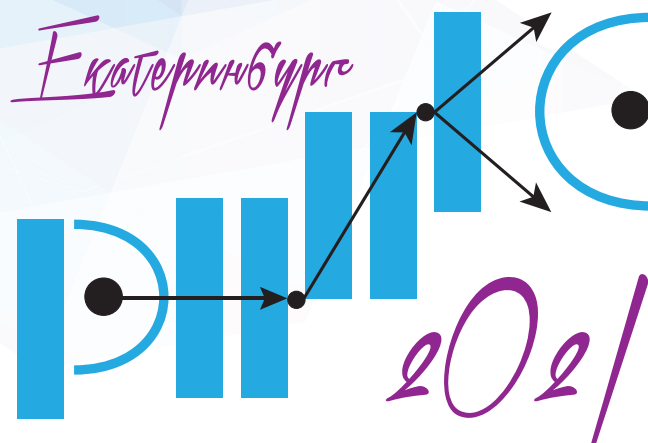
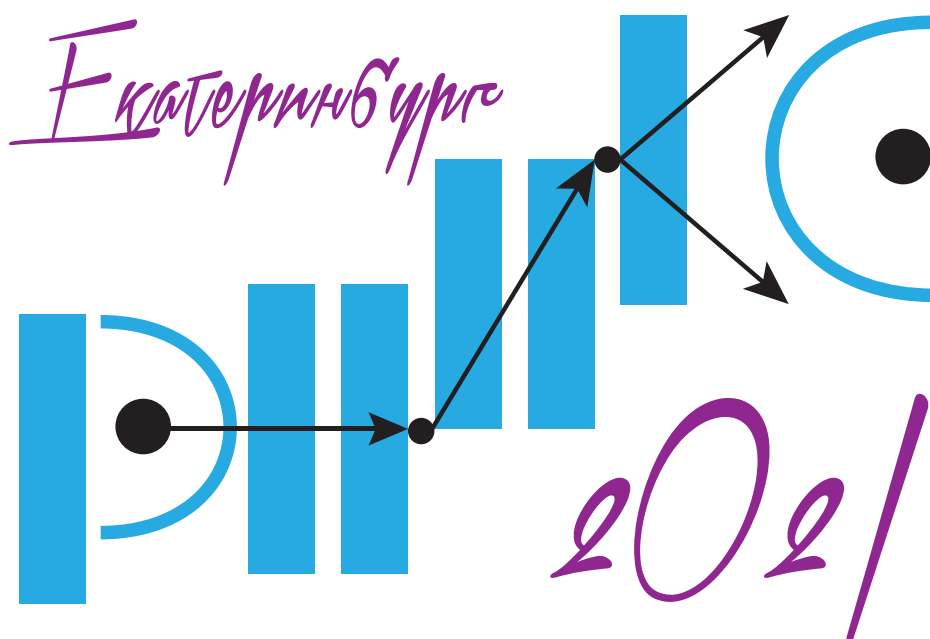




ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

**КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ
В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)**

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.



Памяти Б. Н. Гощицкого

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Организаторы:



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
"КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ"



УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ
имени М.Н. Михеева УрО РАН



УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина



РОССИЙСКОЕ
НЕЙТРОГРАФИЧЕСКОЕ
ОБЩЕСТВО



АО «ИНСТИТУТ РЕАКТОРНЫХ
МАТЕРИАЛОВ»
РОСАТОМ

Спонсоры:



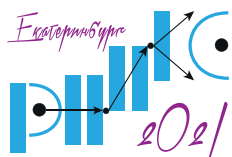
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
ИМ. Б.П. КОНСТАНТИНОВА



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оглавление

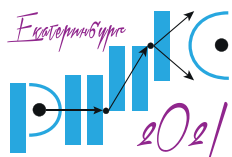
ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ	20
ТЕМАТИКИ	22
Пленарные доклады	23
Комплементарные нейтронные и синхротронные исследования литиевых накопителей энергии, <i>М. В. Авдеев</i>	24
Dubna research reactors: a look into the future, <i>V. L. Aksenov</i>	25
Исследование сильно коррелированных электронных систем с помощью неупругого рассеяния нейтронов, <i>Е. А. Горемычкин</i>	26
Реакторный комплекс ПИК, <i>В. В. Воронин</i>	28
Комплексный подход к исследованиям радиационно-индуцированных процессов атомного перераспределения с применением экспериментальных методов и моделирования эволюции дефектной структуры, <i>А. В. Козлов, И. А. Портных, К. А. Козлов</i>	29
Reflectors of VCNs (Very Cold Neutrons) and experiments with VCNs, <i>V. V. Nesvizhevsky</i>	31
Spin dynamics in quantum magnets studied by inelastic neutron scattering, <i>S. E. Nikitin, T. Xie, C. Rüegg, A. Podlesnyak</i>	32
Синхротронно-нейтронные методы исследования объектов культурного наследия, <i>Е. Ю. Терещенко, Е. С. Коваленко, К. М. Подурец, Р. Д. Светогоров, М. М. Мурашев, Е. Б. Яцишина, М. В. Ковальчук</i>	33
Секция 1. Кристаллические структуры и элементарные возбуждения	34
Эволюция структуры неравновесных Fe-Ga сплавов с высоким содержанием галлия при нагреве-охлаждении, <i>Т. Н. Вершинина, И. А. Бобриков, С. В. Сумников, А. М. Балагуров, А. К. Мохамед, И. С. Головин</i>	35
Структурные особенности и физические свойства гексаферритов М-типа, <i>В. А. Турченко, А. В. Труханов, С. В. Труханов, S. Polosan, I. Fina, H. Chiriac</i>	38
«Фантомные» атомы и тепловые колебания в фуллерене C ₆₀ , <i>Е. К. Нигматуллина, И. В. Голосовский</i>	41



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

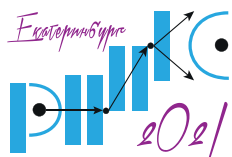
Кристаллическая структура нестехиометрических интерметаллидов на основе TbNi ₅ , А. Н. Пирогов, Е. Г. Герасимов, П. Б. Терентьев, Н. В. Мушников, Д. В. Шептяков, В. Ю. Помякушин, И. А. Бобриков	42
Особенности упорядочения Ni/Co в кристаллической структуре LiNi _{1-x} Co _x PO ₄ (x = 0.3, 0.5, 0.7) на основе данных нейтронной дифракции, Н. В. Урусова, М. А. Сёмкин, А. Хосер, А. Н. Пирогов	44
Корреляция магнитных фаз и кристаллической структуры в редкозе- мельных ортоферритах, О. В. Усманов, И. А. Зобкало, А. К. Овсянников, V. Hutanu	46
Кристаллическая структура и ионная проводимость в NaFeO ₂ , Н. В. Проскурнина, В. И. Воронин, Г. Ш. Шехтман, Н. А. Кабанова	48
Секция 2. Магнитные структуры и взаимодействия	51
Магнитные состояния и фазовые превращения в интеркалированных соединениях Fe _x TiX ₂ , Н. В. Баранов, Н. В. Селезнева, А. Ф. Губкин, Е. М. Шерокалова	52
Исследования спиновой динамики в замещенных мультиферроиках (Nd, Tb)Fe ₃ (BO ₃) ₄ методом неупругого рассеяния нейтронов, И. В. Голосовский, А. А. Mukhin, V. Skumryev, M. Boehm, W. Schmidt, L-P. Regnault, И. А. Гудим	54
Анализ несоизмеримых магнитных структур в редкоземельных интер- металлидах с использованием формализма групп магнитной су- персимметрии, А. Ф. Губкин, Л. Келлер, А. А. Ваулин	55
Новые магнитные состояния в геометрически фрустрированных маг- нитных материалах: нейтронные исследования при изменении термодинамических параметров, Д. П. Козленко	57
Магнетизм двумерных слоистых оксидов с сотообразной сверхструк- турой магнитных ионов, А. И. Курбаков, А. Н. Коршунов	59
Взаимодействие Дзялошинского-Мории в синтетических ферримагне- тиках Pt/Co/Ir/Co/Pt, А. И. Безверхний, Р. Б. Моргунов	61
Синтез и магнитные свойства цилиндрических нанопроводов разного диаметра и длины, А. К. Боймурадова, Н. А. Кулеш, В. О. Васьковский	63
Критическая точка на кривой магнитных фазовых переходов первого рода, Э. З. Валиев	65
Дифракционное исследование магнитного состояния бинарного интер- металлида Ho ₇ Rh ₃ , А. А. Ваулин, Н. В. Баранов, А. Ф. Прекул, Т. Тсутаока, А. Ф. Губкин	67
Магнитные структуры соединений Li(Ni,Co)PO ₄ , М. А. Сёмкин, Н. В. Урусова, А. Хосер, Е. П. Попов, А. И. Бескров- ный, А. Н. Пирогов	69



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

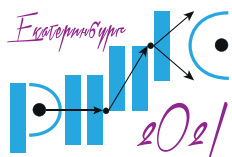
Эволюция магнитной фазовой диаграммы в соединениях $Mn_{1-x}Fe_xGe$ под воздействием внешнего давления, <i>Д. О. Сканченко, Е. В. Алтынбаев, N. Martin, Р. А. Садыков, А. В. Цвященко, С. В. Григорьев</i>	70
Спиновая динамика в ортоферритах $TmFeO_3$, и $TbFeO_3$ <i>С. А. Скоробогатов, С. Е. Никитин, К. А. Шайхутдинов, А. Д. Балаев, К. Ю. Терентьев, G. Ehlers, G. Sala, E. V. Pomjakushina, K. Conder, A. Podlesnyak</i>	71
Исследование низкоразмерных фрустрированных магнетиков методами нейтронной и синхротронной дифракции <i>А. Е. Сулопарова, А. И. Курбаков, В. Ю. Помякушин</i>	73
Ferro-antiferromagnetic transition, driving by Tb–Mn interaction <i>H. M. Alsafi, P. A. Borisova, V. P. Glazkov, E. G. Gerasimov</i>	75
Competing magnetic states in multiferroic $BaYFeO_4$: a high magnetic field study <i>D. P. Kozlenko, N. T. Dang, I. Yu. Zel, L. T. P. Thao, S. E. Kichanov, B. N. Savenko, A. V. Rutkauskas</i>	77
Применение времяпролетной нейтронографии в исследовании динамики фазовых превращений в сплавах на основе FeRh <i>А. А. Ваулин, А. М. Сантос, Р. Р. Гимаев, А. Ф. Губкин, В. И. Зверев</i>	78
Структурные и магнитные фазовые переходы в металлическом тербии при воздействии высоких давлений <i>Н. О. Голосова, Д. П. Козленко, С. Е. Кичанов, Е. В. Лукин, Б. Н. Савенко</i>	80
Кристаллическая и магнитная структура полугейслеровских сплавов $MnNi_{0.9}M_{0.1}Sb$ ($M=Ti, V, Cr, Fe, Co$) <i>А. В. Руткаускас, Г. С. Римский, И. Ю. Зель, Н. М. Белозерова, Д. П. Козленко, С. Е. Кичанов</i>	81
Кристаллическая структура и магнитное состояние двойного перовскита $La_3Co_2MoO_9$ <i>Г. В. Базуев, А. Е. Теплых, А. В. Королев, Е. Г. Герасимов, П. В. Терентьев</i>	82
Секция 3. Магнетизм и поляризованные нейтроны	83
Спин-флоп переход в искусственных ферромагнетиках, <i>Н. О. Антропов, Ю. Н. Хайдуков, Е. А. Кравцов, М. В. Макарова, В. В. Проглядо, В. В. Устинов</i>	84
Критические флуктуации вблизи квантового фазового перехода в нецентросимметричных кубических гелимагнетиках $Mn_{1-x}Fe_xSi$, <i>С. В. Григорьев, Н. М. Чубова, О. И. Утесов</i>	85
Измерение константы жесткости спиновых волн и энергетической щели в спектре магнонов аморфных ферромагнетиков методом малоуглового рассеяния нейтронов, <i>Л. А. Азарова, К. А. Пшеничный, А. Хайнеманн, С. В. Григорьев</i>	86
Наблюдение гелимагнетизма в тонких пленках Dy и Ho и в сверхрешетке Dy/Ho, <i>Д. И. Девятериков, Е. А. Кравцов, В. Д. Жакетов, Ю. В. Никитенко</i>	88



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

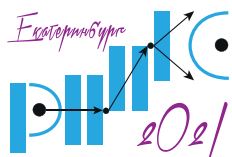
Исследование магнитной структуры сверхрешеток Dy/Co методами РПН и РМКД, <i>М. В. Макарова, Е. А. Кравцов, В. В. Проглядо, В. В. Устинов</i> . . .	91
Effect of interfacial Dzyaloshinski-Moriya interaction on polarized neutrons reflection, <i>D. A. Tatarskiy</i>	93
Magnetic phase diagram of the uniaxial helimagnet $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$: evidence from small angle neutron scattering, <i>A. A. Bykov, N. Chubova, Yu. Kousaka, A. S. Ovchinnikov, J. Kishine, S. V. Grigoriev</i>	95
Секция 4. Сильно коррелированные электронные системы	97
Особенности влияния промежуточно-валентной примеси на наведенное магнитное упорядочение в системе с синглетным основным состоянием PrNi: данные нейтронной спектроскопии, <i>П. С. Савченков, П. А. Алексеев, В. Н. Лазуков</i>	98
Нейтронное рассеяние на допированных нестехиометрических BiMnO_3 , <i>В. В. Сиколентко, Д. В. Карпинский, Д. В. Желудкевич, С. И. Латушко, В. В. Ефимов, Т. Н. Вершинина, А. А. Белик</i>	100
Neutron investigation of $\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$, synthesized on the $\alpha\text{-MnS}$ Mott dielectric, <i>G. Abramova, M. Boehm, J. Schefer, A. Piovano, N. Aliouane</i>	101
Тепловое расширение при фазовых переходах в киральных ферромагнетиках $\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Si}$, <i>А. А. Повзнер, А. Г. Волков, Т. А. Ноговицына, С. А. Бессонов</i>	103
Секция 5. Некристаллические материалы, полимеры, жидкости	104
Исследование структурной организации наночастиц в тонких пленках нанокompозита полистирол-фуллерен, <i>Т. В. Тропин, М. Л. Карпец, Е. Косячкин, И. В. Гапон, Ю. Е. Горшкова, В. Л. Аксенов</i>	105
Эволюция кристаллической и надмолекулярной структуры бактериальной целлюлозы в процессе ферментативной обработки, <i>Л. В. Иванова, А. А. Кульминская, Е. В. Энейская, К. Б. Устинович, Ю. Е. Горшкова, Т. В. Хамова, Н. В. Цвигун, А. Е. Баранчиков, Г. П. Копица</i>	106
Структура композиционных перфторированных мембран с нанодiamondами, <i>Ю. В. Кульвеллис, В. Т. Лебедев, О. Н. Примаченко, А. В. Швидченко, А. И. Куклин</i>	108
Самоорганизация мицелл и частиц в сетчатые структуры, <i>В. С. Молчанов, А. И. Куклин, О. Е. Филиппова</i>	109
Исследование надмолекулярной организации мультимодальных сополимеров на основе полиуретана методами малоуглового рассеяния нейтронов и рентгеновского излучения, <i>А. А. Павлова, А. Н. Бугров, Р. Ю. Смыслов, Ю. Е. Горшкова, В. В. Волков, Н. В. Цвигун, Г. П. Копица</i>	110



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

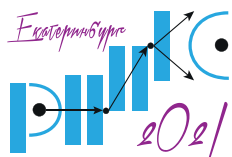
Мезоструктура бинарных аэрогелей $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$, синтезированных с использованием эпоксид-индуцированного гелеобразования, <i>Л. А. Полевой, Н. В. Цвигун, Ю. Е. Горшкова, А. Е. Баранчиков, С. Ю. Котцов, Г. П. Копица, В. К. Иванов</i>	112
Инжектируемые двойные сетки на основе полисахарида и природных нанотрубок, <i>В. С. Молчанов, С. А. Глухова, А. В. Рогачев, О. Е. Филиппова</i>	114
Novel resorcinol-formaldehyde aerogels: synthesis, structure and fractal properties, <i>A. A. Pavlova, S. A. Lermontov, A. N. Malkova, Yu. E. Gorshkova, V. V. Volkov, A. E. Baranchikov, G. P. Kopitsa</i>	116
Секция 6. Поверхности, тонкие пленки и многослойные структуры	117
Resonant neutron reflectometry for hydrogen detection, <i>L. Guasco, Y. N. Khaydukov, S. Pütter, L. Silvi, M. A. Paulin, T. Keller, B. Keimer</i>	118
Hot implantation of GaAs and studies of optical properties of near surface layer, <i>M. Kulik, D. Kołodźńska, M. Turek, P. Wegierek, P. L. Tuan, T. V. Phuc, A. I. Madadzada, A. S. Doroshkevich, T. Yu. Zelenyak, K. Pyszniak</i>	119
Особенности осаждения липидов на кремниевую подложку в зависимости от их состава, <i>В. А. Маслова, М. О. Кузьменко, И. В. Гапон, М. А. Киселев</i>	120
Метод опорного слоя Gd в рефлектометрии поляризованных нейтронов, <i>Е. С. Никова, Ю. А. Саламатов, Е. А. Кравцов, В. В. Устинов</i>	122
Метод фазово-амплитудных функций в рефлектометрии поляризованных нейтронов, <i>Ю. А. Саламатов, Е. А. Кравцов</i>	123
Dielectric function, atomic composition of the near surface layers of GaAs samples implanted Xe ions with different fluence, <i>P. L. Tuan, M. Kulik, T. V. Phuc, A. I. Madadzada, T. Yu. Zelenyak, M. Turek, J. Žuk, L. H. Khiem, A. S. Doroshkevich, B. Jasinska, A. Stanculescu</i>	125
Исследование обменного взаимодействия в многослойных структурах на основе редкоземельных и переходных металлов через диэлектрическую прослойку MgO, <i>Е. М. Якунина, Е. А. Кравцов, В. В. Пролядо, Н. О. Антропов, Ю. Н. Хайдуков</i>	126
Оптимизационный метод прямого поиска для решения задач рефлектометрии, <i>С. Б. Астафьев, Л. Г. Янусова</i>	128
Фазовый состав и магнитные свойства пленочных композитов GdCo– Al_2O_3 , <i>А. Н. Горьковенко, В. Н. Лепаловский, В. О. Васьковский</i>	130
Комплексное исследование структуры тонких кремнеземных пленок, допированных наночастицами Pt/Pd, <i>Н. Н. Губанова, В. А. Матвеев, О. А. Шилова</i>	132



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

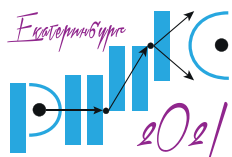
Новая ячейка «жидкость-твёрдое тело» с несущим нанослоем оксида кремния для исследования биологических образцов, <i>М. О. Кузьменко, И. В. Гапон, В. А. Маслова, Ю. Е. Горшкова, М. В. Авдеев</i>	134
Распределение температур блокировок в поликристаллических плёнках Ni-Mn/Fe-Ni, <i>М. Е. Москалев, Е. В. Кудюков, В. Н. Лепаловский, В. О. Васковский</i>	135
Эффективный анализ рефлектометрии поляризованных нейтронов: метод Монте-Карло и элементы машинного обучения, <i>П. С. Савченков, В. И. Боднарчук, К. В. Николаев, А. Н. Пирогов</i>	137
Секция 7. Биологические системы	138
Метод разделённых формфакторов для анализа структуры везикулярных систем по спектрам малоуглового рассеяния нейтронов и рентгеновских лучей, <i>Е. В. Земляная, М. А. Киселев</i>	139
Возможности малоуглового рассеяния нейтронов для исследования везикулярных систем, <i>М. А. Киселев</i>	140
Структурные исследования мембранных белков методом малоуглового рассеяния, <i>Т. Н. Муругова</i>	141
Расчёт параметров фосфолипидных везикулярных систем по данным малоуглового рассеяния: онлайн-интерфейс, параллельная программная реализация, <i>М. В. Башашин, Е. В. Земляная, М. А. Киселев, К. В. Лукьянов</i>	142
Комплементарные методы исследования биогибридных наноконструктов, <i>Ю. Е. Горшкова</i>	143
Исследование липид-ионных взаимодействий в цвиттер-ионных фосфолипидах различной латеральной площади, <i>С. А. Куракин, Е. В. Ермакова, А. И. Иванов, Д. Угрикова, Н. Кучерка</i>	144
Надмолекулярные белковые структуры в покровных тканях животных и человека по данным малоуглового рассеяния нейтронов, <i>Л. А. Иванова, Н. А. Верлов, Ю. Е. Горшкова, К. А. Дариенко, А. А. Пантелеев, Д. В. Лебедев</i>	147
Крупномасштабная организация хроматина в ядре биологической клетки: сходства и отличительные особенности по-разному «живущих» ядер, <i>Е. Г. Яшина, Р. А. Пантина, Е. Я. Варфоломеева, В. Ю. Байрамуков, A. Radulescu, V. Pipich, С. В. Григорьев</i>	148
Данные малоуглового рассеяния нейтронов о надмолекулярной и белковой структуре покровных тканей человека и животных, <i>Л. А. Иванова, Н. А. Верлов, Ю. Е. Горшкова, К. А. Дариенко, А. А. Пантелеев, Д. В. Лебедев</i>	150



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

● → ● → ● → **Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.**

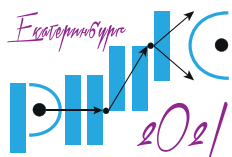
Исследование структуры и олигомеризации сенсора двухкомпонентной системы с помощью малоуглового нейтронного рассеяния, <i>Ю. Л. Рижиков, Ф. С. Орехов, М. И. Рулёв, А. В. Власов, Д. В. Забельский, А. В. Рогачёв, В. В. Ской, Т. Н. Муругова, А. Д. Власова, В. И. Горделий, А. И. Куклин</i>	151
Комплексное влияние нитратов в составе медицинского ляписа на фазовое состояние модельной липидной мембраны, <i>В. В. Ской, А. И. Куклин, А. И. Иванов, Д. В. Соловьёв</i>	153
Секция 8. Функциональные материалы, материаловедение и прикладные исследования (энергетика, окружающая среда, геофизика, культурное наследие)	155
Использование аморфных сплавов и аддитивных технологий для решения задач магнитного экранирования, <i>С. А. Маннинен, П. А. Кузнецов, О. В. Васильева</i>	156
Структурная обусловленность физических свойств слоистых халькогенидов переходных металлов: дифракционные исследования, <i>Н. В. Селезнева, Н. В. Баранов, А. Ф. Губкин</i>	158
Исследование античных и средневековых монет неразрушающими методами нейтронной томографии и дифракции, <i>Б. А. Бакиров, С. Е. Кичанов, И. А. Сапрыкина, Б. А. Абдурахимов, Р. И. Храмченкова</i>	160
Преобладание вкладов межфазных дефектов в коэрцитивную силу и поле обменного смещения в гетероструктурах NiFe/Cu/IrMn, <i>М. В. Бахметьев, Р. Б. Моргунов</i>	162
Нейтронная фурье-стресс-дифрактометрия по времени пролета на реакторе ИБР-2 для решения материаловедческих задач, <i>Г. Д. Бокучава, И. В. Папушкин, А. А. Круглов</i>	164
Исследование фазовых превращений при высоких давлениях и температурах в фуллеренах с малыми добавками металлов, <i>П. А. Борисова, М. С. Блантер, Е. С. Коваленко, В. В. Бражкин, В. П. Филоненко, С. Г. Ляпин, Е. В. Кукуева</i>	166
Effect of carbon additives on the structure of electrodes for high energy density Li-ion batteries by small-angle neutron scattering, <i>M. Yerdauletov, P. Napolsky, M. Avdeev, O. Ivankov, S. Bocharova, S. Ryzhenkova, K. Mironovich, D. Burlyayev, and V. Krivchenko</i>	167
Neutron tomography of two lamprophyre dike samples from Uzbekistan: application of 3D image analysis for the characterization of rock fabric, <i>I. Yu. Zel, B. A. Abdurakhimov, S. E. Kichanov, D. P. Kozlenko</i>	168
Структуры наноалмазов с фотоактивными модификаторами, <i>В. Т. Лебедев, Ю. В. Кульвелис, Э. В. Фомин, О. И. Большакова, Н. П. Евламбиева, Е. Б. Юдина, А. Я. Вуль</i>	169
Magnetic and structural properties of tungsten oxides at high pressures, <i>O. N. Lis, S. E. Kichanov, D. P. Kozlenko, N. M. Belozeroва, E. V. Lukin, B. N. Savenko, S. Balakumar</i>	170
Исследование продуктов взаимодействия иридия с W ₂ V и TaB ₂ с применением метода времяпролетной нейтронографии, <i>В. В. Лозанов, Н. И. Бакланова, А. И. Бескровный</i>	171



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

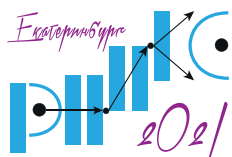
Исследование кристаллической и магнитной структуры сложных оксидов железа при высоком давлении, <i>Н. М. Белозерова, С. Е. Кичанов, Д. П. Козленко, Е. В. Лукин, Б. Н. Са- венко</i>	173
Исследование облученного дисперсного U–9%Mo/Al топлива методом малоуглового рассеяния нейтронов, <i>О. А. Голосов, С. Г. Богданов, А. Н. Пирогов, Н. В. Глушкова, М. С. Лю- тикова, А. Е. Теплых</i>	174
Структура гидратированного портландцемента, <i>А. М. Гурьянов, С. А. Гурьянов</i>	175
Результаты исследования керамических образцов — объектов куль- турного наследия Казахстана — с помощью методов нейтрон- ного рассеяния, <i>А. Ж. Жомартова, С. Е. Кичанов, Б. А. Бакиров, Д. П. Козленко, Р. С. Жуматаев</i>	177
Структура и фазовый состав горных пород из мест захоронения радио- активных отходов: методы нейтронного рассеяния, <i>М. Р. Кенесарин, И. Ю. Зель, С. Е. Кичанов, М. Балашою, Д. П. Коз- ленко, К. М. Назаров, М. Nicu, L. Ionascu, A. C. Dragolici, F. Dragolici</i>	178
Исследование структуры и магнитных свойств нанопорошков оксидов железа γ -Fe ₂ O ₃ и Fe ₃ O ₄ , синтезированных золь-гель методом, <i>Т. В. Хамова, Г. П. Копица, Н. В. Цвигун, К. В. Фролов, О. В. Гера- щенко, А. Е. Баранчиков, О. А. Шилова</i>	179
Влияние поля рассеяния наночастиц на магнитосопротивление синте- тического ферритмагнетика CoFeB/Ta/CoFeB, <i>Е. И. Куницына, Р. С. Аллаяров, О. В. Коплак, Р. Б. Моргунов</i>	180
Термообработка на воздухе и магнитные характеристики аморфного магнитомягкого сплава Co–Fe–Ni–Cr–Mn–Si–B, <i>Н. А. Скулкина, Е. С. Некрасов, П. А. Кузнецов, А. К. Мазеева</i>	181
Исследование киафов с раскопок грунтового могильника Волна-1 ме- тодом нейтронной томографии, <i>В. С. Смирнова, С. Е. Кичанов, Д. П. Козленко, И. А. Сапрыкина, Р. А. Мимоход</i>	183
Влияние разных методов сушки на надмолекулярную структуру натив- ной бактериальной целлюлозы, <i>Л. А. Иванова, Н. В. Цвигун, А. А. Кульминская, Х. Э. Ёров, К. Б. Усти- нович, Ю. Е. Горшкова, Т. В. Хамова, В. В. Волков, А. Е. Баранчи- ков, Р. Ю. Смыслов, А. К. Хрипунов, Е. П. Остапенко, Г. П. Копица</i>	184
Секция 9. Радиационные дефекты в конструкционных материалах	186
Комплементарный анализ радиационных эффектов в материалах, <i>С. В. Рогожкин</i>	187
Отложения на каналах СУЗ РБМК после длительной эксплуатации, <i>Д. Н. Вельмогин, С. А. Аверин, В. А. Цыгвинцев, В. И. Пастухов, М. В. Чернецов, А. Р. Исинбаев</i>	188



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

● → ● → ● → **Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.**

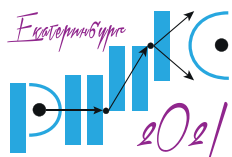
Использование нейтронной дифракции для определения взаимосвязи структурных и механических свойств в ТВЭЛах из сталей ЧС-68 и ЭК-164, <i>В. И. Воронин</i>	189
Влияние радиационной пористости, развивающейся в оболочках твэлов различной технологии изготовления из стали ЧС68, на ресурс эксплуатации ТВС в реакторе БН-600, <i>А. Р. Исинбаев, А. В. Козлов, И. А. Портных</i>	190
Мессбауэровское исследование стали ЭП823 после нейтронного облучения в реакторе БН600, <i>К. А. Козлов, В. А. Шабашов, В. А. Семенкин, А. Е. Заматовский</i> .	191
Особенности сдвигового $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в сталях X18N9 и X18N10T после нейтронного облучения, <i>В. И. Пастухов, В. Л. Панченко, И. А. Портных, А. Р. Исинбаев, М. Л. Лобанов</i>	193
Оценка условий облучения слитков кремния в реакторе ВВР-К, <i>М. Т. Айткулов, Ш. Х. Гизатулин, Д. С. Дюсамбаев, А. Л. Мартюшов, Д. А. Накипов, Н. К. Романова, Д. С. Сайранбаев, А. А. Шаймерденов</i>	195
Нейтронные исследования внутренних напряжений в тонкостенных пластинах из сплава Ti-6Al-4V, изготовленных методом прямого лазерного выращивания, <i>С. А. Рылов, И. Д. Карпов, В. Т. Эм, С. Ю. Иванов, Е. В. Земляков, К. Д. Бабкин</i>	197
Влияние нейтронного облучения на структуру и свойства нержавеющей сталей ферритно-мартенситного класса, <i>А. Е. Устинов, А. В. Козлов, В. Л. Панченко, В. И. Пастухов, В. Ю. Ярков</i>	198
Мессбауэровский анализ ближнего атомного упорядочения в Fe-Cr и Fe-Ni сплавах при интенсивном радиационном и деформационном воздействиях, <i>В. А. Шабашов, К. А. Козлов</i>	200
Использование методов РЭМ для определения структурного состояния трубных изделий из сплава Э125 до и после облучения, <i>В. Ю. Ярков, С. А. Аверин, В. И. Пастухов, А. Е. Устинов, М. Л. Лобанов</i>	202
Neutron diffraction study of high-tech alloy for effects caused by heavy ion irradiation, <i>E. P. Popov, M. N. Mirzayev, V. A. Skuratov, E. Demir, A. A. Donkov, K. Siemek, A. Olejniczak, T. Vershinina, I. G. Genov, A. I. Beskrovnyi, D. Neov, E. Korneeva, Ö. Vural, Z. A. Sharipov, F. Mamedov, K. Krezhov, A. H. Valizade, A. S. Doroshkevich</i>	204
Nuclear methods to study irradiated multilayer structures, <i>A. I. Madadzada, M. Kulik, P. L. Tuan, T. V. Phuc, R. Sh. Isayev, T. Yu. Zelenyak, A. S. Doroshkevich</i>	206



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

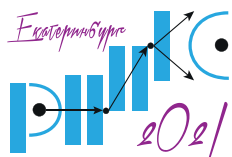
Investigation and analysis of tungsten alloys using neutron diffraction, <i>I. G. Genov, E. Popov, M. N. Mirzayev, E. Demir, A. I. Beskrovnyi, A. Doroshkevich, A. A. Donkov, A. H. Valizade, R. Isayev</i>	207
Исследование механизма структурных превращений в высокопрочной стали, <i>М. Л. Федосеев, С. Н. Петров, М. С. Михайлов, А. Х. Исламов</i>	208
Секция 10. Фундаментальные исследования с нейтронами	210
Эффект ускорения в квантовой механике и нейтронная оптика, <i>А. И. Франк, М. А. Захаров, Г. В. Кулин</i>	211
Отражение нейтронов от резонансного потенциала, осциллирующего в пространстве, <i>М. А. Захаров, А. И. Франк, Г. В. Кулин</i>	213
Нестационарное преобразование энергии нейтронов при дифракции на движущейся решетке и ПАВ, <i>Г. В. Кулин, А. И. Франк</i>	215
Источник ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия для РК ПИК, <i>А. П. Серебров, В. А. Лямкин, А. К. Фомин, М. С. Онегин</i>	218
Моделирование экспериментальной программы с ультрахолодными ней- тронами на реакторе ПИК, <i>А. К. Фомин, А. П. Серебров</i>	219
Поиск новых межнуклонных взаимодействий в рассеянии нейтронов на ядре, <i>В. В. Воронин, Д. Д. Шапиро</i>	220
Эффекты нейтронной оптики вблизи брэгговского отражения в осцил- лирующем кристалле, <i>В. В. Федоров, В. В. Воронин, С. Ю. Семе- нихин, Ю. П. Брагинец, М. В. Ласица</i>	222
Секция 11. Реактор ПИК: научная программа приборной базы	224
Физика фундаментальных взаимодействий с нейтронами и нейтрино на реакторе ПИК, <i>А. П. Серебров</i>	225
Установки малоуглового рассеяния нейтронов на реакторе ПИК, <i>Л. А. Азарова, Е. Г. Яшина, Е. В. Алтынбаев, Д. О. Сканченко, Ю. О. Чет- вериков, Л. А. Аксельрод, Г. П. Копица, С. В. Григорьев</i>	227
Комплекс спектрометров на реакторе ПИК, <i>И. А. Зобкало</i>	229
Дифрактометрический комплекс реакторного комплекса ПИК, <i>А. И. Курбаков</i>	231
Программа ядерно-спектроскопических исследований в реакциях ней- тронного захвата на реакторе ПИК, <i>И. А. Митропольский</i>	233
Установка нейтронно-активационного анализа INAA на реакторе ПИК и программа прикладных исследований, <i>И. А. Митропольский</i>	235
Проект установки ИРИНА на реакторе ПИК, <i>В. Н. Пантелеев, А. Е. Барзах, П. Л. Молканов, М. Д. Селиверстов, Д. В. Федоров</i>	237



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

● → ● → ● → ● → **Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.**

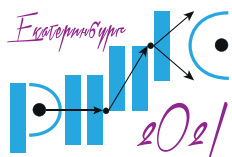
Планируемые нейтронные рефлектометры на реакторе ПИК, <i>Н. К. Плешанов, М. В. Дьячков, В. А. Матвеев, В. Г. Сыромятников, В. В. Тарнавич, В. А. Ульянов</i>	238
Первые исследовательские станции реакторного комплекса ПИК, <i>В. В. Тарнавич</i>	239
Статус проекта «Порошковый нейтронный дифрактометр D1 для реак- торного комплекса ПИК», <i>В. А. Ульянов, А. И. Курбаков, С. О. Сумбаев, А. А. Булкин, С. И. Ка- линин, Д. С. Головастов, Н. А. Коваленко, Ю. М. Киреенко, М. В. Дьяч- ков, М. Р. Колхидашвили, В. А. Соловей</i>	240
Порошковый дифрактометр высокой светосилы D3 для реактора ПИК, <i>К. А. Дрождов, И. В. Голосовский</i>	242
Тестовый нейтронный рефлектометр (ТНР) в зале реактора ПИК, <i>М. В. Дьячков*, В. А. Ульянов, В. Г. Сыромятников, С. И. Калинин, М. Р. Колхидашвили, В. А. Соловей</i>	244
Нарушение временной зеркальной симметрии при магнитных фазо- вых переходах, <i>А. В. Ковалев</i>	246
Решение проблемы постоянного магнита, <i>А. В. Ковалев</i>	248
Рефлектометр поляризованных нейтронов Negro-2 на РК ПИК, <i>В. А. Матвеев, Н. К. Плешанов, Д. С. Головастов, А. В. Сизов</i>	250
Концептуальный проект станции нейтронной томографии на реакторе ПИК, <i>М. М. Мурашев, В. П. Глазков, В. Т. Эм</i>	252
Эксперимент по измерению отношений аксиальной и векторной кон- стант слабого взаимодействия, <i>А. П. Серебров, О. М. Жеребцов, Г. Н. Ключников, А. О. Коптюхов, А. Р. Мороз, А. Н. Мурашкин, А. К. Фомин</i>	253
Секция 12. Источники нейтронов	254
Комплекс нейтронных спектрометров реактора ИБР–2: современное состояние и перспективы, <i>Д. П. Козленко</i>	255
Нейтронный материаловедческий комплекс на реакторе ИВВ–2М. Ис- тория, достижения, перспективы, <i>В. И. Бобровский, А. Ф. Губкин, Ю. Н. Скрыбин</i>	256
Возможности создания источника УХН на импульсном реакторе пери- одического действия, <i>Г. В. Кулин, А. И. Франк, Н. В. Реброва, М. А. Захаров</i>	257
Влияние фона запаздывающих нейтронов на качество данных рефлек- тометрических экспериментов на импульсном реакторе ИБР-2, <i>В. В. Садилов, В. И. Боднарчук, А. И. Иоффе</i>	259
Нейтронные исследования на реакторе ИР-8, <i>В. Т. Эм</i>	260



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

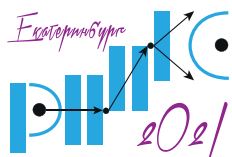
Измерения времяпролетных спектров пропускания токовым методом на реакторе ИБР-2, <i>С. В. Алпатов, Ю. Н. Копач, В. Л. Кузнецов, Е. В. Кузнецова, П. В. Седышев</i>	261
Study of the delayed neutron background at the IBR-2 reactor, <i>S. V. Alpatov, Yu. N. Kopach, V. L. Kuznetsov, E. V. Kuznetsova, P. V. Sedyshev</i>	262
Секция 13. Приборы и методики нейтронного эксперимента	263
Нейтронная рефлектометрия с регистрацией вторичного излучения, <i>В. Д. Жакетов, К. Храмко, А. В. Петренко, Ю. Н. Хайдуков, Ю. Н. Копач, Ю. М. Гledenov, Н. А. Гундорин, Ю. В. Никитенко, В. Л. Аксёнов</i>	264
Неразрушающие исследования объектов культурного наследия Узбекистана на новой установке нейтронной радиографии и томографии на реакторе ВВР-СМ, <i>Б. А. Абдурахимов, С. Е. Кичанов, М. Ю. Ташметов, Б. С. Юлдашев, Д. П. Козленко, Н. Б. Исмаев, Е. В. Лукин</i>	265
Нейтронные исследования внутренних напряжений на реакторе ИР-8, <i>И. Д. Карпов, В. Т. Эм, С. А. Рылов</i>	267
Нейтронная радиография и томография на реакторе ИБР-2: текущий статус и последние результаты, <i>С. Е. Кичанов, Д. П. Козленко, Е. В. Лукин, Б. Н. Савенко, К. М. Назаров, Б. А. Абдурахимов, М. Р. Кенессарин</i>	269
Расходимость нейтронного микропучка из плоского волновода, <i>С. В. Кожевников, В. Д. Жакетов, А. В. Петренко, Т. Келлер, Ф. Раду</i>	270
Проведение нейтронного эксперимента в исследовательском ядерном реакторе ИВВ-2М. Методы и практическая реализация, <i>А. А. Зырянова, Ю. В. Метелева, А. В. Козлов</i>	272
Развитие метода нейтронной интроскопии и его применение на реакторе ИР-8, <i>М. М. Мурашев, В. П. Глазков, В. Т. Эм</i>	274
Inelastic neutron scattering under multi-extreme conditions, <i>P. G. Naumov, M. Bartkowiak, J. Vonka, S. Nikitin, Ch. Rüegg</i>	275
О методах фазометрии в рефлектометрии поляризованных нейтронов для исследований магнетизма слоистых структур, <i>Н. К. Плешанов</i>	276
Камеры высокого фиксированного квазигидростатического давления для нейтронографии, <i>Р. А. Садыков</i>	278
Нейтронный мультимонохроматор-биполяризатор и его использование в эксперименте, <i>В. Г. Сыромятников, В. А. Никифоров</i>	279
New inelastic neutron scattering spectrometer at the IBR-2 reactor, <i>D. M. Chudoba, A. Belushkin, E. Goremychkin, M. Klepaska</i>	280
Рефрижератор растворения ^3He в ^4He с вертикальной загрузкой, предназначенный для нейтронного эксперимента, <i>А. Н. Черников</i>	281



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

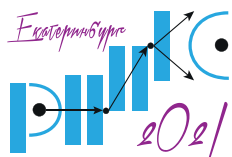
Текущий статус строительства установки SESANS на реакторе ПИК, <i>Л. А. Аксельрод, В. Краан, А. А. Сумбатьян, В. В. Тарнавич, Ю. О. Чет- вериков</i>	283
Ультрамалоугловое рассеяние нейтронов на реакторе ИР-8: возмож- ности и перспективы, <i>М. Н. Шушунов, Е. В. Яковенко</i>	284
Geometry calculation for the new inelastic neutron scattering spectrometer using Monte-Carlo simulation, <i>M. Klepacka, E. A. Goremychkin, A. V. Belushkin, D. M. Chudoba</i>	286
Multiple Bragg reflections are not negligible and spurious, <i>P. Mikula, V. Ryukhtin, J. Šaroun, P. Strunz, V. T. Em</i>	287
On the resolution in strain/stress measurements on bulk polycrystalline samples by 3-axis neutron diffractometer, <i>P. Mikula, J. Šaroun, V. Ryukhtin, P. Strunz, A. Michalcová, V. T. Em</i>	289
Рефлектометр ГРЭИНС: статус и перспективы, <i>И. В. Гапон, М. О. Кузьменко, Т. В. Тропин, М. В. Авдеев</i>	291
Полихроматический нейтронный томограф ПОНИ на реакторе ИР-8, <i>В. П. Глазков, М. М. Мурашев, А. И. Гуреев, Ю. Н. Панин, Д. Н. Тру- нов, В. Т. Эм</i>	292
Концептуальный проект монокристалльного дифрактометра на источ- нике холодных нейтронов реактора ИР-8, <i>Н. Н. Исакова*, А. И. Калюканов</i>	293
Разработка концептуального дизайн-проекта нейтронного стресс-диф- рактометра на реакторе ПИК, <i>И. Д. Карпов, В. Т. Эм, С. А. Рылов</i>	294
Исследование структуры нанообъектов методом малоуглового рассе- яния нейтронов на импульсном источнике ИБР-2, <i>А. И. Куклин, О. И. Иваньков, А. В. Рогачев, Д. В. Соловьев, А. Х. Ис- ламов, В. В. Ской, Ю. С. Ковалев, А. В. Власов, Ю. Л. Рижиков, А. Г. Соловьев, Н. Кучерка, В. И. Горделий</i>	295
High-pressure neutron diffractometer DN-6: current state, <i>E. V. Lukin, D. P. Kozlenko, S. E. Kichanov, A. V. Rutkauskas, B. N. Savenko</i>	296
Порошковый дифрактометр MONOPOLY на компактном источнике ней- тронов DARIA, <i>А. Е. Павлова, К. А. Павлов, П. И. Коник, С. В. Григорьев, В. В. Во- ронин</i>	297
Секция 14. Методы исследования вещества, комплементарные нейтрон- ному рассеянию	298
Ядерный магнитный резонанс, квазиупругое рассеяние нейтронов и нейтронное спиновое эхо как взаимно дополняющие методы ис- следования вращательного туннелирования в борогидридах, <i>А. В. Скрипов, А. В. Солонинин, О. А. Бабанова, Р. В. Скорюнов, F. Morelle, Y. Filinchuk, M. Dimitrievska, A. Faraone, T. J. Udovic</i>	299
Метод параллельной дифференциальной эволюции для анализа струк- туры везикулярных систем на основе ФТНС, <i>Е.И. Жабицкая, Е.В. Земляная, М.А. Киселев</i>	301



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

● → ● → ● → **Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.**

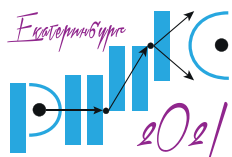
Исследование сохранности металла в объектах культурного наследия с помощью нейтронно-синхротронной визуализации и комплементарных методов, <i>Е. С. Коваленко, К. М. Подурец, М. М. Мурашев, В. П. Глазков, П. А. Борисова, Е. Ю. Терещенко, Е. Б. Яцишина</i>	302
β_0/β phase transformation in TiAl alloys studied by synchrotron and neutron in situ diffraction methods, <i>V. Kononikhina, A. Stark, W. Gan, X. Li, A. Schreyer, F. Ryszak</i>	303
In situ синхротронное исследование кинетики анионного обмена в Zn-Al слоистых двойных гидроксидах, выращенных на металлических поверхностях, <i>М. Х. Юзвюк, И. А. Зобкало, А. С. Bouali, Г. Довженко, М. Сердечнова, F. D. C. Wieland, K. A. Yasakau, C. Blawert, М. Л. Желудкевич</i>	304
Фазовые переходы и температурные зависимости коэффициентов теплового расширения NaNO_3 , внедренного в нанопористое стекло, <i>А. А. Набережнов, О. А. Алексеева, А. В. Кудрявцева, Д. Ю. Чернышев, Т. Ю. Вергентьев</i>	306
Мессбауэровское исследование локализации ионов железа в структуре синтетических хризотил-асбестовых гидросиликатных нанотрубок, <i>В. С. Козлов, Т. П. Масленникова, Э. Н. Корыткова, С. В. Кононова</i>	308
Synthesis and investigation on structural and sorption properties of novel magnetite/silica/MWCNT composite materials, <i>I. Malinowska, M. Studziński, T. Nagorna</i>	309
Секция 15. Компактные источники нейтронов	310
Проект компактного источника нейтронов DARIA для исследований методами нейтронного рассеяния, <i>К. А. Павлов, Н. А. Коваленко, А. Е. Павлова, В. В. Субботина, П. И. Кони, В. А. Скалыга, И. В. Изотов, С. С. Выбин, А. Ф. Боханов, Г. Н. Кропачев, А. Л. Ситников, Т. В. Кулевой, В. В. Воронин, С. В. Григорьев</i>	311
Ядерно-физическая аппаратура производства ФГУП «ВНИИА», <i>В. И. Зверев</i>	313
Криогенный замедлитель компактного источника нейтронов DARIA, <i>М. В. Булавин, К. А. Мухин</i>	314
Применение метода нейтронно-радиационного анализа для определения содержания редкоземельных элементов в образцах горных пород, <i>Р. Р. Гимаев</i>	315
Протонный инжектор для КИН DARIA, <i>И. В. Изотов, В. А. Скалыга, С. С. Выбин, Т. В. Кулевой, Г. Н. Кропачов, А. Л. Ситников, С. В. Григорьев</i>	316
Оптимизация мишенной сборки в составе компактного источника нейтронов DARIA, <i>Н. А. Коваленко, К. А. Павлов, В. В. Субботина, В. В. Воронин, С. В. Григорьев</i>	317



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

● → ● → ● → **Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.**

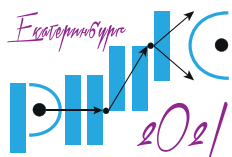
Реализация метода малоуглового рассеяния нейтронов на компактном нейтронном источнике, <i>К. А. Павлов, Н. А. Коваленко, В. В. Субботина, В. В. Воронин, С. В. Григорьев</i>	318
Линейный ускоритель для компактного источника нейтронов DARIA, <i>А. Л. Ситников, Г. Н. Кропачев, Т. В. Кулевой, С. В. Григорьев</i>	319
D-D нейтронный генератор на основе газодинамического ЭЦР ионного источника для приложений, <i>В. А. Скалыга, И. В. Изотов, С. С. Выбин, С. В. Голубев, С. В. Разин, Р. А. Шапошников</i>	320
Эпитепловой дифрактометр для компактного импульсного нейтронного источника: научное обоснование, концепция и расчеты, <i>Д. А. Серебренников, Е. С. Клементьев, К. А. Павлов</i>	321
Секция 16. Детекторы нейтронов	322
Детекторы нейтронов для исследовательского реакторного комплекса ПИК, <i>Е. В. Алтынбаев, В. А. Соловей, А. Г. Крившич, Р. А. Садыков</i>	323
Перспективные разработки в области нейтронных детекторов для установок на реакторе ИБР-2, <i>В. И. Боднарчук, В. М. Милков, А. В. Чураков, А. Г. Колесников</i>	324
Модуль сбора и предварительной обработки данных с сетевым интерфейсом для двумерных детекторов на основе линии задержки, <i>М. А. Голубев, Т. В. Савельева, В. А. Соловей, О. Гапон, А. О. Полюшкин</i>	325
Разработка координатных детекторов на базе тонкостенных дрейфовых трубок (STRAW TRACKER), <i>Т. В. Еник</i>	326
Низкотемпературное нанесение карбида бора на тонкие подложки большой площади, <i>А. Г. Колесников, Ю. А. Крюков, С. А. Куликов, А. В. Чураков, П. Ю. Апель, О. Л. Орелович, Н. В. Горбунов, А. Х. Абдуев, А. Ш. Асваров, А. К. Ахмедов, А. В. Шадрин</i>	327
Сцинтилляционные экраны на основе оксидов со структурой граната для регистрации нейтронов, <i>И. Комендо, В. Щукин, В. Мечинский, Е. Гордиенко, М. Мурашов, П. Глазков, В. Смылова, А. Федоров, Г. Досовицкий, М. Коржик</i>	328
Времяпролетная регистрация релятивистских нейтронов детектором на основе GAGG:Ce, <i>В. Мечинский, А. Бондарев, К. -Т. Бринкманн, А. Федоров, Г. Досовицкий, В. Дорменев, А. Т. Фальк, Д. Козлов, М. Коржик, П. Карпюк, Д. Кузнецова, М. Мориц, Р. -В. Новотный, П. Орсич, М. Сакс, Е. Талочка, Х. -Г. Зауник</i>	330
Многослойный высокоэффективный сцинтилляционный счетчик нейтронов на основе SiPM и органического световода, <i>Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, Р. А. Садыков, С. Н. Аксенов, Е. В. Алтынбаев</i>	331



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

● → ● → ● → Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

Использование позиционно-чувствительных счетчиков нейтронов с резистивной нитью в режиме времени-пролета, А. В. Чураков, А. А. Богдзель, Е. И. Литвиненко, О. Даулбаев . . .	332
Сцинтилляционный детектор нейтронов на основе SiPM и ZnS:Li ⁶ , Т. И. Глушкова, Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, Р. А. Садыков	333
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	335



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ КОНФЕРЕНЦИИ

М. В. КОВАЛЬЧУК (НИЦ КИ)

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Н. В. МУШНИКОВ (ИФМ УрО РАН)

председатель

А. В. GERMANENKO (УрФУ)

заместитель председателя

А. Ф. ГУБКИН (ИФМ УрО РАН)

заместитель председателя

П. А. ФОРШ (Минобрнауки РФ)

заместитель председателя

Е. Г. GERASIMOV (ИФМ УрО РАН)

*председатель
публикационного комитета*

Е. В. МОСТОВЩИКОВА (ИФМ УрО РАН)

ученый секретарь

С. Ю. СТРЕМОУХОВ (НИЦ КИ)

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

А. Е. БЛАГОВ (НИЦ КИ)

сопредседатель

В. В. УСТИНОВ (ИФМ УрО РАН)

сопредседатель

Е. А. КРАВЦОВ (ИФМ УрО РАН)

заместитель председателя

М. В. АВДЕЕВ (ОИЯИ)

П. А. АЛЕКСЕЕВ (НИЦ КИ)

Д. В. АНДРЕЕВ (НИЦ КИ)

А. М. БАЛАГУРОВ (ОИЯИ)

Н. В. БАРАНОВ (ИФМ УрО РАН)

А. В. БЕЛУШКИН (НИЦ КИ, ОИЯИ)

В. И. БОДНАРЧУК (ОИЯИ)

В. В. ВОРОНИН (НИЦ КИ – ПИЯФ)

И. В. ГОЛОСОВСКИЙ (НИЦ КИ – ПИЯФ)

С. В. ГРИГОРЬЕВ (НИЦ КИ – ПИЯФ)

В. В. ДРЕМОВ (РФЯЦ–ВНИИТФ)

Ю. А. ДЬЯКОВА (НИЦ КИ)

В. Г. ЗУБКОВ (ИХТТ УрО РАН)

А. С. ИВАНОВ (ILL, Гренобль, Франция)

Е. Н. КАБЛОВ (НИЦ КИ – ВИАМ)

М. А. КИСЕЛЕВ (ОИЯИ)

Д. П. КОЗЛЕНКО (ОИЯИ)

А. В. КОЗЛОВ (АО ИРМ)
А. Л. КОНЕВЕГА (НИЦ КИ – ПИЯФ)
Т. В. КУЛЕВОЙ (НИЦ КИ – ИТЭФ)
А. И. КУРБАКОВ (НИЦ КИ – ПИЯФ)
Н. В. МАРЧЕНКОВ (НИЦ КИ)
А. В. МИРМЕЛЬШТЕЙН (РФЯЦ–ВНИИТФ)
И. А. МИТРОПОЛЬСКИЙ (НИЦ КИ – ПИЯФ)
Э. Х. МУХАМЕДЖАНОВ (НИЦ КИ)
В. В. НЕСВИЖЕВСКИЙ (ILL, Гренобль, Франция)
Н. Н. НОВИКОВА (НИЦ КИ)
А. С. ОРЫЩЕНКО (НИЦ КИ – ЦНИИ КМ «Прометей»)
А. Н. ПИРОГОВ (ИФМ УрО РАН)
В. Я. ПАНЧЕНКО (РФФИ, ФНИЦ «Кристаллография и фотоника РАН»)
Н. К. ПЛЕШАНОВ (НИЦ КИ – ПИЯФ)
К. М. ПОДУРЕЦ (НИЦ КИ)
Р. А. САДЫКОВ (ОИЯИ)
А. В. СКРИПОВ (ИФМ УрО РАН)
Ю. Н. СКРЯБИН (ИФМ УрО РАН)
Б. П. ТОПЕРВЕРГ (НИЦ КИ – ПИЯФ)
А. И. ФРАНК (ОИЯИ)
Н. М. ЧУБОВА (НИЦ КИ)
В. Т. ЭМ (НИЦ КИ)
С. Н. ЯКУНИН (НИЦ КИ)

КОНСУЛЬТАТИВНЫЙ КОМИТЕТ

В. Л. АКСЕНОВ (ОИЯИ)
А. В. БЕЛУШКИН (НИЦ КИ, ОИЯИ)
А. И. ИОФФЕ (JCNS, Юлих, Германия)

ТЕМАТИКИ**Пленарные доклады****Секция 1. Кристаллические структуры и элементарные возбуждения****Секция 2. Магнитные структуры и взаимодействия****Секция 3. Магнетизм и поляризованные нейтроны****Секция 4. Сильно коррелированные электронные системы****Секция 5. Некристаллические материалы, полимеры и жидкости****Секция 6. Поверхности, тонкие пленки и многослойные структуры****Секция 7. Биологические системы****Секция 8. Функциональные материалы, материаловедение и прикладные исследования (энергетика, окружающая среда, геофизика, культурное наследие)****Секция 9. Радиационные дефекты в конструкционных материалах****Секция 10. Фундаментальные исследования с нейтронами****Секция 11. Реактор ПИК: научная программа приборной базы****Секция 12. Источники нейтронов****Секция 13. Приборы и методики нейтронного эксперимента****Секция 14. Методы исследования вещества, комплементарные нейтронному рассеянию****Секция 15. Компактные источники нейтронов****Секция 16. Детекторы нейтронов****Стендовые доклады**

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

**КОМПЛЕМЕНТАРНЫЕ НЕЙТРОННЫЕ И СИНХРОТРОННЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЛИТИЕВЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ**

М. В. Авдеев

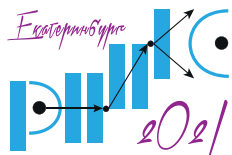
Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна,
Россия

E-mail: avd@nf.jinr.ru

Широкое практическое внедрение литиевых накопителей энергии повлекло за собой революционные изменения в современном образе жизни. Конкурентное сочетание в таких накопителях энергоемкости, стоимости и экологичности обуславливает бурное развитие в настоящее время электротранспорта, робототехники, портативных электронных устройств и пр. В случае дальнейшего повышения энергоемкости они имеют широкие перспективы в области так называемой зелёной энергетики. Вместе с тем, активное использование литиевых накопителей энергии сталкивается с проблемой безопасной эксплуатации, связанной, главным образом, с их нагревом из-за возможного короткого замыкания между электродами в результате спорадического возникновения игольчатых образований при электрохимическом осаждении лития. Таким образом, дальнейшее развитие данного вида накопителей энергии определяется решением глобальной задачи повышения энергоемкости с обеспечением безопасности их использования.

За последние годы методы на основе проникающих излучений, таких как нейтронное и синхротронное излучения, хорошо зарекомендовали себя в изучении различных физико-химических аспектов литиевых накопителей энергии, как в поисковых исследованиях на модельных системах, так и в диагностике отдельных материалов и непосредственно электрохимических устройств. Особенности данных видов излучений и их масштабная реализация на специализированных высокоинтенсивных источниках нейтронов и синхротронного излучения позволили существенно повысить информативность физических экспериментов в электрохимических сборках со специально подобранными компонентами, что, по сути, сформировало отдельное направление. Главной тенденцией развития данного вида исследований явился переход от так называемых *ex situ* экспериментов (эволюция процессов инициируется для разных подобных систем и прерывается на отдельных стадиях) к реализации режимов *in situ* (эволюция процессов инициируется для одной системы с прерыванием для измерения и возобновляется вновь) и *operando* (эволюция процессов отслеживается для одной функционирующей системы в режиме реального времени).

В настоящем обзорном докладе представлено текущее развитие нейтронных и синхротронных методов в рамках крайне актуального направления исследований, связанного с усовершенствованием действующих и изучением перспективных литиевых накопителей энергии. Акцент сделан на применениях, демонстрирующих комплементарность нейтронных и синхротронных исследований. Наряду с устоявшимися тенденциями обсуждаются задачи, где использование нейтронных и синхротронных методов видится наиболее эффективным и при решении которых можно ожидать прорыва в создании энергоемких и безопасных электрохимических накопителей энергии нового поколения.



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

• → • → • → Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

DUBNA RESEARCH REACTORS: A LOOK INTO THE FUTURE

V. L. Aksenov

Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

E-mail: aksenov@nf.jinr.ru

The concept of a new pulsed reactor NEPTUN (serial number IBR-3) is presented, which in terms of its parameters is superior to the existing pulsed sources, as well as to those which are being constructed, for research on extracted beams. A scientific program, the implementation of which is difficult or impossible with existing sources, as well as the infrastructure for supporting experiments, are briefly discussed.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЬНО КОРРЕЛИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ НЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ

Е.А. Горемычкин*

Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна, Россия

E-mail: goremychkin@jinr.ru

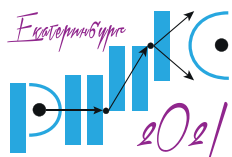
Исследование сильно коррелированных электронных систем (СКЭС) является одной из «горячих» точек современной физики конденсированных сред. Большое разнообразие основных состояний СКЭС обусловлено наличием незаполненных $3d$ -, $4f$ -, или $5f$ -электронных оболочек и соответственно наличием частично или полностью локализованных магнитных моментов, а также конкурирующими взаимодействиями локализованных электронов между собой и с электронами проводимости. К числу наиболее известных соединений с сильными электронными корреляциями относятся: Кондо системы, системы с тяжелыми фермионами (ТФ), системы с переменной валентностью (ПВ), неферми жидкостные системы (non-Fermi liquid systems), системы с квантовой критической точкой (Quantum Critical Point), сверхпроводящие системы с не фононным механизмом сверхпроводимости (ВТСП, ТФ сверхпроводники) и др. Наличие магнито-активных электронных состояний делает неупругое магнитное рассеяние нейтронов (НМРН) уникальной техникой для изучения спиновой динамики СКЭС как функции переданной энергии и импульса. При этом внешние условия на образце позволяют изучать магнитный отклик СКЭС в зависимости от температуры, магнитного поля, давления.

Изучение магнитной динамики СКЭС методом НМРН началось в конце 70-х годов прошлого века вскоре после открытия первого соединения с ТФ CeAl_3 [1] и с тех пор было опубликовано большое число работ, посвященных экспериментальному изучению различных аспектов поведения магнитного отклика СКЭС. В данной работе будет представлен обзор результатов НМРН исследований для трех типов СКЭС иллюстрирующий развитие как технических возможностей измерения НМРН, так и методов анализа и интерпретации экспериментальных данных с использованием современных теоретических моделей:

а) *спиновая динамика соединений с тяжелыми фермионами $\text{Ce}_x\text{Y}(\text{La})_{1-x}\text{Al}_3$ и её эволюция при воздействии химического давления*: реализация анизотропного Кондо эффекта [2, 3] и перехода от состояния с ТФ к состоянию с ПВ [4].

б) *спиновая динамика ВТСП соединений на основе железа*: первое наблюдение так называемого «нейтронного резонанса» в $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ [5] и детальное исследование спиновой динамики в монокристаллических образцах $\text{FeTe}_{1-x}\text{Se}_x$ в не сверхпроводящем соединении с ближним магнитным порядком для $x = 0.27$ и в сверхпроводнике с $x = 0.49$ [6].

в) *спиновая динамика соединения с переменной валентностью CePd_3* : на монокристаллическом образце были проведены измерения четырехмерной функции рассеяния

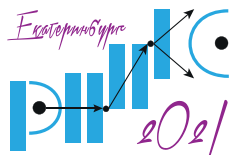


КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

● → ● → ● → Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

$S(Q_x, Q_y, Q_z, \omega)$. Сравнение с результатами расчета методом DFT+DMFT показало хорошее количественное согласие эксперимента и теории без подгоночных параметров, что позволило, в частности, понять происхождение зависимости закона рассеяния $S(Q, \omega)$ от температуры и переданного импульса как результат усиления когерентности f -электронов при понижении температуры [7].

1. K. Andres, J. E. Graebner and H. R. Ott, Phys. Rev. Lett. **35**, 1779 (1975).
2. E. A. Goremychkin, R. Osborn, B. D. Rainford, and A. P. Murani, Phys. Rev. Lett. **84**, 2211 (2000).
3. E. A. Goremychkin, R. Osborn, B. D. Rainford, et al, Phys. Rev. Lett. **89**, 147201 (2002).
4. E. A. Goremychkin, R. Osborn, I. L. Sashin, et al, Phys. Rev. Lett. **104**, 176402 (2010).
5. A. D. Christianson, E. A. Goremychkin, R. Osborn, et al, Nature **456**, 930 (2008).
6. D. Lumsden, A. D. Christianson, E. A. Goremychkin, et al, Nature Physics **6**, 182 (2010).
7. E. A. Goremychkin, H. Park, R. Osborn, et al, Science **359**, 186 (2018).



РЕАКТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ПИК

В. В. Воронин

НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Гатчина, Россия

E-mail: Voronin_VV@pnpi.nrcki.ru

Будет представлен обзор параметров и состояния дел по созданию самого мощного источника нейтронов, предназначенного для работы на выведенных пучках, исследовательского реактора ПИК (НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Гатчина).

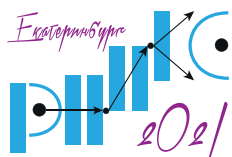
Реактор ПИК (пучковый исследовательский корпусной) представляет собой источник нейтронов с рекордными параметрами, призванный стать флагманом нейтронных исследований в России. Он представляет собой водо-водяной корпусной реактор, где легкая вода (H_2O) используется как теплоноситель, а тяжелая вода (D_2O) как отражатель и замедлитель нейтронов. Основные проектные характеристики реактора следующие [1]:

1. Тепловая мощность — 100 МВт.
2. Объем активной зоны — 50 литров.
3. Плотность потока тепловых нейтронов в отражателе $(0,1 - 1,2) \cdot 10^{15} \text{ н/см}^2\text{с}$. Для вывода нейтронного излучения из отражателя реактора ПИК, а также облучения образцов, реактор ПИК снабжен значительным числом экспериментальных каналов. Центральный экспериментальный канал (ЦЭК) размещен, в водной полости активной зоны. Плотность потока тепловых нейтронов в полости — $5 \cdot 10^{15} \text{ н/см}^2\text{с}$.
4. Горизонтальные экспериментальные каналы (ГЭК) — 9 штук
 - Потоки тепловых нейтронов на донышках $(0,1 - 1,2) \cdot 10^{15} \text{ н/см}^2\text{с}$
 - Потоки тепловых нейтронов на выходе $(0,2 - 3) \cdot 10^{11} \text{ н/см}^2\text{с}$
 - Диаметр каналов — 100 — 250 мм
5. Наклонные экспериментальные каналы (НЭК) — 6 штук
 - Потоки тепловых нейтронов на донышках - $(0,2 - 1) \cdot 10^{15} \text{ н/см}^2\text{с}$.

В настоящее время реактор ПИК выведен на энергетический режим работы, ведутся плановые работы. Кроме этого, введены в эксплуатацию первые 5 станций нейтронного рассеяния, проводятся первые эксперименты.

Данная установка на несколько десятилетий определит стратегию развития нейтронных исследований в РФ и станет основой Международного центра нейтронных исследований.

1. М. В. Ковальчук, С. Л. Смольский, К. А. Коноплев, Кристаллография **66** (2) 184—190 (2021).



КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЯМ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ АТОМНОГО ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ

А. В. Козлов^{1}, И. А. Портных¹, К. А. Козлов²*

¹АО «Институт реакторных материалов», Заречный, Россия

²Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: kozlov_alv@irmatom.ru, sashok-k48@mail.ru

При эксплуатации ядерных реакторов в материалах внутриреакторных конструкций под действием нейтронного облучения, температуры, механических напряжений, контакта с окружающей средой протекает ряд радиационно-индуцированных процессов, связанных с атомным перераспределением, которые приводят к различным неблагоприятным макроскопическим эффектам. Происходит изменение размеров элементов конструкций, вызванное их пластической деформацией и набуханием материалов, уменьшается пластичность, вплоть до полного охрупчивания, снижается прочность и сопротивление разрушению, что в сочетании с образованием дефектов коррозионного и механического происхождения может привести к потере работоспособности конструкций или к их разрушению. Эксплуатирующие и конструкторские организации интересуют прежде всего именно эти последствия, поскольку они ограничивают эксплуатационный ресурс, что влияет на экономические показатели реакторов разных типов и атомной энергетики в целом. Поэтому обычно финансирование направлено на определение набора определенных макроскопических эксплуатационных характеристик, например, при исследовании оболочек твэлов реакторов БН после эксплуатации определяются кратковременные механические свойства, измерения размеров и определяется плотность гидростатическим методом. В более массивных конструкциях проводятся экспериментальные исследования по определению температуры хрупко-вязкого перехода. Для определенных материалов (ферритно-мартенситных сталей) проводятся экспериментальные исследования внутриреакторной ползучести. В результате получается набор характеристик, недостаточный ни для обоснованного прогнозирования остаточного ресурса элемента конструкции, ни для поиска путей улучшения свойств материалов. Информация о микроскопических первопричинах изменений теряется вместе с удалением радиоактивных отходов материалов, прошедших механические испытания.

В ряде случаев удастся провести изучение тонких структурных характеристик процессов атомного перераспределения, включая изменение ближнего порядка [1], перераспределения состава нанодисперсных фаз и кластеров [2], образование сегрегационных профилей и вторичных фаз в кристаллической матрице и на границах зерен [3], а также характеристик образовавшихся радиационных пор и дислокационных петель [4]. Но, как правило, такие исследования фрагментарны, не охватывают разномасштабные уровни изменений, проводятся на разных объектах, и не всегда имеют детальную количественную привязку к результирующим макроскопическим эффектам.

Недостаточный интерес к первоосновам изменений макроскопических свойств, отчасти, связан с отсутствием моделей, описывающих с единых позиций происходящие

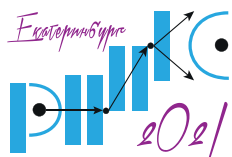
радиационно-индуцированные процессы. Наличие большого количества моделей, относящихся к различным явлениям (радиационному распуханию, радиационной ползучести, радиационному охрупчиванию и др.), использующих свой формализм, набор понятий и характеристик, только осложняет восприятие наблюдаемых изменений, как разных граней единого процесса.

В качестве базовой модели для описания эволюции структуры при нейтронном облучении авторами настоящей работы используется статистическая модель миграции точечных дефектов (СММТД), которая адаптируется для описания радиационно-индуцированных процессов в течение последних ~15 лет. Эта модель является универсальной и может быть применена для описания широкого спектра внешних воздействий. Она основана на том, что миграция точечных дефектов (ТД) осуществляется за счет перескоков в соседнее положение. В изотропном случае, когда энергия дефекта после перескока в любое из положений ближайшего окружения одинакова, перескок во всех направлениях равновероятен, и эта вероятность определяется энергией миграции. В случае, когда энергии в исходном положении и в соседнем положении различны, в вероятность добавляется множитель, определяемый разность этих энергий. В частности, при поглощении ТД стоком его энергия уменьшается, и разность энергий является энергией связи ТД со стоком. Таким образом, для описания миграции ТД, их поглощения и испускания стоками требуется набор характеристик: энергии образования и миграции ТД и энергии их связи с различными стоками. Дальше с использованием аппарата теории вероятности рассчитывается миграция ТД, в частности, их потоки на различные стоки, которые изменяют эти стоки, в том числе, размер радиационных пор. Понятия: коэффициенты диффузии, силы стоков, преференса и пр., не используются, хотя эти величины, в принципе, могут быть вычислены в рамках СММТД.

Комплексный подход к исследованиям процессов атомного перераспределения, и связанных с ним неблагоприятных эффектов, является сочетанием результатов максимально полного набора тонких структурных исследований и макроскопических свойств облученного материала с использованием модельных расчетов радиационно-индуцированных процессов, например в рамках СММТД, адаптированной к конкретным условиям облучения.

В настоящей работе представлено краткое описание СММТД, результаты, полученные на образцах оболочек твэлов из аустенитной стали ЭК164, после эксплуатации в реакторе БН-600 до достижения различных доз, вплоть до максимальной повреждающей дозы 99 сна и адаптация модели для прогнозирования остаточного ресурса твэла до достижения оболочкой максимально разрешенного распухания 15 %.

1. S.S. Huang, et al., J. Nucl. Mater. **456**, 266–271 (2015).
2. S.V. Rogozhkin, et al. Physics of Atomic Nuclei **83**, 1519–1528 (2020).
3. V.I. Pastukhov, A.V. Kozlov and M.L. Lobanov, Solid State Phenomena **284**, 253–258 (2018).
4. I.A. Portnykh, A.V. Kozlov and A.R. Isinbaev, Russian Metallurgy (Metally) **2021**, 290–296 (2021).



REFLECTORS OF VCNS (VERY COLD NEUTRONS) AND EXPERIMENTS WITH VCNS

*V. V. Nesvizhevsky**

CREMLIN+ (ERC INFRASUP P-2019-1/871072), RFFI-18-29-19039, ANR NERF collaborations

Neutrons can be an instrument or an object in many fields of research. Major efforts all over the world are devoted to improving the intensity of neutron sources and the efficiency of neutron delivery for experimental installations. In this context, neutron reflectors play a key role because they allow significant improvement of both economy and efficiency. For slow neutrons, Detonation NanoDiamond (DND) powders provide exceptionally good reflecting performance due to the combination of enhanced coherent scattering and low neutron absorption [1 – 3].

The enhancement is at maximum when the nanoparticle diameter is close to the neutron wavelength, and DND clustering is removed [4, 8 – 9]. The neutron absorption is at minimum when the impurities with large loss cross sections, like hydrogen, are removed by fluorination [5,7-8]. We perform a multi-technique study of DND powders including small-angle neutron scattering, X-ray diffraction, scanning and transmission electron microscopy, neutron activation analysis, dynamical light scattering, infra-red light spectroscopy, and others, with the goal of optimizing the overall reflector performance.

The developed reflectors are approaching the theoretical optimum for this method and can be readily used for numerous applications, which include more efficient extraction and delivery of cold neutrons, better sources of very cold and ultracold neutrons, more sensitive and less expensive large-scale experiments like searches for neutron-antineutron oscillations [6], and probably even the “bulk” of standard neutron scattering techniques if the gain in neutron fluxes is large enough.

1. V. V. Nesvizhevsky, Phys. At. Nucl. **65**, 400 (2002).
2. V. A. Artem'ev, At. Energy **11**, 901 (2006).
3. E. V. Lychagin, A. Y. Muzychka, V. V. Nesvizhevsky, et al. Phys. Lett. B **679**, 186 (2009).
4. A. E. Aleksenskii, E. D. Eydelman, A. Y. Vul', Nanosci. Nanotechnol. Lett. **3**, 68 (2011).
5. V. V. Nesvizhevsky, U. Koester, M. Dubois, et al. Carbon **130**, 799 (2018).
6. V. V. Nesvizhevsky, V. Gudkov, K. V. Protasov, et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 221802 (2019).
7. M. Herraiz, N. Batisse, M. Dubois, et al. J. Phys. Chem. C **124**, 14229 (2020).
8. A. Bosak, A. Dideikin, M. Dubois, et al., Materials **13** 3337 (2020).
9. A. Aleksenskii, M. Bleuel, A. Bosak, et al., Nanomaterials **11**, 1945 (2021).

SPIN DYNAMICS IN QUANTUM MAGNETS STUDIED BY INELASTIC NEUTRON SCATTERING

S. E. Nikitin^{1}, T. Xie², C. Rüegg¹, A. Podlesnyak²*

¹Paul Scherrer Institute, Villigen, Switzerland

²Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, USA

E-mail: stanislav.nikitin@psi.ch

Magnetic materials exhibiting strong quantum fluctuations remain in the focus of close attention in modern solid-state physics. The most prominent examples are low-dimensional and frustrated spin systems. Theory predicts unconventional ground states, which, in addition, can be modified by external tuning parameters such as magnetic field. Inelastic neutron scattering (INS) is a powerful experimental technique, which probes dynamics magnetic susceptibility over the whole Brillouin zone and thus provides invaluable information about the relevant magnetic interactions and overall behavior of magnetic quasiparticles in the system.

In this work I review briefly our recent INS studies of spin dynamics in Yb-based spin-chain and quasi-two dimensional triangular-lattice antiferromagnets, YbAlO₃ and CsYbSe₂.

YbAlO₃ is an orthorhombic perovskite, which exhibits gapless fractionalized spinon excitations above its ordering temperature. With temperature decrease the Yb moments order into a non-collinear commensurate AFM structure due to sizable in-plane dipolar interaction. The dipolar field produces a confining potential, which opens a gap in the spectrum [1–2]. Application of external magnetic field suppresses the AFM phase in favor of exotic spin-density wave (SDW) order and then causes a quantum phase transition towards field-polarized state.

Our comprehensive INS measurements supported by QMC and DMRG simulations allowed us to uncover the primary magnetic interactions in the system. In particular, we have shown that the SDW phase is induced by the nesting of the spinon Fermi-surface and ultimately stabilize due to Ising-like anisotropy of the interchain coupling.

Moreover, the diffraction measurements within the SDW phase revealed two higher harmonics due to distortion of the SDW. Via mapping of the spin-chain model to the free-fermion problem, we associated higher-order harmonics with a multiple spinon scattering process.

Triangular-lattice antiferromagnet (TLAF) is a textbook example of geometrically frustrated system, however, good experimental realizations of this model are rare. Recently, we studied CsYbSe₂, a model example of $S = 1/2$ TLAF model [3]. We observed that at zero field it shows no magnetic phase transition down to the lowest available temperatures, although the diffraction data show clearly the long-range in-plane magnetic correlations, indicating proximity of the 120° ordered state. Application of magnetic field magnetizes the sample and produces a long-range ordered phase, which can be associated with the 3D up-up-down order of Yb moments. We measured magnetic excitations at both, quantum disordered and field-induced phases and found that the zero-fields magnons have no gap and are peaked at the *K*-point of the Brillouin zone, in good agreement with expectations for nearest-neighbor Heisenberg TLAF model. We further note that the zero-field magnons are strongly damped away from the *K*-point due to strong magnon-magnon interaction. In contrast, at the field-induced collinear state the spectrum splits into a series of sharp modes with negligible small broadening. The measured spectra can be well reproduced by DMRG simulation of Heisenberg TLAF model. Our data provide valuable information about field-induced correlated spin dynamics in TLAF model.

1. L.S. Wu et al., NatureComm. **10**, 698, (2019).

2. L.S. Wu et al., Phys. Rev. B **99**, 195117 (2019).

3. J. Xing et al., Phys. Rev. B **100**, 220407 (2019).

СИНХРОТРОННО-НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

Е. Ю. Терещенко^{1,2,3*}, Е. С. Коваленко¹, К. М. Подурец¹, Р.Д. Светогоров¹,
М. М. Мурашев¹, Е.Б. Яцишина^{1,2}, М. В. Ковальчук^{1,3}

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт» – ИРЕА, Москва, Россия

³ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

E-mail: tereschenko_ey@nrcki.ru; elenatereschenko@yandex.ru

Применение естественно-научных методов для изучения объектов культурного наследия – в историческом материаловедении интенсивно развивается во всем мире как в художественно-исторических музеях, гуманитарных институтах, так и в физических центрах. В этих исследованиях используется широкий спектр оборудования – от портативных приборов для полевых исследований до мощных мегаустановок – синхротронных и нейтронных источников излучения.

Сочетание различных синхротронно-нейтронных методов исследований, с учетом их взаимодополняющего характера и возможности изучения как микропроб, так и объектов целиком, делает данное направление работ особенно перспективным при изучении объектов культурного наследия различной природы и происхождения.

В докладе представлены результаты цикла комплексных исследований с использованием синхротронно-нейтронных методов объектов культурного наследия из Государственного исторического музея, Государственного музея изобразительных искусств им. А. С. Пушкина, Института археологии РАН, Института археологии Крыма РАН и других организаций РФ [1 – 6].

Также обсуждаются перспективы развития исторического материаловедения в РФ в рамках реализации Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры.

Работы выполнены с использованием оборудования уникальных научных установок Исследовательский реактор ИР-8" и специализированный «Курчатовский источник синхротронного излучения» в НИЦ «Курчатовский институт». Лабораторные исследования выполнены с применением оборудования ресурсных центров НИЦ «Курчатовский институт» и аналитического центра НИЦ «Курчатовский институт» – ИРЕА.

1. В. П. Глазков и др., Кристаллография **63(4)**, 670 (2018).
2. Н. А. Макаров и др., Краткие сообщения Института археологии **258**, 25 (2020).
3. V. V. Murasheva et al. Journal of archaeological science-Reports **37**, 102946 (2021).
4. А. М. Антипин и др., Кристаллография **64(3)**, 484 (2019).
5. Е. С. Коваленко и др., Российские нанотехнологии **15(5)**, 610 (2020).
6. Е. И. Носова и др., Российские нанотехнологии **15(5)**, 595 (2020).

Секция 1.

Кристаллические структуры и элементарные возбуждения

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ НЕРАВНОВЕСНЫХ Fe-Ga СПЛАВОВ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ГАЛЛИЯ ПРИ НАГРЕВЕ-ОХЛАЖДЕНИИ

Т. Н. Вершинина^{1*}, И. А. Бобриков^{1,2}, С. В. Сумников^{1,2}, А. М. Балагуров^{1,2,3},
А. К. Мохамед², И. С. Головин²

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

³Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: vershinina@nf.jinr.ru

Интерес к структуре Fe–Ga сплавов возрос в начале 2000-х годов после открытия повышенных значений магнитострикции при содержании галлия $x \approx (17 - 19)$ и $(26 - 27)$ ат.% [1]. Это открытие привело к появлению большого числа работ, в которых изучались особенности структурной организации и фазовых переходов между различными структурными состояниями сплавов Fe–Ga в этом диапазоне концентраций [2]. При этом область высоких концентраций галлия ($x > 33$ ат.%) изучена недостаточно, например, до настоящего времени нет полной картины того, какие фазы могут быть сформированы в тех или иных условиях, а их атомная структура продолжает уточняться.

Благодаря тому, что диффузия при низких температурах в сплавах системы Fe–Ga протекает медленно, при закалке из высокотемпературной области удается фиксировать неравновесные состояния. Так для сплава Fe–38.4Ga фиксируется фазовый состав A2/B2+Fe₁₃Ga₉, а для Fe–45Ga — β -Fe₆Ga₅ (Рис. 1).

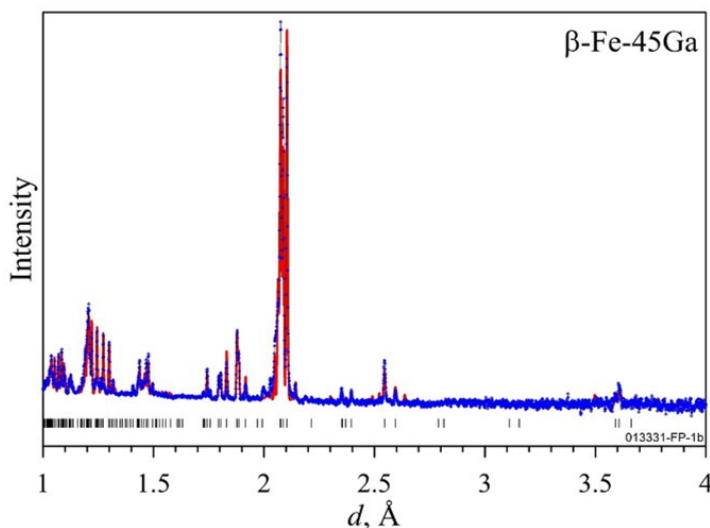


Рис. 1. Нейтронограмма закаленного сплава Fe–45Ga, полученная на Фурье дифрактометре высокого разрешения (ИБР-2, Дубна, Россия) и обработанная методом Ритвельда. Вертикальные штрихи указывают положения пиков фазы β -Fe₆Ga₅.

На примере сплава Fe–45Ga методом рентгеноструктурного анализа (РСА) было показано, что в процессе нагрева в условиях вакуума происходит испарение галлия из по-

верхностных слоев образца. Следствием уменьшения концентрации галлия в направлении от объема к поверхности, является изменение фиксируемых температур фазовых превращений и их несоответствие сплаву Fe–45Ga согласно диаграмме Fe–Ga. Фазовый же состав сплава в состоянии после цикла нагрева-охлаждения, определяемый методом нейтронной дифракции (НД), кардинально отличается от данных РСА. Было показано, что испарение галлия приводит к формированию в поверхностных слоях образца градиентной структуры. Уменьшение влияния указанных поверхностных эффектов может быть достигнуто путем существенного увеличения толщины анализируемого слоя. То есть в случае необходимости анализа объемных Fe–Ga сплавов при высоких температурах в вакууме закономерным является использование НД, поскольку в исследовании участвует весь объем образца, а не только его поверхностный слой. По полученным дифрактограммам было проведено уточнение параметров ячейки и координат атомов высокотемпературной фазы β -Fe₆Ga₅. Параметры элементарной ячейки этой фазы близки к параметрам, определенным для состава Fe–50Ga в работе [3], а именно, пр. гр. $R\bar{3}m$ (№ 166), $a_H = 12.437 \text{ \AA}$, $c_H = 7.764 \text{ \AA}$.

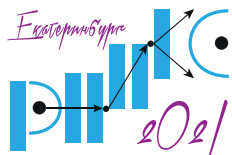
Исследования эволюции структуры сплава Fe–38.4Ga проводились в режиме непрерывного сканирования по температуре исключительно методом НД. В таблице 1 приведены данные по температурам фазовых переходов при нагреве и охлаждении сплава Fe–38.4Ga, с начальным неравновесным состоянием, представленным интерметаллидом Fe₁₃Ga₉ (~64%), кристаллическая структура которого была недавно установлена в [4], и частично упорядоченной фазой B2 (~36%).

Таблица 1. Температуры фазовых переходов при нагреве и охлаждении со скоростью 2 °/мин неравновесного сплава Fe–38.4Ga

Фазовый переход	Температура, °C
Нагрев	
$A2/B2 + Fe_{13}Ga_9 \rightarrow L1_2 + \alpha\text{-Fe}_6Ga_5 + A2/B2$	530
$L1_2 + \alpha\text{-Fe}_6Ga_5 + B2 \rightarrow \alpha\text{-Fe}_6Ga_5 + B2$	660
$\alpha\text{-Fe}_6Ga_5 + B2 \rightarrow B2$	720
Охлаждение	
$B2 \rightarrow \alpha\text{-Fe}_6Ga_5 + B2$	780
$\alpha\text{-Fe}_6Ga_5 + B2 \rightarrow L1_2 + \alpha\text{-Fe}_6Ga_5$	600

Определено, что при первом нагреве со скоростью 2 °C/мин фаза Fe₁₃Ga₉ стабильна вплоть до $T \approx 530^\circ\text{C}$, переходя затем в $\alpha\text{-Fe}_6Ga_5$ и $L1_2$ фазы. С этой же температуры начинается переход типа беспорядок-порядок $A2 \rightarrow B2$, завершающийся к $T \approx 750^\circ\text{C}$. При охлаждении и втором цикле нагрева-охлаждения фаза Fe₁₃Ga₉ не образуется. Также было обнаружено, что значения температур фазовых переходов в сплаве зависят от его температурной предыстории. Для фазы $\alpha\text{-Fe}_6Ga_5$ было выполнено уточнение значений параметров кристаллической решетки, которые составили: $a = 10.081 \text{ \AA}$, $b = 7.975 \text{ \AA}$, $c = 7.699 \text{ \AA}$, $\beta = 108.34^\circ$.

1. A.E. Clark, J.B. Restorff, M. Wun-Fogle et. al., IEEE Trans. Magn. **36**, 3238–3240 (2000).



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

● → ● → ● → Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

2. I.S. Golovin, V.V. Palacheva, A.K. Mokhamed, A.M. Balagurov, Physics of Metals and Metallography **121**, 851–893 (2020).
3. O. Gourdon, S.L. Bud'ko, D. Williams, G.J. Miller, Inorg. Chem. **43**, 3210–3218 (2004).
4. A. Leineweber, H. Becker, A.O. Boev et.al. Intermetallics **131**, 107059 (2020).

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕКСАФЕРРИТОВ М-ТИПА

В. А. Турченко^{1,2,3*}, А. В. Труханов⁴, С. В. Труханов⁴, S. Polosan⁵, I. Fina⁶, H. Chiriac⁷

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

³Донецкий физико-технический институт НАНУ, Киев, Украина

⁴ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь

⁵National Institute of Materials Physics, Bucharest, Magurele, Romania

⁶Institut de Ciencia de Materials de Barcelona-CSIC, Barcelona, Spain

⁷National Institute of Research and Development for Technical Physics, Iasi, Romania

*E-mail: turchenko@jinr.ru

Гексаферриты М-типа и твердые растворы на их основе уже получили широкое практическое применение: в биомедицине [1], в радиоэлектронной промышленности в качестве постоянных магнитов [2], в приборах микроволнового и миллиметрового диапазона, в антирадарных покрытиях [3], в магнитных носителях записи высокой плотности благодаря своим уникальным физическим свойствам.

Сравнительно недавние исследования, казалось бы, уже достаточно хорошо изученных гексаферритов М-типа, обнаружили в керамических образцах $M\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ ($M = \text{Ba}$, Sr и Pb) [4] сегнетоэлектрические свойства (см. Рис. 1).

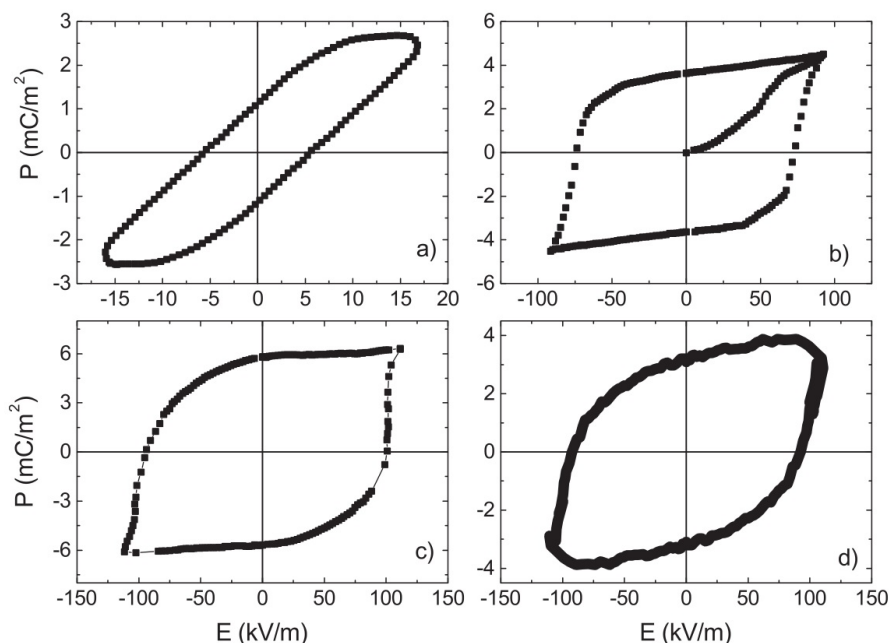


Рис. 1. Сегнетоэлектрические петли исходного $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ (а) и $\text{BaFe}_{11.9}\text{Dm}_{0.1}\text{O}_{19}$ ($\text{Dm} = \text{In}$ – (b), Al – (c) и Sc – (d)) при комнатной температуре, взято из [4, 5].

В литературе имеются различные объяснения появления сегнетоэлектрических свойств в centrosymmetric кристаллической структуре гексаферритов: возможное искажение единичного кислородного октаэдра [4, 6, 7]; появление неколлинеарной магнитной структуры [8]; переход типа порядок–беспорядок [6] и даже связь с квантовыми эффектами [9]. Однако, на сегодняшний день природа возникновения спонтанной поляризации в гексаферритах М-типа и их твердых растворах остается дискуссионной.

Целью данной работы является проведение структурных, магнитных и электрических исследований образцов твердых растворов бариевых и стронциевых гексаферритов для установления микроскопического механизма формирования их сегнетоэлектрических свойств. Особенностью данной работы является применение метода нейтронной дифракции, что позволило собрать информацию как о кристаллической, так и о магнитной структуре в ходе одного измерения. Примеры нейтронограмм, измеренных при разных температурах и обработанные по методу Ритвельда, приведены на Рис. 2(а).

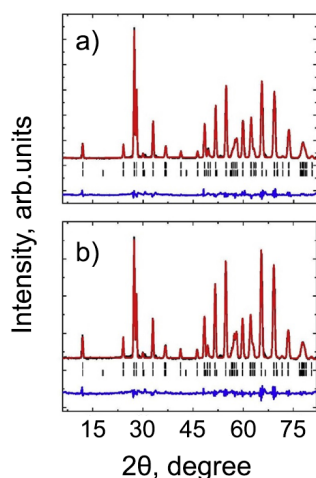


Рис. 2. Нейтронные дифракционные спектры $\text{SrFe}_{10.8}\text{In}_{1.2}\text{O}_{19}$, измеренные при температурах 1.5 К – (а) и 300 К – (б) и обработанные по методу Ритвельда.

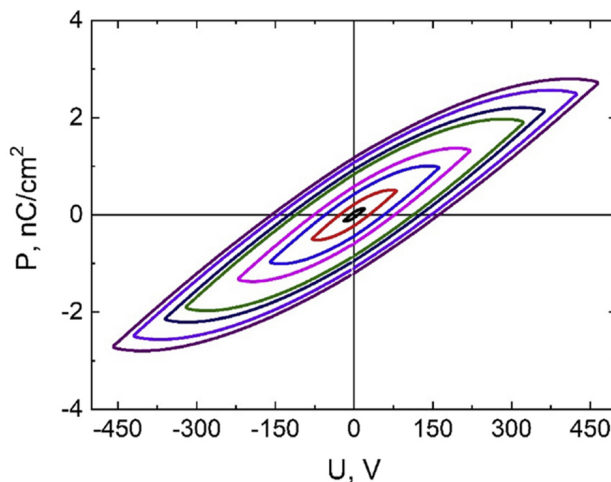
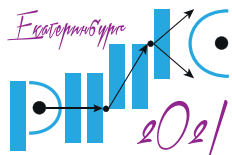


Рис. 3. Полевая зависимость электрической поляризации $\text{SrFe}_{10.8}\text{In}_{1.2}\text{O}_{19}$, измеренная при комнатной температуре.

Объяснить возникновение остаточной поляризации в данном случае представляется возможным, если предположить появлению некомпенсированного дипольного электрического момента вследствие искажения кислородных полиэдров. Для установления микроскопического механизма формирования их сегнетоэлектрических свойств (см. Рис. 3) уточнение кристаллической структуры гексаферритов было выполнено в рамках пространственных групп $P63/mmc$ (№ 194) и $P63mc$ (№ 186). Сопоставление факторов соответствия двух пространственных групп подтверждает возможность описать атомную структуру бариевых ферритов с достаточно высокой точностью в рамках пространственной группы $P63mc$ (№ 186), как это ранее предполагалось в работе [6]. В



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

отличие от centrosymmetrichenой пр. гр. $P6_3/mmc$ (№ 194) искажения кислородных полиэдров в случае неcentrosymmetrichenой пр. гр. $P6_3mc$ (№ 186) допускают появление некомпенсированных дипольных электрических моментов.

Работа выполнена при поддержке программы сотрудничества Румыния – ОИЯИ 04-4-1141-2020/2022 и 04-4-1142-2021/2025 и NFFA Europa ID1026 (Европейские гранты для мобильной деятельности исследователей).

1. D. Staneva, T. Koutzarova, B. Vertruyen et al., J. Mol. Struct. **1127**, 74, (2017).
2. R. C. Pullar, Progr. Mater. Science **57**, 1191 (2012).
3. Susilawati, Aris Doyan, Khalilurrahman, AIP Conf. Proc. **1801**, 040007(1–7) (2017).
4. G. Tann, X. Chen, JMMM **327**, 87 (2013).
5. V. Turchenko, A. Trukhanov, S. Trukhanov et al., JMMM **477**, 9 (2019).
6. A.S. Mikheykin, E.S. Zhukova, V.I. Torgashev et al., Eur. Phys. J. B **87**, 232 (2014).
7. J. Rensen, J. van Wieringen, Solid Stat. Comm. **7**, 1139 (1969).
8. S. Gupta, V.G. Sathe, V. Siruguri, J. All. Comp. **825**, 154141, (2020).
9. H. B. Cao, Z. Y. Zhao, M. Lee et al., APL Materials **3**, 062512 (2015).

«ФАНТОМНЫЕ» АТОМЫ И ТЕПЛОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ФУЛЛЕРЕНЕ C₆₀

Е. К. Нигматуллина, И. В. Голосовский*

ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова НИЦ Курчатовский институт»

*E-mail: nigmatullina_ek@npni.nrcki.ru

В докладе представлены результаты дифракционных исследований структурных особенностей фуллерена C₆₀. Методами нейтронной и рентгеновской порошковой дифракции была обнаружена дополнительная атомная заселённость в октаэдрических и тетраэдрических междоузлиях гранецентрированной кубической ячейки фуллерена C₆₀.

Наблюдаемая «фантомная» заселённость не зависит от образца и точно соответствует перестройке ориентационного порядка в фуллере при понижении температуры. Эта заселённость является результатом колебаний атомов углерода, составляющих молекулу фуллерена, что предполагает небольшую, но конечную вероятность существования атомов в междоузельных пустотах.

Рассматриваются разные подходы для описания кристаллической структуры фуллерена C₆₀. Во-первых, атомная модель, учитывающая характерный для фуллерена C₆₀ «мерздрический беспорядок» при комнатной температуре. В рамках этой модели был выполнен профильный анализ дифрактограмм методом Ритвельда. Следуя [1], координаты всех шестидесяти атомов в молекуле фуллерена были получены из координат трёх базовых атомов [2] операциями симметрии пространственной группы $Fm\bar{3}m$ с учётом двух расстояний между ближайшими углеродными атомами, соответствующими одинарной и двойной связям. Показано, что сходимость можно существенно улучшить если предположить, что какие-то углеродные фрагменты («фантомные» атомы) занимают пустые места (междоузлия) между молекулами C₆₀.

Возможен другой, альтернативный, безмодельный, подход, предполагающий, что каждая молекула фуллерена является однородной сферической оболочкой из равномерно распределённых атомов углерода. Этот подход, не учитывающий положения каждого конкретного атома, хорошо описывает структуру фуллерена C₆₀ при комнатной температуре, однако неприменим после фазового перехода первого рода, характерного для фуллерена C₆₀ при температурах ниже 240–260 К. Кристаллическая структура фуллерена C₆₀ в низкотемпературной фазе описывается атомной моделью в пространственной группе $R\bar{3}$. Ниже 90 К молекулы C₆₀ «замирают» в своей ориентации. Это состояние известно как «ориентационное стекло».

Анализ показывает, что наиболее вероятной причиной появления «фантомных» атомов являются атомные тепловые колебания с аномально большой амплитудой. Действительно, профильный анализ дифрактограмм показывает аномально большой тепловой фактор (Дебая–Валлера), что свидетельствует о большой амплитуде колебаний. Уточнённый тепловой фактор соответствует среднеквадратичному смещению ~ 0.47 Å. Учитывая тот факт, что размер элементарной ячейки фуллерена C₆₀ – 14.1 Å, а радиус молекулы – 3.6 Å, такие аномально большие атомные колебания углеродных атомов вполне могут быть зарегистрированы в дифракционном эксперименте как «фантомные» атомы.

1. W. David, R. Ibberson, J. Matthewman, K. Prassides, et al., *Nature* **353**, 147–149 (1991).
2. P. Heiney, J. Phys. Chem. Solids. **53**, 1333–1352 (1992).

КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКИХ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ НА ОСНОВЕ $TbNi_5$

А. Н. Пирогов^{1,2*}, Е. Г. Герасимов^{1,2}, П. Б. Терентьев^{1,2}, Н. В. Мушников^{1,2},
Д. В. Шептяков^{3,4}, В. Ю. Помякушин^{3,4}, И. А. Бобриков⁴

¹Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Институт естественных наук и математики УрФУ, Екатеринбург, Россия

³Пауль-Шеррар Институт, Виллиген, Швейцария

⁴Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*E-mail: pirogov@imp.uran.ru

Интерметаллические соединения RNi_5 со структурой типа $CaCu_5$ представляют интерес для практики, как материалы водородной энергетики. Интерметаллиды со структурами производными от $CaCu_5$ рассматриваются как перспективные катодные материалы для Ni металл-гидридных батарей.

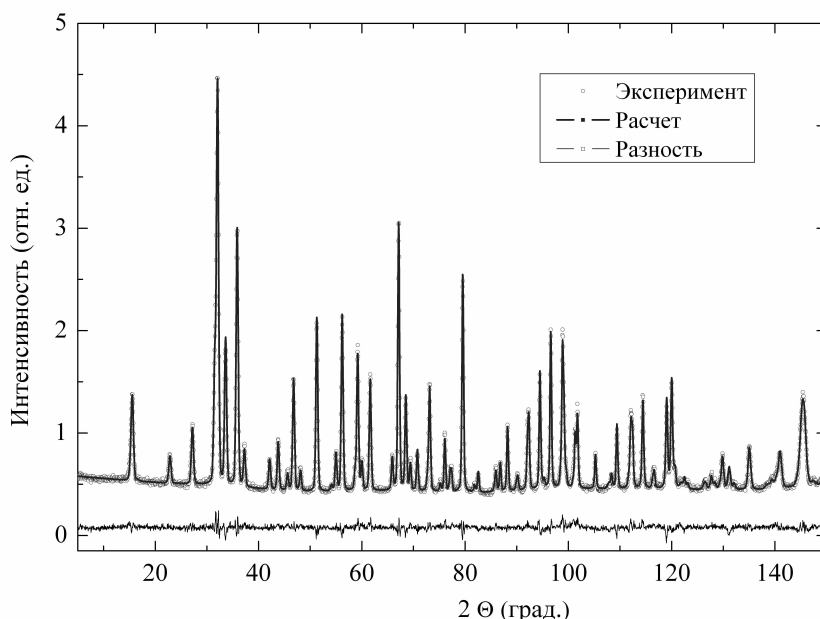
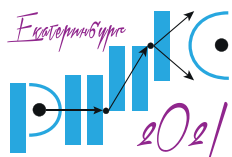


Рис. 1. Экспериментальная и расчетная нейтронограммы нестехиометрического соединения $TbNi_5Mn_{0.2}$ при 300 K и разность между нейтронограммами.

Структура $CaCu_5$ содержит 6 атомов в примитивной гексагональной ячейке. Редкоземельные ионы занимают позицию $1a$; атомы $3d$ -переходного металла расположены в узлах $2c$ и $3g$. Эта структура может быть описана двумя видами упаковки: атомы в узлах $2c$ образуют сотовую сеть, тогда как атомы в $3g$ формируют сеть кагоме.

Цель данной работы состоит в установлении кристаллической структуры нестехиометрических соединений $TbNi_5Mn_{0.2}$ и $TbNi_5Mn_{1.0}$. Для сравнения были исследованы также и соответствующие стехиометрические составы.



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

Образцы $\text{TbNi}_{4.8}\text{Mn}_{0.2}$, TbNi_4Mn_1 , $\text{TbNi}_5\text{Mn}_{0.2}$, $\text{TbNi}_5\text{Mn}_{1.0}$ были выплавлены из исходных высокочистых компонент индукционным методом в тигле из Al_2O_3 в атмосфере аргона. В течение 8 часов был проведен гомогенизирующий отжиг.

Нейтронографические измерения были выполнены на фурье-дифрактометре (реактор ИБР-2), ОИЯИ) и дифрактометре HRPT (Спалейшен источник, ПШИ). В качестве примера на Рис. 1 приведены экспериментальная и расчетная нейтронограммы для соединения $\text{TbNi}_5\text{Mn}_{0.2}$, а также разностная картина между ними.

Наилучшее соответствие между экспериментальными и расчетными нейтронограммами достигается, когда атомы Mn и Ni частично замещают ионы Tb, образуя новую позицию 2e «гантельку». При этом, коэффициент заполнения узлов 1a ионами Tb уменьшается до 0.962.

Итак, в структуре нестехиометрических соединений редкоземельные ионы частично замещаются атомами 3d-переходного металла.

ОСОБЕННОСТИ УПОРЯДОЧЕНИЯ Ni/Co В КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{PO}_4$ ($x = 0.3, 0.5, 0.7$) НА ОСНОВЕ ДАННЫХ НЕЙТРОННОЙ ДИФРАКЦИИ

Н. В. Урусова^{1,3*}, М. А. Сёмкин^{2,3}, А. Хосер⁴, А. Н. Пирогов^{2,3}

¹Институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

³Институт естественных наук и математики УрФУ, Екатеринбург, Россия

⁴Берлинский центр материалов и энергии имени Гельмгольца, Берлин, Германия

* E-mail: natali.urusova@mail.ru

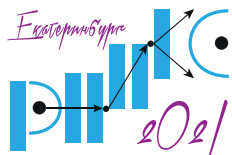
Соединения LiMPO_4 ($M = \text{Ni}, \text{Co}$) относятся к семейству орторомбических литиевых фосфатов $3d$ -переходных металлов, обладающих структурой типа оливин. Данные материалы являются магнитоэлектриками, в которых проявляется магнитоэлектрический эффект (МЭ) [1, 2]. При этом микроскопической теории, объясняющей механизм МЭ эффекта, пока нет. Для создания и развития микроскопической теории необходимы детальные экспериментальные данные о структурном состоянии, магнитной и электрической подсистемах. Целью данной работы является изучение структурного состояния в литиевых ортофосфатах $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{PO}_4$ ($x = 0.3, 0.5, 0.7$).

Распределение ионов никеля и кобальта в кристаллической решётке $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{PO}_4$ было изучено с помощью дифракции нейтронов. Нейтронографические исследования были проведены на порошковом дифрактометре высокого разрешения E9 (FIREPOD) с постоянной длиной волны $\lambda = 1.7982(1) \text{ \AA}$, смонтированном на горизонтальном канале реактора BER-II Берлинского центра материалов и энергии имени Гельмгольца (г. Берлин, Германия).

Кристаллическая структура $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{PO}_4$ ($x = 0.3, 0.5, 0.7$) соответствуют структуре оливина с пространственной группой $Pnma$. В этой группе кратность общей позиции равна 8. Ионы $3d$ -металла расположены в позиции $4c$, при этом образуя октаэдры MO_6 с ионами кислорода О. Ионы Li занимают позицию $4a$ с координатами (0,0,0), ионы P, O1, O2 заполняют позиции $4c$ ($x; 0.25; z$), тогда как кислород O3 расположен в позиции $8d$ ($x; y; z$).

Для состава $x = 0.5$ можно предположить шесть вариантов взаимного распределения ионов никеля и кобальта Ni–Ni–Co–Co; Ni–Co–Ni–Co; Ni–Co–Co–Ni; Co–Co–Ni–Ni; Co–Ni–Co–Ni; Co–Ni–Ni–Co в позиции $4c$ с координатами (1: (0.2759; 0.25; 0.9834), 2: (0.7759; 0.25; 0.5166), 3: (0.7241; 0.75; 0.0166) и 4: (0.2241; 0.75; 0.4834)). Для других двух составов возможны четыре варианта моделей распределения Co–Ni–Ni–Ni; Ni–Co–Ni–Ni; Ni–Ni–Co–Ni; Ni–Ni–Ni–Co для $x = 0.3$ и Ni–Co–Co–Co; Co–Ni–Co–Co; Co–Co–Ni–Co; Co–Co–Co–Ni для $x = 0.7$.

Для $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{PO}_4$ удалось определить предпочтительное распределение ионов никели и кобальта в кристаллической структуре, благодаря тому, что амплитуды когерентного рассеяния нейтронов ядрами кобальта примерно в четыре раза меньше $b_{\text{Co}} = 0.249 \cdot 10^{-12} \text{ см}$, чем ионами никеля $b_{\text{Ni}} = 1.03 \cdot 10^{-12} \text{ см}$. Для конфигурации Ni–Co–Ni–Co было получено наилучшее согласие между расчётной и экспериментальной нейтронограммами (общий фактор сходимости $\chi^2 = 2.5 \%$). В этом случае ионы никеля образуют плоскости ab , которые чередуются с плоскостями кобальта в направлении оси c . Для



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

остальных моделей распределения $3d$ -ионов в оливин структуре на расчётных нейтронограммах появляются дополнительные структурные пики, которых нет на эксперименте.

Четыре варианта моделей распределения ионов никель/кобальта были проверены для составов $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{PO}_4$ ($x = 0.3, 0.7$). По данным расчёта нейтронограмм не удалось определить предпочтительное распределение ионов $3d$ -металла, так как для всех рассмотренных моделей положения и интенсивности пиков совпадают.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-60011.

1. R. Toft-Petersen et al., Phys. Rev. B. **84**, 054408 (2011).
2. J.-P. Rivera, Ferroelect. **161**, 147 (1994).

КОРРЕЛЯЦИЯ МАГНИТНЫХ ФАЗ И КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ В РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ОРТОФЕРРИТАХ

О. В. Усманов^{1*}, И. А. Зобкало¹, А. К. Овсянников^{1,2}, V. Hutanu²

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

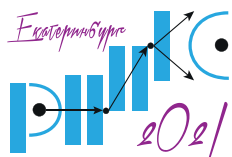
²Institute of Crystallography RWTH Aachen University, Aachen, Germany

*E-mail: usmanov_ov@npi.nrcki.ru

Замечательные магнитные свойства редкоземельных ортоферритов $R\text{FeO}_3$ обусловлены сложными взаимодействиями между моментами $3d$ -электронов на переходном металле и $4f$ -электронов на редкоземельных атомах. В исследованиях [1, 2] показано, что эти соединения имеют довольно высокие температуры Нееля $T_N \approx 600 - 700$ К, ниже которых моменты Fe упорядочены антиферромагнитно со слабым ферромагнитным компонентом. С понижением температуры Fe– R возрастает роль взаимодействия, что приводит к спинпереориентационный (SR) переходу, чаще всего в диапазоне $T_{SR} \approx 50 - 60$ К. Редкоземельная подсистема с относительно слабыми взаимодействиями $R - R$ остается парамагнитной при высоких температурах или слабо поляризована молекулярным полем упорядоченных ионов Fe. Спонтанное упорядочение редкоземельной подрешетки происходит ниже $T_{NR} \approx 5 - 10$ К. Сложные магнитные свойства системы возникают из-за множественности различных обменных взаимодействий. Помимо симметричного обменного взаимодействия гейзенберговского типа Fe–Fe, Fe– R и RR , взаимодействие Дзялошинского–Мория (ДМ) [3, 4] оказывает существенное влияние на магнитные свойства и приводит к слабому ферромагнетизму этих соединений.

Есть основания считать, что взаимодействие ДМ может быть причиной возникновения сегнетоэлектрического упорядочения в DyFeO_3 , YFeO_3 и LuFeO_3 , обнаруженного при температурах выше T_{SR} [5]. Следует также отметить, что орторомбическая пространственная группа $Pbnm$ (или $Pnma$), которой описывается кристаллическая структура $R\text{FeO}_3$, является центросимметричной и не допускает спонтанную электрическую поляризацию. Поэтому для поиска искажений, вызывающих понижение симметрии, необходимы более точные исследования кристаллических и магнитных свойств соединений $R\text{FeO}_3$.

С целью выяснения микроскопических механизмов, приводящих к мультиферроичности в рассматриваемых системах, была исследована температурная эволюция кристаллической структуры $R\text{FeO}_3$ ($R = \text{Ho}, \text{Tm}, \text{Lu}$) на рентгеновском дифрактометре Rigaku SmartLab методом порошковой дифракции. Значения температур измерений выбирались таким образом, чтобы соответствовать различным магнитным фазам соответствующего соединения. Для каждой температуры вычислены параметры обменных связей — длины и углы. Эволюция параметров обменных связей в TmFeO_3 демонстрирует, что углы и длины связей в плоскости ab (Fe–OII–Fe) остаются примерно одинаковыми во всех магнитных фазах, тогда как эти параметры связи вдоль оси c (Fe–OI–Fe) заметно меняются при понижении температуры до 85 К, соответствующей температуре ориентационного перехода. Можно предположить, что это магнитострикционное явление связано с изменением соотношения обменного взаимодействия Fe–Fe и Fe– R подсистем. В то же время длины и углы связи Fe–OI–Fe и Fe–OII–Fe в HoFeO_3 остаются одинаковыми (в пределах погрешности) для всех магнитных фаз — Г4, Г1, Г2. В LuFeO_3



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

магнитное упорядочение во всем интервале температур ниже $T_N = 625$ К характеризуется представлением Г4, и определенные нами параметры обменных связей также остаются неизменными.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 19-52-12047.

1. M. Marezio, J. P. Remeika, and P. D. Dernier, Acta Cryst. B **26**, 2008 (1970).
2. W. C. Koehler, E. O. Wollan, and M. K. Wilkinson, Phys. Rev. **118**, 58 (1960).
3. I.E. Dzyaloshinsky, J. Phys. Chem. Solids **4**, 241 (1958).
4. T. Moriya, Phys. Rev. **120**, 91 (1960).
5. U. Chowdhury et al. Appl. Phys. Lett. **105**, 052911 (2014).

КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ИОННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ В NaFeO_2

Н. В. Проскурнина^{1*}, В. И. Воронин¹, Г. Ш. Шехтман², Н. А. Кабанова³

¹Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

³Центр теоретического материаловедения, Самара, Россия

*E-mail: Proskurnina@imp.uran.ru

Соединение NaFeO_2 можно отнести к классу высокопроводящих соединений по катионам натрия, близким к суперионикам (проводимость при высоких температурах $\sim 4 \times 10^{-3} \Omega \text{ см}^{-1}$).

В настоящей работе на основе исследования кристаллической структуры NaFeO_2 с помощью пакета программ TOPOS выявлены сквозные каналы в кристаллической структуре, определены их размеры и рассмотрена связь структуры и размеров каналов с натрий-катионной проводимостью. Показано, что увеличение размеров каналов проводимости коррелирует с возрастанием ионной электропроводности.

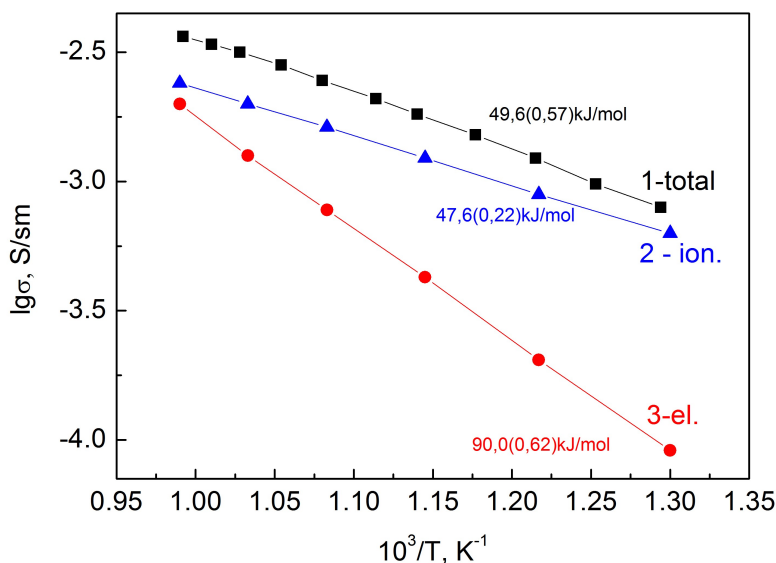


Рис. 1. Температурные зависимости удельной электропроводности NaFeO_2 : 1 — общая электропроводность, 2 — ионная электропроводность; 3 — электронная проводимость.

Для исследования структурных особенностей решетки мы использовали метод нейтронной дифракции. Индексирование рентгенограммы феррита натрия при комнатной температуре показало, что все рефлексы относятся к орторомбической структуре (пространственная группа $Pn21a$) с параметрами элементарной ячейки $a = 5.6703(3) \text{ \AA}$, $b =$

$5.3806(3) \text{ \AA}$ и $c = 7.1347(4) \text{ \AA}$. Выполненный полнопрофильный анализ показал хорошую сходимость расчета и эксперимента, т.е. можно говорить о синтезе соединения NaFeO_2 в β -модификации.

В отсутствие добавок NaFeO_2 имеет смешанную ионно-электронную проводимость вследствие присутствия железа в разных степенях окисления. При температуре $\sim 700^\circ\text{C}$ ионная и электронная составляющие имеют близкие значения (Рис.1), однако электронная проводимость имеет значительно более высокую энергию активации по сравнению с ионной (соответственно 90.0 и $47.6 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$), быстро убывает при понижении температуры, и при 500°C ионная проводимость приблизительно на полтора порядка выше электронной.

В исследованном температурном интервале $300\text{--}700^\circ\text{C}$ феррит натрия сохраняет структуру орторомбической β -модификации и не испытывает полиморфных превращений. В соответствии с этим температурная зависимость ионной составляющей проводимости NaFeO_2 линейна.

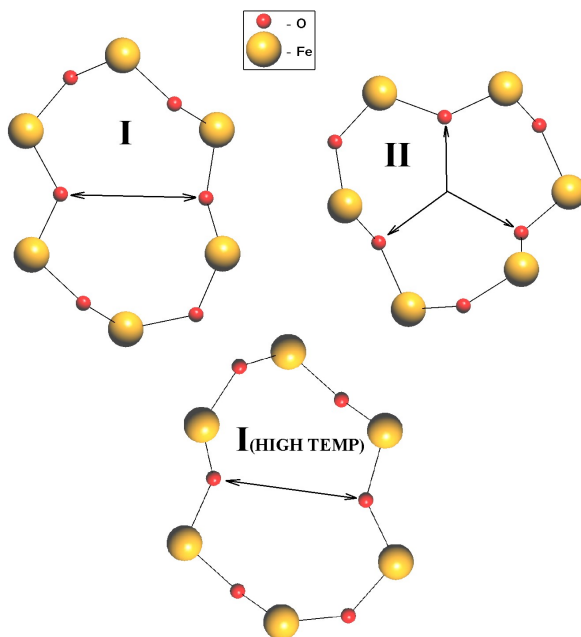
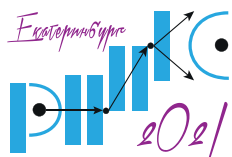


Рис. 2. Неэквивалентные окна в структуре β -фазы NaFeO_2 .

Показано, что кристаллическая решетка исследуемого соединения состоит из строительных блоков — тетраэдров FeO_4 . Они выстраиваются попарно в непрерывные ряды вдоль оси a , соединяясь между собой через вершинные кислороды. Вдоль оси c наблюдается чередование пар тетраэдров и пустое пространство, что приводит к формированию каналов вдоль направления b . Таким образом, в решетке присутствует одно из необходимых условий для возможной высокой катионной проводимости.

Были рассчитаны межатомные расстояния и $\langle \text{Me—O} \rangle$, степень искажения полиэдра (δ) и валентные суммы (V_{sum}) для NaFeO_2 . Показано, что каркас решетки является достаточно жестким образованием, состоящим из почти правильных тетраэдров с мини-



мальными искажениями ($\delta = 0.92 \times 10^{-4}$). При этом величина валентных сумм близка к идеальной валентности катиона. Значительно более искажены полиэдры (тетраэдры) NaO_4 . А несоответствие валентной связи натрия $V_{\text{Na}} = |V_{\text{sum}} - V_{\text{ideal}}| \sim 6\%$ указывает на слабость химической связи в пустотах решетки.

Для оценки возможности движения катионов натрия в β -фазе NaFeO_2 были построены карты проводимости с использованием комплекса программ TOPOS [1]. Анализ TOPOS обнаружил два неэквивалентных элементарных канала (тип I и тип II) в карте миграции Na^+ в β фаз NaFeO_2 . Эти каналы соответствуют двум неэквивалентным кармашным окнам и различаются по диаметру (Рис. 2).

В соответствии с геометрическим критерием $r_{\text{Na}} = 1.8 \text{ \AA}$ и $r_{\text{O}} = 0.6 \text{ \AA}$, $r_c \geq 2.0 \text{ \AA}$ учетом 15% деформации катионов и анионов миграция катионов Na^+ в каналах I-типа затруднена. Как следствие, при комнатной температуре катионы натрия способны перемещаться только по каналам II-типа, т.е. проводимость является одномерной и осуществляется по каналам в зигзагообразной форме.

С ростом температуры увеличиваются сечения обоих каналов проводимости, но сечение II канала достигает критерия проходимости только вблизи температур порядка и выше 930°C . Это означает, что в области температур, достигнутых нами, проводимость остается одномерной и поэтому скорость ее увеличения незначительна.

Следует заметить, что увеличению проводимости способствует и динамическая разупорядоченность натриевой подрешетки, на что указывает рост теплового фактора. Показано, что проводимость становится трехмерной после структурного фазового перехода ($> 950^\circ\text{C}$). Также нами были рассчитаны энергетические барьеры для низкотемпературной бета модификации NaFeO_2 .

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России по темам «Поток» (№АААА-А18-118020190112-8).

1. V. A. Blatov, Cryst. Rev. **10**, 249 (2004).

Секция 2.

Магнитные структуры и взаимодействия

МАГНИТНЫЕ СОСТОЯНИЯ И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ИНТЕРКАЛИРОВАННЫХ СОЕДИНЕНИЯХ Fe_xTiX_2 ($X = \text{S, Se}$)

Н. В. Баранов^{1,2}, Н. В. Селезнева², А. Ф. Губкин^{1,2}, Е. М. Широкалова²*

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

*E-mail: baranov@imp.uran.ru

В дихалькогенидах переходных (T) металлов TX_2 ($X = \text{халькоген}$) со слоистой кристаллической структурой типа NiAs металлические слои расположены между полностью заполненными слоями халькогена. Слабая связь ван-дер-ваальсового типа между трехслойными блоками $X-T-X$ позволяет расслаивать такие структуры и получать графеноподобные двумерные системы с уникальными физическими свойствами, но также дает возможность внедрять (интеркалировать) другие атомы или молекулы и тем самым существенно модифицировать свойства соединений [1]. Интеркаляция соединений TX_2 атомами $3d$ -переходного металла (M), имеющими не полностью заполненные электронные $3d$ -оболочки, позволяет получать в зависимости от типа и концентрации интеркалированных атомов, а также от типа матрицы TX_2 соединения с разными магнитными состояниями от спиновых и кластерных стекол до ферро- и антиферромагнетиков.

На поликристаллических образцах дихалькогенидов титана Fe_xTiX_2 ($X = \text{S, Se}$), интеркалированных железом, с целью выявления эволюции магнитных состояний при увеличении концентрации Fe и замещений в анионной подрешетке были проведены комплексные исследования с помощью рентгеновской и нейтронной дифракции, а также измерений намагниченности в стационарных и импульсных магнитных полях, теплоемкости и магнитосопротивления. Обнаружено, что в системе Fe_xTiS_2 с увеличением содержания Fe реализуются различные магнитные состояния, которые определяются не только концентрацией интеркалированных атомов, но и их распределением в катионных слоях. Состояния спинового и кластерного стекла наблюдаются при малых концентрациях Fe ($x < 0.25$), когда интеркалированные атомы Fe не упорядочены и случайно распределены в октаэдрических позициях между полностью заполненными слоями серы. При содержании железа $x \approx 0.25$ атомы Fe и вакансии упорядочиваются, формируя сверхструктуру, которая описывается пространственной группой $C12/m1$. В соединении $\text{Fe}_{0.25}\text{TiS}_2$, согласно данным магнитным измерений и магнитосопротивления, исходное состояние является антиферромагнитным (АФ) [2]. При увеличении концентрации Fe в Fe_xTiS_2 до $x = 0.33$ атомы Fe в катионных образуют треугольную сетку, что приводит к фрустрациям АФ и Ф взаимодействий и отсутствию дальнего магнитного порядка, что подтверждено нейтронографическими измерениями. Как показали измерения намагниченности и магнитосопротивления, соединение $\text{Fe}_{0.33}\text{TiS}_2$ проявляет поведение, характерное для кластерных стекол. В области концентраций $x \approx 0.45 - 0.5$ атомы Fe , расположенные между S-Ti-S сэндвичами образуют цепочки, что приводит к формированию моноклинной структуры, которая описывается пространственной группой $I12/m1$. Согласно данным нейтронографии в соединении $\text{Fe}_{0.5}\text{TiS}_2$ магнитные моменты Fe упорядочиваются антиферромагнитно ниже температуры Нееля $T_N \sim 140 \text{ K}$ [3,4]. Установлено, что соединения Fe_xTiS_2 , обладающие АФ упорядочением претерпевают индуцированные полем фазовые переходы в метастабильное высококоэр-

цитивное ферромагнитное (ФМ) состояние, которое сопровождается большим остаточным магнитосопротивлением. Необратимость АФ–Ф перехода в $\text{Fe}_{0.5}\text{TiS}_2$ под действием магнитного поля подтверждается нейтронографическими измерениями, выполненными в разных магнитных полях. При более высоких концентрациях Fe ($x > 0.5$) в соединениях Fe_xTiS_2 предполагается ферримагнитное упорядочение, которое является следствием частичного перемешивания атомов Fe и Ti в катионных слоях. Изменения магнитного состояния Fe_xTiS_2 с концентрацией Fe сопровождаются немонотонными зависимостями магнитосопротивления и коэрцитивной силы с максимальными абсолютными значениями в соединениях с АФ состоянием. Поскольку необычно высокие значения коэрцитивной силы (до 50 – 60 кЭ) при низких температурах наблюдаются в соединениях Fe_xTiS_2 , обладающих АФ упорядочением, можно предположить, что наряду с наличием значительного орбитального момента на интеркалированных атомах Fe [5] на гистерезисные свойства этих соединений значительное влияние оказывает внутреннее обменное смешение.

На примере системы $\text{Fe}_{0.5}\text{TiS}_{2-y}\text{Se}_y$ с замещением по анионной подрешетке показано что увеличение содержания селена в антиферромагнитных (АФ) соединениях приводит к уменьшению периода магнитной структуры [4], а также к переходу от спин-флип к спин-флоп переходам и к десятикратному увеличению критического поля перехода [6]. Такие изменения в процессах намагничивания от типа Изинга к типу Гейзенберга связаны с уменьшением энергии магнитокристаллической анизотропии из-за увеличения межатомных расстояний, вызванного замещением.

Результаты комплексного исследования железосодержащих халькогенидных соединений Fe_xTiX_2 ($X = \text{S}, \text{Se}$) со слоистой структурой типа NiAs показывают, что их магнитные и транспортные свойства проявляют сильную зависимость от замещений как в катионной, так и в анионной подрешетках, а также от характера распределения атомов 3d-металлов разного сорта в слоях и между слоями.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (тема № АААА-А18118020290129–5 и проект № FEUZ-2020-0054).

1. A. B. Kaul, J. Mater. Res. **29**, 348 (2014).
2. N.V. Selezneva et al., J. Magn. Magn. Mater. **519**, 167480 (2021).
3. N.V. Baranov et al., J. Phys.: Condens. Matter. **25**, 066004 (2013).
4. A.F. Gubkin et al., J. Alloys Comp. **616**, 148 (2014).
5. A. Yamasaki et al., Surface Rev. Lett. **9**, 961 (2002).
6. N.V. Baranov et al., Phys. Rev. B **100**, 024430 (2019).

ИССЛЕДОВАНИЯ СПИНОВОЙ ДИНАМИКИ В ЗАМЕЩЕННЫХ МУЛЬТИФЕРРОИКАХ $(\text{Nd,Tb})\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ МЕТОДОМ НЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ

И. В. Голосовский^{1}, А. А. Mukhin², V. Skumryev³, M. Boehm⁴, W. Schmidt⁴, L.-P. Regnault^{4,5},
И. А. Гудим⁶*

¹НИЦ «Курчатовский институт», Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова, Гатчина, Россия

²Институт общей физики им. Прохорова, РАН, Москва, Россия

³Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats, Barcelona, Spain

⁴Institut Laue Langevin, Grenoble, France

⁵Université Grenoble Alpes, Grenoble, France

⁶Институт физики им. Киренского, СО РАН, Красноярск, Россия

*E-mail: golosovsky_iv@pnpi.nrcki.ru

Спектры неупругого рассеяния нейтронов, измеренные на спектрометрах ThALES и IN12 (ИЛЛ) в ферроборатах $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{Nd}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ и $\text{TbFe}_3(\text{BO}_3)_4$, показывают сложную картину магнитных возбуждений вплоть до 6 мэВ. При переходе от магнитной структуры «легкая плоскость» ($\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$) к магнитной структуре «легкая ось» ($\text{TbFe}_3(\text{BO}_3)_4$) наблюдается сложная эволюция спектров магнитных возбуждений. Изинговский характер иона Tb^{3+} делает невозможной прецессию магнитного момента, поэтому вклад Tb сводится к увеличению эффективной магнитной анизотропии, что стабилизирует состояние «легкая ось».

Дисперсия спиновых волн в $\text{Nd}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ и $\text{TbFe}_3(\text{BO}_3)_4$ с близкими магнитными структурами, но с разной кристаллической симметрией, пространственные группы $R32$ и $R3_121$ соответственно, сильно различается. Приложение магнитного поля, в состоянии «легкая ось», перпендикулярного спинам, приводит к расщеплению вырожденных низкоэнергетических ветвей Fe и Nd, и к возникновению «сломанной» спиновой структуры.

В рамках стандартного подхода спин-волновой теории установлена иерархия различных взаимодействий и получены их величины. Установлено, что низколежащие ветви магнитных подсистем Fe и Nd, как в чистом Nd, так и в соединениях, легированном Tb, определяются близкими значениями обменных параметров Fe–Fe и Nd–Fe, величина которых медленно падает с увеличением межатомных расстояний, однако остается конечной на расстояниях вплоть до 7 Å.

Работа поддержана грантом РФФИ 20-02-00109а.

1. I. V. Golosovsky et al., Phys. Rev. B **103**, 214412 (2021).

АНАЛИЗ НЕСОИЗМЕРИМЫХ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР В РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ИНТЕРМЕТАЛЛИДАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОРМАЛИЗМА ГРУПП МАГНИТНОЙ СУПЕРСИММЕТРИИ

А. Ф. Губкин^{1,2*}, Л. Келлер³, А. А. Ваулин¹

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

³Институт Пауля Шеррера, Виллиген, Швейцария

*E-mail: agubkin@imp.uran.ru

Магнитные фазовые переходы играют ключевую роль в понимании фундаментальных свойств магнитных материалов и определяют возможность их использования для решения прикладных задач. Установление сложных несоизмеримых магнитных структур в бинарных редкоземельных интерметаллидах имеет принципиальное значение для изучения наблюдаемых в них магнитных фазовых переходов. В частности, соединения Tb₃Ni и Ho₇Rh₃ обладают сложными магнитными фазовыми диаграммами и демонстрируют несоизмеримые магнитные структуры в области низких температур. Установление и математическое описание подобных магнитных структур при помощи экспериментов по упругому рассеянию нейтронов и анализа экспериментальных данных в рамках формализма Шубниковских групп невозможно [1,2]. С другой стороны, анализ экспериментальных данных в рамках представленного подхода [2,3] либо требует уточнения слишком большого числа параметров в случае Tb₃Ni либо не является полным в случае Ho₇Rh₃. В данной работе для установления сложных несоизмеримых магнитных структур Tb₃Ni и Ho₇Rh₃ были проведены нейтрон-дифракционные эксперименты в широком интервале температур. Анализ данных нейтронной дифракции осуществлен при помощи формализма групп магнитной суперсимметрии, объединяющего в себе сильные стороны представленного подхода и метода Шубниковских групп.

Нейтрон-дифракционный эксперимент на порошковом образце Tb₃Ni (пространственная группа *Pnma*) показал, что при охлаждении ниже температуры Нееля $T_N = 62$ K происходит магнитный фазовый переход в несоизмеримую антиферромагнитную структуру с волновым вектором $\mathbf{k} = [1/2 + \delta, \mu, 0]$, где $\delta = 0.006 \pm 0.001$ и $\mu = 0.299 \pm 0.001$. Существует два физически неприводимых представления *mV1* и *mV2* группы волнового вектора G_k , полученные из малых неприводимых представлений с размерностью $N = 1$. Для каждого неприводимого представления существует только одна группа магнитной суперсимметрии, которую можно записать по алгоритму, изложенному в работе [4]. Таким образом, было показано, что неприводимому представлению *mV1* соответствует группа магнитной суперсимметрии $P112_1/a1'(ab0)00s$ и неприводимому представлению *mV2* соответствует группа $P112_1/a1'(ab0)0ss$. Уточнение модели магнитной структуры по методу Ритвельда показало, что группа $P112_1/a1'(ab0)0ss$ лучше описывает экспериментальные данные [5]. Использование расширенной группы волнового вектора G_{k-k} вместо малой группы волнового вектора, как это предполагается в представленном подходе по методу Е. Берто, позволяет уменьшить количество уточняемых переменных в 2 раза. Визуализация несоизмеримой магнитной структуры Tb₃Ni приведена на Рис. 1а.

Нейтрон-дифракционный эксперимент на порошковом образце Ho₇Rh₃ (пространственная группа *P63mc*) показал, что при охлаждении ниже температуры Нееля $T_N =$

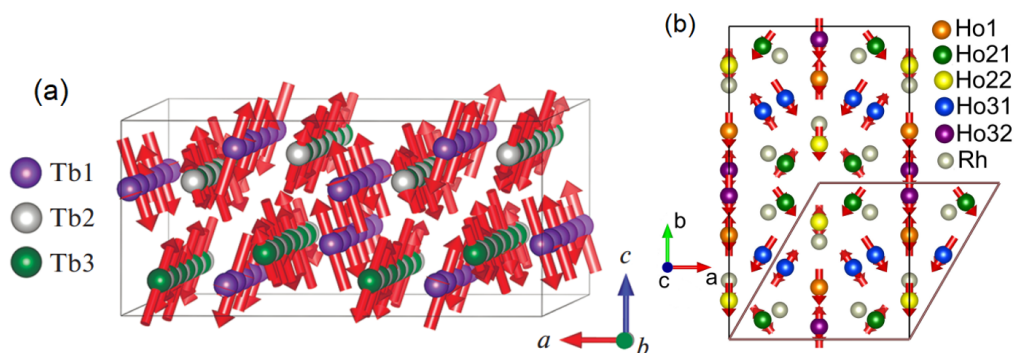


Рис. 1. Визуализация уточненных моделей несоизмеримой магнитной структуры для соединений (a) Tb_3Ni и (b) Ho_7Rh_3 .

32 K [6] происходит магнитный фазовый переход в несоизмеримую антиферромагнитную структуру с волновым вектором $\mathbf{k} = [0, 0, \mu]$, где $\mu = 0.38$. Ввиду отсутствия центральной симметрии в пространственной группе $P63mc$, малая группа волнового вектора $G_{\mathbf{k}}$ полностью совпадает с расширенной группой волнового вектора $G_{\mathbf{k}, -\mathbf{k}}$. Существует шесть физически неприводимых представлений группы волнового вектора: $m\text{DT}1$, $m\text{DT}2$, $m\text{DT}3$, $m\text{DT}4$, $m\text{DT}5$, $m\text{DT}6$, среди которых только представление $m\text{DT}6$ описывает магнитную структуру соединений R_7Rh_3 . Данное неприводимое представление построено на матрицах малых неприводимых представлений с размерностью $N = 2$ и, как было показано в работе [4], для него могут существовать несколько различных групп магнитной суперсимметрии, соответствующие принципиально разным моделям магнитной структуры. В частности, для $m\text{DT}6$ существует четыре группы суперсимметрии $P6_31'(00g)hs$, $Cmc2_11'(00g)s0ss$, $Cmc2_11'(00g)0sss$ и $P2_11'(0b0)ss$, соответствующие гексагональной, орторомбической и моноклинной симметрии, соответственно. Уточнение по методу Ритвельда показало, что наилучшее описание экспериментального профиля нейтронограммы может быть получено в рамках орторомбической группы магнитной суперсимметрии $Cmc2_11'(00g)0sss$. Визуализация несоизмеримой магнитной структуры Ho_7Rh_3 приведена на Рис. 1b.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 20-32-90047.

1. Н.В. Белов, Н.Н. Неронова, Т.С. Смирнова, 1651 шубниковская группа. В сб. Труды Ин-та Кристаллографии АН СССР (1955).
2. Ю.А. Изюмов, В.Е. Найш, Р.П. Озеров Нейтронография магнетиков. М.: Атомиздат. (1981).
3. E.F. Bertaut, Acta Cryst. **A24**, 217 (1968).
4. J.M. Perez-Mato et al., J. Phys.: Condens. Matter. **24**, 163201 (2012).
5. A.F. Gubkin et al., Phys. Rev. B **97**, 134425 (2018).
6. T. Tsutaoka et al., J. All. Comp. **654**, 126–132 (2016).

НОВЫЕ МАГНИТНЫЕ СОСТОЯНИЯ В ГЕОМЕТРИЧЕСКИ ФРУСТРИРОВАННЫХ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ: НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Д. П. Козленко

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

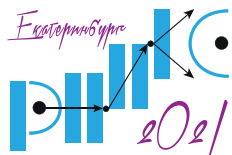
E-mail: denk@nf.jinr.ru

Исследования геометрически фрустрированных магнитных материалов являются одним из наиболее актуальных направлений в области физики конденсированного состояния и материаловедения, поскольку в таких системах обнаружено существование новых магнитных состояний с необычными свойствами и физических явлений. Среди них — квантовые критические явления, новые топологические возбуждения и типы магнитного порядка, магнитоэлектрические эффекты и др.

В докладе представлены результаты систематического исследования особенностей формирования магнитных и структурных состояний в низкоразмерных ван-дер-ваальсовских магнетиках CrBr_3 , FePS_3 и сложных оксидах кобальта $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$, Co_3O_4 с геометрически фрустрированными магнитными решетками при вариации термодинамических параметров (температуры в диапазоне 10 – 300 K и давления в диапазоне 0 – 10 ГПа) методом нейтронной дифракции.

В соединениях CrBr_3 и FePS_3 магнитные атомы образуют квазидвумерные слабозаимодействующие посредством ван-дер-ваальсовых сил слои с шестиугольными ячейками, симметрия которых аналогична слоям графена. Недавно была продемонстрирована возможность существования магнитного упорядочения в этих материалах в пределе до атомного монослоя при достаточно высоких температурах. В системе CrBr_3 обнаружено аномальное поведение структурных характеристик в области температуры Кюри и отрицательное тепловое расширение объема кристаллической решетки и квазидвумерных ван-дер-ваальсовских слоев в области температур $T < T_C$ [1]. При воздействии высокого давления наблюдалось уменьшение упорядоченного магнитного момента ферромагнитного (ФМ) состояния. В системе FePS_3 обнаружен изоструктурный фазовый переход в новую моноклинную модификацию при $P = 1$ ГПа, сопровождающийся значительным изменением параметров решетки. Структурная перестройка приводит к изменению характера АФМ упорядочения с квазидвумерного (вектор распространения $\mathbf{k} = (011/2)$) на трехмерный ($\mathbf{k} = (010)$) [2].

В системе $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ наличие чередующихся октаэдров CoO_6 , содержащих ионы Co^{3+} в низкоспиновом LS состоянии ($S = 0$), и тригональных призм CoO_6 , содержащих ионы Co^{3+} в высокоспиновом HS состоянии ($S = 2$), приводит к формированию квазидвумерных спин-цепочечных магнитных структур на фрустрированной магнитной треугольной решетке. При нормальном давлении в $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ возникает антиферромагнитное (АФМ) несоразмерное состояние волны спиновой плотности с вектором распространения $\mathbf{q}_{\text{sdw}} = (0, 0, 1.01)$ и температурой Нееля $T_N = 25$ K. Также, в области низких температур наблюдалось появление неупорядоченной магнитной фазы, ближний порядок которой характеризуется магнитной корреляционной длиной 128 Å. При воздействии высокого давления выше 2 ГПа наблюдалось подавление несоразмерной



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

АФМ фазы и появление новой соразмерной АФМ фазы с вектором распространения $\mathbf{q}_{caf} = (0.5, -0.5, 1)$ и $T_{NC} = 26$ K [3]. В рамках существующих теоретических моделей проанализирована роль внутрицепочечных и междоузельных магнитных взаимодействий в механизме наблюдаемого магнитного фазового перехода.

В шпинели Co_3O_4 наличие пространственного упорядочения ионов Co^{3+} в низкоспиновом LS состоянии ($S = 0$) с октаэдрическим кислородным окружением и Co^{2+} в высокоспиновом HS состоянии ($S = 3/2$) с тетраэдрическим кислородным окружением приводит к формированию фрустрированной магнитной решетки типа алмаза, на которой возможно появление уникального состояния спиновой спиральной жидкости. При нормальном давлении наблюдалось формирование сложного магнитного состояния, включающего сосуществование коллинеарной АФМ фазы и разупорядоченного магнитного состояния, предположительно типа спиновой спиральной жидкости [4]. При повышении давления до 9 ГПа наблюдалось подавление разупорядоченной магнитной фазы и значительное увеличение T_N для АФМ фазы в 1.5 раза. Выявлена важная роль сверхобменных взаимодействий посредством двух анионов типа А–О–О–А в формировании магнитных свойств.

1. D.P. Kozlenko et al., NPJ Quantum materials 6: 19 (2021).
2. M.J. Coak et al., Physical Review X **11**, 011024 (2021).
3. D. P. Kozlenko et al., Physical Review B **98**, 134435 (2018).
4. N.O. Golosova et al., Journal of Magnetism and Magnetic Materials **508**, 165360 (2020).

МАГНЕТИЗМ ДВУМЕРНЫХ СЛОИСТЫХ ОКСИДОВ С СОТООБРАЗНОЙ СВЕРХСТРУКТУРОЙ МАГНИТНЫХ ИОНОВ

А. И. Курбаков, А. Н. Коршунов*

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина,
Россия

E-mail: kurbakov_ai@npni.nrcki.ru

Сейчас наблюдается повышенный интерес исследователей к предсказанию, обнаружению и изучению необычных магнитных явлений и, в частности, к поиску новых экзотических магнитных состояний вещества. Физика низкоразмерного магнетизма представляет собой огромное поле для современных исследований, которые возможны благодаря применению передовых экспериментальных и теоретических методов, успешно дополняющих друг друга. В отличие от треугольной решетки или решетки КагOME, где присутствуют геометрические фрустрации, в сотообразной геометрии фрустрации возникают за счет конкуренции ферромагнитных (ФМ) и/или антиферромагнитных (АФМ) взаимодействий с соседями на разных расстояниях, соотношения между которыми определяют конечное спиновое состояние. Теоретические модели пока не позволяют заранее предсказывать тип и температуру магнитного упорядочения соединения даже при детально известной атомной структуре, поэтому решающая роль здесь остаётся за прямым экспериментом по установлению спинового упорядочения. Связано это с тем, что даже самые малые изменения в кристаллической структуре могут приводить к радикальным изменениям в магнитных свойствах вещества.

Изучены особенности формирования дальнего магнитного порядка в ряде новых слоистых квазидвумерных магнетиков $A_3M_2SbO_6$ (A — щелочной, M — $3d$ -переходный металл) с сотообразной сверхструктурой магнитных слоев. В результате полнопрофильного анализа данных дифракции нейтронов высокого разрешения и синхротронного излучения установлено, что кристаллическая структура соединений $Li_3Ni_2SbO_6$, $Li_3Co_2SbO_6$ и $Na_3Co_2SbO_6$ описывается в рамках моноклинной пространственной группы $C2/m$, а не тригональной $P3_112$, как предполагалось ранее. Определены детали кристаллических структур.

Обнаружены АФМ фазовые переходы и получены значения критических температур в $Li_3Ni_2SbO_6$, $Li_3Co_2SbO_6$, и $Na_3Co_2SbO_6$ по появлению дополнительных магнитных отражений на низкотемпературных нейтронограммах. Установлено, что тип спинового упорядочения в слоистых магнетиках с сотообразной решеткой крайне чувствителен к исходному атомному составу. В результате полнопрофильного анализа нейтронограмм были предложены модели спиновой структуры типа зигзаг для $Li_3Ni_2SbO_6$ [1] и $Na_3Co_2SbO_6$ [2,3], но с существенными отличиями в типе зигзага. Основное состояние магнитной подсистемы в $Na_3Co_2SbO_6$ описывается суперпозицией двух векторов распространения $\mathbf{k}_1 = (1/2, 1/2, 0)$ и $\mathbf{k}_2 = (1, 0, 0)$ и соответствует сложной неколлинеарной магнитной структуре. Для соединения $Li_3Co_2SbO_6$ [2] спиновая структура не является зигзагообразной и может быть представлена как ферромагнитные сотообразные слои, антиферромагнитным образом связанные друг с другом, что наблюдается впервые для сотообразных соединений. Установлено, что преимущественное направление магнитных моментов в упорядоченном состоянии существенным образом зависит от

типа магнитного иона. В исследуемых кобальтатах спины Co^{2+} демонстрируют плоскостную анизотропию и лежат в плоскости ab . С другой стороны, для никелевых соединений характерно упорядочение с магнитными моментами Ni^{2+} , которые направлены практически перпендикулярно сотообразным слоям.

Прослежена и совместно проанализирована температурная эволюция данных нейтронной дифракции, магнитной восприимчивости и теплоемкости.

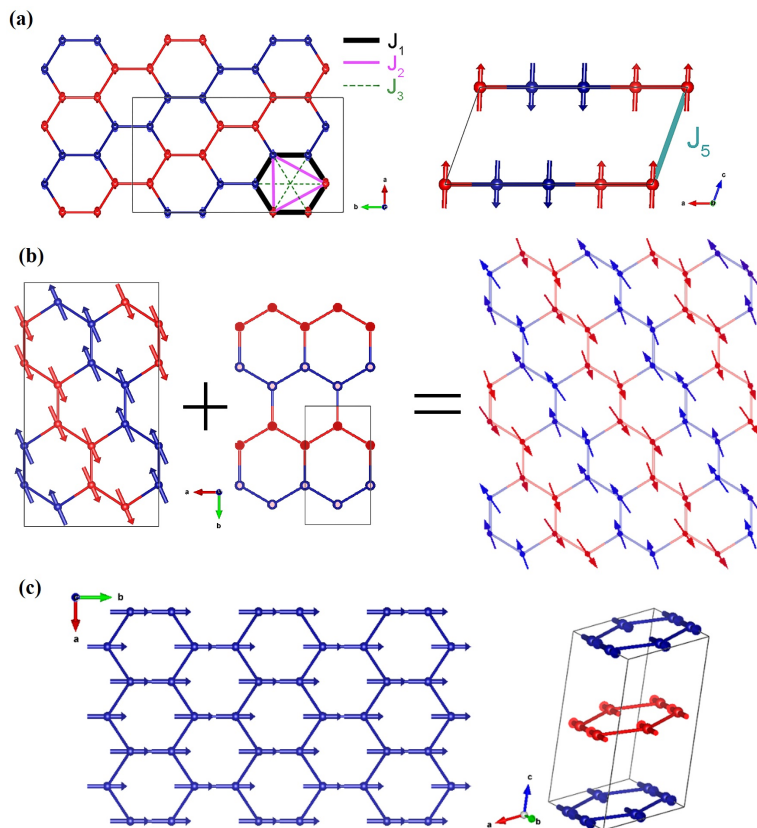


Рис. 1. Модели магнитной структуры для ряда соединений $A_3M_2\text{SbO}_6$. (a) — Спиновая структура типа зигзаг для $\text{Li}_3\text{Ni}_2\text{SbO}_6$ (противоположные направления спинов обозначены красным и синим цветом соответственно) и схема обменных магнитных взаимодействий $J_1 - J_2 - J_3$ в слое и J_5 между соседними магнитоактивными слоями. (b) — Неколлинinearная зигзагообразная спиновая структура для $\text{Na}_3\text{Co}_2\text{SbO}_6$. (c) — Ферромагнитное сотообразное упорядочение с антиферромагнитным взаимодействием между соседними слоями для $\text{Li}_3\text{Co}_2\text{SbO}_6$.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-12-00375).

1. A.I. Kurbakov et al., Phys. Rev. B. **96**, 024417 (2017).
2. M.I. Stratan et al. New J. Chem. **43**, 13545 (2019).
3. А.И. Курбаков, А.Н. Коршунов, А.Н. Пирогов, Е.Г. Герасимов, Н.В. Мушников, Кристаллография **66**, 271 (2021).

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДЗЯЛОШИНСКОГО-МОРИИ В СИНТЕТИЧЕСКИХ ФЕРРИМАГНЕТИКАХ Pt/Co/Ir/Co/Pt

А. И. Безверхний, Р. Б. Моргун*

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

*E-mail: bezverhnii.alex@gmail.com

Синтетические ферромагнетики (СФ) с перпендикулярной магнитной анизотропией являются основой для устройств антиферромагнитной спинтроники [1]. Синтетические ферримагнетики состоят из двух сверхтонких ферромагнитных слоёв разной толщины (~ 1 нм), разделенных слоем немагнитной проводящей прослойки (~ 1 нм). Между слоями ферромагнетика осуществляется обменное взаимодействие Ruderman–Kittel–Kasuya–Yosida (RKKY) через электроны проводимости. Мощным инструментом для изучения спин-волновой динамики устройств спинтроники является Мандельштам–Бриллюэновская спектроскопия (МБС). Эта методика позволила впервые обнаружить антиферромагнитное обменное взаимодействие RKKY между слоями Fe в многослойных гетероструктурах Fe/Au/Fe и Fe/Cr/Fe [2] и осцилляционную зависимость энергии J_{12} этого взаимодействия от толщины, разделяющей ферромагнитные слои прослойки [3]. Частоты пиков на спектрах МБС соответствуют частотам фононов и магнонов (спиновых волн). Разница частот пиков Стокса и анти-Стокса Δf спиновых волн зависит от антисимметричного обменного взаимодействия Дзялошинского-Мория (ДМ) [4], дипольного взаимодействия и разницы констант поверхностной анизотропии ферромагнитных слоёв [5]. Для использования МБС в качестве инструмента прямого измерения энергии взаимодействия ДМ нужно учитывать все источники невязности спиновых волн. На границах разделов Pt/Co и Pt/Ir возникает взаимодействие ДМ [6, 7] и мы ожидаем, что в СФ Pt/Co/Ir/Co/Pt взаимодействие ДМ тоже присутствует. Целью нашей работы было изучение спиновой динамики методом МБС в СФ Pt/Co/Ir/Co/Pt, в которых сочетается антиферромагнитное RKKY взаимодействие и взаимодействие ДМ на интерфейсах Pt/Co и Pt/Ir.

Серия исследуемых образцов $\text{SiO}_2/\text{Pt}(3.2 \text{ нм})/\text{Co}(1.1 \text{ нм})/\text{Ir}(1.4 \text{ нм})/\text{Co}(\text{tCo})/\text{Pt}(3.2 \text{ нм})$ состоит из четырёх штук, которые отличаются толщиной верхнего слоя Co $t_{\text{Co}} = 0.6 \text{ нм}, 0.7 \text{ нм}, 0.8 \text{ нм}, 1.0 \text{ нм}$.

На спектрах МБС образцов Pt/Co/Ir/Co/Pt были обнаружены одиночные и двойные пики спиновых волн (Рис. 1а и 1б). Два пика Стокса и анти-Стокса спиновых волн возникают при наличии акустической и оптической мод. Оптическая мода наблюдается при антиферромагнитном взаимодействии RKKY между ферромагнитными слоями [2]. Вклад поверхностной анизотропии в разницу частот Δf пиков спиновых волн составляет $0.47 - 2.27 \text{ МГц}$. Этот сдвиг пренебрежимо мал по сравнению с наблюдаемой в эксперименте разницей частот Δf $1 - 3.8 \text{ ГГц}$. Таким образом, Δf вызвано в основном взаимодействием ДМ с плотностью энергии $D = \Delta f \pi M_s / \gamma k$, где $M_s = 1300 \text{ ед}/\text{см}^3$ намагниченность насыщения слоёв Co, $\gamma = 1.9 \cdot 10^7 \text{ Гц}/\text{Ое}$ гиромагнитное отношение Co, k — волновой вектор спиновых волн. Зависимость значений D от толщины верхнего слоя Co показана на Рис. 2. Измеренные значения D по порядку величины совпадают со значениями, для родственных гетероструктур с одним слоем Co [8]. Из Рис. 2 видно, что с увеличением толщины верхнего слоя Co, величина D уменьшается линейно, как

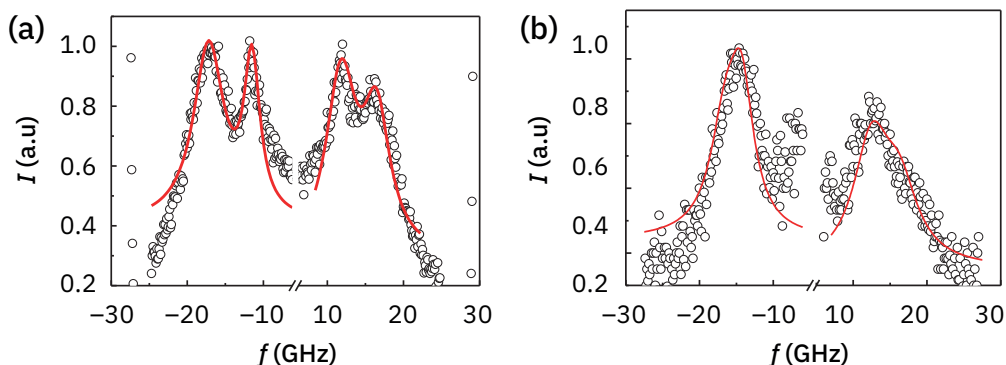


Рис. 1. Спектры МБС записанные в поле $H_{IP} = 8$ кОе, направленном в плоскости образца при значении проекции волнового вектора лазерного луча на поверхность образца $k = 11 \text{ } \mu\text{m}^{-1}$ для образцов с (a) $t_{Co} = 0.6 \text{ nm}$, (b) $t_{Co} = 0.7 \text{ nm}$. Сплошные линии — аппроксимации функциями Лоренца.

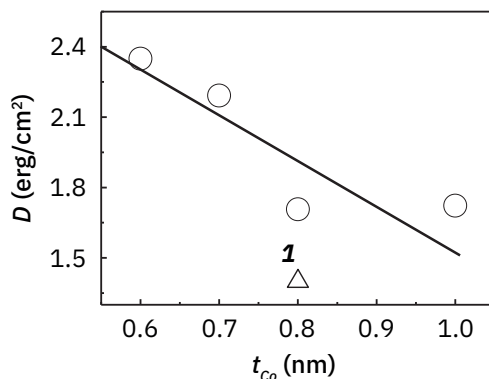


Рис. 2. Зависимость плотности взаимодействия ДМ от толщины верхнего слоя Со в СФ Pt/Co/Ir/Co/Pt. Точка 1 — значение D для гетероструктуры Pt/Co(0.8 nm)/Ir [8].

в случае одиночной плёнки Со [7]. Качественно этот вывод вполне ожидаем, как для одиночных, так и для многослойных пленок.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для ведущих научных школ 2644.2020.2. Авторы благодарны профессору S. Mangin за предоставленные образцы и плодотворные дискуссии.

1. A. Fert, F. Nguyen Van Dau, C. R. Physique **20**, 817 (2019).
2. J. Barnas, P. Grünberg, J. Magn. Magn. Mat. **82**, 186 (1986).
3. Y. Roussigné, F. Ganot, C. Dugautier, P. Moch. Phys. Rev. B **52**, 350 (1995).
4. J. Cho, N.-H. Kim, S. Lee, et al., Nature Communications **6**, 7635 (2015).
5. S.M. Chérif, Y. Roussigné, P. Moch. J. Appl. Phys. **98**, 063905 (2005).
6. S.-G. Je, D.-H. Kim, S.-C. Yoo, et al., Phys. Rev. B **88**, 214401 (2013).
7. K. Shahbazi, J.-V. Kim, H. T. Nembach, et al., Phys. Rev. B. **99**, 094409 (2019).
8. S.M. Rezende, C. Chesman, M.A. Lucena, et al., J. Appl. Phys. **54**, 958 (1998)

СИНТЕЗ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ НАНОПРОВОДОВ РАЗНОГО ДИАМЕТРА И ДЛИНЫ

А. К. Боймурадова*, Н. А. Кулеш, В. О. Васьковский

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

*E-mail: arianaboimuradova@yandex.ru

Магнитные нанопровода представляют собой относительно новый класс магнитных наноструктур, свойства которых в значительной степени определяются их геометрией. Благодаря возможности тонкой настройки функциональных свойств путем прецизионного контроля диаметра и длины, а также создания структур модулированных по составу и диаметру, нанопровода представляют существенный интерес не только с точки зрения практического использования в области сенсорики, биотехнологий, магнитной памяти [1], но в качестве удобного объекта в фундаментальных исследованиях [2].

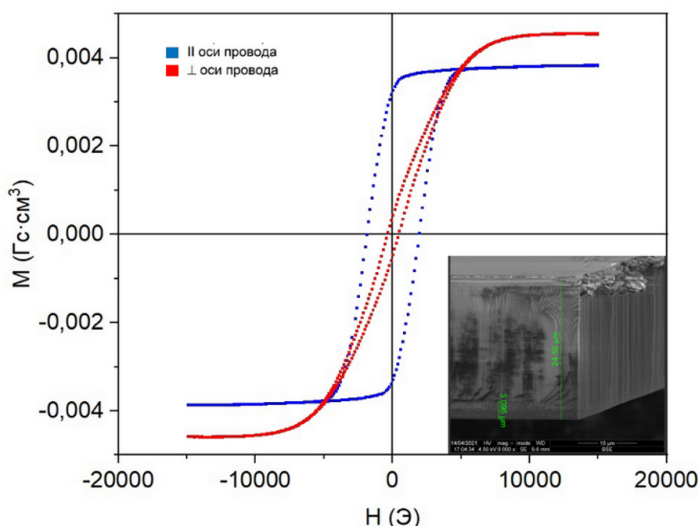


Рис. 1. Петли гистерезиса, измеренные на массиве нанопроводов Co длиной 3 мкм диаметром 35 нм. На вставке показано СЭМ изображение нанопроводов в матрице анодированного алюминия.

В данной работе нами была оптимизирована методика синтеза и исследованы зависимости магнитной анизотропии и гистерезисных свойств от геометрических размеров нанопроводов Co пригодных для дальнейшего использования в виде наполнителей полимерных композитов. В качестве базового метода было выбрано электролитическое осаждение магнитного материала в шаблоны пористого анодированного алюминия. Синтез шаблонов производился при комнатной температуре путем двухэтапного анодирования высокочистых фольг алюминия в водном растворе щавелевой кислоты. Для осаждения Co использовался электролит, содержащий соль CoSO_4 и борную кислоту. Осаждение кобальта в пористые шаблоны производилось без удаления барьерного слоя в режиме переменного напряжения с амплитудой 12 В и частотой 200 Гц.

В результате работы была реализована методика синтеза и получены цилиндрические нанопровода Co длиной от 3 до 5 мкм и диаметром от 35 до 85 нм. На Рис. 1 показан пример петель гистерезиса, измеренных вдоль и перпендикулярно оси нанопроводов. Результаты анализа гистерезисных свойств в сочетании с данными о морфологии нанопроводов, полученных методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), позволили выполнить анализ основных вкладов в магнитную анизотропию. Выполненные оценки показывают, что сглаживание петли гистерезиса, измеренной перпендикулярно оси проводов, в области насыщения может быть обусловлено дисперсией их длины. Увеличение отношения длины к диаметру привело к ожидаемому росту анизотропии формы нанопроводов с насыщением, однако одновременно происходил рост собственного размагничивающего поля массива, что отрицательно сказывалось на коэрцитивной силе и остаточной намагниченности.

Анализ образцов будет продолжен на следующем этапе работы, подразумевающим растворение шаблона и перевода нанопроводов в раствор для дальнейшего использования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ № 18-72-10044П.

1. M. Staão, O. Fruchart, Handbook of Magnetic Materials **27**, 155—267 (2018).
2. A.K. Wanekaya, W. Chen, N.V. Myung, A. Mulchandani, Electroanalysis **18**, 533—550 (2006).

КРИТИЧЕСКАЯ ТОЧКА НА КРИВОЙ МАГНИТНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ПЕРВОГО РОДА

Э. З. Валиев

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*E-mail: valiev@imp.uran.ru

Устный доклад

Проведен расчет диаграммы магнитного состояния в магнитном поле (H) для ферромагнетиков, с магнитным фазовым переходом первого рода (ФППР). Показано, что кривая ФППР оканчивается в критической точке (КТ): (H_{cr}, T_{cr}) , подобной критической точке жидкость–газ на плоскости T, P — давление. Получены аналитические выражения для термодинамических величин: магнитная восприимчивость, теплоемкость и др., которые аномально возрастают в окрестности КТ. Результаты расчета сравнены с имеющимися экспериментальными данными для ферромагнетика $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}$, который испытывает магнитный ФППР. Проанализировано изменение основных характеристик магнитокалорического эффекта этого ферромагнетика при приближении к КТ.

Расчет диаграммы магнитного состояния и термодинамических величин проведен с использованием одного из вариантов обменно-стрикционной модели ферромагнетика [1,2]. Термодинамический потенциал (ТП) этой модели имеет вид:

$$\Phi = NJs^2m^2 - NkT \ln Z(x) + \frac{K\omega^2}{2}. \quad (1)$$

Здесь $Z(x) = \sinh(x + x/2s)/\sinh(x/2s)$; $x = 2s(\mu H + sJm)/kT$, отношение энергии спина атома (s) во внешнем магнитном и молекулярном поле к тепловой энергии, m — приведенная намагниченность, ω — относительные изменения объема, $J = J_0 + \gamma\omega$ — обменный интеграл, γ — постоянная магнитоупругого взаимодействия.

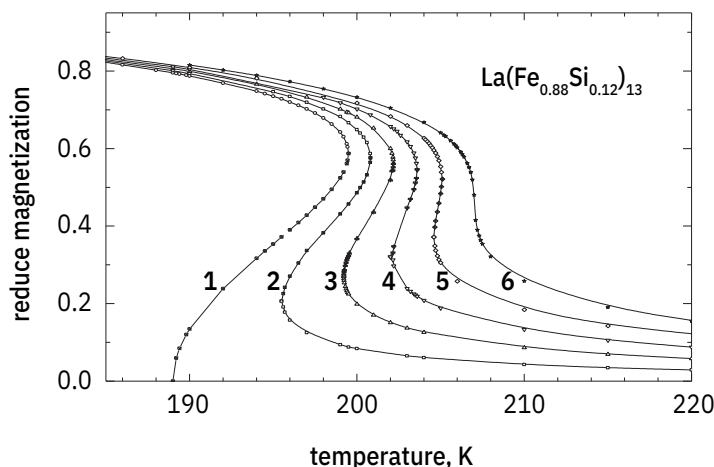


Рис. 1. Зависимость $m(T)$ при $H = \text{const.}$

Основной особенностью модели является зависимость обменного интеграла J от ω . Равновесные уравнения состояния для m и ω получены из условия минимума потенциала (1).

С помощью (1) рассчитаны параметры магнитной КР и температурные зависимости термодинамических величин для ферромагнетика $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}$. На Рис. 1 представлен результат расчета $m(T)$ при постоянных значениях магнитного поля.

Расчет проведен при численных значениях параметров для ферромагнетика $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}$ из [2]. Кривые 1, 2, 3, 4, 5, 6 соответствуют значениям магнитного поля 0, 1, 2, 3, 4 и 5.16 Т. Кривая 6 рассчитана при критическом значении $H_{cr} = 5.16$ Т. При $H > H_{cr}$ фазового перехода нет и происходит непрерывный переход из ферромагнитного в парамагнитное состояние.

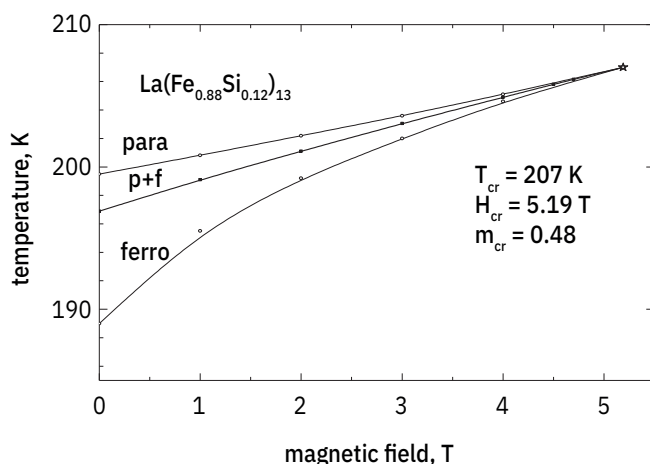


Рис. 2. Диаграмма состояния ферромагнетика $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}$ в окрестности КТ.

Тонкими сплошными линиями на Рис. 2 изображены спинодали парамагнитной и ферромагнитной фаз. Жирная сплошная — линия равновесных фазовых переходов 1 рода. Звездочка — положение критической точки. Тонким линиям на Рис. 2 соответствуют точки Рис. 1, в которых производная $\partial m / \partial T = \infty$.

Показано, что зависимость величины изотермического изменения энтропии от магнитного поля в окрестности фазовых переходов первого и второго рода сильно различаются. Также обсуждается аномальная температурная зависимость магнитной восприимчивости и теплоемкости и сделан вывод, что в окрестности КТ должно наблюдаться магнитное критическое рассеяние нейтронов. Угловая зависимость рассеянных нейтронов описывается формулой Орнштейна–Цернике.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Поток», № АААА-А18-11802011190112-8).

1. С.Р. Bean and D.S. Rotbell, Phys. Rev. **1**, 104, (1962).
2. Э.З. Валиев, ЖЭТФ **135**, 314, (2009).

ДИФРАКЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ БИНАРНОГО ИНТЕРМЕТАЛЛИДА Ho_7Rh_3

А. А. Ваулин^{1,*}, Н. В. Баранов^{1,2}, А. Ф. Прекул¹, Т. Тсутаока³, А. Ф. Губкин^{1,2}

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

³Graduate School of Education, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Japan

*E-mail: vaulin@imp.uran.ru

Бинарные редкоземельные интерметаллиды $R_7\text{Rh}_3$ с нецентросимметричной кристаллической решеткой привлекают внимание исследователей наличием сложных магнитных фазовых диаграмм, гигантским магнитотепловым и магниторезистивным эффектами. В частности, для соединения Ho_7Rh_3 было показано существование трех магнитных фазовых переходов при охлаждении ниже $T_N = 32$ K, $T_{t1} = 21$ K и $T_{t2} = 9$ K, а также гигантского магниторезистивного эффекта в области низких температур [1, 2]. В настоящий момент в научной литературе нет данных об изменениях магнитной структуры соединения Ho_7Rh_3 в области низких температур. В данной работе было проведено комплексное исследование низкотемпературного магнитного состояния Ho_7Rh_3 при помощи порошковой нейтронной дифракции и анализа нелинейной магнитной восприимчивости в переменном магнитном поле.

Анализ данных нейтронной дифракции (см. Рис. 1) и температурной зависимости гармоник $\chi'_{n\omega}(T)$ и $\chi''_{n\omega}(T)$ ($n = 1, 2, 3$) показал, что магнитный фазовый переход при температуре связан с возникновением несоизмеримой магнитной структуры типа поперечная спиновая волна, описываемой группой магнитной суперсимметрии $\text{Cmc}2_11'(00g)0\text{sss}$.

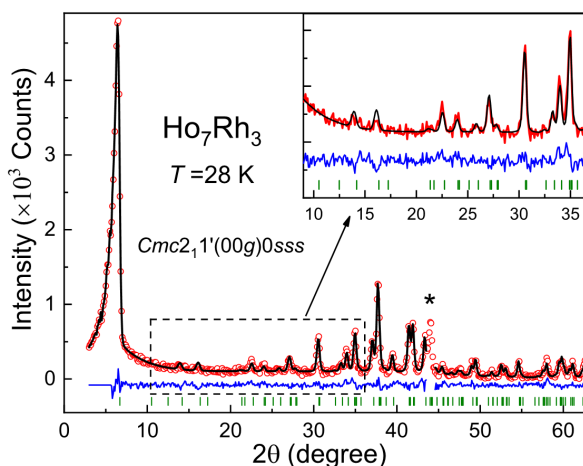


Рис. 1. Результат наилучшего уточнения нейтронной порошковой дифрактограммы, измеренной при $T = 28$ K с использованием модели магнитной группы суперсимметрии $\text{Cmc}2_11'(00g)0\text{sss}$.

При дальнейшем охлаждении ниже температуры $T_{f1} \sim 21$ К начинается «squaring-up» процесс, связанный с эволюцией спиновой волны по направлению к прямоугольной структуре типа «антифазных доменов». При $T < T_{f2} \sim 9$ К магнитная структура может быть описана одной из групп магнитной суперсимметрии $Cm'c2'_1(00g)ss0$ и $Cmc2'_11'(00g)0sss$, которые являются подгруппами с индексом $i = 2$ для родительской группы $Cmc2'_11'(00g)0sss$ и разрешает появление спонтанной намагниченности в базисной плоскости гексагональной структуры Ho_7Rh_3 при сохранении несоизмеримого характера.

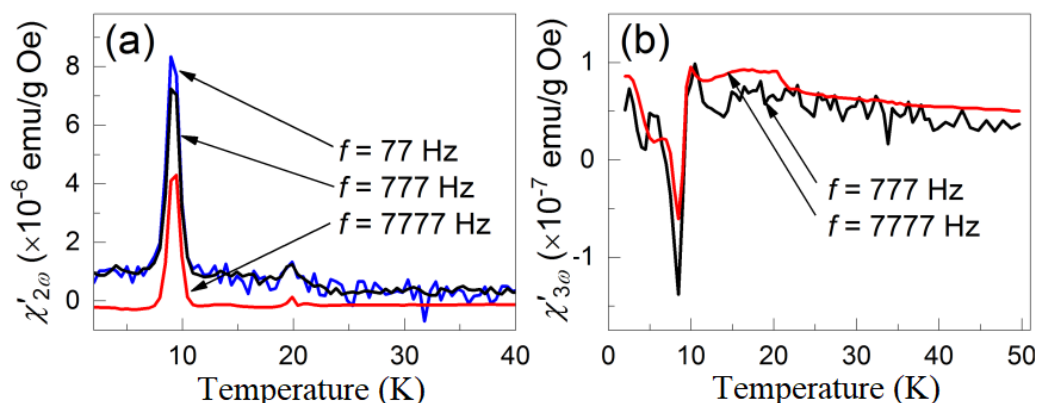


Рис. 2. Температурная зависимость реальных компонент $\chi'_{n\omega}(T)$ ($n = 2, 3$) (а, б) гармоник магнитной восприимчивости при различных частотах осциллирующего магнитного поля.

Измерения нелинейной АС восприимчивости показали, что изменения магнитной структуры при охлаждении ниже T_{f1} и появление спонтанной намагниченности в образце сопровождаются ярко выраженными аномалиями на температурных зависимостях 2-й и 3-й гармоник АС восприимчивости (Рис. 2), по-видимому, вследствие понижения симметрии магнитной подсистемы в связи с потерей операции инверсии времени $\{1'|0001/2\}$.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-32-90047 и госзадания Минобрнауки (темы «Поток», № ААААА18-118020190112-8 и «Сплавы», № АААА-А19-119070890020-3).

1. T. Tsutaoka et al, Physica B **327**, 352–356 (2003).
2. T. Tsutaoka et al, Journal of Alloys and Compounds **654**, 126–132 (2016).

МАГНИТНЫЕ СТРУКТУРЫ СОЕДИНЕНИЙ $\text{Li}(\text{Ni},\text{Co})\text{PO}_4$

М. А. Сёмкин^{1,2*}, Н. В. Урсова^{2,3}, А. Хосер⁴, Е. П. Попов⁵, А. И. Бескровный⁵,
А. Н. Пирогов^{1,2}

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

³Институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

⁴HZB, Берлин, Германия

⁵Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*E-mail: semkin@imp.uran.ru

Соединения на основе $\text{Li}(\text{Ni},\text{Co})\text{PO}_4$ обладают рядом магнитных фазовых переходов (МФП): порядок-порядок и порядок-беспорядок. В LiNiPO_4 МФП из антиферромагнитной (АФМ) структуры в парамагнитное состояние, происходит через промежуточную несоизмеримую АФМ фазу (поперечная спиновая волна с вектором распространения вдоль оси y) при температуре $T_{C-IC} = 20.8$ К [1]. Дальнейшее увеличение температуры до $T_N = 21.8$ К индуцирует переход в парамагнитное состояние. Основное состояние характеризуется АФМ упорядочением магнитных моментов никеля вдоль оси z ($\mu_z = 2.2(2) \mu_B$) и оси x ($\mu_x = 0.3(1) \mu_B$) [1]. В соединении LiCoPO_4 существует только переход из соизмеримой фазы с АФМ порядком (магнитные моменты кобальта ориентированы вдоль оси y ($\mu_y = 3.5 \mu_B$) и оси z ($\mu_z = 0.4 \mu_B$)) в парамагнитное состояние при температуре 21.6 К [2]. Близость значений температур МФП в этих соединениях формирует фундаментальный интерес изучения физических свойств смешанных составов $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{PO}_4$. Методом упругого когерентного рассеяния нейтронов исследованы магнитные структуры соединений $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{PO}_4$ с $x = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ и 0.5 в диапазоне температур от 5 К до 25 К, с учетом различных моделей взаимного распределения ионов никеля и кобальта в кристаллической структуре. Нейтронографические измерения $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{PO}_4$ были выполнены на времяпролетной нейтронной установке среднего разрешения ДРВ (дифракция в реальном времени), смонтированной на реакторе ИБР-2М Объединённого института ядерных исследований (г. Дубна, Россия) [3] и на порошковом дифрактометре высокого разрешения E9 FIREPOD (с постоянной длиной волны $\lambda = 1.7982(1) \text{ \AA}$) смонтированным на горизонтальном канале реактора BER-II Берлинского центра материалов и энергии имени Гельмгольца (г. Берлин, Германия) [4].

Кристаллическая структура $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{PO}_4$ описывается орторомбической структурой оливина (пространственная группа $Pnma$). Ионы Li занимают позицию 4a с координатами (0; 0; 0), ионы Ni, Co и P занимают позиции 4c (x ; 0.25; z), а ионы O расположены в двух позициях 4 и позиции 8d (x ; y ; z). Для описания магнитных структур соединений был проведен симметричный анализ базисных функций с волновым вектором $k = 0$. Наилучшее описание нейтронограмм $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{PO}_4$ достигается для АФМ упорядочения ионов Ni/Co вдоль осей x и y в рамках двух неприводимых представлений $\tau_{6,2}$ и $\tau_{2,1}$, соответственно.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-60011.

1. T. B. S. Jensen, N. B. Christensen, et al., Phys. Rev. B. **79**, 092412 (2009).
2. E. Fogh, O. Zaharko, et al., Phys. Rev. B. **99**, 104421 (2019).
3. A. M. Balagurov, A. I. Beskrovnyy, et al., J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. **10**(3), 467 (2016).
4. A. Franz, A. Hoser, J. Large-Scale Res. Facilities **3**, A103 (2017).

ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНОЙ ФАЗОВОЙ ДИАГРАММЫ В СОЕДИНЕНИЯХ $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Ge}$ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ

Д. О. Сканченко^{1*}, Е. В. Алтынбаев^{1,2}, N. Martin³, Р. А. Садыков^{2,4,5}, А. В. Цвященко²,
С. В. Григорьев^{1,6}

¹НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Гатчина, Россия

²Институт физики высоких давлений РАН, Троицк, Москва, Россия

³Leon Brillouin Laboratory, SEA Saclay, France

⁴Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

⁵Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

⁶Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: skanchenko_do@npfi.nrcki.ru

Соединения $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Ge}$, синтезированные при высоком давлении, кристаллизуются в нецентросимметричную кубическую структуру типа B20 [1]. Отсутствие центра инверсии в расположении магнитных атомов зачастую приводит к возникновению антисимметричного обменного взаимодействия Дзялошинского – Мориа (ДМ) и, как следствие, образованию гомокиральной магнитной спирали [2, 3].

Анализ эволюции магнитной структуры MnSi и FeGe во внешнем магнитном поле позволил обнаружить образование скирмионной решетки (СКР) или А-фазу [4, 5]. В работе [6] показано, что ни температурный, ни полевой диапазоны области существования А-фазы в соединении MnSi практически не зависят от внешнего давления вплоть до $P = 13$ кбар. При этом температура магнитного упорядочения в этом соединении существенно падает. Известно, что в соединениях $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Ge}$ с $x = 0,1$ и $0,3$ А-фаза наблюдается в широком диапазоне температур, $30 \text{ K} < T < 130 \text{ K}$, и полей, $0,8 \text{ Тл} < H < 2 \text{ Тл}$ [7].

Данное исследование посвящено исследованию магнитной структуры $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Ge}$ с $x = 0,1$ и $0,3$ под действием квазигидростатического давления до 10 кбар методом малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН). Оказалось, что давление приводит к одновременному увеличению всех критических полей: H_{c1} , H_{c1m} , H_{c2} — при низких температурах и уменьшению температуры магнитного упорядочения, T_C , как для соединений с $x = 0,1$, так и для соединений с $x = 0,3$. Также обнаружено, что в случае соединения $\text{Mn}_{0,7}\text{Fe}_{0,3}\text{Ge}$ увеличение внешнего давления приводит к уменьшению как температурного, так и полевого диапазонов существования А-фазы. Сравнение эволюции фазовой диаграммы «поле — температура» для соединений $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Ge}$ и MnSi позволяет подтвердить различную природу основных взаимодействий, формирующих длиннопериодную магнитную структуру в этих соединениях.

Авторы благодарят за поддержку Российский научный фонд (грант № 17 12 01050).

1. A.V. Tsvyashchenko, J. Less-Common Met. **99**, L9 (1984).
2. I.E. Dzyaloshinskii, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **46**, 1420 (1964).
3. P. Bak, M.H. Jensen, J. Phys. C **13**, L 881 (1980).
4. Н. М. Чубова и др., ЖЭТФ **152**, 933–943 (2017).
5. H. Wilhelm et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 127203 (2011).
6. L.J. Bannenberg et al., Phys. Rev. B **100**, 054447 (2019).
7. E.V. Altynabev et al., Phys. Rev. B **101**, 100404 (2020).

СПИНОВАЯ ДИНАМИКА В ОРТОФЕРРИТАХ TmFeO_3 И TbFeO_3

С. А. Скоробогатов^{1,2*}, С. Е. Никитин³, К. А. Шайхутдинов¹, А. Д. Балаев¹,
К. Ю. Терентьев¹, G. Ehlers⁴, G. Sala⁵, E. V. Pomjakushina³, K. Conder³, A. Podlesnyak⁵

¹Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

²Сибирский Федеральный Университет, Красноярск, Россия

³Paul Scherrer Institute (PSI), Villigen, Switzerland

⁴Neutron Technologies Division, Oak Ridge National Laboratory, USA

⁵Neutron Scattering Division, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA

*E-mail: sgsas13@gmail.com

Редкоземельные ортоферриты с общим составом $R\text{FeO}_3$ (R -редкоземельный ион), представляют собой оксидные магнитные материалы, исследование которых началось еще в 70-е годы прошлого века, однако их свойства находятся в центре внимания современной физики твердого тела и сегодня. К таким свойствам относятся: спонтанный спин-переориентационный переход [1], сверхбыстрое вращение намагниченности, индуцированное лазерным импульсом [2], анизотропная эволюция магнитной энтропии [3] возникновение солитонных решеток [4]. Ортоферриты состоят из двух магнитных подрешеток: упорядочение сильно связанной подрешетки ионов Fe^{3+} происходит при $T_N \approx 600$ К и подрешетки редкоземельного иона, упорядочение которой наступает при $T < 10$ К. Общепринято, что уникальные магнитные свойства ортоферритов возникают вследствие $3d-4f$ взаимодействия, однако построение универсальной микроскопической модели наталкивается на ряд трудностей.

В нашем исследовании мы попытались решить эту проблему, изучая полный спин-волновой спектр TmFeO_3 и TbFeO_3 с помощью неупругого нейтронного рассеяния. Монокристаллы TmFeO_3 и TbFeO_3 исследуемые в нашей работе были выращены методом оптической зонной плавки, структурно относятся к перовскитам, с пространственной группой $Pbnm$. Исследование спиновой динамики проводилось на двух различных энергетических масштабах: возбуждения подсистемы Fe^{3+} (~ 60 мэВ) измерялись на спектрометре ARCS (angular-range chopper spectrometer) при энергии падающих нейтронов ($E_i = 100$ мэВ). Редкоземельные подсистемы Tm^{3+} (~ 4.5 мэВ) [5, 6] и Tb^{3+} (~ 15 мэВ) исследовались с применением спектрометра CNCS (Cold Neutron Chopper Spectrometer) имеющим диапазон энергий нейтронов ($E_i = 3.3$ мэВ и 12 мэВ), обе установки размещены в Oak Ridge National Laboratory.

Мы описали высокоэнергетические магнитные возбуждения с использованием линейной спин-волновой модели и определили обменные взаимодействия в подсистеме Fe^{3+} в TmFeO_3 и TbFeO_3 . Наши результаты показывают выраженную анизотропию между обменными взаимодействиями в ab -плоскости и вдоль оси, как для ближайших соседей, так и соседей второго порядка. Магнонная дисперсия, подсистемы ионов Fe^{3+} , рассчитанная с учетом анизотропии обменов приведена на Рис. 1.

Спектр магнитных возбуждений подсистемы Tm^{3+} состоит из двух переходов кристаллического поля (CEF), которые имеют дисперсию из-за обменного взаимодействия $\text{Tm}-\text{Tm}$. Данные возбуждения расположены в области энергий ниже щели магнонов Fe^{3+} . Мы провели расчеты используя модель точечного заряда и воспроизвели основные особенности наблюдаемых переходов, а также анизотропию магнитной восприимчивости [7].

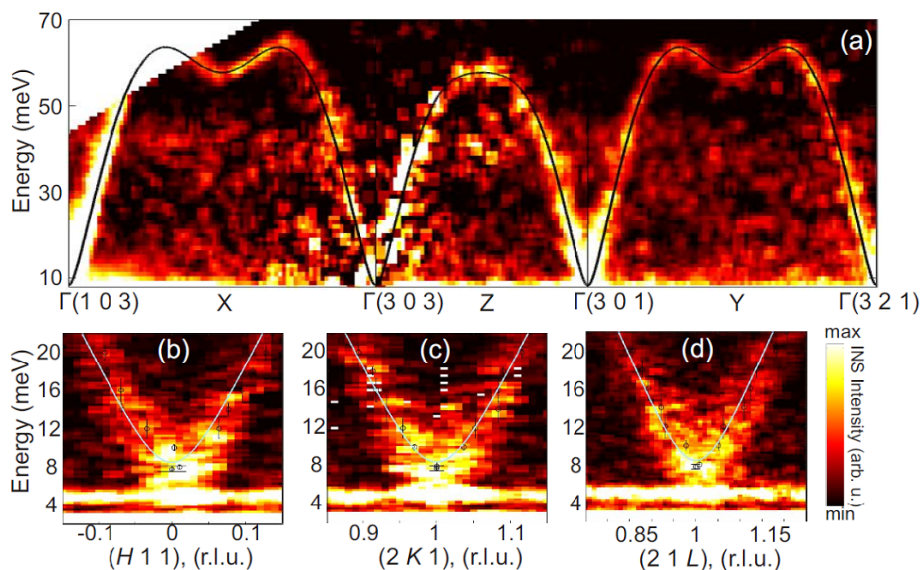


Рис. 1. Спектр магнонных возбуждений в соединении TmFeO_3 при температуре 7 К. (a) Срез по энергии сделанный по высокосимметричным направлениям. (b-d) Срез по энергии по направлениям H, K и L в областях Γ точки магнитной зоны Бриллюэна для демонстрации энергетической щели АФМ соединения. По ортогональным направлениям. Сплошной линией показана расчетная кривая [7].

Работа ведется при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), номер гранта РФФИ № 20-32-90142.

1. R.L. White, J. Appl. Phys. **40**, 1061 (1969).
2. A.V. Kimel et al., Nature (London) **435**, 655 (2005).
3. Y.J. Ke et al., Sci. Rep. **6**, 19775 (2016).
4. S. Artyukhin et al. Nat. Mater. **11.8**, 694–699 (2012).
5. S.M. Shapiro et al., Phys. Rev. B **10**, 2014 (1974).
6. S.E. Nikitin et al., Phys.Rev. B **98**, 064424 (2018).
7. S.A. Skorobogatov et al., Phys. Rev. B **101**, 014432 (2020).

ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ФРУСТРИРОВАННЫХ МАГНЕТИКОВ МЕТОДАМИ НЕЙТРОННОЙ И СИНХРОТРОННОЙ ДИФРАКЦИИ

А. Е. Суслопарова^{1*}, А. И. Курбаков¹, В. Ю. Помякушин²

¹Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт»,
Санкт-Петербург, Россия

²Laboratory for Neutron Scattering and Imaging LNS, Paul Scherrer Institute, Villigen, Switzerland

*E-mail: susloparovanna@mail.ru

Работа направлена на изучение особенностей формирования двумерного фрустрированного магнетизма семейства тригонально-слоистых теллуридов $A_2\text{MnTeO}_6$ ($A = \text{Li}, \text{Na}, \text{Ag}, \text{Tl}$), используя методы нейтронной и синхротронной порошковой дифракции. Соединения семейства являются геометрически фрустрированными с тригональным устройством магнитной сверхструктуры внутри магнитоактивного слоя. Подобное сочетание свойств, как естественная геометрическая фрустрация базовой магнитной решетки в сочетании с сильной кулоновской корреляцией и спин-орбитальным взаимодействием, может привести к появлению новых экзотических магнитных фаз в этих системах.

Актуальность выбранной темы связана также с тем, что низкоразмерные и одновременно фрустрированные магнетики демонстрируют удивительно богатые магнитные фазовые диаграммы, а в некоторых случаях установление дальнего порядка затрудняется в пользу основного состояния подобного спиновой жидкости с остаточной энтропией [1]. Спин-жидкостные состояния, возникающие в идеальных теоретических моделях, в реальных магнетиках могут оказываться неустойчивыми из-за присутствия различных слабых взаимодействий (одноионной анизотропии, анизотропных спин-спиновых взаимодействий, взаимодействий дальних соседей, спин-решеточных связей или структурных искажений), что и приводит к разнообразным фазовым диаграммам и непредсказуемым фазовым переходам.

Кристаллическая структура изучаемых соединений в общих чертах была определена ранее [2]. Соединения кристаллизуются в пространственную группу $P\bar{3}1c$, где катионы Mn^{4+} и Te^{6+} вместе образуют сотовые слои (Рис. 1), которые чередуются с немагнитными слоями, состоящими из катионов A^+ , а магнитная подрешетка ионов марганца имеет вид на основе треугольной геометрии.

Для изучения особенностей кристаллической и магнитной структур серии образцов $\text{Li}_2\text{MnTeO}_6$, $\text{Na}_2\text{MnTeO}_6$, $\text{Ag}_2\text{MnTeO}_6$, $\text{Tl}_2\text{MnTeO}_6$, принадлежащих одному семейству $A_2\text{MTeO}_6$ проводились эксперименты на дифрактометрах тепловых и холодных нейтронов HRPT и DMC в PSI (Швейцария), используя метод порошковой нейтронной дифракции при различных температурах. Полученные данные обрабатывались с использованием полнопрофильного анализа в пакете программ FullProf [3]. В результате получено детальное описание природы новых магнитных явлений на микроскопическом уровне, исследованы магнитные взаимодействия, уточнены их величины, знаки и соотношения в ряде соединений $\text{Li}_2\text{MnTeO}_6$, $\text{Na}_2\text{MnTeO}_6$, $\text{Ag}_2\text{MnTeO}_6$, $\text{Tl}_2\text{MnTeO}_6$. Несмотря на принадлежность всех соединений к одному семейству, при практически идентичных нейтронограммах при комнатной температуре получены сильно отличные друг от друга нейтронограммы при гелиевых температурах.

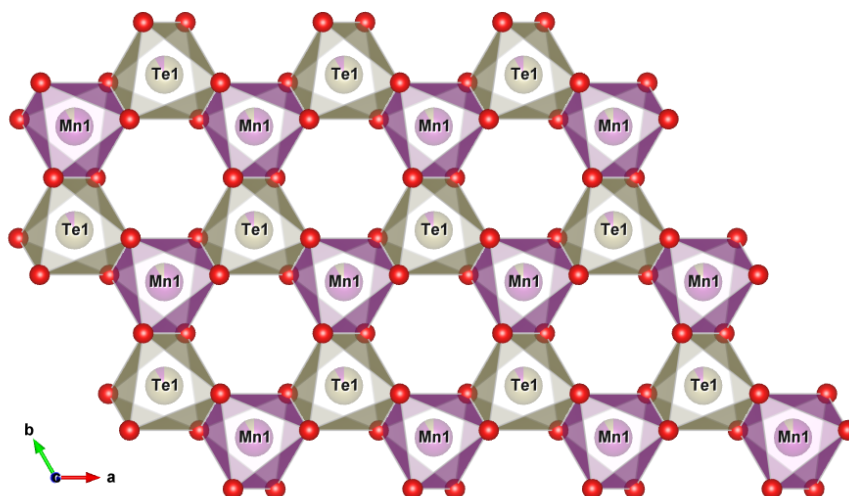


Рис. 1. Проекция магнитоактивного слоя на плоскость ab .

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 18-12-00375.

1. N.D. Mermin and H. Wagner, Phys. Rev. Lett. (1966).
2. V. B. Nalbandyan, Inorganic chemistry (2017).
3. J. Rodriguez-Carvajal, Phys. B (Amsterdam, Neth.) (1993).

FERRO-ANTIFERROMAGNETIC TRANSITION, DRIVING BY Tb–Mn INTERACTION

H. M. Alsafi^{1*}, *P. A. Borisova*², *V. P. Glazkov*², *E. G. Gerasimov*^{3,4}

¹Institute of Natural Science and Mathematics of Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

²National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

³Institute of metal physics UB RAS, Ekaterinburg, Russia

⁴Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

*E-mail: haneenalsafi.1991@gmail.com

Intermetallic compounds RM_2X_2 type (where R is the rare-earth element or yttrium; M is the $3d$ -, $4d$ -, or $5d$ -transition metal; X is Si or Ge), crystallize in the body-centered tetragonal ThCr_2Si_2 -type structure. In this structure different elements form the single-atomic layers across the c -axis in sequence $-M-X-R-X-M-$.

Diversity of types of magnetic ordering and phase transitions were found in the RM_2X_2 compounds for $M = \text{Mn}$ [1]. Using results of magnetic measurements, the concentration magnetic phase diagram was plotted for the $\text{La}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Mn}_2\text{Si}_2$ compounds in [1]. The phase diagram includes different magnetically ordered states. Neutron diffraction measurements were carried out then on some of them samples [2]. However, samples with high concentration of Tb ions did not be studied in [2].

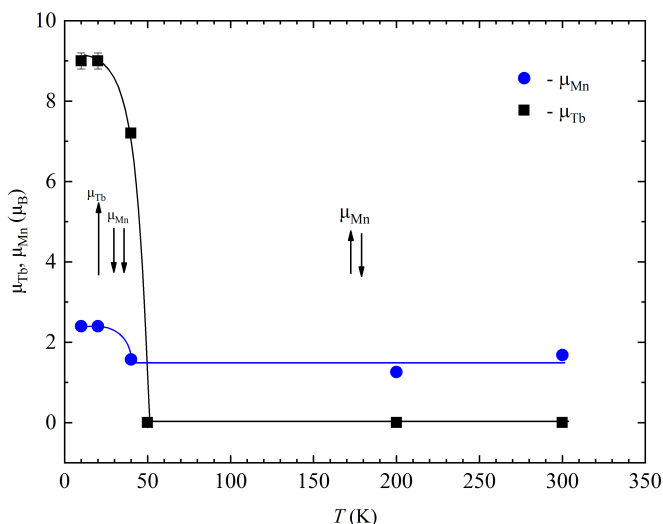
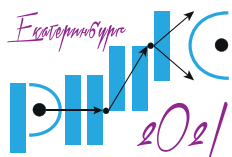


Рис. 1. Temperature evolution of Tb- and Mn- magnetic moments.

In order to make clear the role of exchange interactions in forming a magnetic structure, we have carried out neutron diffraction study on the $\text{La}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Mn}_2\text{Si}_2$.

We used the same sample that was studied in [2]. Neutron powder diffraction (NPD) patterns have been recorded on the diffractometer DISK (reactor IR-8, Kurchatov Institute, Moscow). Calculations of NPD patterns were performed with Fullprof program.



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

NPD patterns have been recorded at 10, 20, 40, 200, and 300 K. Calculations of patterns lead to following results. The propagation vector of the magnetic structure is $k = (001)$. The orientations and values of Tb-ion and Mn-atom moments are presented on Fig. 1. The Tb-ions carry magnetic moments, oriented along the c -axis at 10, 20, and 40 K, and they are nonmagnetic at 200 and 300 K. Taking into account magnetic measurement data, we assume that the Tb-ion moments are disordered at 50 K. The Mn-atoms carry the magnetic moments over whole interval (10 — 300) K. But, their z -components undergo a ordering change. The z -components are mutually parallel and oriented along the c -axis at 10, 20, 40 K and they become antiparallel at 200 and 300 K. We can assume that the change of the ordering of z -component takes place at 50 K.

Thus, when Tb ions carry magnetic moments, they induce the mutual parallel ordering of the z components of Mn moments due to Tb-Mn exchange integration.

1. E. G. Gerasimov, N. V. Mushnikov, P. B. Terentev et al. JMMM **422**, 237 (2017).
2. E. G. Gerasimov, N. V. Mushnikov, P. B. Terentev et al. J. All. Comp. **731**, 397 (2018).

COMPETING MAGNETIC STATES IN MULTIFERROIC BaYFeO_4 : A HIGH MAGNETIC FIELD STUDY

D. P. Kozlenko¹, N. T. Dang^{2,3}, I. Yu. Zel^{1*}, L. T. P. Thao^{4,5}, S. E. Kichanov¹, B. N. Savenko¹,
A. V. Rutkauskas¹

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

²Institute of Research and Development, Duy Tan University, Danang, Viet Nam

³Faculty of Natural Sciences, Duy Tan University, Danang, Viet Nam

⁴Department of Physics, University of Sciences, Hue University, Hue, Viet Nam

⁵University of Education, The University of Danang, Danang, Viet Nam

*E-mail: zel@jinr.ru

Multiferroic materials, where ferroelectricity is induced by magnetic order, are of great current interest because of their potential applications in electronic devices and intriguing physical phenomena such as magnetoelectric effect, generation of electromagnons, etc. The strong magnetoelectric (ME) coupling makes them promising candidates for designing multi-functional devices with electric-field-tunable magnetism and magnetic-field-controlled ferroelectricity. Usually, the ME effect has been discovered in magnets with peculiar long-range magnetic structures such as the noncollinear incommensurate cycloidal antiferromagnetic (AFM) order of RMnO_3 ($R = \text{Tb, Dy, Ho, Er}$), MnWO_4 and CoCr_2O_4 , the E-type collinear commensurate AFM phase of RMnO_3 ($R = \text{Tm}$), and $\text{Ca}_3\text{CoMnO}_6$, modulated incommensurate and commensurate AFM phases of RMn_2O_5 (R – rare-earth elements). Very recently, BaYFeO_4 has been found to exhibit the spin-driven ferroelectricity, which was assumed to be caused by the onset of a long-range cycloidal antiferromagnetic order of Fe spins. However, emerging results point to uncorrelated behavior of the ferroelectric and cycloidal states under application of magnetic field, providing evidence to unconventional and complex nature of magnetoelectric coupling. To shed more light on the origin of unusual magnetic properties and magnetoelectric effect, a high-quality sample of BaYFeO_4 has been synthesized by a solid-state reaction method and it has been systematically investigated under magnetic fields up to 9 T by means of magnetic, magnetocaloric, and Mössbauer measurements in a wide temperature range. In addition, crystal and magnetic structures have been studied using the X-ray and neutron powder diffraction. The results show that Fe spins form a long-range spin density wave anti-ferromagnetic (AFM) order at $T_{N1} \sim 48$ K, which transforms into the cycloidal AFM order at $T_{N2} \sim 33$ K. The coexistence of spin-cluster glass and long-range cycloidal AFM states is observed below $T^* \sim 17$ K. Mössbauer and magnetocaloric measurements have proved that under applied magnetic fields up to 6 T both long-range orders are very robust, whereas the spin-glass state is gradually converted to ferromagnetic order by the application of magnetic field. The results demonstrate that the evolution of the spin correlations character from AFM to FM in the spin glass state is responsible for unusual magnetoelectric response of BaYFeO_4 in the applied magnetic fields.

This work was supported by the RFBR and VAST grant No. 20-52-54002. Vietnamese researchers were supported by the Vietnam Academy of Science and Technology under the Program of development in the field of physics by 2020, grant number VAST.CTVL.01/17-20 and the RFBR – VAST cooperation program, grant number QTRU01.02/20-21.

ПРИМЕНЕНИЕ ВРЕМЯПРОЛЕТНОЙ НЕЙТРОНОГРАФИИ В ИССЛЕДОВАНИИ ДИНАМИКИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ FeRh

А. А. Ваулин¹, А. М. Сантос², Р. Р. Гимаев³, А. Ф. Губкин¹, В. И. Зверев^{3*}

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Neutron Scattering Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, USA

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: vi.zverev@physics.msu.ru

Интерес к сплавам на основе Fe–Rh связан с явлением гигантского магнитокалорического эффекта, наблюдающимся в области магнитного фазового перехода первого рода антиферромагнетик (АФМ) — ферромагнетик (ФМ) в области температур близких к комнатной. Легирование сплавов Fe–Rh переходными металлами Pd, Pt, Ni позволяет варьировать температуру фазового перехода, что значительно расширяет область практического применения данного семейства сплавов. В настоящей работе проведено исследование динамики фазовых превращений в образцах $\text{Fe}_{50.4}\text{Rh}_{49.6}$, $\text{Fe}_{49.7}\text{Rh}_{47.4}\text{Pd}_{2.9}$ и $\text{Fe}_{48.3}\text{Rh}_{46.8}\text{Pd}_{4.9}$ методами нейтронной дифракции и Холловской магнитометрии.

Анализ данных времяпролетной нейтронной дифракции в широком интервале температур для соединений $\text{Fe}_{50.4}\text{Rh}_{49.6}$, $\text{Fe}_{49.7}\text{Rh}_{47.4}\text{Pd}_{2.9}$ и $\text{Fe}_{48.3}\text{Rh}_{46.8}\text{Pd}_{4.9}$ показал, что при температурах ниже АФМ–ФМ фазового перехода магнитное состояние каждого образца может быть описано моделью антиферромагнитной структуры G-типа, реализующейся на подрешетке Fe, а при температурах выше перехода все образцы демонстрируют ферромагнитное упорядочение обеих подрешеток Fe и Rh. Этот результат хорошо согласуется с опубликованными ранее результатами нейтронографического исследования систем типа FeRh [1].

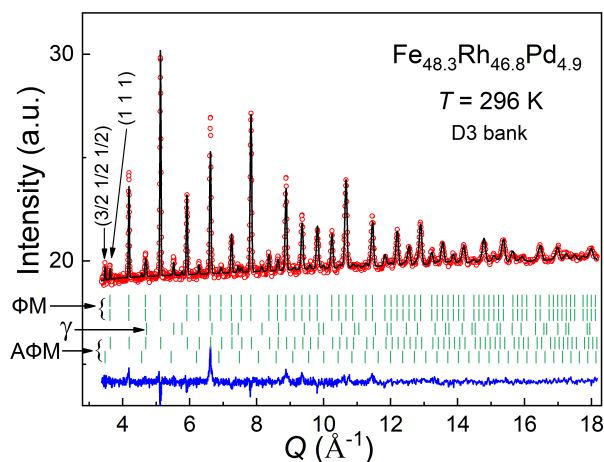


Рис. 1. Нейтронограмма образца $\text{Fe}_{48.3}\text{Rh}_{46.8}\text{Pd}_{4.9}$ измеренная в смешанном АФМ–ФМ состоянии при температуре фазового перехода.

Детальное нейтронографическое исследование с шагом по температуре 3 К в области фазового перехода АФМ–ФМ показало, что в образцах реализуется трехкомпонентное пространственно-неоднородное состояние с широким термомагнитным гистерезисом: (i) ОЦК структура с параметром элементарной ячейки a_1 и АФМ упорядочением; (ii) ОЦК структура с параметром элементарной ячейки a_2 и ФМ упорядочением; (iii) ГЦК γ -фаза с не зависящей от температуры массовой долей $\omega \sim 8\%$. Так, на Рис. 1 представлен результат анализа порошковой времяпролетной нейтронограммы образца $\text{Fe}_{48.3}\text{Rh}_{46.8}\text{Pd}_{4.9}$, измеренной в смешанном АФМ–ФМ состоянии при температуре фазового перехода. Были построены детальные температурные зависимости, параметров элементарной ячейки, фазового состава и величины магнитного момента на атомах Fe и Rh. Было обнаружено, что величина термомагнитного гистерезиса пропорциональна концентрации Pd в легированных сплавах. Была проведена оценка спонтанной объемной магнитострикции при переходе АФМ–ФМ (Рис. 2).

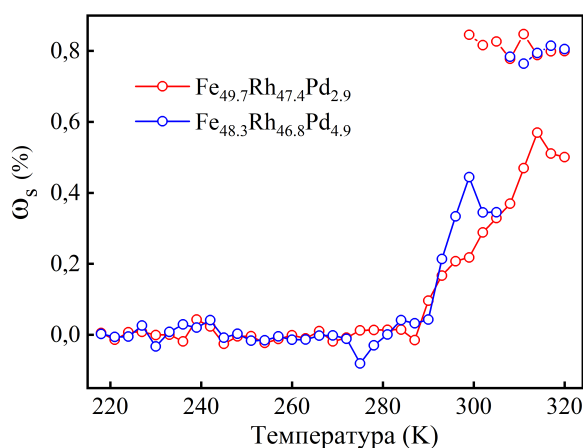
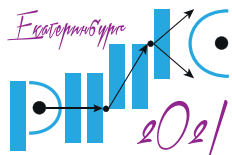


Рис. 2. Температурная зависимость спонтанной объемной магнитострикции для образцов $\text{Fe}_{49.7}\text{Rh}_{47.4}\text{Pd}_{2.9}$ и $\text{Fe}_{48.3}\text{Rh}_{46.8}\text{Pd}_{4.9}$.

Непосредственная визуализация фазовой сепарации в области магнитного фазового перехода АФМ–ФМ в исследуемых образцах $\text{Fe}_{50.4}\text{Rh}_{49.6}$, $\text{Fe}_{49.7}\text{Rh}_{47.4}\text{Pd}_{2.9}$ и $\text{Fe}_{48.3}\text{Rh}_{46.8}\text{Pd}_{4.9}$ была осуществлена при помощи Холловской магнитометрии.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки (тема «Поток» № АААА-А18-118029192112-8 и «Сплавы» №АААА-Ф19119070890020-3).

1. G. Shirane, R. Nathans, C.W. Chen, Phys. Rev. **134**, A1547–A1553 (1964).



СТРУКТУРНЫЕ И МАГНИТНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ТЕРБИИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ

Н. О. Голосова, Д. П. Козленко, С. Е. Кичанов, Е. В. Лукин, Б. Н. Савенко*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*E-mail: golosova@nf.jinr.ru

Проведено исследование кристаллической и магнитной структуры металлического тербия методом нейтронной дифракции в диапазоне температур 7 — 300 К и давлений 0 — 9 ГПа. При давлениях выше 4 ГПа наблюдался структурный фазовый переход из исходной гексагональной плотноупакованной (ГПУ) фазы в ромбоэдрическую фазу Sm-типа, характеризующийся широкой барической областью сосуществования фаз. Данный структурный переход сопровождался изменением магнитного состояния с исходного ферромагнитного (ФМ) на антиферромагнитное (АФМ). Температура магнитного упорядочения в фазе Sm-типа, $T_{MO} = 110$ К при $P = 9$ ГПа, примерно в два раза меньше соответствующей величины для ГПУ фазы ($T_{MO} = 227$ К).

В АФМ фазе Sm-типа в диапазоне температур ниже 50 К возникает упорядочение магнитных моментов Tb в атомных слоях с дальним порядком, соответствующим гпу упаковке, вектор распространения $k_{AF1} = (0\ 0\ 1/2)$. В области более низких температур происходит упорядочение магнитных моментов в атомных слоях с дальним порядком, соответствующим ГЦК упаковке, вектор распространения $k_{AF2} = (1/2\ 0\ 1/2)$ [1].

1. D. P. Kozlenko et al., Phys. Rev. Materials **5**, 034402 (2021).

КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ И МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА ПОЛУГЕЙСЛЕРОВСКИХ СПЛАВОВ $\text{MnNi}_{0.9}\text{M}_{0.1}\text{Sb}$ ($\text{M} = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}, \text{Fe}, \text{Co}$)

А. В. Руткаускас^{1*}, Г. С. Римский², И. Ю. Зель¹, Н. М. Белозерова¹, Д. П. Козленко¹,
С. Е. Кичанов

¹Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь

*E-mail: ranton@nf.jinr.ru

Полугейслеровские магнитные интерметаллиды переходных металлов проявляют интересные физические свойства, такие как магнетосопротивление, ферромагнитные и антиферромагнитные магнитные состояния, сверхпроводимость, проявляют эффект памяти формы и сверхупругости с возможностью управления этими явлениями с помощью магнитного поля. Это делает такие соединения перспективными для использования в качестве материалов для постоянных магнитов, элементов устройств электроники и охлаждающей техники.

Для выявления микроскопических механизмов или выявления структурных аспектов формирования магнитных состояний в допированных соединениях семейства тройных интерметаллидов MnNiSb требуется корректное разделение вклада в магнитные свойства от подрешёток ионов никеля и марганца, выявления взаимосвязей между структурными и магнитными свойствами этих материалов. Нейтронные дифракционные исследования позволят получить уникальную научную информацию как о кристаллической, так и о магнитной структуре интерметаллидов MnNiSb , исследовать влияние особенностей кристаллической структуры на формирование магнитных состояний в подобных материалах.

В работе представлены результаты исследования кристаллической и магнитной структуры полугейслеровских интерметаллидов $\text{MnNi}_{0.9}\text{M}_{0.1}\text{Sb}$ ($\text{M} = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}, \text{Fe}, \text{Co}$) методом нейтронной дифракции при нормальных условиях. Частичное замещение никеля на другой переходный элемент приводит уменьшению магнитного момента ионов Mn.

Также были выполнены исследования соединений MnNiSb , $\text{MnNi}_{0.9}\text{Cr}_{0.1}\text{Sb}$ и $\text{MnNi}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{Sb}$ в диапазоне температур 13 — 300 К. Установлено, что исходная кубическая структура и ферромагнитная фаза сохраняются во всём исследуемом диапазоне температур. Новых рефлексов соответствующих антиферромагнитной фазе обнаружено не было.

Работа поддержана грантом РФФИ № 20-52-04003 Бел_мол_а.

КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И МАГНИТНОЕ СОСТОЯНИЕ ДВОЙНОГО ПЕРОВСКИТА $\text{La}_3\text{Co}_2\text{MoO}_9$

Г. В. Базуев¹, А. Е. Теплых^{2*}, А. В. Королев^{2,3}, Е. Г. Герасимов^{2,3}, П. В. Терентьев^{2,3}

¹Институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

³Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*E-mail: teplykh@imp.uran.ru

Сложные оксиды переходных металлов с перовскитоподобной структурой, в особенности, так называемые «двойные перовскиты» состава A_2BBO_6 , $A_3B_2B'O_9$ и др., демонстрируют самые разнообразные физические свойства. Наличие двух переходных металлов в позициях B и B' может обеспечивать высокую проводимость вследствие облегченного электронного обмена между катионами, разные степени окисления элементов B и B' придают повышенную каталитическую активность, а упорядоченное их расположение — ферри- или ферромагнитные свойства.

Нами впервые синтезированы керамические образцы двойного перовскита $\text{La}_3\text{Co}_2\text{MoO}_9$ и исследованы их кристаллическая структура и магнитные свойства, с использованием рентгеновской и нейтронной порошковой дифракции, а также магнитометрическими методами. Структурные исследования показали, что при комнатной температуре образец представляет собой моноклинный перовскит с пространственной группой $P21/n$ и параметрами элементарной ячейки $a = 5,5812(2) \text{ \AA}$, $b = 5,7073(2) \text{ \AA}$, $c = 7,9279(3) \text{ \AA}$, $\beta = 89,96(2)^\circ$, $V = 252,558(11) \text{ \AA}^3$. Две кристаллографически различные октаэдрические позиции $2d$ и $2c$ заняты Co^{2+} (положение $2d$) и Co^{2+} и $\text{Mo}^{5+}/\text{Mo}^{4+}$ (положение $2c$). Данные низкотемпературных исследований магнитных свойств, совместно с результатами температурных зависимостей нейтронограмм порошкового образца показали, что перовскит $\text{La}_3\text{Co}_2\text{MoO}_9$ является ферримагнетиком ($T_C = 147 \text{ K}$) с нескомпенсированным магнитным моментом $2 \mu_B$ и высоким значением коэрцитивной силы H_C ($H_C = 75 \text{ kOe}$ при $4,2 \text{ K}$).

В докладе обсуждаются особенности структурных и магнитных свойств двойного перовскита $\text{La}_3\text{Co}_2\text{MoO}_9$. Рассмотрены сходство и отличия от структурных аналогов данного соединения, при замещениях другими типами атомов.

Работа проводилась в соответствии с государственными заданиями для ИХТТ и ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия. Исследование выполнено с использованием УНУ «Нейтронный материаловедческий комплекс ИФМ УрО РАН в рамках госзадания Минобрнауки России (тема «Поток», №АААА-А118-1180201901112-8) и частично поддержано РФФИ (проект № 18-02-00270). Результаты измерений магнитных свойств были получены в рамках госзадания Минобрнауки России (тема «Магнит» № АА-А18-118020290129-5).

Секция 3.

Магнетизм и поляризованные нейтроны

СПИН-ФЛОП ПЕРЕХОД В ИСКУССТВЕННЫХ ФЕРРИМАГНЕТИКАХ

Н. О. Антропов^{1,2*}, Ю. Н. Хайдуков^{3,4,5}, Е. А. Кравцов^{1,2}, М. В. Макарова^{1,2},
В. В. Проглядо¹, В. В. Устинов¹

¹Институт физики металлов имени М. Н. Михеева, Екатеринбург, Россия

²Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

³Институт исследований твердого тела им. Макса Планка, Штутгарт, Германия

⁴Исследовательский источник нейтронов Хайнца Майера-Лейбница (MLZ), Гархинг, Германия

⁵НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, МГУ, Москва, Россия

*E-mail: nikolayantropovekbr@gmail.com

Антиферромагнитная спинтроника — быстро развивающаяся область современной науки [1–3]. Антиферромагнетизм имеет большое применение в создании новейших устройств спинтроники, так как может быть использован для защиты от внешних магнитных возмущений, а также для подавления нежелательных сигналов, проходящих между небольшими приборами на ограниченной плоскости. Особый интерес представляют устройства на основе магнитного спин-флоп перехода.

Спин-флоп переход (СФП) заключается в скачкообразном изменении антиферромагнитных моментов в неколлинеарное магнитное состояние, когда магнитное поле достигает отметки выше критического значения. Потенциально СФП может использоваться во многих приложениях антиферромагнитной спинтроники. Однако сложность использования данного эффекта в обычных антиферромагнетиках заключается: 1) в слишком большом поле перехода; 2) необходимости наличия магнитной анизотропии; 3) приложении магнитного поля вдоль соответствующей оси анизотропии. Эти проблемы может решить использование искусственных ферримагнетиков, в которых СФП происходит без магнитной анизотропии, а поле перехода может быть понижено за счет настройки обменного взаимодействия в структуре.

Использование рефлектометрии поляризованных нейтронов и других современных методов позволило выполнить систематическое исследование магнитной конфигурации сверхрешеток Fe/Pd/Gd. Анализ рассеяния нейтронного спин-флипа подтвердил наличие неколлинеарной магнитной фазы при температурах ниже 50 К в магнитных полях порядка 500 Э. Используя расширенную модель Стоннера-Вольфарта, авторам удалось описать наблюдаемый переход, как конкуренцию зеемановского, биллинейного и биквадратичного взаимодействий. Энергии межслойного взаимодействия могут варьироваться за счет немагнитной прослойки.

1. T. Jungwirth, J. Sinova, A. Manchon, et al., Nat. Phys. **14**, 200 (2018).

2. R. A. Duine, K.-J. Lee, S. S. P. Parkin, and M. D. Stiles, Nat. Phys. **14**, 217 (2018).

3. A. Hirohata, K. Yamada, Y. Nakatani, et al., J. Magn. Magn. Mater. **509**, 166711 (2020).

КРИТИЧЕСКИЕ ФЛУКТУАЦИИ ВБЛИЗИ КВАНТОВОГО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В НЕЦЕНТРОСИММЕТРИЧНЫХ КУБИЧЕСКИХ ГЕЛИМАГНЕТИКАХ $Mn_{1-x}Fe_xSi$

С. В. Григорьев^{1,2*}, Н. М. Чубова³, О. И. Утесов^{1,2}

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

*E-mail: grigoryev_sv@pnpi.nrcki.ru

Методом малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов исследованы критические флуктуации нецентросимметричных кубических гелимагнетиков с взаимодействием Дзялошинского Мория $Mn_{1-x}Fe_xSi$ with $x = 0.10, 0.15, 0.20$ [1]. Магнитная система соединений $Mn_{1-x}Fe_xSi$ упорядочивается в киральный гелимагнетик ниже T_C и демонстрируют режим интенсивных геликоидальных флуктуаций выше T_C в широком температурном диапазоне вплоть до T_{DM} . Критические температуры T_C и T_{DM} уменьшаются с увеличением x и стремятся к 0 при $x = 0.11$ и 0.17 , соответственно. Показано, что три образца проявляют свойства флуктуаций в разных режимах. Для образца с $x = 0.10$ регистрируется острый пик рассеяния на картах МУРН для температур вблизи T_C и в упорядоченной фазе, тогда как в образце с $x = 0.15$ развитие критических флуктуаций подавляются беспорядком, разрушающим дальний магнитный порядок, а соответствующие пики рассеяния существенно шире, чем при $x = 0.10$. Для образца с $x = 0.20$ даже при самых низких температурах видны только след пика рассеяния — широкий размытый максимум. Степень поляризации рассеянных нейтронов близка к 1 для всех трех образцов, что означает, что соответствующие геликоидальные флуктуации являются 100% киральными. На качественном уровне мы утверждаем, что наблюдаемые особенности могут быть приписаны дефектным антиферромагнитным связям, которые добавляются в систему ионами Fe и приводят к конечной корреляционной длине спирали при малых температурах при $x > x_C$.

Известно, что магнитная структура этих соединений представляет собой спиновую спираль с большим периодом от 30 до 3000 Å, которая образуется в результате баланса двух взаимодействий — симметричного ферромагнитного обмена и антисимметричного взаимодействия Дзялошинского-Мория. Соединения $Mn_{1-x}Fe_xSi$ представляют собой пример систем, в которых ферромагнитный обмен стремится к нулю с ростом x , но взаимодействие Дзялошинского-Мория остается постоянным и обеспечивает 100% киральное вращение спинов в магнитных флуктуациях. Напротив, соединения $Mn_{1-x}Fe_xGe$ дают пример системы, где ферромагнитный обмен остается практически постоянным изменением x , но взаимодействие Дзялошинского-Мория стремится к нулю при $x = 0.70$, что приводит переходу из геликоидального в ферромагнитное состояние системы. Можно сделать вывод, что два взаимодействия — ферромагнитный обмен и взаимодействие Дзялошинского-Мория — оказываются независимыми и их величиной можно по отдельности управлять, меняя концентрацию химических элементов в квазибинарных соединениях $Mn_{1-x}Fe_xSi$ и $Mn_{1-x}Fe_xGe$.

1. S. V. Grigoriev, O. I. Utesov, N. M. Chubova, et al., ЖЭТФ, **159**, 690 — 695 (2021).

2. S.V. Grigoriev, N.M. Potapova, S.-A. Siegfried, et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 207201 (2013).

ИЗМЕРЕНИЕ КОНСТАНТЫ ЖЕСТКОСТИ СПИНОВЫХ ВОЛН И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЩЕЛИ В СПЕКТРЕ МАГНОНОВ АМОРФНЫХ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ МЕТОДОМ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ

Л. А. Азарова^{1,2*}, К. А. Пшеничный², А. Хайнеманн³, С. В. Григорьев^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт»,
Гатчина, Россия

³Helmholtz Zentrum Geesthacht, Geesthacht, Germany

*E-mail: loveazarova@gmail.com

Аморфные магнитные материалы представляют значительный интерес, как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения. Низкое коэрцитивное поле в аморфном магнетике является важным свойством для его применения в качестве материала сердечника в электрических трансформаторах. Структурные и магнитные свойства аморфных магнитных систем могут быть достаточно сложными. Наличие структурного, а также магнитного беспорядка играет важную роль в аморфных системах. Однако понимание формирования и роста спиновых кластеров в аморфных системах является сложной задачей. Свойства спиновых кластеров в аморфной системе под действием внешнего магнитного поля зависят от их морфологии. Поэтому с точки зрения магнетизма интересными аспектами являются: (1) корреляция между структурными и магнитными свойствами; (2) понимание поведения спиновых кластеров и (3) исследование магнитных возбуждений в таких системах.

В данной работе представлены исследования магнитных возбуждений аморфных ферромагнитных сплавов FeNi методом малоуглового рассеяния нейтронов. Широко известно, что наиболее прямым способом исследования магнитных возбуждений являются методы трехосной и времяпролетной спектроскопии. Однако у обоих этих методов есть ограничение — невозможность проводить измерения вблизи прямого пучка, т.е. для малых переданных импульсов. Поэтому была предложена и внедрена в Петербургском институте ядерной физики в середине восьмидесятых годов методика малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов в наклонной геометрии [1]. Измеряя разницу в зависимости интенсивностей рассеяния при различной начальной поляризации пучка нейтронов от переданного импульса, можно зарегистрировать рассеяние на спиновых волнах. В этом случае используется киральный канал рассеяния поляризованных нейтронов, позволяющий измерять асимметрию интенсивности рассеяния, которая проявляется наилучшим образом при приложении внешнего магнитного поля под углом в 45° [2]. В этом случае оказывается, что рассеяние на спиновых волнах сконцентрировано в конусе, ограниченном углом отсечки θ_c (Рис. 1). Таким образом, получая зависимость угла отсечки от приложенного магнитного поля или от длины волны нейтронов, можно определить жесткость спиновых волн.

В данной работе были получены зависимости интенсивности рассеяния поляризованных нейтронов на спиновых волнах от приложенного внешнего магнитного поля H и от длины волны нейтронов λ на образцах аморфных сплавов FeNi. По результатам проведенных исследований показано, что спектр спиновых волн является не просто квадратичным по переданному импульсу, а в нем присутствует дополнительная добавка в

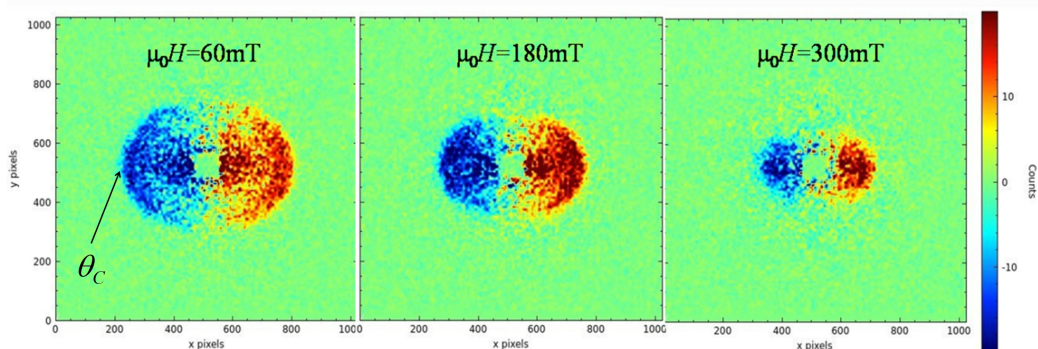


Рис. 1. Картины малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов на спиновых волнах при различном внешнем магнитном поле.

виде щели E_g неполевой природы $\epsilon = Aq^2 + g\mu_B H + E_g$. Наличие щели, не зависящей от поля, в спектре аморфных ферромагнетиков уже было ранее обнаружено в аморфных микропроводах соединения $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{5.5}\text{B}_{15}$ [3]. В данной работе также показано, что, только измеряя одновременно две зависимости угла отсечки: от приложенного магнитного поля и от длины волны, можно получить достоверную информацию о спиновой динамике в системе.

1. A. I. Okorokov, V. V. Runov, B. P. Toperverg, et al., JETP Lett. **43**, 503(1986).
2. С. В. Григорьев, Е. В. Алтынбаев, Н. Eckerlebe, А. И. Окорок, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования **10**, 71 – 78 (2014).
3. С. В. Григорьев, К. А. Пшеничный, И. А. Барабан и др., Письма в ЖЭТФ **110**, 800 – 806 (2019).

НАБЛЮДЕНИЕ ГЕЛИМАГНЕТИЗМА В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ Dy И Ho И В СВЕРХРЕШЕТКЕ Dy/Ho

Д. И. Девятериков^{1*}, Е. А. Кравцов¹, В. Д. Жакетов², Ю. В. Никитенко²

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*E-mail: devidor@yandex.ru

Тяжелые редкоземельные металлы (РЗМ), такие как Dy, Ho, Tb и др., выращенные в виде эпитаксиальных пленок или сверхрешеток, характеризуются магнитными свойствами, существенно отличающимися от таковых в объемных РЗМ.

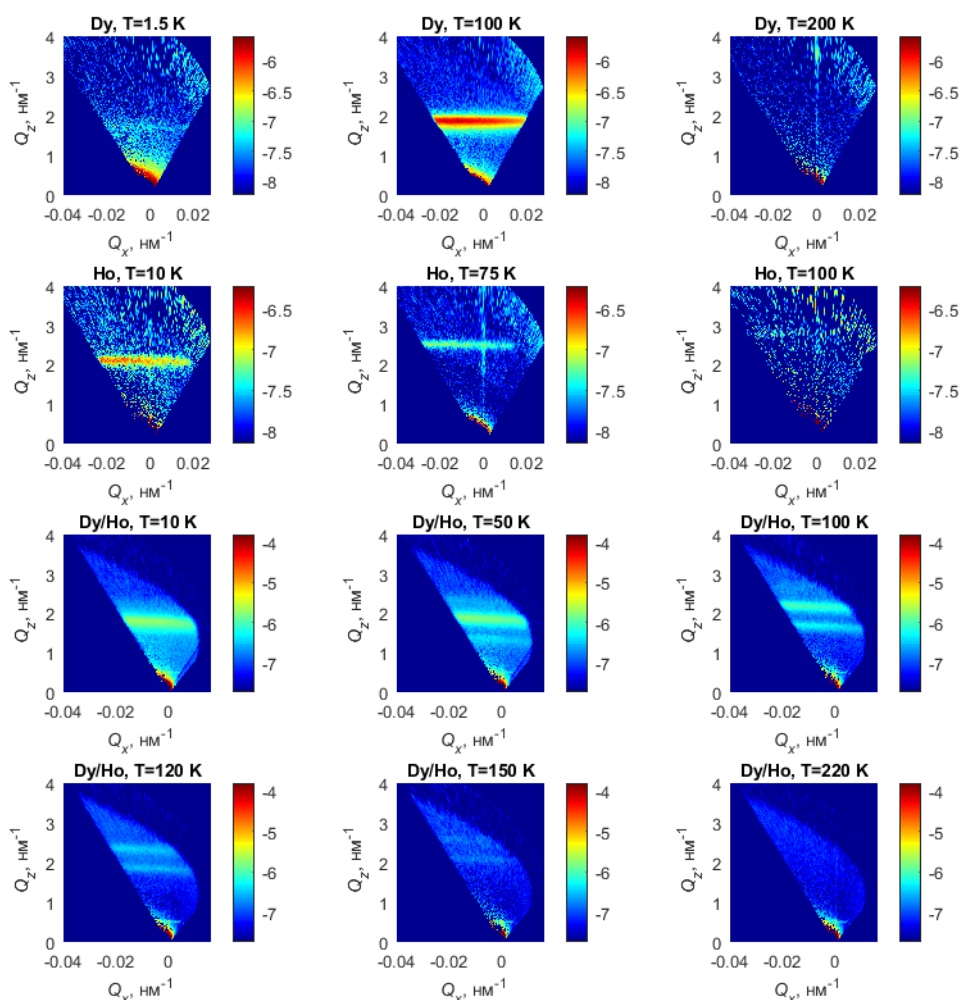


Рис. 1. Спектры РПН для тонких плёнок Dy и Ho и сверхрешётки Dy/Ho.

Например, в объемном Dy ниже температуры Нееля 178 K образуется геликоидальное магнитное упорядочение, а ниже температуры Кюри 85 K оно переходит в ферромагнитное состояние [1 – 3]. Объемный Ho переходит в гелимагнитное состояние при 133 K, а ниже 20 K он переходит в соизмеримую коническую фазу. Было показано [4, 5], что незначительные изменения параметра решетки Dy приводят к существенной модификации фазовой диаграммы — подавлению перехода в ферромагнитную фазу при расширении решетки и повышению температуры Кюри при сжатии. Эпитаксиальные напряжения в пленках Ho приводят к подавлению перехода в коническую фазу, значительному изменению периода геликоида и изменению его температурной зависимости [6]. В исследованных ранее сверхрешётках Dy/Ho наблюдается аналогичное обнаруженному в тонких плёнках Dy подавление перехода в ферромагнитную фазу для слоёв Dy и рост температуры Нееля для слоёв Ho в сравнении с объёмным Ho [7].

Периодические магнитные структуры синтезированных методом магнетронного распыления образцов Dy (200 нм), Ho (200 нм) (тонкие плёнки) и [Dy (6 нм)/Ho (6 нм)] $\times$ 34 (сверхрешётка) были исследованы методом рефлектометрии поляризованных нейтронов (РПН) в диапазоне температур 1.5–200 K во внешнем поле 80 кА/м, приложенном в базисной плоскости на рефлектометре «РЕМУР» ОИЯИ, Дубна. Структурная аттестация образцов осуществлялась методом рентгеновской дифракции и показала наличие преобладающей текстуры (0001) вдоль нормали к поверхности образца во всех образцах, что позволяет наблюдать магнитный спутник 0000⁺ от модулированных магнитных структур при проведении эксперимента по рефлектометрии поляризованных нейтронов. При этом период таких структур будет соответствовать положению магнитного спутника в системе координат вектора рассеяния ($Q_x - Q_z$).

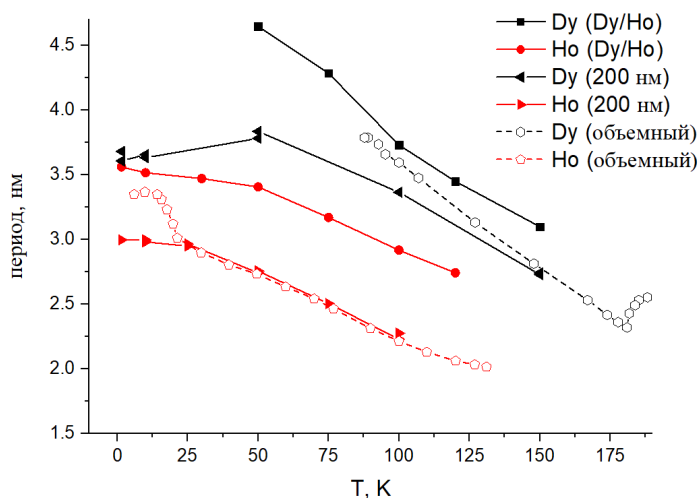
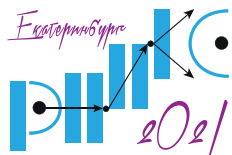
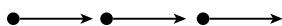


Рис. 2. Температурная зависимость периодов магнитных геликоидов в тонких плёнках Dy и Ho и сверхрешётке Dy/Ho в сравнении с периодами геликоидов объёмных Dy и Ho [2 – 3].

При проведении эксперимента по РПН, были обнаружены зависящие от температуры магнитные спутники, соответствующие геликоидальному упорядочению Dy в плёнке Dy и сверхрешётке, и соответствующие геликоидальному упорядочению Ho в плён-



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)



Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

ке Ho, а также Ho в сверхрешётке Dy/Ho, что отражено на Рис.1. Анализ температурной зависимости периода геликоиды (Рис. 2) позволил установить:

- Образование двух когерентно распространяющихся между слоями в сверхрешётке магнитных геликоид, соответствующих Dy и Ho соответственно. Период этих геликоид превосходит период магнитных геликоид Dy и Ho в тонких плёнках и объёмных монокристаллах этих РЗМ.
- Отсутствие перехода в соизмеримую коническую фазу в плёнке Ho и слоях Ho в сверхрешётке при температурах ниже T_C для объёмного Ho.
- Существенное снижение температуры Нееля для Ho в тонкой плёнке Ho при отсутствии подобного эффекта в слоях Ho в сверхрешётке.
- Понижение температуры Кюри для Dy в тонкой плёнке Dy и слоях Dy в сверхрешётке при сохранении геликоидального упорядочения в некоторых участках образца вплоть до $T=1.5$ К в тонкой плёнке Dy.

Исследование поддержано проектом РФФИ №19-32-90007 «Аспиранты».

1. R.J. Elliott, Magnetic Properties of Rare Earth Metals, N.Y.: Plenum (1972).
2. J. Yu, P. R. LeClair, G. J. Mankey, et al., Phys. Rev. B **91**, 014404 (2015).
3. M. J. Pechan, C. Stassis, Journal of Applied Physics **55**, 1900 — 1902 (1984).
4. F. Tsui, C. P. Flynn, Phys. Rev. Lett. **71**, 1462 — 1465 (1993).
5. C. Dufour, K. Dumesnil, P. H. Mangin, Pramana **67**, 173 — 190 (2006).
6. A. D. F. Herring, W. J. Nuttall, M. F. Thomas, et al., Journal of Physics: Condensed Matter **17**, 2543 — 2552 (2005).
7. J.A. Simpson, R. A. Cowley, D. F. McMorrow, et al., J. Phys.: Condens. Matter **8**, L187 (1996).

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ СВЕРХРЕШЕТОК Dy/Co МЕТОДАМИ РПН И РМКД

М. В. Макарова^{1,2*}, Е. А. Кравцов^{1,2}, В. В. Проглядо¹, В. В. Устинов¹

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

*E-mail: makarova@imp.uran.ru

За последние 10 лет возрос интерес к системам редкоземельный металл/переходный металл (РЗМ/ПМ), так как появилась возможность переключения намагниченности системы без внешнего магнитного поля с помощью фемтосекундного пульсирующего лазера [1]. Необходимые условия оптомагнитного переключения — это антиферромагнитное взаимодействие, неэквивалентные подрешетки и наличие перпендикулярной магнитной анизотропии [1]. Наиболее характерные представители данного класса веществ: Gd/Fe, Tb/Co, Ho/Co, GdFeCo и т.п.

В докладе представлены результаты исследований сверхрешёток Dy/Co. Данная наноструктура может стать элементом устройства магнитооптической системы записи и хранения информации, поскольку магнитные моменты Dy и Co упорядочиваются антипараллельно [2, 3]; температуры Кюри и магнитные моменты этих металлов различны. Варьируя толщины слоев и температуру, можно в широких пределах изменять магнитное упорядочение в таких системах, в том числе добиваться компенсации магнитных моментов Dy и Co подрешеток. Также, в сверхрешётках Dy/Co со сравнительно тонкими слоями возможно наличие перпендикулярной магнитной анизотропии.

Для понимания механизмов эффектов, наблюдаемых в магнитных сверхрешётках, необходимо определить на атомном уровне профили намагниченности внутри отдельных слоев. В последней работе мы показали, что при напылении слоёв Dy/Co на кристаллический буферный слой, образовывается интерметаллид DyCo₂ и слой Co [4, 5].

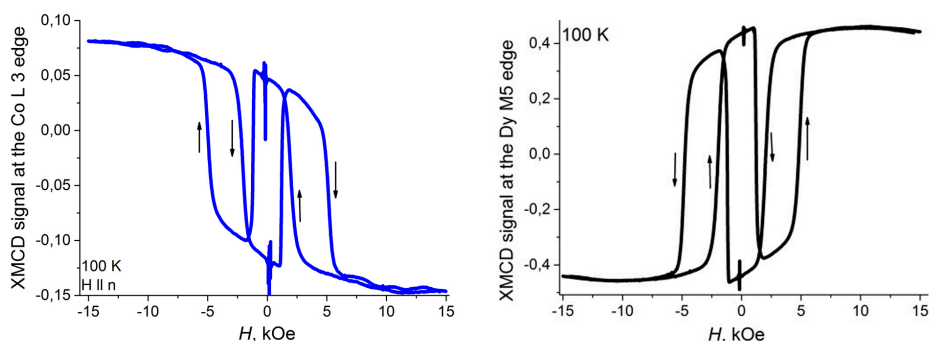
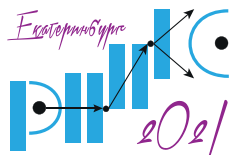


Рис. 1. Петли магнитного гистерезиса сверхрешётки $[\text{Dy}(20 \text{ \AA})/\text{Co}(30 \text{ \AA})]_{40}$, измеренные на краях поглощения Co $L_{2,3}$ и Dy $M_{4,5}$ при $T = 100 \text{ K}$ (внешнее магнитное поле прикладывалось перпендикулярно плоскости образца).



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

→ Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

В данной работе мы демонстрируем результаты исследования магнитных свойств сверхрешёток Dy/Co с помощью рефлектометрии поляризованных нейтронов (РПН) и рентгеновского магнитного кругового дихроизма (РМКД) (Рис. 1).

Серия сверхрешёток: Nb/[Dy(X)/Co(30 Å)]₄₀, где X = 4 – 20 Å изготовлена методом высоковакуумного магнетронного распыления на монокристаллических подложках (001)Si. Измерения рефлектометрии поляризованных нейтронов проводили в стандартной геометрии $\theta - 2\theta$ на рефлектометре NREX на исследовательском реакторе FRM II. Измерения рентгеновского кругового магнитного дихроизма на краях поглощения Dy $M_{4,5}$ и Co $L_{2,3}$ проводились на установке PGM-1 синхротрона BESSY.

Конкуренция сильного обменного взаимодействия DyCo₂ и Co, магнитной анизотропии и энергии Зеемана приводит к сложному магнитному поведению, которое можно наблюдать на аномальных петлях гистерезиса РМКД, измеренных на краях поглощения Dy и Co (Рис. 1).

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема "Спин" № АААА-А18-118020290104-2) и при частичной поддержке РФФИ (проект № 20-42-660024).

1. S. Mangin, M. Gottwald, C-H. Lambert, D. Steil, Nature Materials **13** (2014).
2. Z. S. Shan, D. J. Sellmyer, S. S. Jaswal et al., Phys. Rev. Letters **63**, 4 (1989).
3. Z. S. Shan, D. J. Sellmyer, Phys. Rev. B. **42**, 16 (1990).
4. I. A. Subbotin, E.M. Pashaev, A.L. Vasiliev et al., Physica B **573**, 28. (2019).
5. М.В. Макарова, Е.А. Кравцов, В.В. Проглядо и др., ФТТ **62**, 9 (2020).

EFFECT OF INTERFACIAL DZHALOSHINSKII-MORIYA INTERACTION ON POLARIZED NEUTRONS REFLECTION

D. A. Tatarskiy^{1,2*}

¹Institute for Physics of Microstructures RAS, Nizhny Novgorod, Russia

²Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

*E-mail: tatarskiy@ipmras.ru

It was pointed out [1] that even in a high-symmetry lattice, where the antisymmetric Dzyaloshinskii–Moriya interaction (DMI) would normally vanish, this interaction is present in the vicinity of any lattice defect. Hence, based on these considerations, one may expect that the DMI substantially influences the magnetic microstructure of polycrystalline materials with a large defect density. In a sense, microstructural defects act as a source of additional local chiral interactions, similar to the above mentioned (intrinsic) DMI in noncentrosymmetric crystals. The impact of such defect-induced DMI has been studied both theoretically [2] and experimentally [3] in small angle neutron scattering (SANS). It leads to small chiral variations of magnetization fluctuations. These variations have a helix-like type, so the effect on SANS observed when the magnetic field is applied perpendicular to the scattering plane.

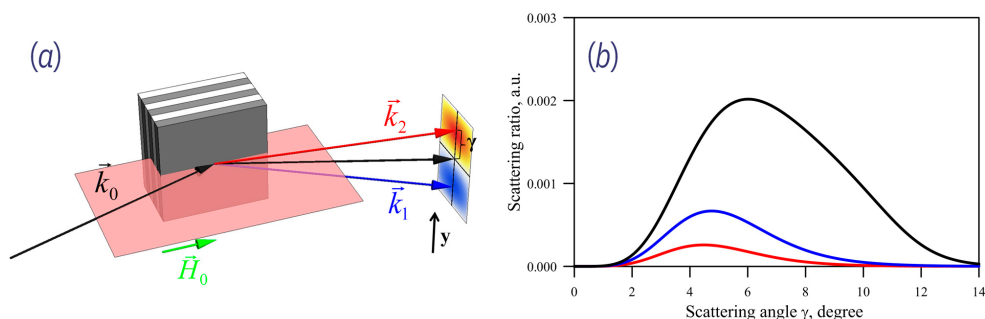


Рис. 1. (a) — experimental scheme proposal; (b) — chiral/Specular differential cross-section ratio vs. transversal scattering angle γ . Red, blue and black curves for $D = 0.5, 1.0$ and 1.5 erg/cm² consequently.

On the other hand thin polycrystalline films with heavy metal–ferromagnet interfaces shows a strong interfacial-induced DMI [4]. Homochiral magnetic textures are studied in them by Brillouin light scattering [5] or Lorentz transmission electron microscopy [6]. In case of small enough interfacial DMI constant the fluctuations of magnetization near saturation in a high homogeneous external field can also be calculated.

Let the external magnetic field is applied along x axis in plane of the film with interfacial DMI (Fig. 1a). The magnetization is determined by balance of torque equation

$$[\vec{M}(\vec{r}) \times \vec{H}_{eff}(\vec{r})] = 0 \quad (1)$$

where $\vec{M}(\vec{r})$ is magnetization distribution and $\vec{H}_{eff}(\vec{r})$ is an effective field. It is defined as the functional derivative of the magnetostatic energy-density functional. We consider the case

when the external field is applied in plane of the film along x axis. The z axis is oriented along the normal to the film. The Eq.(1) can be linearized near saturation. We suppose every crystalline in the film is characterized by its own uniaxial anisotropy direction. Such random magnetocrystalline anisotropy is the source for small fluctuations of the magnetization near saturation. The solution for small variations $M_{y,z}$ can be given in Fourier form [7]

$$\begin{cases} \tilde{M}_y = \frac{\tilde{H}_{Ay} \left(A + 4\pi \frac{q_y^2}{q^2} \right) - \tilde{H}_{Az} B}{A^2 + 4\pi \frac{q_y^2 + q_z^2}{q^2 - q_y^2 L_{DMI}^2}}, \\ \tilde{M}_z = \frac{\tilde{H}_{Az} \left(A + 4\pi \frac{q_y^2}{q^2} \right) - \tilde{H}_{Ay} B^*}{A^2 + 4\pi \frac{q_y^2 + q_z^2}{q^2 - q_y^2 L_{DMI}^2}}, \end{cases} \quad (2)$$

where

$$A = \frac{H_0}{4\pi M_0} + L_{ex}^2 q^2 \quad \text{and} \quad B = 4\pi \frac{q_y q_z}{q^2} + i q_y L_{DMI} \quad \text{and} \quad \tilde{H}_{Ay,z}$$

are the Fourier components of the random magnetocrystalline anisotropy field. The chiral-dependent part of neutron cross-section in case of neutron polarization along x axis is

$$\frac{\partial \sigma(\vec{q})^{(x)}}{\partial \Omega} \sim \text{Im}(\vec{q} \cdot [\vec{M}^* \times \vec{M}]). \quad (3)$$

The resulting ratios of chiral to specular part of the differential scattering cross-section for different typical interfacial DMI values are shown on Fig. 1b.

Comparing [2, 3] we see the difference in chiral fluctuation for small transversal magnetization deviations in case of the bulk DMI and the interfacial DMI. In bulk materials the chiral part of deviations is a long range helix-like textures. Thus the asymmetry in polarized neutron scattering exists when the external field applied along this helix axis and perpendicular to the scattering wavevector. The iDMI give rise to the long range cycloidal-like fluctuations. That is why the asymmetry effect appears when the external field applied in the specular reflection plane.

Thus we show that the random magnetocrystalline anisotropy with interfacial DMI in polycrystalline films give rise to chiral part of magnetic ripple. This ripple can be detected by GISANS experiment.

This research was supported by the Russian Science Foundation (Grant № 21-12-00271).

1. A. Arrott, J. Appl. Phys. **34**, 1108 (1963).
2. A. Michels, D. Mettus, D. Honecker, K. L. Metlov, Phys. Rev. B **94**, 054424 (2016).
3. A. Michels, D. Mettus, I. Titov et al., Phys. Rev. B **99**, 014416 (2019).
4. H. Yang, A. Thiaville, S. Rohart, A. Fert, M. Chshiev, Phys. Rev. Lett. **115**, 267210 (2015).
5. M. Belmeguenai, J.-P. Adam, Y. Roussigne et al., Phys. Rev. B **91**, 180405(R) (2015).
6. L.-C. Peng, Y. Zhang, S.-L. Zuo et al., Chin. Phys. B **27** 066802 (2018).
7. D.A. Tatarskiy, J. Magn. Magn. Mater. **509**, 166899 (2020).

MAGNETIC PHASE DIAGRAM OF THE UNIAXIAL HELIMAGNET $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$: EVIDENCE FROM SMALL ANGLE NEUTRON SCATTERING

A. A. Bykov^{1*}, N. Chubova², Yu. Kousaka³, A. S. Ovchinnikov⁴, J. Kishine⁵, S. V. Grigoriev^{1,6}

¹Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P.Konstantinov of NRC «Kurchatov Institute», Gatchina, Russia

²NRC «Kurchatov institute», Moscow, Russia

³Center for Chiral Science, Hiroshima University, Higashihiroshima, Hiroshima, Japan

⁴Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

⁵The Open University of Japan, Tokyo, Japan

⁶Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

*E-mail: redi87@bk.ru

The magnetic structure of the $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$ compound was studied by small angle neutron scattering (SANS) under applied magnetic field in the wide temperature range below $T_N = 130$ K. The magnetic spiral of Cr^{3+} ions is built along the c-axis of the structure belonging to the $P6_322$ space group at zero field [1 – 3]. As the sample under study is in the powder form, the diffraction ring is detected that is interpreted as scattering on the magnetic spiral with the period of 485 Å at low temperatures (Fig. 1).

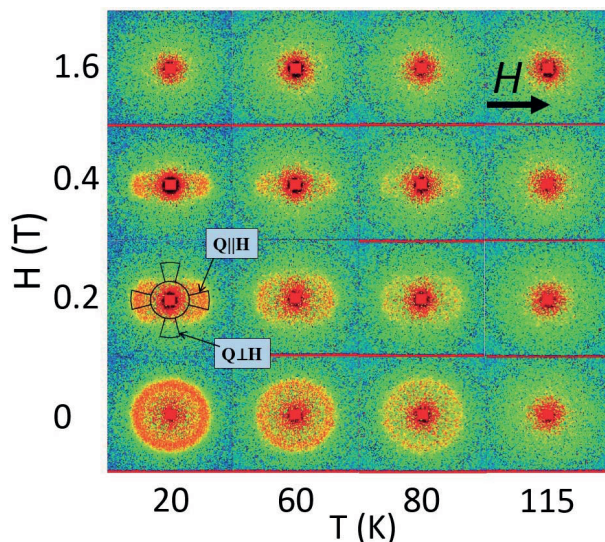


Рис. 1. A set of the SANS maps of the H-scan for the different magnetic fields and temperatures.

The intensity of the diffraction peak decreases with T and vanishes completely at $T = 115$ K. Being applied perpendicular to the neutron beam, the magnetic field affects differently the samples grains with helix wave vector $\mathbf{k}$ along the field and those with $\mathbf{k}$ perpendicular to the field. The magnetic field, when applied, leads to emergency of the chiral soliton lattice (CSL) for the grains with $\mathbf{k}$ perpendicular to the field. The period of the CSL increases rapidly as H approaches $H_{C1} = 0.25$ T. The transition from CSL to the field-induced ferromagnet, however, is not homogeneously smooth but is accompanied by the strong ferromagnetic

fluctuations in the wide field range around H_{C1} . These fluctuations are well visible in SANS experiment as scattering at $Q = 0$. For the grains with $\mathbf{k}$ parallel to the field systems undergoes a series of the transitions from helimagnet to the conical state, and then to the field-induced ferromagnet at $H_{C2} = 1.25$ T. The period of the cone increases slightly (for 5 %) with increase of the field, while the transition to the field – induced ferromagnetic state is again accompanied by strong ferromagnetic fluctuations. Magnetic field – Temperature ($H - T$) phase diagram was drawn on the basis of the obtained SANS data (Fig. 2).

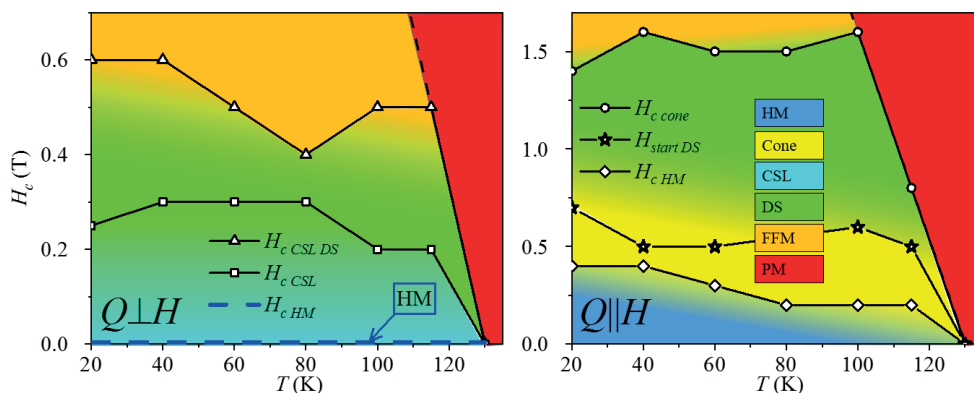


Рис. 2. HT phase diagrams of magnetic spiral in $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$.

1. Y. Togawa et. al Phys. Rev. Lett. **108**, 21–25 (2012).
2. Y. Togawa et. al Phys. Rev. B **92**, 1–6 (2015).
3. K. Tsuruta et. al Phys. Rev. B **93**, 104402 (2016).

Секция 4.

Сильно коррелированные электронные системы

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНО-ВАЛЕНТНОЙ ПРИМЕСИ НА НАВЕДЕННОЕ МАГНИТНОЕ УПОРЯДОЧЕНИЕ В СИСТЕМЕ С СИНГЛЕТНЫМ ОСНОВНЫМ СОСТОЯНИЕМ PrNi: ДАННЫЕ НЕЙТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

П. С. Савченков*, П. А. Алексеев, В. Н. Лазуков

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

*E-mail: savch92@gmail.com

В работе рассмотрены особенности явления «наведенного» магнитного упорядочения в интерметаллическом редкоземельном соединении PrNi.

Для описания формирования дальнего магнитного порядка в системе с синглетным основным состоянием PrNi предложена реалистичная трехуровневая модель. В рамках модели учтены реальная схема уровней в кристаллическом поле для Pr^{3+} , дипольные магнитные матричные элементы переходов между ними, а также наличие двух магнитных атомов в примитивной ячейке. Последнее приводит к формированию акустических и оптических мод для каждого из исходно одноионных возбуждений, соответствующих переходам между синглетами.

В результате подгонки экспериментальных данных, полученных на монокристалле PrNi для одного из направлений высокой симметрии, в котором при понижении температуры формируется мягкая акустическая магнитная мода, получены значения констант обменного взаимодействия. Модель позволила получить разумное описание всей имеющейся совокупности экспериментальных данных по неупругому магнитному рассеянию нейтронов, в частности, успешно описаны наблюдаемые особенности дисперсии и интенсивности магнитных возбуждений для основных направлений высокой симметрии.

Отдельное внимание в работе уделено влиянию дефектов различной природы в редкоземельной подрешетке (немагнитная примесь La — $\text{Pr}_{1-x}\text{La}_x\text{Ni}$ [1] и промежуточно-валентная (ПВ) Се — $\text{Pr}_{1-x}\text{Ce}_x\text{Ni}$ [2]) на условия возникновения дальнего магнитного порядка (ДМП) в системах на основе PrNi. Предложен и реализован микроскопический подход к структурному моделированию влияния дефектов на ДМП.

Результаты экспериментов по замещению на немагнитную примесь La демонстрируют наличие критического параметра, определяющего температуру перехода. Установлено, что критический параметр формируется в результате конкурирующих взаимодействий: эффектов кристаллического поля и обменного взаимодействия. Переход в ферромагнитную фазу при замещении Pr на La наблюдается вплоть до концентрации $\text{La } x = 0.5$ (сплошная линия на Рис. 1).

Замещение Pr на ПВ ион Се приводит к увеличению области существования ДМП на фазовой диаграмме (пунктирная линия на Рис. 1), по сравнению с замещением немагнитной примесью. Переход в упорядоченное состояние в $\text{Pr}_{1-x}\text{Ce}_x\text{Ni}$ наблюдается вплоть до $x = 0.9$. Экспериментально установлено, что магнитный момент на ионе Се, находящегося в ПВ состоянии, себя никак не проявляет, очевидно, ввиду его подавления за счет быстрых спиновых флуктуаций. Основное влияние на температуру магнитного упорядочения от замещения Pr промежуточно-валентным ионом Се обусловлено обнаруженным существенным подавлением расщепления в кристаллическом поле для Pr^{3+} .

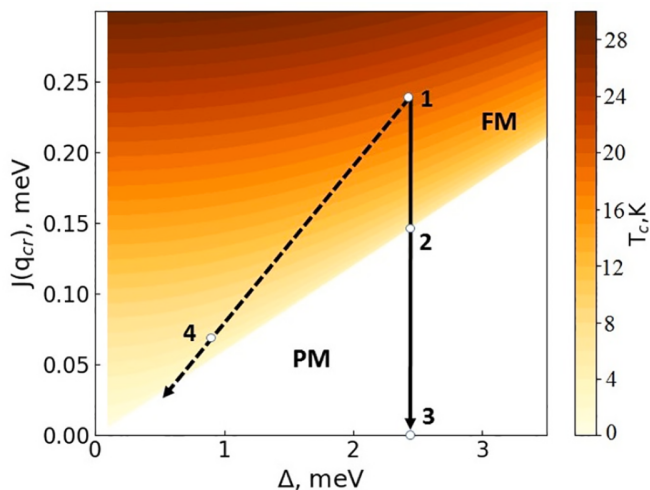


Рис. 1. Диаграмма магнитных состояний систем на основе PrNi. Представлена взаимосвязь между температурой магнитного упорядочения (T_c), параметра обменного взаимодействия $J(q)$ и величиной расщепления в кристаллическом поле (Δ). Сплошной линией отмечено изменение T_c с увеличением концентрации La в $\text{Pr}_{1-x}\text{La}_x\text{Ni}$, пунктирной — изменение T_c с увеличением концентрации Ce в $\text{Pr}_{1-x}\text{Ce}_x\text{Ni}$. Точки соответствуют соединениям: 1. — PrNi . 2. — $\text{Pr}_{0.5}\text{La}_{0.5}\text{Ni}$. 3. — LaNi . 4. — $\text{Pr}_{0.25}\text{Ce}_{0.75}\text{Ni}$.

1. P. S. Savchenkov, E. S. Clementyev, P. A. Alekseev, V. N. Lazukov, JMMM **489**, 165413 (2019).
2. P. S. Savchenkov, E. S. Clementyev, V. N. Lazukov, P. A. Alekseev, JMMM **514**, 167187 (2020).

НЕЙТРОННОЕ РАССЕЯНИЕ НА ДОПИРОВАННЫХ НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКИХ BiMnO_3

В. В. Сиколенко^{1,3,5*}, Д. В. Карпинский², Д. В. Желудкевич², С. И. Латушко²,
В. В. Ефимов¹, Т. Н. Вершинина¹, А. А. Белик⁴

¹Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Научно-практический центр по материаловедению НАН РБ, Минск, Беларусь

³Технологический институт Карлсруэ, KIT, Карлсруэ, Германия

⁴Национальный институт по материаловедению NIMS, Цукуба, Япония

⁵НОЦ «Функциональные материалы», Балтийский Федеральный Университет, Калининград, Россия

*E-mail: vadim.sikolenko@jinr.ru

Висмут-содержащие перовскиты интенсивно исследуются в последние годы, составы на основе BiMnO_3 являются сегнетоэлектриками, не содержащими свинец и при этом характеризуются дальним магнитным порядком, таким образом являются мультиферроками. Наиболее изученными мультиферроками являются составы на основе феррита висмута (BiFeO_3), а также составы системы $\text{BiFeO}_3\text{—BiMnO}_3$. Авторы провели эксперименты по нейтронным и синхротронным дифракционным исследованиям керамических составов BiMnO_3 замещенных ионами железа, которые изучены намного меньше в связи с большой сложностью приготовления [1]. Ферромагнитное упорядочение в исходном составе BiMnO_3 обусловлено орбитальным упорядочением, которое разрушается при температуре ~ 475 К, в то время как структурные искажения остаются моноклинными [2, 3]. Магнитная структура замещенных составов определяется обменным взаимодействием между ионами марганца и железа и сильно зависит от геометрии химической связи Mn—O—Mn(Fe) . Установлено, что увеличение концентрации ионов железа приводит к разрушению орбитального упорядочения, характерного для исходного состава BiMnO_3 , при этом составы с концентрацией ионов-заместителей более 30 % характеризуются смешанным магнитным состоянием, характерным для состояния типа спинового кластерного стекла.

Также были выполнены эксперименты по нейтронной и синхротронной дифракции высокого разрешения в широком диапазоне температур для составов с номинальным содержанием кислорода выше стехиометрического $\text{BiMnO}_{3+\delta}$. Показано, что формирование вакансий в позициях ионов висмута и марганца приводит к разрушению ферромагнитного упорядочения, при этом кристаллическая структура составов изменяется от моноклинной в орторомбическую через формирование двухфазного структурного состояния.

Работа поддержана грантом РФФИ-БРФФИ 20-52-00023.

1. A. Belik, Adv. Mater. **12**, 044610 (2011).
2. J. M. D. Covey et.al. Adv. Phys. **48**, 167 (2010).
3. A. Belik et.al., J. Am. Cer. Soc. **132**, 8137 (2010).

NEUTRON INVESTIGATION of $\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$, SYNTHESIZED ON THE α -MnS MOTT DIELECTRIC

G. Abramova^{1*}, *M. Boehm*², *J. Schefer*³, *A. Piovano*², *N. Aliouane*³

¹Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC, SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

²Institut Max von Laue – Paul Langevin, Grenoble, France

³Paul Scherrer Institute, CH-5232 Villigen, Switzerland

*E-mail: agm@iph.krasn.ru

The α -MnS-based $\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ ($0 < x < 0.3$) solid solutions are synthesized new Mott materials with the rock salt structure. Investigation of such materials is interesting for both fundamental study of the interrelation between the magnetic, electrical, and structural properties in MnO-type strongly correlated electron systems and application. Pressure-induced metallization at hydrostatic and chemical pressure of these materials presented in [1]. Investigation of Mössbauer spectra in the temperature range from 4.2 to 300 K found that Fe^{2+} ions in the $\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ samples have a high-spin (HS) state in locally distorted octahedral positions of the solid solution. In the samples with $0.25 \leq x \leq 0.29$, the chemical pressure leads to appearing of new Fe^{2+} states corresponding to the additional doublet with the IS value typical of low spin LS Fe^{2+} [2] under ambient pressure.

Neutron diffraction data [3] show that the chemical-pressure (x) induced Neel temperature shift from 150 ($x = 0$) to 200 ± 5 K ($x = 0.29$) in these materials with a decrease in the NaCl-type cubic lattice parameters under ambient pressure. This indicates the enhancement of the superexchange interaction constant with decreasing distance between magnetic ions upon substitution of Fe for Mn. Below Neel temperature T_N similar to α -MnS, $\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ ($0 < x < 0.2$) exhibit the FCC II (AFM-II) antiferromagnetic order with ferromagnetic (FM) sheets of the (111) planes antiferromagnetically stacked along the [111] direction of FCC NaCl lattice. With increasing of Fe-substitution the additional nonequivalent magnetic states of iron Fe^{2+} are appeared in the samples and its formed the magnetic structures which can be described by the propagation vectors: $\mathbf{k}_1 = (1/2, 1/2, 1/2)$, $\mathbf{k}_2 = (1/2, 1/2, 0)$, and $\mathbf{k}_3 = (1/2, 0, 0)$. These data are correlated with the results of the Mössbauer investigation [2].

The results of the neutron diffraction investigations of the magnetic state with the propagation vector $\mathbf{k}_1 = (1/2, 1/2, 1/2)$ under hydrostatic pressures up to 42 kbar in the temperature range from 65 to 300 K [4] for $x = 0.27$ presented on Fig. 1. The Néel temperature of the $\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ ($x \sim 0.27$) sample at ambient pressure $T_N = 205 \pm 5$ K. The shift of the Néel temperature up to 280 ± 5 K was detected with increasing pressure up to 42 kbar (4.2 GPa). The mechanism of the increase in the Néel temperature can be associated with a NaCl-lattice compression and an increase in the exchange integral due to the increase in the degree of covalence and the metallization.

Additional (see Fig. 1), we found a decrease in the sublattice magnetization ($|F_{\text{mag}}| \sim \sqrt{I}$, I is the peak intensity) with increasing of hydrostatic pressure for $\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$. For example, at 100 K the magnetization of the sample decreases nonlinearly by a factor of 2.5 with increasing pressure up to 42 kbar (4.2 GPa). Taken in to account the Mössbauer data [2], according which the chemical pressure leads to appearing of new Fe^{2+} states with the IS value typical of LS Fe^{2+} , we can supposed that the Mn^{2+} ions also have the coexistence of the HS and LS states with increasing of hydrostatic pressure due to spin crossover. For pure α -MnS the spin state of Mn^{2+} ions is changed from HS to LS continuously in the pressure range from 10 to 40 GPa (400 kbar) [5].

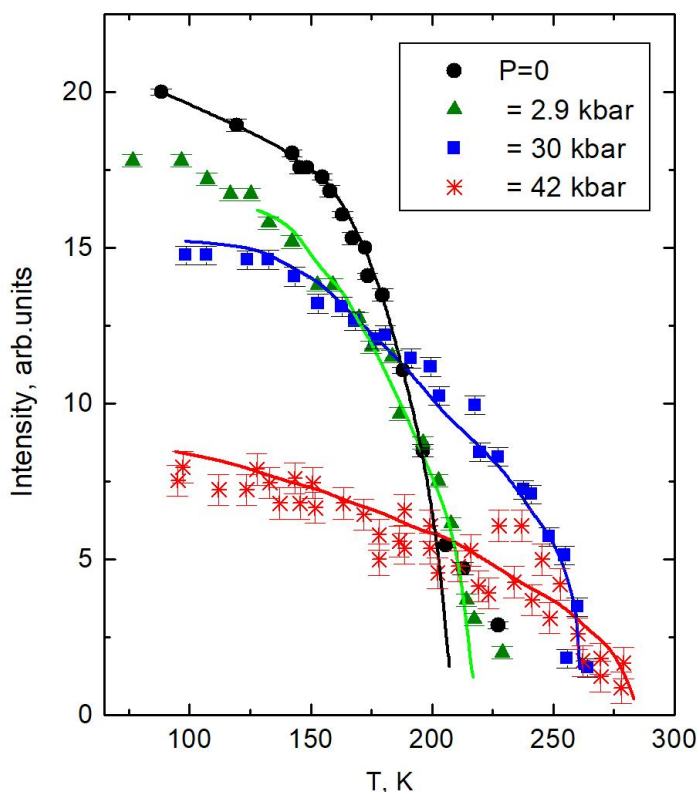


Рис. 1. Change of integral intensity $|F_{mag}|$ of the sublattice magnetization with $\mathbf{k}_1 = (1/2, 1/2, 1/2)$ of $\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ ($x \sim 0.27$) under hydrostatic pressure up to 42 kbar.

We acknowledge the beam time used at D1A and IN8 of the Institut Laue–Langevin Grenoble (ILL) and the single instrument ZEBRA at the Swiss Spallation Neutron Source SINQ/Paul Scherrer Institut, Villigen PSI. This study was supported by the INTAS project no. 06-100013-9002 and in part the CRDF-SB RAS project no. RUP1-7054-KR-11, N 16854.

1. G.M. Abramova, A. Hanzawa, T. Kagayama, Y. Mita, et al. J. Mag. Mag. Mat. **465**, 775 (2018).
2. G.M. Abramova, Yu.V. Knyazev, O.A. Bayukov, S.P. Kubrin, Physics of the Solid State **63**, 68 (2021).
3. G. Abramova, J. Schefer, N. Aliouane, M. Boehm, et al. J. Alloys and Compounds **632**, 563 (2015).
4. G. Abramova, M. Boehm, J. Schefer, A. Piovano, et al. JETP Letters **106**, 498 (2017).
5. Y. Wang, L. Bai, T. Wen, et al., L. Angew. Chem. Int. Ed. **55**, 10350 (2016).

ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ В КИРАЛЬНЫХ ФЕРРОМАГНЕТИКАХ $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$

А. А. Повзнер, А. Г. Волков, Т. А. Ноговицына, С. А. Бессонов*

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург,
Россия

*E-mail: t.a.nogovitsyna@urfu.ru

Развивается флуктуационная теория, описывающая особенности теплового расширения при концентрационных и термодинамических магнитных фазовых переходах в киральных ферромагнетиках со взаимодействием Дзялошинского–Мория. Основное состояние описывается на основе приближения LDA+U+SO с дополнительным учетом концентрационных флуктуаций, связанных с различием потенциалов внутриатомного хаббардовского взаимодействия на узлах. Уравнение магнитного состояния в развитой модели описывает не только киральный геликоидальный ферромагнетизм, но и флуктуации спиновой спирали, за счет которых при включении внешнего магнитного поля формируются скирмионные состояния.

Решения уравнений магнитного состояния рассматриваются на примере квазибинарных неупорядоченных сплавов $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$. Важной особенностью сплавов $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ является существование в них инвариантных особенностей теплового расширения, а также, наблюдаемые на нейтронографических экспериментах флуктуации спиновой спирали (катастрофа модели Янсена-Бака), а также формирование во внешнем магнитном поле киральной спиновой жидкости со скирмионными микроструктурами. В данной работе получены температурные зависимости объемного коэффициента теплового расширения (ОКТР) для широкого диапазона концентраций. Учет различия потенциалов железа и кобальта на узлах, позволил описать экспериментально наблюдаемый широкий отрицательный минимум теплового расширения. Показано, что изменение знака коэффициента междоузельной связи в точке T_c (температура, соответствующая максимуму магнитной восприимчивости) приводит к формированию широкого минимума, обусловленного флуктуациями на узлах кулоновских потенциалов Fe и Co. Получено, что ОКТР меняет знак при переходе в парамагнитную фазу в точке T_s , вследствие исчезновения модуля локальной намагниченности на узле. Обсуждается корреляция полученных результатов с нейтронографическими экспериментами. Учет концентрационных флуктуаций в сплавах $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ позволяет описать зависимость ОКТР в области температур $T_c > T > T_s$, где на эксперименте наблюдаются флуктуации спиновой спирали или скирмионные состояния.

Секция 5.
**Некристаллические материалы,
полимеры, жидкости**

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ НАНОЧАСТИЦ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ НАНОКОМПОЗИТА ПОЛИСТИРОЛ-ФУЛЛЕРЕН

Т. В. Тропин^{1*}, М. Л. Карпец^{2,3}, Е. Косячкин^{1,4}, И. В. Гапон¹, Ю. Е. Горшкова¹,
В. Л. Аксенов¹

¹Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна, Россия

²Институт экспериментальной физики, Словацкая АН, Кошице, Словакия

³Технический университет в Кошице, Кошице, Словакия

⁴Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков, Украина

*E-mail: ttv@jinr.ru

Тонкие пленки полимеров и полимерных нанокмпозитов являются перспективными объектами для широкого круга приложений, включая сенсоры и солнечные батареи [1]. К типичным процедурам получения таких пленок из растворов относятся центрифугирование (спин-коатинг), аэрозольное распыление (спрей-коатинг), погружение (дип-коатинг). Как показывают исследования [2,3], структурная организация наночастиц внутри пленки является одним из свойств, определяющих ее устойчивость и другие важные характеристики. Частицы не всегда однородно распределяются внутри пленок, а могут образовывать слои у поверхности или подложки. Эффективными методами исследования организации наночастиц в пленке являются нейтронная рефлектометрия и рентгеновская рефлектометрия.

В настоящей работе данными методами исследуются тонкие пленки нанокмпозитов полистирол-фуллерен C_{60}/C_{70} [4]. Пленки получены методом спин-коатинга из растворов полистирола и фуллеренов в толуоле на кремниевые подложки. Относительная доля фуллеренов к полимеру составляла 1, 3 и 5 масс. %. Измерения методом нейтронной рефлектометрии выполнены на рефлектометре ГРЭИНС на реакторе ИБР-2 (ЛНФ, ОИЯИ). Дополнительно, выполнены исследования поверхностей пленок методом атомно-силовой микроскопии. Показано, что фуллерены Сейчас $_{70}$ в пленках частично образуют агрегаты. При этом также показано, что наночастицы образуют плотные слои толщиной менее 5 нм у поверхности подложки.

Работа выполнена при поддержке программы сотрудничества ОИЯИ-Польша (168/2021 п. 13).

1. T. P. Russell and Y. Chai, *Macromolecules* **50** (12), 4597 (2017).
2. K. A. Barnes, J. F. Douglas, D. W. Liu, and A. Karim, *Adv. Colloid Interface Sci.* **94** (1-3), 83, (2001).
3. M. A. Holmes, M. E. Mackay, R. K. Giunta, *J. Nanoparticle Res.* **9** (5), 753, (2007).
4. T. V. Tropin, M. L. Karpets, Ye. Kosiachkin, I. V. Gapon, Yu. E. Gorshkova, V. L. Aksenov, *Fullerenes, Nanotub. Carbon Nanostructures*, (2021).

ЭВОЛЮЦИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ И НАДМОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ В ПРОЦЕССЕ ФЕРМЕНТАТИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Л. В. Иванова¹, А. А. Кульминская¹, Е. В. Энейская¹, К. Б. Устинович², Ю. Е. Горшкова³,
Т. В. Хамова⁴, Н. В. Цвигун⁵, А. Е. Баранчиков², Г. П. Копица^{1,4*}

¹Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт»,
Гатчина, Россия

²Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия

³Лаборатория Нейтронной Физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна, Россия

⁴Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁵ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

*E-mail: kopitsa_gp@pnpi.nrcki.ru

Бактериальная целлюлоза (БЦ), синтезируемая бактерией *Gluconoacetobacter xylinum* в стационарных условиях, является плотной плёнкой на поверхности питательной среды, способной удерживать большое количество жидкости в соотношении $\sim 1:100$ (сухое вещество: вода) и сохранять высокую механическую прочность на разрыв. Физико-химические свойства и уникальная структура нано-гель-плёнки БЦ обуславливают ее широкое использование при создании новых композитных материалов для хирургии, медицины, кулинарии и др. областей. Так, при использовании традиционных медицинских средств терапии частая смена перевязочного материала влечет за собой травмирование поверхности раны. Использование же БЦ в качестве раневого покрытия, для которого необходимы гигроскопичность, водо- и паропроницаемость материала, механическая прочность и биосовместимость, представляется весьма перспективной альтернативой. Однако одним из существенных ограничений применения биопленок БЦ для лечения ран является их низкая резорбция из-за отсутствия в организме человека целлюлолитических ферментов.

Целью данной работы было изучение процесса деградации кристаллической и надмолекулярной структуры целлюлозных нано-гель пленок (НГП) под воздействием целлобиогидролазы из гриба *Scytalidium candidum* ЗС (ЦБГ) и выбор условий для биодеградации бактериальной целлюлозы для разработки биодеградируемых раневых покрытий и материалов с необходимыми структурными свойствами на основе БЦ.

В настоящей работе [1] впервые было выполнено комплексное исследование эволюции микро- и мезоструктуры НГП БЦ, синтезированной с использованием штамма бактерий *Gluconoacetobacter hansenii* ATCC 10821 на базе Лаборатории энзимологии (ОМРБ, НИЦ КИ – ПИЯФ), на разных стадиях ферментативного гидролиза. Нативная НГП БЦ и образцы, подвергнутые воздействию ЦБГ, были высушены с использованием методики сверхкритической сушки в CO_2 , а затем исследованы комплексом физико-химических методов: РФА, МУРН, УМУРН, МУРР, СЭМ, АСМ и низкотемпературной адсорбции азота.

Комплексный анализ экспериментальных данных показал, что НГП нативной БЦ, высушенной в сверхкритических условиях с использованием CO_2 , представляет собой пористую трехмерную полимерную сеть, состоящую из кристаллических нановолокон толщиной $T \approx 8$ нм и шириной $W \approx 50$ нм и с развитой удельной площадью поверхности $S_{\text{ВЕТ}} \approx 260 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$.

Установлено, что ферментативный гидролиз оказывает существенное влияние на кристаллическую и надмолекулярную структуру нативной БЦ. Выявлено, что ферментативный гидролиз нативной БЦ в течение 24 часов, приводит к:

- Уменьшению среднего размера кристаллов D_{hkl} нанолент БЦ вдоль (101) и (002) плоскостей (примерно на 10 %);
- Значительному увеличению размеров нанолент, составляющих 3D полимерную сеть БЦ, а также фрактальной размерности их поверхности DS;
- Существенному увеличению среднего диаметра пор d_p (с 2.24 до 4.69 нм), наряду с уменьшением удельного объема мезопор $V_{P/P0 \rightarrow 0.99}$ (с 0.86 до 0.42 см³·г⁻¹) и удельной площади поверхности S_{BET} (с ≈ 260 до ≈ 100 м²·г⁻¹);
- Изменениям микроморфологии поверхности БЦ, выражающейся в уширении нанолент 3D полимерной сети и увеличении расстояния между ними, а также к образованию агломератов в узлах полимерной сети, являющихся, по-видимому, продуктами гидролиза бактериальной целлюлозы.

Таким образом, в процессе ферментативной обработки БЦ происходит «разрыхление» ее надмолекулярной структуры с одновременным образованием и накоплением субмикронных частиц в узлах трехмерной полимерной сети.

1. L.A. Ivanova, K.B. Ustinovich, T.V. Khamova, et al., Materials **13**, (9), 2087 (2020).

**СТРУКТУРА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЕРФТОРИРОВАННЫХ МЕМБРАН
С НАНОАЛМАЗАМИ**

Ю. В. Кульвелис^{1*}, В. Т. Лебедев¹, О. Н. Примаченко², А. В. Швидченко³, А. И. Куклин⁴

¹НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Гатчина, Россия

²Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург, Россия

³Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

⁴Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

* E-mail: kulvelis_yv@pnpi.nrcki.ru

Протонопроводящие мембраны на основе сополимера с основной цепью из тетрафторэтилена (ТФЭ) и боковых цепей с сульфокислотными $-\text{SO}_3\text{H}$ группами на концах выполняют важную роль в работе водородных топливных элементов (ТЭ) в различных типах силовых устройств широкого диапазона мощности. Первыми коммерчески используемыми были мембраны на основе материала Нафийон (с длинными боковыми цепями), однако мембраны типа Аквивион (с короткими боковыми цепями), обладают существенными преимуществами — большей протонной проводимостью и большим диапазоном рабочих температур [1]. Для дальнейшего улучшения характеристик мембран типа Аквивион, получаемых поливом раствора сополимера в диметилформамиде (ДМФА), мы использовали в качестве наполнителя частицы детонационного наноалмаза (ДНА, размеры частиц 4 — 5 нм) с различными функциональными группами на поверхности ($-\text{COOH}$, $-\text{H}$, $-\text{SO}_3\text{H}$, $-\text{F}$).

Методом малоуглового рассеяния нейтронов исследована тонкая структура мембран. Показано сохранение гидрофильных каналов в структуре, выполняющих роль путей передачи протонов по мембране в топливной ячейке. Показана связь структуры с изменением проводящих и механических свойств приготовленных мембран, по мере наполнения их ДНА различных типов до уровня 5 вес. %.

Наиболее перспективными для использования являются композиционные мембраны Аквивион с сульфированными ДНА, которые обеспечивают повышение концентрации ионогенных групп в проводящих каналах мембраны, что обеспечивает рост протонной проводимости при высоких рабочих температурах.

Работа поддержана РФФИ (проект 19-03-00249).

1. O. N. Primachenko, E.A. Marinenko, A. S. Odinov, et al., Polym. Adv. Technol. **32**, 1386 (2021).

САМООРГАНИЗАЦИЯ МИЦЕЛЛ И ЧАСТИЦ В СЕТЧАТЫЕ СТРУКТУРЫ

В. С. Молчанов^{1*}, А. И. Куклин², О. Е. Филиппова¹

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия

*E-mail: molchan@polly.phys.msu.ru

Червеобразные мицеллы поверхностно-активного вещества (ПАВ) – это гибкие цилиндрические мицеллы, уникальные полимероподобные агрегаты, которые изменяют реологические свойства водного раствора уже при невысоких концентрациях ниже 10 мМ [1,2]. Значительные изменения свойств раствора происходят благодаря высокой длине мицелл в несколько десятков микрон, в результате чего они подобно полимерным цепям переплетаются и образуют сетку топологических зацеплений, обладающую вязкоупругими свойствами. Но в отличие от полимерных цепей червеобразные мицеллы образованы слабыми нековалентными связями, поэтому длина мицелл зависит от многих параметров, например, количества ПАВ или соли. По этой причине червеобразные мицеллы стали успешно использовать вместо полимеров как загустители с управляемыми свойствами, например в нефтедобывающей промышленности, где, помимо вязкоупругости растворов, используется так же специфичное свойство сетки мицелл разрушаться при контакте с (углеводородами) нефтью, т.к. вместо длинных мицелл образуются капли микроэмульсии, стабилизированные ПАВ [3]. Данная работа нацелена на исследование взаимодействия червеобразных мицелл ПАВ и неорганических частиц как способа создания более прочных сеток червеобразных мицелл путем внедрения в систему физических сшивок. Нанопластины глины широко используются как нанонаполнители для полимерных систем. В том числе потому, что в форме тактоидов они могут использоваться для доставки веществ. В данной работе показано, что нанопластины глины могут быть успешно диспергированы в вязкоупругом растворе червеобразных мицелл ПАВ [4]. Более того при использовании смешанных мицелл цвиттер-ионного и анионного ПАВ обнаружен эффект увеличения вязкости и времени релаксации на порядки при добавлении наночастиц глины в сетку. Были исследованы реологические свойства суспензий при различном составе системы, в том числе при условии образования линейных и разветвленных червеобразных мицелл. Структура сеток была исследована методами малоуглового рассеяния нейтронов и криогенной электронной микроскопии. Показано, что между нанопластинами и мицеллярными цепями образуются связи. Мицеллы прикрепляются торцевыми частями к поверхности нанопластин, покрытой слоем ПАВ. Оценено количество адсорбированного ПАВ. Предложена модель, объясняющая создание менее прочных и более прочных сшивок между мицеллами и частицами. Таким образом, показано, что нанопластины глины могут выступать в роли физических сшивок в сетке переплетенных червеобразных смешанных мицелл ПАВ. Обнаружено, что эффект частиц зависит от формы мицелл и увеличивается при условии образования разветвленных мицелл.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект №17-13-01535).

1. V. S. Molchanov, O. E. Philippova, J. Colloid Interface Sci. **394**, 353 (2013).
2. A. L. Kwiatkowski, V. S. Molchanov, A. S. Orekhov, et al., J. Phys. Chem. B **120**, 12547 (2016).
3. A. V. Shibaev, V. S. Molchanov, O. E. Philippova, J. Phys. Chem. B **119**, 15938 (2015).
4. V. S. Molchanov, M. A. Efremova, A. S. Orekhov, et al., J. Mol. Liq. **315**, 113684 (2020).

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДМОЛЕКУЛЯРНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ МУЛЬТИБЛОК-СОПОЛИМЕРОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИУРЕТАНА МЕТОДАМИ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. А. Павлова^{1,2,}, А. Н. Бугров^{3,4}, Р. Ю. Смыслов^{1,3}, Ю. Е. Горшкова⁵, В. В. Волков⁶,
Н. В. Цвигун⁶, Г. П. Копица^{1,7}*

¹Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт»,
Гатчина, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁴Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,
Санкт-Петербург, Россия

⁵Лаборатория нейтронной Физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна, Россия

⁶ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

⁷Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург, Россия

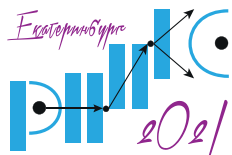
*E-mail: alina.pavlova.htsc@gmail.com

Мультиблочные сополимеры характеризуются гетерогенным строением и содержат области концентрации жестких блоков, а также гибкие сегменты, способные кристаллизоваться. Такая особенность строения мультиблок-сополимеров, способствует пространственному разделению химически разнородных блоков — микросегрегации, т.е. формированию отдельных микрофаз [1]. Микрофазное разделение обуславливает многообразие физических свойств блок-сополимеров. Варьируя химическую структуру сегментных блок-сополимеров, можно контролировать их термомеханические свойства. Наиболее интересное и важное практическое применение мультиблок-сополимеров состоит в разработке на их основе материалов со свойствами термопластов, эластомеров и термоэластопластов, перспективных для использования в качестве клеев, герметиков, упаковочных, теплоизоляционных и демпфирующих материалов [2,3].

В данной работе [4] комплексом методов, включающим в себя рентгенофазовый анализ, атомно-силовую микроскопию, дифференциальную сканирующую калориметрию, а также малоугловое рассеяние нейтронов (МУРН) и рентгеновских лучей (МУРР), проведено исследование организации надмолекулярной структуры сегментных полиуретанмочевин (ПУМ) и ее стабильности в процессе термоциклирования.

При синтезе сегментных полиуретанмочевин в качестве гибких алифатических блоков использовались поликапролактон диолы, с молекулярной массой 530 и 2000 г/моль, в качестве жестких ароматических звеньев были использованы следующие сочетания мономеров: 4,4'-метиленидифенилдиизоцианат и 2,4-толуиленидиизоцианат с диаминами различного химического строения 4'-бис-(4''аминофенокси)-дифенилсульфон, 1,3-метафенилендиамин.

Измерения МУРН проводились на времяпролетном спектрометре малоуглового рассеяния нейтронов ЮМО (ИБР-2, ОИЯИ, Дубна, Россия) в диапазоне переданных импульсов q от 0.006 до 0.6 Å⁻¹. Измерения МУРР были выполнены на автоматическом малоугловом рентгеновском дифрактометре «АМУР-К» (ИК РАН, Москва, Россия) в диапазоне переданных импульсов q от 0.01 до 1 Å⁻¹.



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

→ → → Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

Анализ полученных данных показал, что микрофазное разделение гибких и жестких сегментов наблюдается для всех исследованных образцов мультиблочных полиуретанов вне зависимости от их химического состава. В то же время установлено, что длина как гибких алифатических сегментов, так и жестких ароматических блоков, а также состав используемого удлинителя цепи оказывают существенное влияние на структуру сегментных ПУМ. Так, включение более протяженных гибких алифатических сегментов в структуру мультиблочных полиуретанов, как правило, не влияет на размер доменов, формируемых ароматическими блоками, но приводит к существенному увеличению расстояния между ними. В свою очередь, размер и форма доменов жесткой фазы напрямую зависят от длины ароматического диизоцианата и удлинителя цепи.

Обнаружено, что структурные превращения в мультиблочных полиуретанах при их нагревании и последующем охлаждении в ряде случаев обратимы и зависят, в первую очередь, от сегментальной подвижности гибких блоков.

1. M. J Van der Schuur, R.J. Gaymans. *Polymer*. **48** (2007).
2. C. Prisacariu, Vienna, Springer (2011).
3. K. Gissel, B. Helge, *Macromolecular Materials and Engineering* **288**, 265 – 271 (2003).
4. А.А. Павлова. Исследование органо-неорганических материалов с эффектом памяти формы на основе сегментных полимеров методом малоуглового рассеяния нейтронов и рентгеновского излучения: специальность 03.04.02 «Физика»: выпускная квалификационная работа / Павлова Алина Андреевна; Санкт-Петербургский государственный университет. — Санкт-Петербург, 58 (2021).

МЕЗОСТРУКТУРА БИНАРНЫХ АЭРОГЕЛЕЙ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$, СИНТЕЗИРОВАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭПОКСИД-ИНДУЦИРОВАННОГО ГЕЛЕОБРАЗОВАНИЯ

Л. А. Полевой¹, Н. В. Цвигун^{1,2*}, Ю. Е. Горшкова³, А. Е. Баранчиков¹, С. Ю. Котцов^{1,4},
Г. П. Копица^{5,6}, В. К. Иванов^{1,4}

¹Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия

²ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

³Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

⁶Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург, Россия

* E-mail: n_tsvigun@mail.ru

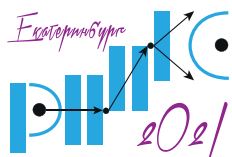
Аэрогели — это высокопористые материалы, в основном с размером пор от 2 до 50 нм и пористостью до 99%, получаемые в результате хаотичного соединения наночастиц в трехмерную сетку. Синтез аэрогелей традиционно включает получение лиогелей золь-гель методом с последующим удалением жидкой фазы таким способом, который позволяет максимально сохранить исходную структуру лиогеля. В силу высокой пористости и большой площади поверхности аэрогели находят применение в качестве тепло- и звукоизоляторов, катализаторов и носителей катализаторов, адсорбентов, сенсоров.

В отличие от хорошо изученных аэрогелей на основе оксида кремния, аэрогели на основе оксидов металлов демонстрируют большее разнообразие свойств и применений. В особенности интересными свойствами обладают смешанные аэрогели оксидов металлов, одним из примеров которых являются аэрогели на основе $\text{TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$.

Аэрогель оксида алюминия (Al_2O_3) обладает повышенной термостабильностью, которая лучше, чем у других оксидных аэрогелей, например диоксида циркония, диоксида титана и оксида ниобия. Кроме того, аэрогель Al_2O_3 обладает сверхнизкой теплопроводностью и отличной каталитической активностью. Благодаря своим привлекательным свойствам аэрогель Al_2O_3 имеет большой потенциал применения в качестве высокотемпературного теплоизолятора и катализатора. Однако, практическое применение данного аэрогеля всегда было ограничено из-за присущей ему хрупкости и склонности к спеканию при высокой температуре.

На данный момент существует несколько способов синтеза смешанных аэрогелей. Наряду с традиционным гидролизом алкоксидов металлов, существует ряд альтернативных методик, например, совместное гелеобразование в присутствии ПАВ, анодное окисление, окисление алюминия с помощью амальгамы, а также эпоксид-индуцированное гелирование.

В данной работе методом эпоксид-индуцированного гелирования неорганических солей (TiCl_4 и $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) и использованием ДМФА в качестве растворителя с последующей сушкой геля в суперкритических условиях были синтезированы смешанные аэрогели $\text{TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ с различным содержанием оксидов алюминия и титана: 0% мол. титана (от общего содержания металла в образце) — чистый Al_2O_3 , 10%, 20%, 50% и



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

• → • → • → Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

100% — чистый TiO_2 . Структура и фрактальные свойства полученных аэрогелей на основе $\text{TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ были исследованы методами РФА, ИК-спектроскопии, СЭМ, МУРН и МУРР, а также низкотемпературной адсорбции азота.

Комплексный анализ полученных данных показал, что все образцы синтезированных аэрогелей являются рентгеноаморфными, пористыми системами, обладающими высокой удельной поверхностью (от 250 до 750 $\text{м}^2/\text{г}$). Установлено существенное влияние фазового состава аэрогелей на их мезоструктуру, фрактальную размерность и характерный размер кластеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 18-29-06014.

ИНЖЕКТИРУЕМЫЕ ДВОЙНЫЕ СЕТКИ НА ОСНОВЕ ПОЛИСАХАРИДА И ПРИРОДНЫХ НАНОТРУБОК

В. С. Молчанов^{1}, С. А. Глухова¹, А. В. Рогачев², О. Е. Филиппова¹*

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия

*E-mail: molchan@polly.phys.msu.ru

В последнее время стали исключительно популярны аддитивные технологии. Они позволяют получать изделия путем послойного добавления материала (3D-печать) и способны обеспечить экономию ресурсов и безотходность производства, что важно не только с экономической, но и с экологической точек зрения [1]. С точки зрения экологии также важно развивать 3D-печать природных биоразлагаемых полимеров, которые по окончании использования не будут загрязнять окружающую среду. К таким полимерам относятся, в частности, полисахаридные гели. Одним из важных направлений развития этой технологии стала 3д-биопечать для применения в медицине. Материалы, используемые в настоящее время для восстановления и регенерации, преимущественно создаются на основе материалов природного происхождения (в том числе полимеров альгината, желатина, коллагена, хитозана, фибрина и гиалуроновой кислоты, часто выделенного из животных тканей). Преимуществом природных полимеров для 3D биопечати и других приложений для тканевой инженерии являются их сходство с человеческим межклеточным матриксом и свойственная им биологическая активность.

Показано, что наиболее перспективным методом 3D-печати для гелей является послойная экструзия из-за простоты, низкой стоимости и высокого качества печати. Однако обнаружено, что изделия, полученные из традиционных гидрогелей, характеризуются низкой механической прочностью. Кроме того, разрешение 3D-печати невысокое из-за «расплывания» структуры, вызванного недостаточными упругими свойствами использованных гидрогелей [2]. Таким образом, обе проблемы 3D-печати традиционных гидрогелей, по сути, вызваны их недостаточными механическими свойствами. Проблемы могут быть решены введением в полимерную матрицу неорганических наноматериалов.

Для создания сеток, применимых в виде чернил для 3д печати, были использованы исключительно природные компоненты: полисахарид альгинат натрия и алюмосиликатные нанотрубки глины галлуазита. Альгинат — анионный полисахарид, получаемый из бурых водорослей, а также синтезируемый некоторыми бактериями. Это водорастворимый линейный мультиблочный сополимер, состоящий из двух видов чередующихся блоков — блоков гулуруновой кислоты (G-блока) и блока маннуруновой кислоты (M-блока). Альгинат был выбран для проведения исследований благодаря таким его ценным свойствам, как биосовместимость, низкая токсичность, относительно низкая стоимость и способность к образованию гелей при сшивании отрицательно заряженных макромолекул друг с другом мультивалентными ионами металлов, например, ионами кальция. В образовании сшивок кальцием в основном участвуют блоки GG. «Многоточечные» сшивки повышают прочность образующейся сетчатой структуры.

Чтобы повысить механические свойства геля в него вводили природные нанотрубки глины галлуазита $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \times n\text{H}_2\text{O}$ (внешний диаметр — около 40 — 70 нм, внутренний диаметр — 15 нм, длина — от 100 нм до 1 мкм согласно данным просвечивающей

электронной микроскопии). При низкой концентрации таких нанотрубок были получены «обычные» нанокомпозитные гидрогели, а при концентрации нанотрубок, превышающей концентрацию их перекрывания, получены двойные сетчатые структуры, в которых полимерная сетка сочетается с сеткой из неорганических наночастиц.

Для успешной экструзионной печати материалы должны удовлетворять целому ряду требований. Разработанные нанокомпозитные гидрогели альгината («чернила» для печати) значительно уменьшают свою вязкость при течении (для легкого продавливания растворов через экструдер и их быстрого смешения), но при этом обладают большими вязкоупругими свойствами (в том числе пределом текучести) в покое (для сохранения формы после выдавливания из экструдера и до момента фиксации) [3]. После инжектирования гидрогели в течение нескольких секунд восстанавливают свойства за счет подвижности и восстановления ионных сшивок, что обеспечивает необходимую фиксацию структуры. Фиксация должна происходить быстро, чтобы обеспечить высокую скорость печати [3].

Таким образом, в работе разработаны нанокомпозитные гидрогели на основе природных компонентов и определены условия, соответствующие наиболее быстрой фиксации структуры, а также наибольшей механической прочности получаемых гелей. Показано, что наиболее прочный гель образуется в случае двойных сетчатых структур, в которых полимерная сетка сочетается с сеткой из неорганических наночастиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2020-794).

1. J. Li, Ch. Wu, P. K. Chu, P. Gelinsky, Mater. Sci. Engin.: R: Reports. **140**, 100543 (2020).
2. D. M. Kirchmayer, R. Gorkin III, M. in het Pankius, J. Mater. Chem. B. **3**, 4105 (2015).
3. S. E. Bakarich, M. in het Pankius, S. Beirne, G. G. Wallace, G. M. Spinks, J. Mater. Chem. B. **1**, 4939 (2013).

NOVEL RESORCINOL-FORMALDEHYDE AEROGELS: SYNTHESIS, STRUCTURE AND FRACTAL PROPERTIES

A. A. Pavlova^{1,2,*}, S. A. Lermontov³, A. N. Malkova³, Yu. E. Gorshkova⁴, V. V. Volkov⁵,
A. E. Baranchikov⁶, G. P. Kopitsa^{1,7}

¹Petersburg Nuclear Physics Institute NRC KI, Gatchina, Russia

²Saint Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

³Institute of Physiologically Active Compounds RAS, Chernogolovka, Russia

⁴Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

⁵FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Moscow, Russia

⁶Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry RAS, Moscow, Russia

⁷Institute of Silicate Chemistry RAS, Saint-Petersburg, Russia

*E-mail: alina.pavlova.htsc@gmail.com

Organic aerogels belong to a very attractive class of aerogel materials possessing both the properties inherent to traditional oxide aerogels (high specific surface and porosity, low apparent density), and unique flexible chemical composition (e.g. the presence of various functional groups). Organic aerogels can be synthesized by polycondensation of resorcinol and formaldehyde producing so-called resorcinol-formaldehyde (RF) aerogels. RF aerogels possess high porosity, specific surface area and pore volume, as well as low thermal conductivity (for instance, RF aerogels are better thermal insulators than commercial fiber glass). On the other hand, RF aerogels are stiffer and stronger than inorganic aerogels. During the synthesis of RF-aerogels, pH of a reaction mixture, concentration and resorcinol/formaldehyde ratio, the type of gelation catalyst (acid or base), and resorcinol/catalyst ratio govern the structural characteristics (density, specific surface area, particle size, pore size distribution).

In the present work, the small angle neutron scattering (SANS), the small angle X-ray scattering (SAXS) and low temperature nitrogen adsorption techniques have been used to study the mesostructure and fractal properties of resorcinol-formaldehyde aerogels prepared by the reaction between resorcinol and formaldehyde using different solvents (acetonitrile or perfluoroacetone). Additionally, RF-lyogels were aged at various temperatures from 20 to 70 °C to achieve fine-tuning of the structure of aerogel materials.

The synthesis of the resorcinol-formaldehyde lyogels was conducted using acetonitrile and hexafluoroacetone hydrate as solvents. Hexafluoroacetone hydrate plays not only a role of a solvent, but also a gelling agent for the synthesis of RF-lyogels, this approach for the RF-lyogels synthesis was used for the first time. Supercritical drying in CO₂ allowed synthesizing monolithic (including flexible) RF aerogels possessing specific surface up to 400 m²/g, specific porosity up to 1.3 cm³/g. All the obtained RF-aerogels were hydrophilic.

Both the amount and type of the solvent used at the gelation stage allow varying the texture characteristics and the microstructure of the resultant RF-aerogels. In particular, the use of acetonitrile as a solvent resulted in aerogels with a highly developed surface; on the contrary, the use of hexafluoroacetone hydrate lead to the formation of macroporous aerogels consisting of submicron dense spherical particles with a virtually smooth surface. The rate of RF lyogel formation is governed by the type of the solvent used. In acetonitrile, the gel formed in several hours, in hexafluoroacetone hydrate — in a few seconds. The increase in the ageing temperature of RF-lyogels from 20 to 70 °C resulted in a significant decrease in the surface fractal dimension D_s of aerogels (from ~2.5 to 2.0), which indicated a significant smoothing of the surface of the nanoparticle aggregates during the ageing process. On the contrary, the ageing temperature did not virtually affect the size of nanoparticle aggregates. A significant increase in the size of nanoparticle aggregates occurs when the gelling system is diluted (an increase in the amount of the solvent used).

The work was supported by Russian Science Foundation (grant 19-73-20125).

Секция 6.

Поверхности, тонкие пленки и многослойные структуры

RESONANT NEUTRON REFLECTOMETRY FOR HYDROGEN DETECTION

L. Guasco^{1,2}, Y. N. Khaydukov^{1,2,3*}, S. Pütter⁴, L. Silvi⁵, M. A. Paulin⁶, T. Keller^{1,2}, B. Keimer¹

¹Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart, Germany

²Max Planck Society Outstation at the MLZ, Garching, Germany

³Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia

⁴Jülich Centre for Neutron Science at the MLZ, Garching, Germany

⁵Helmholtz Zentrum Berlin, Berlin, Germany

⁶Comision Nacional de Energia Atomica, Buenos Aires, Argentina

*E-mail: y.khaydukov@fkf.mpg.de

The detection and quantification of hydrogen is becoming increasingly important in research on electronic materials and devices, following the identification of the hydrogen content as a potent control parameter for the electronic properties. However, establishing quantitative correlations between the hydrogen content and the physical properties of solids remains a formidable challenge. Here we report neutron reflectometry experiments on 50 nm thick niobium films during hydrogen loading, and show that the momentum-space position of a prominent waveguide resonance allows tracking of the absolute hydrogen content with an accuracy of about one atomic percent on a timescale of less than a minute. Resonance-enhanced neutron reflectometry thus allows fast, direct, and non-destructive measurements of the hydrogen concentration in thin-film structures, with sensitivity high enough for real-time *in-situ* studies.

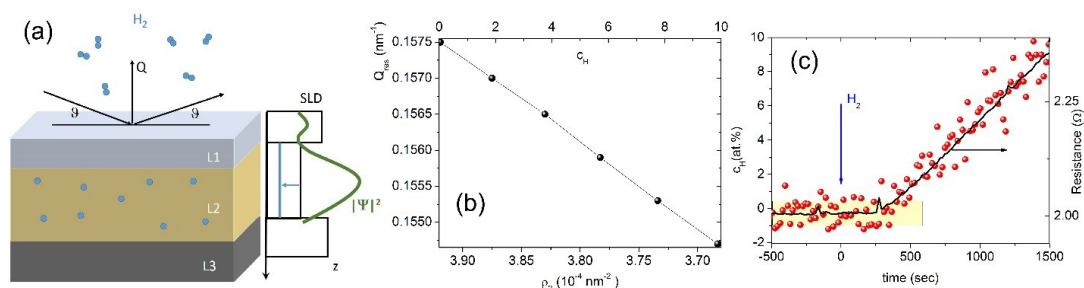


Рис. 1. (a) Scheme of (resonant) neutron reflectometry. The right panel in (a) shows the SLD depth profile (black). Hydrogen uptake will lead to a decrease of the SLD of the active layer L2 (ρ_2) which is indicated by the blue line. The green line shows the neutron density in the system at the resonance momentum transfer Q_{res} . (b) The resonance position in Q -space vs. the SLD of the active layer and concentration of hydrogen, c_H . Calculations are performed for the bilayer Pt(3nm)/Nb(50nm) on Al_2O_3 substrate (c) Experimentally measured time dependence of hydrogen concentration in Nb(50nm) layer derived from Q_{res} position. The yellow rectangular shows the standard deviation of the RNR data, the blue arrow shows the moment of injection of the H_2 gas, and the black line shows the sample resistance measured simultaneously with the RNR.

1. L. Guasco, Y. Khaydukov, S. Pütter et al. Submitted in 2021.

HOT IMPLANTATION OF GAAS AND STUDIES OF OPTICAL PROPERTIES OF NEAR SURFACE LAYER

M. Kulik^{1,2,}, D. Kołodzyńska³, M. Turek², P. Wegierek⁴, P. L. Tuan^{1,5}, T. V. Phuc^{1,6,7},
A. I. Madadzada⁸, A. S. Doroshkevich^{1,9}, T. Yu. Zelenyak¹, K. Pyszniak²*

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

²Institute of Physics, Maria Curie-Skłodowska University, Lublin, Poland

³Chemical Department, Maria Curie-Skłodowska University, Lublin, Poland

⁴Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Lublin University of Technology,
Lublin, Poland

⁵Hanoi Irradiation Center, Vietnam Atomic Energy Institute, Hanoi, Vietnam

⁶Institute of Physics, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

⁷Graduate University for Science and Technology, Vietnam Academy of Science and Technology

⁸Department of Neutron Physics, National Nuclear Research Centre JSC, Baku, Azerbaijan

⁹Donetsk Institute for Physics and Engineering named after O.O. Galkin, Donetsk, Ukraine

* E-mail: mkulik@hektor.umcs.lublin.pl

Ion implantation is the most popular way of preparing microelectronic circuits. In the process of introducing atoms into the sub-surface layers of the modified semiconductors, as a result of the interaction of ions with atoms of the irradiated semiconductors, radiation defects are formed in the doped layers. The change in the concentration of Al atoms in the sub-surface GaAs layers after implanted with Al ions was determined by the Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS) methods. It has been observed that as the implantation temperature increases above 350°C, Al atoms diffuse into the irradiated surface of GaAs. The influence of the implantation temperature of samples on the spectra of the dielectric function of the doped layers was determined on the basis of ellipsometric measurements. It was found that the spectra of the dielectric function of samples implanted at temperatures above 475°C correspond to the spectra of the material before ion implantation. This effect can be explained by the restoration of the crystallographic structure of the ionically doped layer. In the next step of the research, the chemical composition of the subsurface layers after implantation was determined using the XPS method. It was found that the concentration of As₂O₃ and As₂O₅ compounds changes with increasing implantation temperature, and AlAs appears in the layers of samples irradiated at 500°C.

The study was performed in the scope of the RO-JINR Projects 366 / 2021 item 81; and the Poland-JINR Project No. 168 / 2021 item 26.

ОСОБЕННОСТИ ОСАЖДЕНИЯ ЛИПИДОВ НА КРЕМНИЕВУЮ ПОДЛОЖКУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ СОСТАВА

В. А. Маслова^{1}, М. О. Кузьменко^{1,2}, И. В. Гапон^{1,3}, М. А. Киселев¹*

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Киевский национальный университет им. Т. Шевченко, Киев, Украина

³Институт проблем безопасности атомных электростанций НАС Украины, Чернобыль, Украина

*E-mail: varvara@jinr.ru

На сегодняшний день одним из наиболее перспективных подходов к повышению эффективности лекарственных средств является размещение биологически активных веществ в транспортных системах [1]. Использование наносистем для транспортировки лекарственных средств позволяет не только повысить биодоступность последних, но и осуществлять целенаправленную доставку лекарственных средств в определенные органы и клетки-мишени [2; 3].

Структурные исследования проникновения нанопрепаратов через биологическую мембрану клетки, а также детальные исследования взаимодействия нанопрепаратов с липидным бислоем не проводились. Чтобы получить более четкую картину этого взаимодействия, для начала необходимо разработать метод нанесения модельной мембраны.

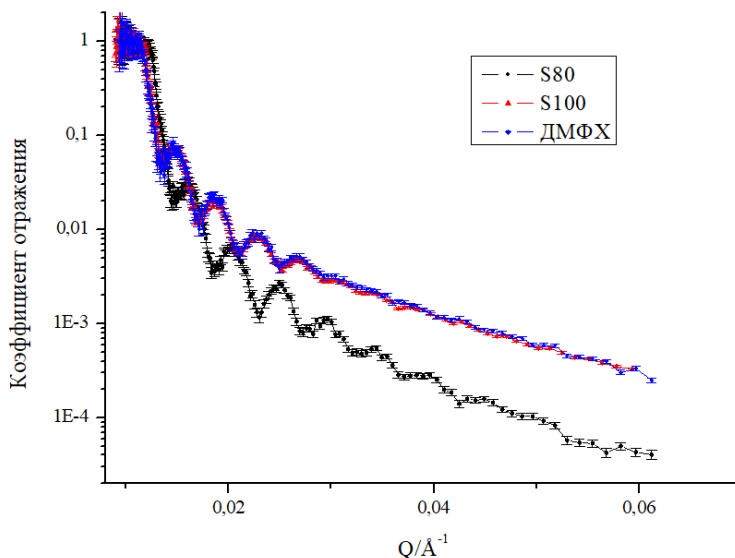
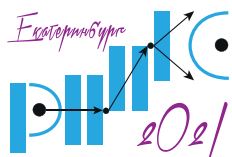


Рис. 1. Рефлектотрические кривые рассеяния нейтронов на соевых фосфолипидах с чистотой 80% и 100% и ДМФХ

Целью эксперимента являлось исследование различий в осаждении соевых фосфолипидов с чистотой 80% и чистотой 100% и димиристоилфосфатидилхолина (ДМФХ) с



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

● → ● → ● → Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

помощью метода времяпролетной нейтронной рефлектометрии. Эксперимент был выполнен в Объединенном институте ядерных исследований на нейтронном рефлектометре с горизонтальной плоскостью образца GRAINS. Была использована ячейка с возможностью промывки. Растворы были приготовлены в тяжелой воде с концентрацией фосфолипидов 1%.

На графике представлены кривые рассеяния нейтронов на фосфолипидах различной чистоты и ДМФХ. Данные по соевым фосфолипидам с чистотой 100% и ДМФХ совпали. Соевый фосфолипид с чистотой 80% осаждался в виде «островков».

Была отработана методика осаждения липидного бислоя на кремниевой подложке, а также получены результаты, которые демонстрируют, что качество образуемого липидного бислоя зависит от чистоты используемых соевых фосфолипидов.

1. K. J. Gundermann, A. Kuenker, E. Kuntz, M. Drozdik, Pharmacol Rep. **63**, 643 (2011).
2. T. Gutberlet, B. Klosgen, R. Krastev, R. Steitz, Adv. Eng. Mat. **6**, 832 (2004).
3. T. Gutberlet, R. Steitz, G. Fragneto, B. Klogen, J. Phys.: Condens. Matter **16** (2004).

МЕТОД ОПОРНОГО СЛОЯ Gd В РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ

Е. С. Никова^{1,2,*}, Ю. А. Саламатов¹, Е. А. Кравцов^{1,2}, В. В. Устинов^{1,2}

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, Россия

*E-mail: e.nikova@mail.ru

Для изучения сложных слоистых металлических структур широко применяется рефлектометрия поляризованных нейтронов. Этот метод основан на анализе зеркального отражения тепловых нейтронов с определённым спином, падающих при малых углах скольжения к поверхности образца. Основным преимуществом метода является то, что он основан на прямом взаимодействии спинов нейтронов с атомными магнитными моментами. Он позволяет получить информацию о зависимости от глубины двух компонент магнитного момента, лежащих в плоскости образца. Для исследования металлических магнитных плёнок нами был адаптирован метод, предложенный в [1, 2], для определения комплексной амплитуды коэффициента отражения с использованием известного опорного слоя. Разработанный метод [3] позволяет определять модуль и фазу коэффициента отражения на основе резонансного взаимодействия нейтронов с ядрами изотопов гадолиния. Метод был апробирован на модельных численных расчётах и на экспериментальных данных для немагнитных и магнитных образцов, полученных на времяпролётном рефлектометре РЕФЛЕКС реактора ИБР-2 (ОИЯИ, г. Дубна) [4].

Были проведены эксперименты по отражению поляризованных нейтронов от пленки с ферромагнитным упорядочением слоев $\text{Fe Al}_2\text{O}_3/\text{Cr}(100\text{\AA})/\text{Fe}(90\text{\AA})/\text{Cr}(23\text{\AA})/\text{Fe}(90\text{\AA})/\text{Gd}(50\text{\AA})/\text{Cr}(50\text{\AA})$ и пленки с антиферромагнитным упорядочением слоев $\text{Fe Al}_2\text{O}_3/\text{Cr}(100\text{\AA})/\text{Fe}(100\text{\AA})/\text{Cr}(10.5\text{\AA})/\text{Fe}(100\text{\AA})/\text{Cr}(20\text{\AA})/\text{Gd}(50\text{\AA})/\text{Cr}(50\text{\AA})$. Опорным слоем в этих образцах является $\text{Gd}(50\text{\AA})/\text{Cr}(50\text{\AA})$. Эксперименты проводились в диапазоне по Q от 0.01 до 0.05 $\text{\AA}^{-1}$ с полным поляризационным анализом на рефлектометре РЕМУР реактора ИБР-2 (ОИЯИ, г. Дубна) при трех различных углах скольжения. Перед измерениями образцы были намагничены до насыщения, затем внешнее поле было уменьшено до ведущего поля, в котором и проводились измерения. Полученные экспериментальные данные были обработаны по предлагаемому методу, учитывая энергетическую зависимость гадолиния в каждой точке q -пространства [5]. Были восстановлены модули и фазы коэффициентов рассеяния для структур, лежащих ниже опорного слоя. На основании этих результатов проведено уточнение параметров слоёв. Обработка проводилась совместно для двух поляризаций, одновременно анализировались модуль и фаза. Таким образом, предлагаемый метод определения фазы позволяет исследовать многослойные плёнки, в том числе с магнитным упорядочением слоёв. При этом есть возможность существенного сокращения количества возможных решений обратной задачи за счёт совместной обработки данных по модулю и фазе для различных поляризаций, что уменьшает неопределённость итогового результата.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Спин» (№ АААА-А18-118020290104-2) при частичной поддержке РФФИ (проект № 19-02-00674).

1. C. F. Majkrzak and N. F. Berk, *Physical Review B* **52**, 10827 (1995).
2. V. O. de Haan, A. A. van Well, P. E. Sacks, et al., *Physica B* **221**, 524 (1996).
3. E. S. Nikova, Yu. A. Salamatov, E. A. Kravtsov, et al., *Superlattices and Microstructures* **109**, 201 (2017).
4. Е. С. Никова, Ю. А. Саламатов, Е. А. Кравцов, и др., *ФММ* **9**, 120 (2019).
5. E. S. Nikova, Yu. A. Salamatov, E. A. Kravtsov, et al., *Physica B* **58**, 552 (2019).

МЕТОД ФАЗОВО-АМПЛИТУДНЫХ ФУНКЦИЙ В РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ

Ю. А. Саламатов, Е. А. Кравцов*

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*E-mail: salamatov@imp.uran.ru

Рефлектометрия поляризованных нейтронов представляет собой удобный и точный метод определения атомной и магнитной структур тонких наноразмерных пленок и сверхрешеток. Она основана на наличии у нейтронов собственного магнитного момента, который при рассеянии взаимодействует с магнитными моментами атомов образца. Это приводит к дополнительному вкладу в потенциал взаимодействия, который существенно зависит от магнитного состояния системы.

В настоящей работе рассматривается метод расчета интенсивности отражения в рефлектометрии, основанный на использовании фазово-амплитудных функций [1, 2]. Он заключается в решении нелинейного дифференциального уравнения первого порядка, связывающего потенциал рассеяния и коэффициент отражения. Такой подход требует меньше вычислительных ресурсов, чем матричный формализм Абеле и рекуррентные соотношения Парратта. Уравнение точное, оно соответствует динамической теории. В случае поляризованных нейтронов уравнение принимает матричный вид. К плюсам этого метода можно отнести меньшие вычислительные затраты (уравнение записывается для матриц 2×2 , тогда как в подходе Абеле применяются матрицы 8×8) и, соответственно, более высокую скорость вычислений. Также, использование фазово-амплитудных функций упрощает моделирование и анализ систем со сложным магнитным упорядочением, в частности, с геликоидальным упорядочением моментов. Уравнение для расчёта коэффициентов отражения в методе фазово-амплитудных функций имеет вид:

$$\frac{d}{dx}B = (E^+ + BE^-)V(E^+ + BE^-). \quad (1)$$

Все величины, входящие в него, являются матрицами 2×2 и описывают четыре возможных канала рассеяния нейтронов — два канала с сохранением спина и два канала с изменением спина. Матрица B включает в себя комплексные коэффициенты отражения нейтронов. Матрица E^+ описывает падающую волну, E^- — отражённую. Матрица V содержит информацию о потенциале взаимодействия в различных каналах рассеяния.

Дифференциальное матричное уравнение (1) может быть решено методом Рунге-Кутты, характеристики потенциала в обратной задаче определяются при помощи алгоритма Левенберга-Марквардта, возможно применение и других алгоритмов спуска.

С целью апробации метода были проведены эксперименты по рефлектометрии поляризованных нейтронов на следующих образцах:

1. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Nb}(300)$ — немагнитная система, проверка возможности обработки простых данных.
2. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Nb}(100)/\text{Fe}(500)/\text{Nb}(50)$ — система с одним магнитным слоем, проверка возможности обработки данных без переворота спина.

3. $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Nb}(100)/\text{Fe}(250)/\text{Nb}(20)/\text{Fe}(250)/\text{Nb}(50)$ — система с двумя магнитными слоями, проверка возможности обработки данных при наличии рассеяния с переворотом спина.

Поверхность подложки совпадает с кристаллографической плоскостью. Все образцы были приготовлены на установке магнетронного распыления ULVAC (Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург). Базовое давление в камере роста составляло $6 \cdot 10^{-7}$ Па, давление аргона 0.1 Па, температура комнатная, внешнее магнитное поле отсутствовало.

Нейтронные измерения проводились на времяпролётном рефлектометре поляризованных нейтронов РЕФЛЕКС, установленном на импульсном ядерном реакторе ИБР-2 (Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна Московской обл.).

В результате обработки эксперимента для образца 1 было установлено, что толщина плёнки составляет 350 Å. Средние величины шероховатостей на интерфейсе с подложкой и на поверхности плёнки не превышают 4 Å. Заметный окисленный слой на поверхности образоваться не успел, поскольку Nb достаточно медленно окисляется на воздухе при комнатной температуре, а эксперимент был проведён через несколько дней после синтеза плёнки.

Структура образца 2: $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Nb}(114)/\text{Fe}(508)/\text{Nb}(26)/\text{Nb}_2\text{O}_5(29)$. Характерный размер шероховатостей поверхности не превышает 8 Å. Подтверждено ферромагнитное состояние образца. Параметры структуры определялись так, чтобы одновременно обеспечить наиболее оптимальное согласие двух спектров для каждой поляризации.

Образец 3 перед началом измерений был намагничён до насыщения, рефлектометрические кривые были получены в поле 100 Э. В данном образце наблюдалось слабое рассеяние нейтронов с переворотом спина, что свидетельствует о формировании в образце неколлинеарного упорядочения магнитных моментов слоёв Fe.

Установлено, что образец имеет следующую структуру: $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Nb}(88)/\text{Fe}(248)/\text{Nb}(21)/\text{Fe}(256)/\text{Nb}(29)/\text{Nb}_2\text{O}_5(31)$. Шероховатость поверхности не превышает 5 Å. Магнитные моменты слоёв Fe отклонены от направления внешнего поля на небольшие углы (9° и 4°) в разные стороны в плоскости слоёв, суммарный момент образца отклонён от направления поля на 6.5° . Неодинаковость углов может быть обусловлена наличием собственной магнитной анизотропии в исследуемой плёнке.

Итак, в настоящей работе предложен и экспериментально проверен метод фазово-амплитудных функций для анализа данных по рефлектометрии поляризованных нейтронов. Во всех случаях, обработка кривых с использованием предлагаемого метода позволила определить как структурные, так и магнитные характеристики образцов. Таким образом, можно сделать вывод, что метод фазово-амплитудных функций может использоваться для анализа экспериментальных данных в рефлектометрии поляризованных нейтронов.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Спин», № АААА-А18-118020290104-2) при частичной поддержке РФФИ (грант № 19-02-00674).

1. В. В. Бабилов, Метод фазовых функций в квантовой механике, Наука, Москва, (1976).
2. F. Calogero, Variable Phase Approach to Potential Scattering, Academic Press Inc., New-York, (1967).

DIELECTRIC FUNCTION, ATOMIC COMPOSITION OF THE NEAR SURFACE LAYERS OF GaAs SAMPLES IMPLANTED Xe IONS WITH DIFFERENT FLUENCE

P. L. Tuan^{1,2*}, M. Kulik^{2,3}, T. V. Phuc^{2,4,5}, A. I. Madadzada^{2,6}, T. Yu. Zelenyak², M. Turek³,
J. Žuk³, L. H. Khiem^{4,5}, A. S. Doroshkevich^{2,7}, B. Jasinska³, A. Stanculescu⁸

¹Hanoi Irradiation Center, Vietnam Atomic Energy Institute, Hanoi, Vietnam

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

³Institute of Physics, Maria Curie-Skłodowska University, Lublin, Poland

⁴Institute of Physics, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

⁵Graduate University for Science and Technology, Vietnam Academy of Science and Technology

⁶Department of Neutron Physics, National Nuclear Research Centre JSC, Baku, Azerbaijan

⁷Donetsk Institute for Physics and Engineering named after O.O. Galkin, Donetsk, Ukraine

⁸National Institute for Materials Physics (NIMP) Strada Atomîștilor 405, Măgurele, Romania

*E-mail: phanluongtuan@gmail.com

Surfaces of (100) SI GaAs irradiated with 250 keV Xe⁺ ion beam at room temperature with different fluence. The ion fluence implanted to individual sample varied from $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ to $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$. GaAs samples before and after irradiated were the objects of studies. After ion implantation process, the samples were exposed to oxidation in the air under normal ambient conditions for 5 hours. The characterization of native oxide layers and their thicknesses were investigated by using the nuclear reaction (NR) method. The depth profiles of As, Ga and Xe atoms were measured by the Rutherford backscattering spectrometry (RBS). The dielectric functions were obtained with virgin and implanted samples. The investigations were used spectroscopy ellipsometry (SE) method on the near surface layers of GaAs samples. It was found that the dielectric function values are different for the samples. Influence of the ion fluence on the refractive index and extension index were determined.

The study was performed in the scope of the RO-JINR Projects 366 / 2021 item 81; and the Poland-JINR Project No. 168 / 2021 item 26.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ И ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ЧЕРЕЗ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОСЛОЙКУ MgO

Е. М. Якунина^{1*}, Е. А. Кравцов^{1,2}, В. В. Проглядо¹, Н. О. Антропов^{1,2}, Ю. Н. Хайдуков^{3,4}

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, Россия

³Институт исследования твёрдого тела имени Макса Планка, Штутгарт, Германия

⁴Max Planck Society Outstation at the FRM-II, Штутгарт, Германия

* E-mail: eyakuninaart@gmail.com

Слоистые наноструктуры Fe/MgO/Cr/MgO/Fe — искусственный ферромагнитный материал, в котором обменное взаимодействие магнитных моментов слоев Fe через промежуточные диэлектрические и металлические слои может приводить к магнитным конфигурациям, не реализующимся в хорошо изученных системах Fe/MgO/Fe и Fe/Cr/Fe. В настоящей работе мы сообщаем об исследовании корреляции структурных и магнитных свойств слоистых наногетероструктур Fe(10нм)/MgO(1.5нм)/Cr(*t*)/MgO(1.5нм)/Fe(7нм) (*t* = 0.9 и 1.8 нм). Структурные исследования, выполненные с помощью рентгеновской дифрактометрии и рефлектометрии высокого разрешения, подтвердили формирование эпитаксиальной кристаллической структуры и выявили ее хорошо определенный слоистый характер с резкими межслойными границами.

Fe/MgO/Cr/MgO/Fe — это новая система, в которой магнитные моменты Fe связаны как между диэлектрическими, так и металлическими промежуточными слоями. Магнитные и магнитотранспортные свойства магнитных многослойных структур с границами раздела металл/металл и металл/диэлектрик были глубоко изучены, тогда как системы, включающие как металлические, так и диэлектрические промежуточные слои, были изучены гораздо меньше. В частности, физически интересные системы Fe/MgO/Cr изучены в очень ограниченном количестве публикаций [1], [2].

В данной работе мы сообщаем о структуре и магнитных свойствах наногетероструктур Fe/MgO/Cr. В основном, мы сосредоточились на изготовлении образцов, их магнитных свойствах, включая макроскопические свойства, а также на перемагничивании с разрешением слоев. Мы исследовали два образца Fe(10нм)/MgO(1.5нм)/Cr(*t*нм)/MgO(1.5нм)/Fe(7нм)/Ta(5нм) с *t* = 0.9 нм (образец 1) и *t* = 1.8 нм (образец 2). Такие толщины Cr, как известно, обеспечивают антиферромагнитное и ферромагнитное упорядочение в сверхрешетках Fe/Cr [3]. Металлы выращивались методом магнетронного распыления на постоянном токе, слои MgO — методом высокочастотного распыления. Рентгеновскую рефлектометрию (XRR) и дифракцию (XRD) для определения структурных характеристик образцов проводили на дифрактометре Empyrean PANalytical с использованием излучения $\text{Co } K_\alpha$ в геометрии параллельного пучка. Намагниченность измеряли методом вибрационной магнитометрии. Слоистые наногетероструктуры Fe/MgO/Cr/MgO/Fe были синтезированы методом высоковакуумного магнетронного напыления на монокристаллические подложки MgO(100) без какого-либо буферного слоя. Для защиты от окисления готовые структуры покрывались слоем Ta. К слоям MgO в процессе роста была применена специальная процедура отжига. Данная манипуляция была проведена с целью улучшения качества слоистой и кристаллической структуры MgO. Согласно предыдущим исследованиям отжиг во время роста положительно влияет на

формирование кристаллической структуры MgO [4]. Дальнейшие исследования были проведены на двух образцах: Fe(10нм)/MgO(1.5нм)/Cr(t)/MgO(1.5нм)/Fe(7нм)/Ta(5нм), $t = 0.9$ нм (далее образец 1) и $t = 1.8$ нм (далее образец 2). Толщину слоев и средне-квадратичную шероховатость границы раздела определяли методом рефлектометрии высокого разрешения. Установлено, что структурные свойства обоих образцов идентичны. Рефлектометрическая кривая для образца 1 и кривая наилучшего соответствия модели показаны на Рис. 1.

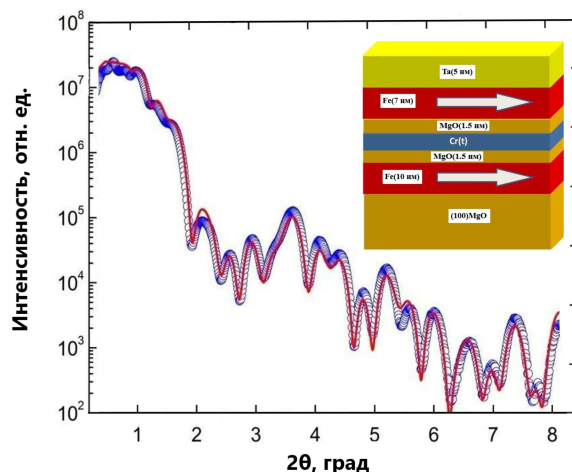


Рис. 1. Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца 1 (символы) и модельная кривая (линия). На вставке приведена схематическая структура исследуемого образца с параллельным упорядочением магнитных моментов в слоях железа.

Отметим, что толщины слоев близки к номинальным, формируется слоистая структура с четкими границами раздела во всех слоях, за исключением слоя Cr, у которого наблюдается шероховатость примерно два монослоя. Внутрислойную кристаллическую структуру образцов определяли методом рентгеновской дифракции. Дифрактограмма образца 1 в геометрии $\theta - 2\theta$ показана на Рис. 2, на ней четко видны пики, соответствующие брэгговским отражениям 002 MgO, 004 MgO и 002 Fe. Эти пики свидетельствуют о наличии выраженной текстуры [001] Fe и [001] MgO в направлении роста образца. Были исследованы структурные и магнитные свойства слоистых наногетероструктур Fe(10нм)/MgO(1.5нм)/Cr(t)/MgO(1.5нм)/Fe(7нм) ($t = 0.9$ и 1.8 нм). Рентгеновские методы подтвердили формирование эпитаксиальной кристаллической структуры с ориентацией MgO[001]||Fe[001]||Cr[001] вдоль нормали к образцу, а также наличие хорошо определенной слоистой структуры с резкими межслойными границами. Проведенное исследование может быть полезно для создания устройств спинтроники для работы при комнатной температуре, а также при низких температурах, в сверхпроводящих спин-вентильных структурах, где требуется неколлинеарность для генерации спинового триплетного конденсата.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 19-02-00674.

1. S.Yuasa, D. Djayaprawira, Appl. Phys. **40**, 337 – 354 (2007).
2. A. Koziol-Rachwał, T. V. Nozaki, Zayets, et al., Appl. Phys. **120**, 085303 (2016).
3. J. A. C. Bland, B. Heinrich, Edc., Ultrathin Magnetic Structures, Springer-Verlag: Berlin, V. I-IV, (1994–2005).

ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ МЕТОД ПРЯМОГО ПОИСКА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

С. Б. Астафьев*, Л. Г. Янусова

Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

* E-mail: serge@crys.ras.ru

В работе предложен математический метод многомерной оптимизации, позволяющий отыскать глобальный экстремум заданной функции. Разновидности этого метода известны в литературе как методы поиска на равномерной сетке и методы заполнения пространства (*space filling*) [1]. Метод имеет полиномиальную вычислительную сложность относительно определяемых параметров, но при этом не требует вычисления каких-либо производных, крайне прост в реализации и всегда приводит к нахождению глобального экстремума задачи с наперед заданной точностью. Найденный минимум (максимум) является истинно глобальным по определению [1]. Предложенный в работе метод оптимизации реализован в составе аналитического комплекса BARD [2] и далее будет называться методом модифицированного прямого поиска (МПП).

Без потери общности рассмотрим задачу нахождения минимума функции одной переменной $F(x)$ на отрезке $[a, b]$. Необходимо найти её минимум на этом отрезке: $F(x) \rightarrow \min\{x \in [a, b]\}$. Это простейшая задача оптимизации с ограничениями типа неравенства. Функция $F(x)$ может иметь аналитическое выражение либо быть представленной в виде таблицы значений (например, экспериментально измеряемая величина). Задаём число N — число значений (число отчётов) и разбиваем отрезок $[a, b]$ на $(N - 1)$ равных интервалов точками деления x_i с шагом разбиения Δx равным:

$$\Delta x = \frac{(b - a)}{(N - 1)} \quad (1)$$

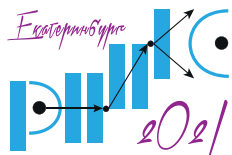
$$x_1 = a; x_i = x_{i-1} + \Delta x; i = 2..N.$$

Вычислив значения $F(x)$ в точках x_i , путём сравнения, находим точку x_m , такую что: $F(x_m) = \min\{F(x_i)\}$ для всех $i = 1..N$. При этом погрешность определения точки минимума x_m функции $F(x)$ определяется шагом разбиения Δx и будет уменьшаться с увеличением количества точек разбиения N , $\Delta x \rightarrow 0$ при $N \rightarrow \infty$ (1).

Картина и сущность алгоритма остаётся практически такой же простой при переходе к многомерной задаче. В этом случае поиск вектора значений X_p^m , минимизирующих функцию $\Phi_p(X)$ в P -мерном гиперкубе $[A_p, B_p]$ сводится к мультипликативному исполнению P циклов вычислений значений Φ_p с целью определения вектора решений задачи X_p^m . Важно отметить, что в этом многомерном случае можно ввести «многомерную точность» метода — вектор значений ΔX_p , определяющий шаг разбиения области поиска каждого параметра, аналогично (1):

$$\Delta X_p = (A_p - B_p) / (N_p - 1), p = 1..P \quad (2)$$

При этом появляется возможность независимо контролировать точность определения каждого отдельного параметра задачи, разделяя их на важные и второстепенные.



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

Метод МПП использован для решения обратной задачи рефлектометрии — поиска профиля электронной плотности слоистой плёнки [3]. В качестве демонстрации применения метода проведено восстановление электронного профиля модельных тонких плёнок на подложке. Предлагаемый метод оптимизации использован для восстановления электронного профиля плёнки оксида индия–олова (ITO) и монослоя цинковых диад фуллерена порфирина (ZnDHD6ee) [4]. Также применение МПП для обработки рентгенодифракционных данных позволило уточнить строение слабоупорядоченных плёнок на водной субфазе [5].

В заключение следует отметить, что предлагаемый метод прямого поиска в силу простоты реализации и абсолютной сходимости может быть использован в любых прикладных и расчётных задачах нахождения оптимального решения.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

1. C.A. Floudas, P.M. Pardalos. Encyclopedia of Optimization, 2-nd Edition, Springer, New York (2009).
2. С. Б. Астафьев, Б. М. Щедрин, Л. Г. Янусова, Кристаллография **57**, 141 (2012).
3. L. G. Parrat, Phys. Rev. **95**, 359 (1954).
4. С. Б. Астафьев, Б. М. Щедрин, Л. Г. Янусова, Кристаллография **58**, 355 (2013).
5. С. Б. Астафьев, Л. Г. Янусова. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования **7**, 1 (2021).

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОЧНЫХ КОМПОЗИТОВ $\text{GdCo-Al}_2\text{O}_3$

А. Н. Горьковенко^{1,}, В. Н. Лепаловский¹, В. О. Васьковский^{1,2}*

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

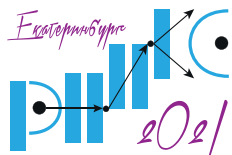
²Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*E-mail: a.n.gorkovenko@urfu.ru

Пленочные композиционные материалы, функциональные свойства которых обуславливаются соотношением концентраций магнитной и немагнитной фаз, являются актуальным направлением исследований в физике магнитных материалов. Однако большинство работ в этой области посвящено средам, в которых в качестве магнитной фазы используются ферромагнитные металлы и их сплавы [1–3]. В тоже время, более богатыми по возможностям варьирования магнитных свойств представляются пленки, содержащие ферримагнитные элементы. Данная работа посвящена оценке возможности применения метода магнетронного распыления для получения композитных плёнок типа $(\text{Gd-Co})\text{-Al}_2\text{O}_3$ с ферримагнитным характером упорядочения, аттестации их фазового состава и магнитных свойств.

Пленки $(\text{Gd}_y\text{Co}_{100-y})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ были получены методом магнетронного сораспыления мишеней Co, Gd и Al_2O_3 в атмосфере Ar. При этом использовалось две мишени Al_2O_3 , что было обусловлено низкой скоростью распыления оксида алюминия по сравнению с металлами. Подложками служили покровные стекла Corning, содержавшие 5-нанометровый буферный слой Ta. Номинальная толщина образцов составляла 100 нм. Их состав варьировался путем изменения электрической мощности, подводимой к соответствующим мишеням. Содержание Gd по отношению к Co изменялось в пределах $15 \div 50$ ат. % и контролировалась при помощи рентгено-флуоресцентного анализа, реализованного на установке Nanohunter. Общая концентрация металлической фазы варьировалась от 50 до 90 ат. % и задавалась по относительным скоростям распыления мишеней. Отдельные образцы подвергались вакуумной термообработке при температурах 200, 300 и 400 °C в течение часа. Магнитные свойства пленок измерялись при помощи опции вибромагнетометра PPMS DynaCool в диапазоне температур $5 \div 300$ К и в полях до 90 кЭ.

Магнитные измерения выявили, что при относительно большой концентрации гадолиния (~40 %) и металлической фазы в целом (~70 %) пленки обнаруживают немонотонное изменение магнитного момента при варьировании температуры и одноосную магнитную анизотропию с осью лёгкого намагничивания ориентированной перпендикулярно плоскости пленки. Полученные данные указывают на наличие ферримагнитного упорядочения, которое реализуется в системе Gd-Co. С использованием данных по температурной зависимости спонтанной намагниченности для аморфных плёнок типа Gd-Co [4] оценен состав ферримагнитной фазы, а также соотношение объемов магнитных и немагнитных компонентов. Предполагалось, что помимо GdCo и Al_2O_3 в процессе напыления в пленках могут образовываться фазы Gd_2O_3 , CoO и Al. В результате проведенных оценок было установлено, что во всех исследуемых образцах независимо от номинальной доли Al_2O_3 около 70% Gd не даёт вклада в спонтанную намагниченность и, по-видимому, находится в составе окисла.



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

→ → → → Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

Также исследовано влияние отжига на магнитные свойства системы $\text{GdCo-Al}_2\text{O}_3$. Оно выполнено на образце $(\text{Gd}_{43.1}\text{Co}_{56.9})_{69}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{31}$, обладающим температурой компенсации ~ 105 K. Было обнаружено, что термообработка не вносит качественных изменений в магнитную анизотропию и характер температурной зависимости спонтанной намагниченности, но приводит к некоторому уменьшению температуры компенсации. Это, говорит о том, что в результате отжига часть Gd, изначально находящегося в ферромагнитной связи с Co, перешла в немагнитное состояние, то есть окислилась. Но эта доля не превышает нескольких процентов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-72-10044-П.

1. M. Poiana, M. Dobromir, V. Nica, et al., J. of Supercond. and Nov. Mag. **26**, 3105 (2013).
2. Y. Wei, J. Yue, X.-Z. Tang, et al., Applied Surface Science **428**, 296 (2018).
3. C. Jiang, C. W. Leung and P. W. T. Pong, Applied Surface Science **419**, 692 (2017).
4. V. O. Vas'kovskiy, A. N. Gorkovenko, O. A. Adanakova, et al., PMM **120**, 1055 (2019).

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТОНКИХ КРЕМНЕЗЕМНЫХ ПЛЕНОК, ДОПИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦАМИ Pt/Pd

Н. Н. Губанова^{1,2*}, В. А. Матвеев¹, О. А. Шилова^{2,3}

¹НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Гатчина, Россия

²Институт химии силикатов РАН, Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: gubanova_nn@npni.nrcki.ru

В последние годы проявляется большой интерес к изучению структуры биметаллических Pt/Pd наночастиц, их физических и химических свойств, в том числе в свете создания нового поколения топливных элементов. Свойства биметаллических наночастиц определяются их размерами, структурой, особенностями состояния поверхности, и часто заметно отличаются от свойств массивных образцов с таким же химическим составом. Различные методы синтеза позволяют получать наночастицы с различным строением: ядро-оболочка, частицы с единой кристаллической решеткой, или смесь Pt и Pd частиц. Это позволяет получать частицы с новыми физическими и химическими характеристиками. Целью данного исследования было определение типа строения наночастиц Pt/Pd и их кристаллической структуры, равномерно распределенных в кремнеземной матрице, получаемых золь-гель методом.

В данной работе представлены результаты комплексного исследования кремнеземных пленок допированных наночастицами Pt/Pd, получаемых золь-гель методом. Для получения пленок золь наносился на кремниевые подложки методом центрифугирования (spin-coating). После осаждения пленки отжигались при 250 °С.

Исследование полученных образцов методом рентгеновской рефлектометрии выявило наличие градиента электронной плотности по толщине пленок (Рис. 1а), что свидетельствует о концентрировании металлических наночастиц в верхнем слое [1, 2].

Результаты дифракции в геометрии скользящего падения пучка показало наличие только одной фазы Pt/Pd с единой кристаллической решеткой. Средний размер кристаллитов в пленках, который был оценен по уширению дифракционных максимумов, не зависит от концентрации металлов в пленке и составляет 4–6 нм (Табл. 1).

Таблица 1. Средний размер кристаллитов в кремнеземных пленках, допированных наночастицами Pt/Pd.

Образец	5Pt_5Pd_200Si	10Pt_10Pd_200Si	20Pt_20Pd_200Si	40Pt_40Pd_200Si	80Pt_80Pd_200Si
Средний размер кристаллитов, нм	аморфн.*	5.0±0.1	4.7±0.6	6.0±0.2	4.9±0.1

* — рентгеноморфная фаза

С целью уточнения информации о моменте «зарождения» кристаллитов Pt/Pd, золь наносили в виде пленки на Si-сетку, высушивали сначала на воздухе при комнатной температуре, а потом отжигали при 130 °С в течении 1 часа в вакуумном сушильном

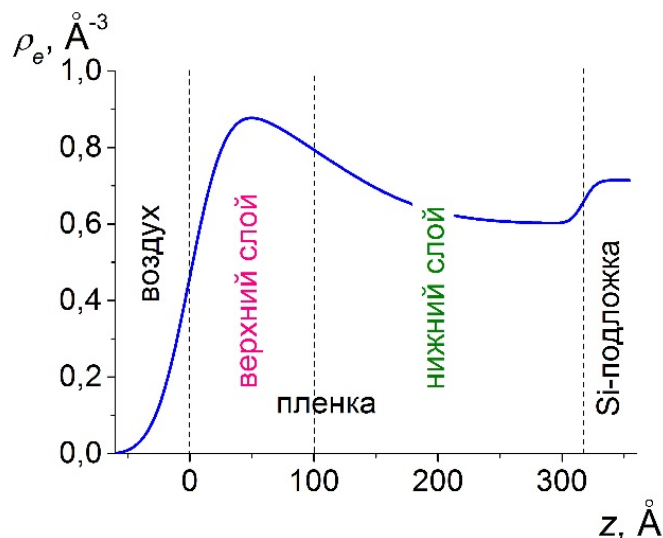


Рис. 1. Распределение электронной плотности в тонкой кремнеземной пленки, допированной наночастицами Pt/Pd.

шкафу до полного удаления растворителей и остатков/следов органических веществ. Полученные образцы исследовали с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Результаты ПЭМ позволили наблюдать появления наночастиц Pt/Pd в кремнеземной матрице. Размер таких наночастиц составил величину 1 – 2 нм (Рис. 2) [1, 2].

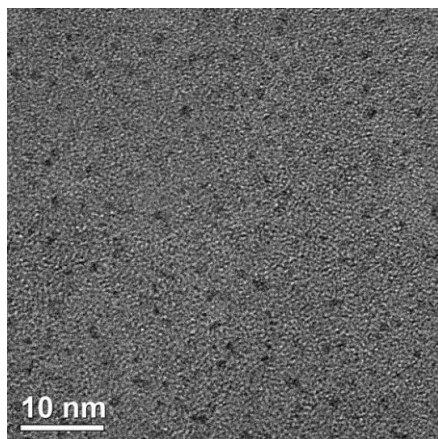


Рис. 2. ПЭМ микрофотография кремнезоля, содержащего зарождающиеся наночастицы Pt/Pd.

1. N.N. Gubanova, V.A. Matveev, O.A. Shilova, Journal of Sol-Gel Science and Technology, 1-9 (2019).
2. O.A. Shilova, N.N. Gubanova, V.A. Matveev et al. Journal of Molecular Liquids **288**, 110996 (2019).

**НОВАЯ ЯЧЕЙКА «ЖИДКОСТЬ-ТВЕРДОЕ ТЕЛО» С НЕСУЩИМ
НАНОСЛОЕМ ОКСИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ**

М. О. Кузьменко^{1,}, И. В. Гапон^{1,2}, В. А. Маслова¹, Ю. Е. Горшкова¹, М. В. Авдеев¹*

¹Лаборатория нейтронной физики им. И.М.Франка ОИЯИ, Дубна, Россия

²Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль, Украина

* E-mail: kuzjamyryna@gmail.com

Одно из направлений биорелевантных исследований — синтез новых неорганических и органических наноструктур с определенными свойствами для диагностических или терапевтических целей. Актуальна разработка неразрушающих, быстро выполняемых и более точных методов исследования в условиях, близких к реальным. Внедрение таких методов позволяет понять процессы, происходящие в исследуемой системе, и помогает в синтезе новых лекарств, а также в улучшении существующих. Нейтронная рефлектометрия может быть использована для диагностики многокомпонентных систем. В последние десятилетия этот метод был расширен на изучение наноструктур на границах раздела жидкостей и жидких коллоидных систем с другими средами. С одной стороны, это неразрушающий метод; а с другой он позволяет исследовать скрытые интерфейсы.

Для экспериментов в структурной биологии с использованием нейтронной рефлектометрии возникла необходимость создать ячейку с набором характеристик, удовлетворяющих требованиям как к предмету исследования, так и к состоянию экспериментального комплекса. Проблема фона, а также необходимость измерений в реальном времени вводят ограничения. Дополнительный слой на кристалле кремния в жидкой ячейке позволяет восстановить структуру интерфейса с использованием кривых зеркального отражения, измеренных в меньшем динамическом диапазоне q . Моделирование жидкой ячейки с изменением параметров дополнительного опорного слоя показывает, что более эффективно использовать оксид кремния в качестве основного опорного слоя толщиной ~ 80 нм. Это обеспечивает как лучшую экспериментальную чувствительность, так и необходимые гидрофильные свойства. Кроме того, этот слой остается устойчивым в водной среде и особенно в химически агрессивных средах при очистке от загрязнений после экспериментов.

В работе обсуждаются характеристики созданной нами поверхности оксида кремния путем сухого высокотемпературного окисления. Также демонстрируются преимущества данного субстрата для изучения тонких биологических систем при помощи нейтронной рефлектометрии. Показана устойчивость данного слоя к агрессивным и мягким процедурам очистки при длительном и частом использовании, а также сокращение времени на подготовку подложки для последующих измерений.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР БЛОКИРОВОК В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ Ni-Mn/Fe-Ni

М. Е. Москалев^{1,}, Е. В. Кудюков¹, В. Н. Лепаловский¹, В. О. Васьковский^{1,2}*

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

²Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*E-mail: mikhail.moskalev@urfu.ru

Эффект обменного смещения, заключающийся в сдвиге петли гистерезиса вдоль оси магнитных полей на величину H_E , и зачастую сопровождающийся увеличением коэрцитивной силы H_C , наблюдается при непосредственном контакте ферромагнитного и антиферромагнитного слоёв [1]. Данный эффект используется в спиновых клапанах, магнитных туннельных переходах и лежит в основе многих современных устройств магнитной памяти и сенсорики [1]. В практическом применении данных сред ключевой оказывается их температурная стабильность, которая во многом определяется температурным поведением обменного смещения. Одним из способов его исследования является измерение распределения температур блокировок [2]. С помощью последовательного охлаждения образцов в поле противоположного по отношению к первоначальному смещению петли знака возможно выделить вклад в обменное смещение различных зёрен поликристаллических образцов. Использование данной методики также позволяет оценить эффективную константу анизотропии антиферромагнитного слоя [2]. В данной работе мы исследуем распределение температур блокировок в поликристаллических плёнках Ni-Mn/Fe-Ni. Антиферромагнитный слой Ni-Mn представляет особый интерес для практического применения, так как в средах на его основе обменное смещение способно выдерживать температуры до 650 K [3].

С целью экспериментальной оценки эффективной константы анизотропии антиферромагнитного слоя Ni-Mn методом магнетронного напыления на установке AJA ATC Orion-8 была получена следующая серия образцов — стекло/Ta(5)/Ni₃₀Mn₇₀(t_{Ni-Mn})/Fe₂₀Ni₈₀(40)/Ta(5), где t_{Ni-Mn} — толщина слоя Ni-Mn, варьировавшаяся от 8 нм до 20 нм. Для формирования антиферромагнитной фазы θ -NiMn, ответственной за термостабильный эффект обменного смещения в данных образцах, после напыления образцы были подвергнуты отжигу в вакуумной камере в присутствии магнитного поля при температуре 300 °C в течение 1 ч. Распределения температур блокировок в образцах были получены с помощью вибрационного магнитометра LakeShore 7407, оснащённого низкотемпературной опцией. Для их получения образцы изначально выдерживались в поле $H = 5$ кЭ при 440 K в течение 30 мин. После этого образцы охлаждались в этом же поле до температуры $T = 100$ K, при которой проводятся все измерения петель гистерезиса. В дальнейшем эта процедура повторяется с использованием отрицательного магнитного поля $H = -5$ кЭ при последовательном повышении температуры от 120 K до 440 K, называемой температурой активации T_{act} .

В результате исследования были получены значения медианных температур блокировок $\langle T_B \rangle$ (значения T_{act} при которых сдвиг петли равен нулю) образцов с $t_{Ni-Mn} = 8$ нм; 10 нм; 12 нм; и 14 нм. Эти значения в дальнейшем позволили рассчитать эффективную величину константы анизотропии Ni-Mn. Для образцов с большим t_{Ni-Mn} медианная температура блокировки оказывается выше 440 K, что является свидетельством того,

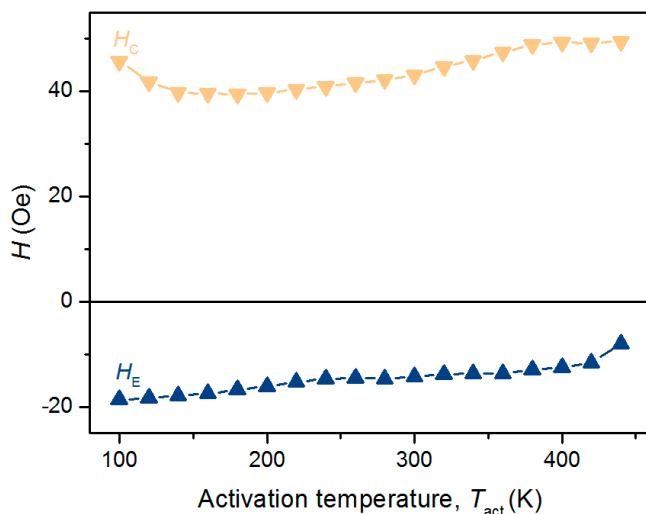


Рис. 1. Распределение температур блокировок (зависимость поля смещения H_E от температуры активации T_{act}) плёнки $Ni_{30}Mn_{70}(20)/Fe_{20}Ni_{80}(40)$ и зависимость коэрцитивной силы H_C от T_{act} .

что распределение кристаллитов по объёму в слое Ni-Mn с увеличением t_{Ni-Mn} смещается в сторону больших величин. В случае образца с $t_{Ni-Mn} = 20$ нм (см. Рис. 1) сдвиг петли оказывается стабильным в интервале температур от 240 К до 360 К, что говорит о том, что в данном образце практически отсутствуют кристаллиты, чья температура блокировки лежала бы в данном интервале. Любопытно, что зависимость эффективной константы анизотропии Ni-Mn от толщины этого слоя оказывается линейной в интервале от 180 К до 440 К. Вкупе с тем фактом, что в образцах с более толстым слоем Ni-Mn распределение по температурам блокировок существенно смещено в диапазон температур выше комнатной, это может быть отражением характерного аномального роста поля смещения при стандартных измерениях петель гистерезиса, наблюдаемого в интервале температур от 150 К до 400 К [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 18-72-10044.

1. F. Radu, H. Zabel, Magnetic heterostructures, Springer, 97 (2008).
2. K. O'Grady, L.E. Fernandez-Outon, G. Vallejo-Fernandez, JMMM **322**, 883 (2010).
3. V. O. Vas'kovskiy, et. al., J. Alloys Compd. **777**, 264 (2019).

ЭФФЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ: МЕТОД МОНТЕ-КАРЛО И ЭЛЕМЕНТЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

П. С. Савченков^{1*}, В. И. Боднарчук^{1,2}, К. В. Николаев¹, А. Н. Пирогов³

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

³Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*E-mail: savch92@gmail.com

Рефлектометрия поляризованных нейтронов является уникальным инструментом для исследования магнетизма тонких плёнок и слоистых структур. Причиной этому является высокая проникающая способность нейтронов и чувствительность к величине и направлению намагниченности исследуемой структуры.

Однако в ряде случаев обработка и анализ экспериментальных данных является затруднительным. Такие факторы, как недостаточная светосила установки, слабое разрешение приводят к сложностям при выборе подгоночной модели, возникают дополнительные экспериментальные сложности. Все эти обстоятельства зачастую приводят к слабой эффективности стандартных подходов к обработке экспериментальных данных и требуют развития новых методик, объединяющих в себе современные вычислительные и технические возможности.

В представленной работе предложен новый подход для анализа результатов экспериментов по рефлектометрии поляризованных нейтронов, который основан на моделировании по методу Монте-Карло и машинном обучении. Эффективность подхода продемонстрирована на примере анализа результатов экспериментов по рефлектометрии с поляризованными нейтронами на тонкой плёнке TbCo, выполненного на установке РЕФЛЕКС на реакторе ИБР-2 (ОИЯИ, Дубна).

В рамках представленного подхода для тонкой плёнки TbCo (Ti/TbCo/стекло), намагниченной до насыщения, был рассчитан профиль плотности длины рассеяния нейтронов для двух противоположных направлений поляризации в падающем на образец пучке. Полученные значения структурных параметров (толщины слоёв, шероховатости) находятся в согласии с данными, полученными из экспериментов по рентгеновской рефлектометрии. Для плотностей длин рассеяния всех слоев получены распределения вероятностей и парные корреляционные функции, что позволило достоверно определить магнитную составляющую плотности длины когерентного рассеяния нейтронов на соединении TbCo.

МЕТОД РАЗДЕЛЕННЫХ ФОРМФАКТОРОВ ДЛЯ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ ВЕЗИКУЛЯРНЫХ СИСТЕМ ПО СПЕКТРАМ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ И РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ

Е. В. Земляная^{1,2,*}, М. А. Киселев^{1,2}

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

*E-mail: elena@jinr.ru

Развитый в работах [1,2] метод разделенных формфакторов (РФФ) представляет собой эффективный инструмент для анализа спектров малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) от полидисперсных популяций везикул фосфолипидов в избытке жидкости для получения информации о структуре и свойствах таких систем, что представляет фундаментальный и прикладной интерес в нанофизике и биомедицине.

В рамках РФФ, модель плотности длины рассеяния нейтрона поперек мембраны везикулы может описываться практически любой подходящей функцией и представляет собой модуль, не зависящий от модели всей полидисперсной системы в целом. Это обеспечивает гибкость данного подхода и возможность извлекать всю информацию о структуре везикулярных систем только по данным малоуглового рассеяния, без привлечения дополнительных методов. Тем самым, метод РФФ может применяться для исследования структуры и свойств широкого спектра везикулярных систем с различным химическим составом и свойствами при условии, что толщина бислоя существенно меньше среднего радиуса везикул в популяции.

Так, метод РФФ был успешно применен для анализа структуры однослойных везикул димиристоилфосфатидилхолина [2] в различных фазовых состояниях липидного бислоя и дипальмитоилфосфатидилхолина [3] под действием диметилсульфоксида. В работах [4–6] с помощью РФФ-подхода исследованы многокомпонентные везикулярные системы на основе церамида 6, моделирующие верхний слой кожи млекопитающих (*Stratum Corneum*). В работах [7,8] метод РФФ адаптирован для анализа данных малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР).

Дается описание метода РФФ, обсуждаются различные варианты моделей бислоя и особенности программной реализации РФФ-подхода, демонстрируются результаты РФФ-анализа различных везикулярных систем по данным малоуглового рассеяния нейтронов и рентгеновских лучей.

1. M. A. Kiselev, P. Lesieur, F. M. Kisselev, et al. J. Appl. Phys. A **74**, S1654 (2002).
2. M. A. Kiselev, E. V. Zemlyanaya, V. K Aswal, R. Neubert. Eur. Biophys. J **35**, 477 (2006).
3. Е. В. Земляная, М. А. Киселев. Кристаллография **62**, 795 (2017).
4. E. V. Zemlyanaya, M. A. Kiselev, J. Zbytovska et al. Crystallogr. Rep. **51**, S22 (2006).
5. Е. В. Земляная, М. А. Киселев, Р. Нойберт и др. Поверхность. рентген., синхротрон. нейтрон. исслед. **11**, 14 (2008).
6. M. A. Kiselev, E. V. Zemlyanaya, N. Y. Ryabova et al. Appl. Phys. A **116**, 319 (2014).
7. М. А. Киселев, Е. В. Земляная, Е. И. Жабицкая, В. Л. Аксенов. Кристаллография **60**, 140 (2015).
8. М. А. Киселев, Е. В. Земляная, А. Ю. Грузинов и др. Поверхность. рентген., синхротрон. нейтрон. исслед. **2**, 49 (2019).

ВОЗМОЖНОСТИ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕЗИКУЛЯРНЫХ СИСТЕМ

*М. А. Киселев**

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*E-mail: kiselev@jinr.ru

Везикулы являются основой внутриклеточного и межклеточного транспорта. Именно поэтому на везикулярной основе создаются многочисленные переносчики лекарств. В том числе, и переносчики лекарств через кожу. Особый интерес к везикулам возникает по причине того, что вакцины на основе матричных РНК от COVID-19 создаются как везикулярные системы. Важнейшим требованием к нанолечарствам является их физическая и химическая стабильность.

Везикула является классическим нанобъектом: её размер лежит в диапазоне 20 — 200 нм, а толщина липидного бислоя примерно равна 5 нм. Размер и форму везикулы можно определить комбинацией статического и динамического рассеяния света. А вот толщина и структура липидного бислоя наиболее эффективно определяются малоугловым рассеянием нейтронов и рентгеновских лучей. Именно структура и свойства липидного бислоя определяют физическую и химическую стабильность везикулярных нанолечарств.

В докладе представлены результаты исследования малоугловым рассеянием нейтронов различных везикулярных систем (однокомпонентные везикулы из синтетических фосфолипидов, двухкомпонентные везикулы фосфолипид/детергент, многокомпонентные везикулы из натуральных фосфолипидов). Сравниваются возможности нейтронного и синхротронного излучения для исследования везикулярных систем. Формулируются требования к малоугловому инструменту на реакторе ПИК.

1. D. Lombardo, P. Calandra, D. Barreca, et al., *Nanomaterials* **6**, 125, 2 (2016).
2. M. A. Kiselev, D. Lombardo, *Biochimica et Biophysica Acta* **1861**, 3700 (2017).
3. M. A. Kiselev, D. N. Selyakov, I. V. Gapon, et al., *Crystallography Reports* **64**, 4, 659 (2019).
4. M. A. Kiselev, E. V. Zemlyanayaa, A. Yu. Gruzinov, et al., *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques* **13**, 1, 111 (2019).
5. D. Lombardo, P. Calandra, M. A. Kiselev, *Molecules (MDPI)* **25**, 5624 (2020).

СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕМБРАННЫХ БЕЛКОВ МЕТОДОМ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ

Т. Н. Муругова*

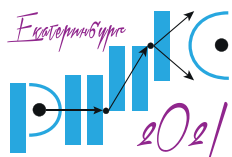
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*E-mail: murugova@jinr.ru

Мембранные белки играют ключевую роль в клеточных процессах: они участвуют в клеточной сигнализации, транспорте различных веществ через мембрану, преобразовании энергии и других процессах. Более половины производимых в настоящее время лекарств своей мишенью имеют мембранные белки. Для понимания функционирования мембранных белков необходимо знать их трехмерную структуру. Широко используемыми методами для получения структурной информации высокого разрешения являются кристаллография и развивающаяся сейчас криоэлектронная микроскопия. Однако эти методы сопровождаются очень сложной пробоподготовкой: они или требуют получения высококачественных кристаллов, или использования низких температур. Кроме того, в процессе приготовления образцов могут применяться жесткие условия, влияющие на структуру белка. В свете этого методы малоуглового рассеяния нейтронов и рентгеновских лучей являются уникальными методами изучения структуры белков в водных растворах при физиологических условиях. Эти методы дают структурную информацию низкого разрешения, однако, они позволяют регулировать внешние условия, контрастировать детергентное или липидное окружение мембранного белка, исследовать взаимодействие и взаимное расположение компонент внутри мембраны.

В докладе будут приведены примеры использования малоуглового рассеяния на мембранных белках. Эксперименты по малоугловому рассеянию нейтронов проводились на спектрометре ЮМО (Дубна, ОИЯИ, ИБР-2) [1-3]. Также они сопровождались комплементарными исследованиями с помощью малоуглового рентгеновского рассеяния.

1. <http://flnph.jinr.ru/en/facilities/ibr-2/instruments/yumo>
2. A.I. Kuklin et al. Journal of Physics: Conference Series **012010**, 848, (2017).
3. A.I. Kuklin et al. Journal of Physics: Conference Series **012016**, 994, (2018).



РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ФОСФОЛИПИДНЫХ ВЕЗИКУЛЯРНЫХ СИСТЕМ ПО ДАННЫМ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ: ОНЛАЙН-ИНТЕРФЕЙС, ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

М. В. Башашин^{1,2*}, Е. В. Земляная^{1,2}, М. А. Киселев^{1,2}, К. В. Лукьянов^{1,2}

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

*E-mail: bashashinmv@jinr.ru

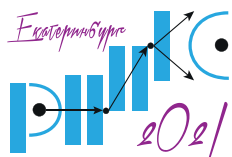
Исследование фосфолипидных везикул представляет собой одну из горячих тем современной нано- и биофизики в связи с многочисленными приложениями этих объектов в медицине, фармакологии и косметологии. Один из эффективных и интенсивно используемых в последнее десятилетие методов изучения структуры и свойств везикул по данным малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) – метод разделенных факторов (РФФ), разработанный в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) [1]. В этой связи актуальной задачей является создание возможностей для удобной работы с РФФ широкому кругу пользователей, не владеющих навыками программирования и не имеющих в своем распоряжении соответствующего программного обеспечения.

Представлен онлайн-интерфейс [2] для работы с фортран-программой, реализующей подгонку структурных параметров полидисперсных везикулярных систем по экспериментальным данным МУРН рамках модели РФФ на основе стандартной программы локальной минимизации DFUMIL из электронной библиотеки JINRLIB.

В связи с тем, что при большом объеме экспериментальных данных обработка спектров МУРН может потребовать значительного времени, разработана также параллельная реализация [3,4] подгонки РФФ-параметров на основе технологии параллельного программирования MPI.

Возможности онлайн-интерфейса для обработки спектров МУРН и эффект параллельной компьютерной реализации демонстрируются на конкретных примерах. Также, обсуждаются перспективы создания на базе платформы HybriLIT (ЛИТ, ОИЯИ, Дубна) информационной системы, реализующей эффективную параллельную обработку малоугловых спектров с удобным веб-интерфейсом для ввода входных параметров и визуализации результатов.

1. M. A. Kiselev, E. V. Zemlyanaya, V. K Aswal et al., Eur. Biophys. J **35**, 477 (2006).
2. Е. В. Земляная, М. А. Киселев, К. В. Лукьянов, и др., Системный анализ в науке и образовании, **4**, 1 (2017).
3. M. Bashashin, E. Zemlyanaya and M. Kiselev. Lecture Notes in Computer Science **11189**, 309 (2019).
4. M. Bashashin, E. Zemlyanaya, E. Zhabitskaya, et al., European Physics Journal – Web of Conferences **173**, 05003 (2018).



КОМПЛЕМЕНТАРНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОГИБРИДНЫХ НАНОКОМПЛЕКСОВ

Ю. Е. Горшкова*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*E-mail: Yulia.Gorshkova@jinr.ru

Комплексное исследование новых биогибридных наноконплексов с целью получения полной информации о их структуре, морфологии и функциональных свойствах предполагает привлечение ряда комплементарных методов. Широкий спектр применения комплементарных методов исследований нейтронному рассеянию в Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований стал возможен благодаря активному развитию приборной базы в ЛНФ ОИЯИ за последние пять лет. В докладе будет продемонстрирован ряд примеров успешного применения комплексного исследования биогибридных наноматериалов с использованием инфраструктурных возможностей ЛНФ ОИЯИ.

В частности, на примере изучения биологических характеристик плазмонных биогибридов, созданных на основе искусственных клеточных мембран, фитогенерированных наночастиц серебра/хлорида серебра и хитозана показано, что активность таких систем в качестве ингибиторов раковых клеток HepG2 и HT-29 определяется их структурой и морфологией. Наночастицы серебра/хлорида серебра со средним размером 48.2 ± 9.5 нм и значением дзета-потенциала -31.1 ± 1.9 мВ, полученные методом «зеленого» синтеза из смеси экстрактов крапивы и винограда, были использованы в качестве «строительных блоков» для развития плазмонных биогибридов, содержащих биомиметические мембраны и хитозан. Механизм образования биогибрида был выяснен путем сопоставления спектральных данных (УФ-видимая флуоресценция, ИК-Фурье спектроскопия), структурных данных (рентгеновская дифракция и малоугловое рентгеновское рассеяние) с информацией, полученной с помощью микроскопических методов (атомно-силовой микроскопии и сканирующей электронной микроскопии). Изменение морфологии самих биомиметических мембран в присутствии гибридных наночастиц и/или хитозана было изучено методом малоуглового нейтронного рассеяния на спектрометре ЮМО высокопоточного импульсного реактора ИБР-2 (Дубна, Россия). Вышеупомянутые новые наноматериалы показали способность связывать свободные радикалы до 75% (испытано *in vitro* методом хемилюминесценции), отличные антимикробные свойства против *Escherichia coli* (IGZ = 45 мм) и *Staphylococcus aureus* (IGZ = 35 мм).

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИПИД-ИОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ЦВИТТЕР-ИОННЫХ ФОСФОЛИПИДАХ РАЗЛИЧНОЙ ЛАТЕРАЛЬНОЙ ПЛОЩАДИ

С. А. Куракин^{1,2*}, Е. В. Ермакова¹, А. И. Иванов^{1,3,4}, Д. Угрикова⁵, Н. Кучерка^{1,5}

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

³Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Россия

⁴Институт проблем безопасности атомных электростанций национальной академии наук Украины, Киев,
Украина

⁵Университет им. Я.А. Коменского в Братиславе, Братислава, Словакия

*E-mail: ksa18@list.ru

Все сложные клеточные биологические процессы происходят в средах, представляющих собой растворы солей, содержащие огромное разнообразие ионов. Тонкий баланс концентраций ионов в клетке и межклеточной среде поддерживается плазматическими мембранами — фосфолипидными бислоями, структура которых может меняться под действием ионов, способных связываться с головой фосфолипидов. Специфика связывания ионов зависит от большого числа факторов, включая в том числе липидный и ионный состав, гидратацию мембраны [1]. Однако влияния этих факторов на липид-ионные взаимодействия, и, следовательно, на изменение структуры мембран под действием ионов, в частности, двухвалентных катионов металлов, на данный момент еще далеки от полного понимания. Поэтому в данной работе с помощью методов малоуглового рассеяния и дифракции нейтронов были исследованы модельные фосфолипидные мембраны различного липидного состава — представители цвиттер-ионных фосфатидилхолинов (ФХ), находящихся в разных условиях гидратации и обогащенные в отдельности ионами кальция и магния. Соответственно, из эксперимента были получены структурные параметры фосфолипидных бислоев (толщина и латеральная площадь на липид), которые, в свою очередь, были приготовлены в форме однослойных везикул (условия избыточной гидратации) и ориентированных бислоев (недостаток гидратации), при физиологически значимых концентрациях кальция и магния.

Полученные результаты, свидетельствующие об изменениях толщины мембраны (d_L) и латеральной площади на липид (A_L), выявили влияние ионов на структуру мембран. Например, исследования однослойных везикул, составленных из насыщенных фосфатидилхолинов, таких как 1,2-димиристоил-*sn*-глицеро-3-фосфохолин (ДМФХ) [2] и 1,2-дипальмитоил-*sn*-глицеро-3-фосфохолин (ДПФХ) [3], выявили некоторые общие закономерности — резкое уменьшение A_L в диапазоне концентраций кальция и магния $C \approx 0 - 1$ (2.5) мМ для ДМФХ (ДПФХ). С другой стороны, при добавлении ионов к ди-мононенасыщенному 1,2-диолеил-*sn*-глицеро-3-фосфохолину (ДОФХ) [3] был обнаружен противоположный эффект, заключающийся в первоначальном увеличении A_L . В случае же мононенасыщенного 1,2-олеил-*sn*-глицеро-3-фосфохолина (ПОФХ) практически не наблюдалось изменение A_L (Рис. 1).

Таким образом, экспериментальные результаты позволяют предположить наличие совершенно различных механизмов липид-ионных взаимодействий, реализующихся в мембранах и напрямую зависящих от параметра A_L , определяющего тип липид-ионных

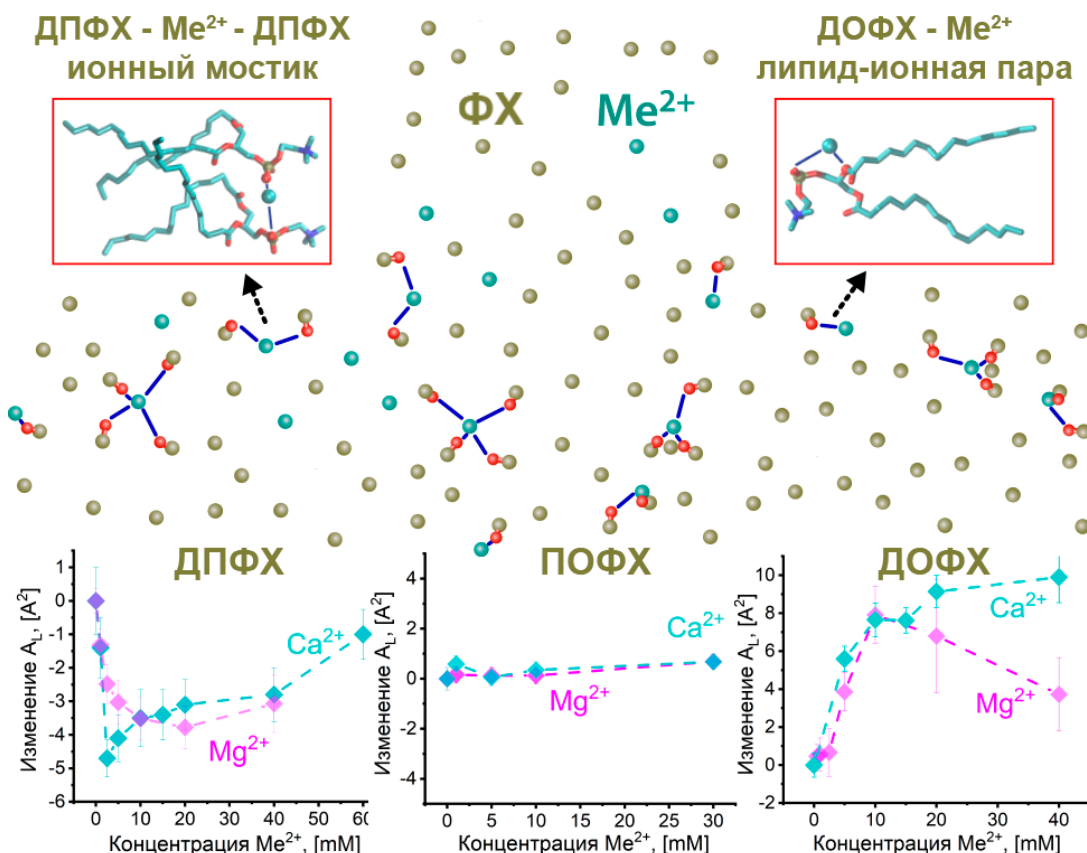
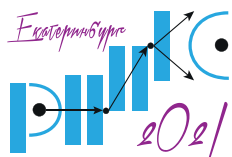


Рис. 1. Типы липид-ионных взаимодействий фосфолипидов различной латеральной площади

взаимодействий. В частности, в насыщенных ДМФХ и ДПФХ вследствие достаточно плотной упаковки бислоя ($A_L^{\text{ДМФХ}} = 599 \text{ \AA}^2$, $A_L^{\text{ДПФХ}} = 63.1 \text{ \AA}^2$) преимущественно появляются ионные мостики липид-ион-липид, приводящие к последующему уплотнению мембраны; в случае ДОФХ ($A_L^{\text{ДОФХ}} = 68.9 \text{ \AA}^2$), наоборот, появляются разделенные липид-ионные пары, заряженные в целом положительно и отталкивающиеся друг от друга. В везикулах ПОФХ ($A_L^{\text{ПОФХ}} = 64.5 \text{ \AA}^2$) площадь на липид близка к некоторой критической площади, соответствующей расстоянию отсечки липид-ионных взаимодействий, что позволяет предположить смешанный тип взаимодействий без преобладания заметного влияния определенного типа взаимодействий (ионные мостики/разделенные пары) на структуру бислоя (Рис. 1).

Для подтверждения этой концепции была исследована роль гидратации мембраны при влиянии ионов на структурные параметры бислоев ДОФХ и ДПФХ. Оказалось, что уровень гидратации также определяет появление ионных мостиков или разделенных липид-ионных пар посредством регулирования A_L . Например, эксперименты на ориентированных образцах ДОФХ выявили зависимость A_L от концентрации ионов, отличающуюся от аналогичной зависимости ДОФХ в везикулах, в то время как для ДПФХ изме-



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

нения структурных параметров бислоя в обоих случаях оказались схожими. Известно, что недостаток молекул воды (в ориентированных образцах) приводит к более плотной латеральной упаковке бислоя (по сравнению с везикулами) [3]. Следовательно, если в ориентированных ДПФХ продолжают преимущественно формироваться мостики, как и в везикулах ДПФХ, то в случае ориентированных ДОФХ вклад мостиков достигает лишь вклад разделенных липид-ионных пар, т.к. в данном случае площадь близка к критическому значению $A_L \approx 65 \text{ \AA}^2$, соответствующему расстоянию отсечки липид-ионных взаимодействий. Таким образом, показано, что в наших системах цвиттер-ионных фосфолипидных бислоев с двухвалентными ионами металлов латеральная площадь липида является важным параметром, определяющим тип липид-ионных взаимодействий в мембранах и, соответственно, существенным образом влияющим на изменение структуры мембраны при добавлении ионов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-72-20186 и в рамках тематического плана ОИЯИ 04-4-1121-2015/2020.

1. G. Pabst, N. Kučerka, M.-P. Nieh, et al., Chem. Phys. Lipids. **163**, 460 (2010).
2. С. А. Куракин, Е. В. Ермакова, А. И. Иванов, и др., Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования **3**, 3 (2021).
3. N. Kučerka, E. Ermakova, E. Dushanov, et al., Langmuir. **37**, 278 (2021).

НАДМОЛЕКУЛЯРНЫЕ БЕЛКОВЫЕ СТРУКТУРЫ В ПОКРОВНЫХ ТКАНЯХ ЖИВОТНЫХ И ЧЕЛОВЕКА ПО ДАННЫМ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ

Л. А. Иванова^{1,2}, Н. А. Верлов^{1,2}, Ю. Е. Горшкова³, К. А. Дариенко², А. А. Пантелеев²,
Д. В. Лебедев^{1,2*}

¹НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Гатчина, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

* E-mail: Lebedev_dv@npi.nrcki.ru

В то время как молекулярная структура липидного компонента рогового слоя эпидермиса достаточно хорошо изучена [1], структурные и функциональные свойства белковой компоненты поверхностного слоя эпидермиса, и в частности структура кератиновых филаментов, их взаимодействие с компонентами липидного матрикса и клеточной оболочки, процесс формирования и роль в барьерной функции эпидермиса гораздо менее понятны. Первая информация, указывающая на упорядоченную структуру кератиновых филаментов в цитоплазматическом пространстве клеток верхнего слоя эпителия, была получена методами электронной микроскопии и рентгеновской дифракции более полувека назад [2,3]. Тем не менее, крупномасштабная структура кератина по-прежнему остается дискуссионной, при этом существующие модели предполагают плотную высокоупорядоченную упаковку филамента в клетке, образующейся при самоорганизации промежуточных филаментов во взаимодействии с липидными мембранами [4,5]. Данные МУРН на препаратах кожи взрослых мышей показали наличие иерархии упорядоченных белковых структур, имеющих преимущественную ориентацию в ткани. В точке компенсации липидной компоненты в спектре препаратов наблюдалась серия дифракционных максимумов, вызванных рассеянием на структурах с характерными размерами 10 — 60 нм. В точке компенсации белка дифракционные пики отсутствовали, что указывает на белковый характер наблюдаемой структуры. Нечувствительными к обработке коллагеназами оказались белковые структуры (фибриллы) с характерным размером ~10 нм. Результаты сравнительных измерений МУРН на препаратах кератиноцитов, культивированных на коллагеновой подложке, и препаратах кожи и эпидермиса новорожденных мышей показали значительное отличие спектров рассеяния от полученных на коже взрослых мышей. При сохранении асимптотики $I \sim q^2$, дифракционная картина в образцах как целой кожи (дерма+эпидермис), так и эпидермиса новорожденных мышей была значительно менее выражена. В культурах кератиноцитов дифракционная картина отсутствовала полностью, а кривая рассеяния следовала асимптотике $I \sim q^4$, что соответствует рассеянию на интерфейсах, представляющих собой гладкую поверхность объекта больших размеров.

Работы проводились при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (Приказ №1363 от 25.07.2019 г.) и при использовании источников нейтронов FRM-2 (Мюнхен, Германия; эксперимент №14128/14831) и ИБР-2 (Дубна, Россия, эксперимент № 2020-10-20-23-46-20).

1. P. M. Elias, J. Invest. Dermatol. **132** 2131 (2012).
2. I. Brody, J. Ultrastruct. Res. **3**, 84 (1959).
3. G. Swanbeck, Journal of Ultrastructure Research **3**, 51 (1959).
4. L. Norlén, A. Al-Amoudi, J. Invest. Dermatol. **123** 715 (2004).
5. M. E. Evans, S. T. Hyde, J. R. Soc. Interface. **8** 1274 (2011).

КРУПНОМАСШТАБНАЯ ОРГАНИЗАЦИИ ХРОМАТИНА В ЯДРЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ КЛЕТКИ: СХОДСТВА И ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПО-РАЗНОМУ «ЖИВУЩИХ» ЯДЕР

Е. Г. Яшина^{1,2,*}, Р. А. Пантина¹, Е. Я. Варфоломеева¹, В. Ю. Байрамуков¹, A. Radulescu²,
V. Pipich², С. В. Григорьев^{1,3}

¹НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Гатчина, Россия

²Heinz Maier-Leibnitz Zentrum, Garching bei M'unchen, Germany

³Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

* E-mail: yashina_91@inbox.ru

Интерес к вопросу о том, как двуспиральная нить ДНК, длина которой составляет несколько метров, уложена в ядре клетки размером в несколько микрон не ослабевает в течение нескольких десятилетий, несмотря на колоссальный прогресс в биологии, генетике и особенно в технологиях исследования биологической клетки. Наиболее изученной считается нуклеосомная структура интерфазного хроматина, в то время как его крупномасштабная структура на сегодняшний момент достоверно неизвестна.

В поисках универсального принципа крупномасштабной организации хроматина были исследованы три типа ядер (Табл. 1) методами малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) и ультра МУРН с использованием техники вариации контраста, а также методом атомно-силовой микроскопии (АСМ):

- ядра куриных эритроцитов (КЭ) [1 – 3] — рудиментарные ядра, не делятся, синтез белков минимален и направлен только на поддержание собственной жизнедеятельности,
- ядра крысиных лимфоцитов (КЛ) — клетки иммунитета, не делятся, активно синтезируют специальные белки для создания иммунного ответа,
- ядра HeLa (H) [3,4] - раковые клетки, активно делятся и синтезируют много белков.

Эксперименты по МУРН продемонстрировали двухуровневую фрактальную организацию хроматина во всех трех типах клеток (Табл. 1). Мелкомасштабная фрактальная организация описывается классической моделью однородного фрактала, который повторяет свое геометрическое строение на разных масштабах, с дробной размерностью равной приблизительно 2.5 (для КЭ $D_F \sim 2.4$, для КЛ $D_F = 2.3$, для H $D_F = 2.55$). Мелкомасштабная фрактальная организация построена так, чтобы максимально облегчить диффузию белков. Одним из наиболее показательных объектов с фрактальной размерностью $D_F = 2.4$ является кластер диффузно-ограниченной агрегации (DLA) [4]. Кластер DLA (также известный как броуновское дерево) представляет собой фрактальный агрегат, в котором форма кластера контролируется возможностью частиц достичь кластера посредством броуновского движения.

Крупномасштабная фрактальная организация описывается моделью логарифмического фрактала, которая была специально разработана в рамках данного исследования [5]. Корреляционная функция такого фрактала описывается не степенной функцией, как в случае объемного фрактала, а логарифмической [6]. Это приводит к необычным масштабным свойствам, а именно, уменьшение масштаба в N раз дает аддитивную добавку к корреляционной функции, что отличает его от классического однородного

фрактала (D_F имеет одно значение во всех его областях), характеризующегося мультипликативной добавкой. В результате логарифмический фрактал является более компактным, чем объемный фрактал, но он все еще имеет довольно большую площадь поверхности, что обеспечивает высокую доступность внешних агентов на всех масштабах длины. Эти два свойства (доступность и компактность) крупномасштабной структуры хроматина облегчают не только диффузию белков, но и взаимодействие генов [1].

Тем не менее, можно выделить ряд различий между тремя типами ядер. Например, в ядрах КЭ наблюдается малый диапазон существования логарифмического фрактала, в отличие от ядер КЛ и ядер HeLa. Техника вариации контрастов показывает, что в ядрах КЛ и HeLa белки би-фрактальны, в отличие от ядер КЭ, где белки организованы как один объемный фрактал. Кроме того, АСМ на ядрах, просто помещённых на подложку и ядрах, помещённых на подложку и подвергнутых при этом центрифугированию (60 rcf.), демонстрирует различные механические свойства. Высоты, на которые проседают ядра можно сопоставить с точками перехода (Q_c) между двумя фрактальными уровнями в интенсивностях малоуглового рассеяния нейтронов (Табл. 1).

Таблица 1. Сходства и отличия между ядрами КЭ, КЛ и HeLa.

Куриные эритроциты	Крысиные лимфоциты	HeLa
— не делятся — только переносят кислород, минимально поддерживая жизнедеятельность	— не делятся — активно синтезируют специальные белки для иммунитета	— активно делятся — активно синтезируют белки для жизни и роста
Би-фрактальная организация хроматина со структурой объемного фрактала в меньших масштабах и со структурой логарифмического фрактала в больших (вплоть до диаметра ядра)		
— малый диапазон существования Лог. ф.	— большой диапазон существования Лог. ф. в хроматине, белках и НК	— большой диапазон существования Лог. ф.
— белки организованы как объемный фрактал ($D=2.4$)	— белки би-фрактальны	— белки би-фрактальны интерференция между белками и НК
— сжимается при центрифугировании	— сжимается при центрифугировании	— не меняет объем при центрифугировании
— $Q_c = 0.01 \text{ nm}^{-1}$ соответствует высоте нецентрифугированного ядра 600 nm	— $Q_c = 0.2 \text{ nm}^{-1}$ соответствует высоте центрифугированного ядра 30 nm	— $Q_c = 0.04 \text{ nm}^{-1}$ соответствует высоте центрифугированного ядра 200 nm

1. S. V. Grigoriev, E. G. Iashina, V. Y. Bairamukov, et al., Phys. Rev. E **102**(3), 032415 (2020).
2. E. G. Iashina, E. V. Velichko, M. V. Filatov, et al., Phys. Rev. E **96**, 012411 (2017).
3. E. G. Iashina and S. V. Grigoriev, JETP **129**, 455 (2019).
4. E. G. Iashina, M. V. Filatov, R. A. Pantina, et al., J. Appl. Cryst. 52844–853 (2019).
5. J. Feder, Fractals (Plenum, New York, 1998).
6. E. G. Iashina, S. V. Grigoriev, Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, **11**, (2017).

ДАННЫЕ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ О НАДМОЛЕКУЛЯРНОЙ И БЕЛКОВОЙ СТРУКТУРЕ ПОКРОВНЫХ ТКАНЕЙ ЧЕЛОВЕКА И ЖИВОТНЫХ

Л. А. Иванова^{1,2*}, Н. А. Верлов^{1,2}, Ю. Е. Горшкова³, К. А. Дариенко², А. А. Пантелеев²,
Д. В. Лебедев^{1,2}

¹НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Гатчина, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*E-mail: Ivanova_la@pnpi.nrcki.ru

Несмотря на то, что молекулярная структура липидной компоненты рогового слоя эпидермиса достаточно хорошо изучена [1], остаются вопросы, затрагивающие структуру и функциональные свойства белковой компоненты поверхностного слоя эпидермиса. В первую очередь, наиболее дискуссионной остается крупномасштабная структура кератина, при этом существующие модели предполагают плотную высокоупорядоченную упаковку филамента в клетке, образующейся при самоорганизации промежуточных филаментов во взаимодействии с липидными мембранами [2, 3].

Данные МУРН на препаратах кожи взрослых мышей показали наличие иерархии упорядоченных белковых структур, имеющих преимущественную ориентацию в ткани. В точке компенсации липидной компоненты в спектре препаратов наблюдалась серия дифракционных максимумов, вызванных рассеянием на структурах с характерными размерами 10 – 60 нм. В точке компенсации белка дифракционные пики отсутствовали, что указывает на белковый характер наблюдаемой структуры. Нечувствительными к обработке коллагеназами оказались белковые структуры (фибриллы) с характерным размером ~10 нм. Результаты сравнительных измерений МУРН на препаратах кератиноцитов, культивированных на коллагеновой подложке, и препаратах кожи и эпидермиса новорожденных мышей показали значительное отличие спектров рассеяния от полученных на коже взрослых мышей. При сохранении асимптотики $I \sim q^2$, дифракционная картина в образцах как целой кожи (дерма+эпидермис), так и эпидермиса новорожденных мышей была значительно менее выражена. В культурах кератиноцитов дифракционная картина отсутствовала полностью, а кривая рассеяния следовала асимптотике $I \sim q^4$, что соответствует рассеянию на интерфейсах, представляющих собой гладкую поверхность объекта больших размеров.

Работы проводились при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (Приказ №1363 от 25.07.2019 г.) и при использовании источников нейтронов FRM-2 (Мюнхен, Германия; эксперимент №14128/14831) и ИБР-2 (Дубна, Россия, эксперимент № 2020-10-20-23-46-20).

1. P. M. Elias, J. Invest. Dermatol. **132** 2131 (2012).
2. L. Norlén, A. Al-Amoudi, J. Invest. Dermatol. **123** 715 (2004).
3. M. E. Evans, S. T. Hyde, J. R. Soc. Interface. **8** 1274 (2011).

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ОЛИГОМЕРИЗАЦИИ СЕНСОРА ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ МАЛОУГЛОВОГО НЕЙТРОННОГО РАССЕЯНИЯ

Ю. Л. Рижиков^{1,2}, Ф. С. Орехов², М. И. Рулёв^{3,4,5}, А. В. Власов^{1,2}, Д. В. Забельский^{1,4,5,6},
А. В. Рогачёв^{1,2}, В. В. Ской^{1,2}, Т. Н. Муругова^{1,2}, А. Д. Власова¹, В. И. Горделий^{1,4,5,6},
А. И. Куклин^{1,2*}

¹Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

³European Synchrotron Radiation Facility, Гренобль, Франция

⁴Institute of Biological Information Processing (IBI-7: Structural Biochemistry), Юлих, Германия

⁵JuStruct: Jülich Center for Structural Biology, Forschungszentrum Jülich, Юлих, Германия

⁶Institut de Biologie Structurale Jean-Pierre Ebel, Université Grenoble Alpes–Commissariat à l’Energie Atomique
et aux Energies Alternatives–CNRS, Гренобль, Франция

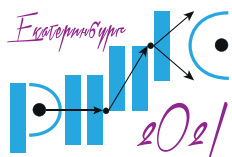
*E-mail: kuklin@nf.jinr.ru

Двухкомпонентные системы (ДКС) отвечают за коммуникацию микроорганизмов с окружающей средой; они присутствуют почти во всех доменах и являются наиболее распространенными сигнальными системами в живой природе. ДКС состоит из рецептора (сенсора, первого компонента) и регулятора ответа (второго компонента). Первый компонент обычно представлен трансмембранными рецепторами: гистидинкиназами, хеморецепторами и фоторецепторами, имеющими аналогичную модульную структуру. В клеточной мембране хемо- и фоторецепторы образуют тримеры димеров, которые вместе с киназами CheA и CheW они образуют основную единицу сигнальных массивов [1].

Сенсорный родопсин II в комплексе с его родственным трансдюсером из галофильной археи *Natronomonas pharaonis* (*NpSRII/NpHtrII*) представляет собой археобактериальный фоторецептор, который широко используется для изучения того, как ДКС передают сигналы через мембрану [2]. Концентрация соли может существенно повлиять на форму и олигомерное состояние белков *N. pharaonis* [3].

Мы провели анализ влияния концентрации соли на структуру и олигомеризацию полноразмерного комплекса *NpSRII/NpHtrII*, приготовленного в буферах на основе D₂O, содержащих 150 мМ, 1.4 М, 2.8 М и 4.0 М NaCl. Измерения малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) проводились на спектрометре ЮМО (ИБР-2, Дубна, Россия) [4]. Анализ полученных данных показывает, что в условиях низкой концентрации соли (150 мМ NaCl) *NpSRII/NpHtrII* образует димеры. В экспериментах МУРН при концентрациях NaCl 1.4 М, 2.8 М и 4.0 М обнаружено увеличение порядка олигомеризации, соответствующее образованию тримеров димеров, доля которых по отношению к димерам увеличивается с увеличением концентрации соли: полученные массовые доли тримеров димеров составляют 21±3%, 29±3% и 36±2% для 1.4 М, 2.8 М и 4.0 М NaCl, соответственно.

На основе полученных нами данных малоуглового рассеяния и молекулярной динамики построена молекулярная модель тримера димеров комплекса *NpSRII/NpHtrII* [5], в которых контакт между димерами опосредован только цитоплазматическими частями, трансмембранные части димеров при этом не контактируют друг с другом, то есть имеет место «tripod»-образная модель, отличная от предложенных ранее в литературе «O»- и «Y»-образных моделей [6].



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

Работа по разработке протоколов экспрессии и очистки белка, проведение экспериментов МУР и построение молекулярной модели тримера димеров поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований (РФФИ) в рамках проекта №20-54-12027 и Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) в рамках проекта №430170559. Работа по анализу *ab initio* моделей комплекса NpSR_{II}/NpHtr_{II}, полученных на основе данных МУРН, поддержана Российским Научным Фондом (РНФ) в рамках исследовательского проекта №21-64-00018.

1. M. Li, G. L. Hazelbauer. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. **108**, 9390 (2011).
2. V. I. Gordeliy, et al. Nature **419**, 484 (2002).
3. I. L. Budyak, et al. PNAS **103** (42), 15428 (2006).
4. A. I. Kuklin, et al. Journal of Physics: Conference Series **848** (2017).
5. Y. L. Ryzhykau, P. S. Orekhov, M. I. Rulev, et al. Sci Rep **11**, 10774 (2021).
6. P. S. Orekhov. Signaling and Adaptation in Prokaryotic Receptors as Studied by Means of Molecular Dynamics Simulations. PhD thesis, University of Osnabrück, Germany (2016).

**КОМПЛЕКСНОЕ ВЛИЯНИЕ НИТРАТОВ В СОСТАВЕ МЕДИЦИНСКОГО
ЛЯПИСА НА ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ МОДЕЛЬНОЙ ЛИПИДНОЙ
МЕМБРАНЫ**

В. В. Ской^{1,2*}, А. И. Ку克林^{1,2}, А. И. Иванов^{1,3}, Д. В. Соловьев^{1,3}

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

³Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль, Украина

* E-mail: skoi.vv@phystech.edu

Одним из традиционно используемых бактерицидных препаратов, действие которых основано на эффекте подавлении жизнедеятельности микроорганизмов в присутствии ионов серебра, является ляпис — твердый сплав нитратов серебра и калия $\text{AgNO}_3\text{--KNO}_3$. Однако, наряду с общим противовоспалительным действием ляписа известны частные эффекты воздействия ионов Ag^+ и K^+ на фазовое состояние клеточной липидной мембраны, приводящие к изменению её функционального состояния. Так, при помощи методов малоуглового рассеяния рентгеновских лучей и дифференциальной сканирующей калориметрии показано, что присутствие AgNO_3 в растворе модельных липидных везикул дипальтоилфосфатидилхолина (ДПФХ) смещает точку главного фазового перехода в область более высоких температур, что приводит к фазовому переходу мембраны из жидкокристаллического в гель-состояние [1]. В случае одновременного присутствия в растворе нитратов $\text{AgNO}_3\text{--KNO}_3$ отмечается конкурирующее воздействие ионов Ag^+ и K^+ . Преимущественное влияние Ag^+ на фазовое состояние липидной мембраны при этом объясняется более активным связыванием ионов серебра с липидной мембраной [2].

В данной работе методами малоуглового рассеяния нейтронов и рентгеновских лучей, а также методом денситометрии исследовано комплексное влияние нитратов серебра и калия на фазовое состояние и структурные параметры модельных липидных мембран на примере многослойных везикул дипальтоилфосфатидилхолина (ДПФХ).

Растворы нитратов серебра и калия с массовым соотношением нитратов 18/37 приготовлены из порошка медицинского ляписа путем растворения в тяжелой воде. Для получения водных дисперсий липидных везикул в приготовленные растворы добавлены навески порошка ДПФХ. Смесь подвергнута пяти циклам нагрева и охлаждения в диапазоне температур от -20 до 60 °С.

Измерения зависимостей плотности образцов от температуры проведены на денситометре Anton Paar 5000M (Рис. 1). Показано, что при суммарной массовой концентрации липидов и нитратов в растворе равной 5% наблюдается возникновение дополнительной точки перегиба, что может свидетельствовать о макрофазном разделении образца.

Структурные исследования многослойных липидных везикул ДПФХ в присутствии нитратов $\text{AgNO}_3\text{--KNO}_3$ проведены методом малоуглового рассеяния нейтронов на спектрометре ЮМО (ОИЯИ, ЛНФ, Дубна). Исследованы образцы с различными временами инкубации от 1 часа до 5 суток. Показано, что при различных временах инкубации значительно отличается характер зависимости периода повторяемости (совокупной толщины липидной мембраны и межмембранной водной прослойки) от температуры. При

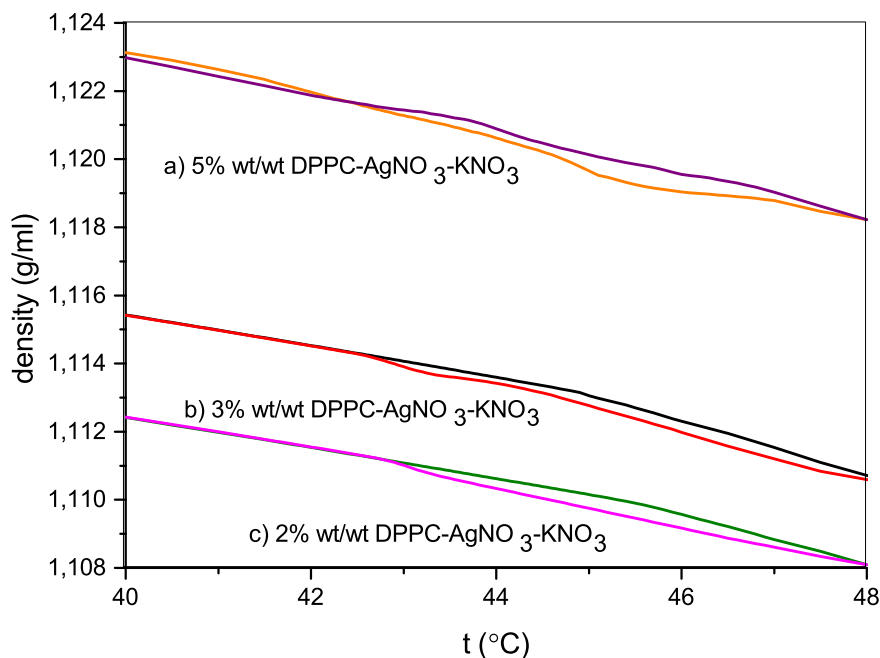


Рис. 1. Образец рисунка. Графики зависимости плотности от температуры растворов многослойных везикул ДПФХ в тяжелой воде с добавлением препарата ляписа. Массовое соотношение липид/нитраты 1:1. Суммарные массовые концентрации растворенных веществ а) 5%, б) 3%, в) 2%. Верхние кривые в каждой паре соответствуют нагреву от 40 до 48 °С, нижние — охлаждению от 48 до 40 °С.

длительной инкубации образца наряду с основным дифракционным пиком от многослойной мембраны в жидкокристаллической фазе наблюдается дополнительный пик. Этот факт свидетельствует о возникновении неоднородностей в липидных везикулах, что подтверждается данными денситометрии. Оба использованных метода показывают повышение температуры главного фазового перехода липидной мембраны ДПФХ в присутствии нитратов $\text{AgNO}_3\text{--KNO}_3$. При этом величина эффекта значительно зависит от времени инкубации липидных везикул в растворе ляписа.

1. L.A. Bulavin et al. Phase transitions **88**, 6, 582-592 (2015).
2. O.V. Vashchenko et al. Biophysics **62**, 2, 227-232 (2017).

Секция 8.

**Функциональные материалы, материала-
ловедение и прикладные исследования
(энергетика, окружающая среда, геофи-
зика, культурное наследие)**

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ И АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

С. А. Маннинен, П. А. Кузнецов, О. В. Васильева*

НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: npk3@crism.ru

Для создания защитных материалов, эффективных в низкочастотном диапазоне магнитных полей, необходимо использовать магнитомягкие сплавы, обладающие высокой магнитной проницаемостью и низкой коэрцитивной силой. В дополнение к этому, магнитные характеристики сплавов должны быть устойчивы по отношению к внешним механическим воздействиям и деформациям, неизбежно возникающим в процессе изготовления, монтажа и эксплуатации изделий. Не менее важным требованием является удобство применения материалов для создания конкретных экранирующих изделий, возможность получения экрана необходимой формы для решения индивидуальных задач заказчика.

Кристаллические материалы известны достаточно давно, и границы их применимости определяются относительно небольшой величиной магнитной проницаемости. Исключение составляет молибденовый пермаллой, максимальная магнитная проницаемость которого достигает величины 500000 Гс/Э. Однако технологически применять данный сплав очень сложно из-за сильной деградации его магнитных свойств при внешних механических воздействиях. Хорошей альтернативой традиционным кристаллическим сплавам являются аморфные магнитомягкие сплавы на основе кобальта. Данные сплавы обладают уникальным набором свойств: высокой магнитной проницаемостью (до 1000000 Гс/Э), низкой коэрцитивной силой, а также низкой магнитострикцией, что обеспечивает эффективность применения подобных сплавов в сфере производства экранирующих магнитных материалов.

Начиная с 2002 года, в институте ведутся разработки магнитных экранирующих материалов на базе отечественного аморфного сплава АМАГ-172 (ПАО «Мстатор»). К настоящему времени запатентована конструкция и разработана технология получения рулонных металлополимерных магнитных экранов типа МАР-1К. Материал представляет собой трехслойный металлополимерный композит. Внутренний магнитный слой набирается из лент аморфного сплава. Ленты располагаются внахлест, с перекрытием порядка 1 мм. Внешние слои композиционного материала выполняются из полиэтилентерифтолатной пленки, обеспечивающей конструкционные, защитные и эксплуатационные свойства. Толщина металлического слоя – 20 мкм, общая толщина материала – 85 мкм. Ширина исходной ленты – 3 см, ширина получаемого рулонного композита – 50 см. Данные экраны предназначены для экранирования постоянных магнитных полей и магнитных полей промышленной частоты. Диапазон величины магнитного поля для эффективного однослойного применения составляет от 0 до 100 мкТл. Для больших полей или для увеличения коэффициента экранирования возможно применение многослойных экранов. Главное слабое место традиционных кристаллических магнитомягких сплавов заключается в необратимой деградации их магнитных свойств при любых механических воздействиях. Было установлено, что магнитные свойства аморфных сплавов при упругих деформациях также снижаются, однако эти изменения являются обратимыми. Свойства практически полностью восстанавливаются при возвращении экрана к исходной форме. Таким образом, для достижения максимальной

эффективности экранирования для аморфных сплавов, термическая обработка ленты должна производиться в том же состоянии (на том же диаметре), в котором она будет находиться в экранирующей конструкции. Другой особенностью магнитных экранов из аморфного сплава, которую необходимо учитывать при экранировании, является расположение лент в полотне экрана. Максимальная эффективность экранирования достигается в том случае, когда направление силовых линий экранируемого магнитного поля совпадает с направлением лент в экране.

Рулонные магнитные экраны на основе аморфных сплавов удобны для изготовления экранирующих конструкций цилиндрической или плоской геометрии. Для изготовления экранов более сложной формы перспективным направлением является использование порошковых аддитивных технологий, таких как селективное лазерное сплавление (СЛС). Данная технология позволяет изготовить изделия любой геометрии за один технологический цикл без механической обработки, с минимальными отходами материала. Сырьем для данной технологии является мелкодисперсный порошок (диаметр не более 100 мкм), со сферической формой частиц и узким гранулометрическим распределением. Производство такого порошка возможно методом вакуумного распыления расплава. Нами был получен такой порошок из сплава 80НХС.

Метод СЛС определяет жесткие требования к исходному материалу. На качество получаемого образца значительное влияние оказывают сферичность, химический и гранулометрический состав исходного порошка. Был произведен тщательный выходной контроль качества порошкового материала. Измеренный методом лазерной дифракции средний размер фракции порошка составляет 20 — 100 мкм. С помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 SBH фирмы TESCAN были выполнены структурные исследования порошка 80НХС для определения морфологии частиц и химического состава порошка. Проведенный анализ показал, что частицы данного порошка имеют сферическую форму со средним размером 44.8 мкм. Полученные результаты удовлетворяют требованиям к порошку для его использования в качестве сырья для установки СЛС. Для выбора оптимального режима СЛС на установке EOSINT M270 были изготовлены образцы кубической формы с гранью 1 см в количестве 8 штук. Образцы изготавливались несколькими партиями при различных режимах построения. Наибольшая плотность материала достигнута при режиме наибольшей мощности 190 Вт и наименьшей скорости сканирования образца 700 мм/с.

Для исследования магнитных характеристик изделий из порошка 80НХС были построены лабораторные образцы в виде колец с внешним диаметром $D = 22 \pm 0.5$ мм, внутренним диаметром $d = 16 \pm 0.5$ мм, высотой $h = 5 \pm 0.5$ мм. Построенные образцы исследовались на магнитные характеристики. Измерения магнитных свойств производились на установке МК-3Э методом квазистатического перемагничивания образца по петле гистерезиса и намагничиванию по основной кривой намагничивания в постоянном поле по задаваемому режиму в соответствии с ГОСТ 8.377.

Основными магнитными характеристиками, определяющими качество сплава 80НХС, согласно ГОСТ 10160-75 являются максимальная магнитная проницаемость, начальная магнитная проницаемость и коэрцитивная сила. Термическая обработка проводилась с помощью вакуумной печи Nabertherm VHT 8/22 GR. Проведенная в соответствии с ГОСТ 10160-75 термообработка не позволила достичь удовлетворительных результатов, магнитные свойства оказались слишком низкими. Для поиска оптимального режима термообработки были произведены эксперименты по термообработке при более высоких температурах. Таким образом, для образцов сплава 80НХС, изготовленных методом СЛС, был определен оптимальный режим термической обработки (выдержка 3 часа при температуре 1300 °С) для получения магнитных свойств, близких к требованиям ГОСТ 10160-7.

СТРУКТУРНАЯ ОБУСЛОВЛЕННОСТЬ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЛОИСТЫХ ХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ: ДИФРАКЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Н. В. Селезнева^{1}, Н. В. Баранов², А. Ф. Губкин²*

¹Институт Естественных наук, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

²Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*E-mail: hope_s@mail.ru

Халькогениды переходных металлов M_7X_8 (M – 3d-металл; X – S, Se) обладают слоистой структурой типа NiAs с различным упорядочением вакансий в катионной подрешетке. Наличие/отсутствие сверхструктур можно контролируемо реализовать температурой синтеза и термообработками, а также замещениями по катионной/анионной подрешеткам, что будет отражаться на физических свойствах получаемых соединений. Составы Fe_7X_8 являются ферримагнетиками, в отличие от соединений с кобальтом Co_7X_8 , которые не обладают дальним магнитным порядком и проявляют парамагнетизм Паули [1 – 4]. Несмотря на активное изучение слоистых соединений на основе халькогенидов переходных металлов, проблемы магнитного упорядочения, магнитной анизотропии и гистерезисных свойств остаются нерешенными, в частности, из-за недостатка экспериментальных данных о величинах магнитных моментов, магнитокристаллической анизотропии, обменных взаимодействий и об особенностях магнитной структуры.

Поликристаллические образцы $Fe_6Ti_1S_8$, $Fe_4Ti_3(S,Se)_8$, $Fe_4Co_3(S,Se)_8$ были получены методом твердофазного ампульного синтеза в вакуумированных кварцевых ампулах при $T = 800$ °C. Аттестация осуществлялась на дифрактометре Bruker D8 ADVANCE. Полевые и температурные зависимости намагниченности образцов измерялись на СКВИД-магнитометре MPMS (Quantum Design) в температурном интервале 2 – 400 K и в магнитных полях до 70 кЭ. Для определения магнитной структуры были проведены нейтронографические исследования на порошковых образцах в температурном интервале от 1.5 K до 300 K и при $T = 540$ K для состава $Fe_6Ti_1S_8$ в институте Пауля Шеррера (Швейцария) на дифрактометрах DMC и HRPT. Уточнение кристаллических и магнитных структур проводилось в программе FullProf.

Нейтронографическое исследование соединения $Fe_6Ti_1S_8$ и результаты магнитных измерений показали, что замещение одного атома железа титаном в пирротине Fe_7S_8 , который обладает ферримагнитным упорядочением, приводит к антиферромагнетизму. Причиной таких изменений является неравновероятное замещение железа титаном в чередующихся катионных слоях, а именно, тот факт, что в соединении $Fe_6Ti_1S_8$ титан преимущественно располагается в слое без вакансий, в результате чего из-за антиферромагнитного упорядочения магнитных моментов Fe в соседних слоях происходит компенсация намагниченностей подрешеток. При дальнейшем увеличении содержания титана происходит раскомпенсация магнитных моментов, переход к ферримагнетизму и увеличение результирующей намагниченности [4,5].

Детальное исследование кристаллической и магнитной структур замещенных соединений типа M_7X_8 показало, что соединения $Fe_4Ti_3S_8$ и $Fe_4Ti_3Se_8$ кристаллизуются в моноклинной кристаллической структуре $P2_1/c$: слои без вакансий содержат больше

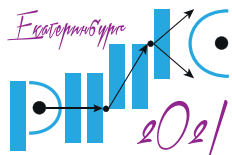
атомов железа, чем атомов титана, в то время как в слоях с вакансиями больше катионных позиций занято атомами титана, чем атомами железа. Ниже температуры магнитного упорядочения оба соединения обладают ферромагнитной структурой с волновым вектором $k = 0$. Кроме этого установлено, что, поскольку в соединениях имеются две структурно-неэквивалентные позиции атомов железа, локальные магнитные моменты железа μ_{Fe} в этих позициях различаются и ниже спинового значения, которое можно было ожидать для иона Fe^{2+} , исходя из модели локализованных моментов. Такое поведение можно объяснить участием $3d$ -электронов атомов железа в образовании ковалентно-подобных связей.

Соединения $Fe_4Co_3X_8$, в которых атомы Fe частично замещены кобальтом, кристаллизуются в тригональной сингонии (пр. группа $R\bar{3}m$). Установлено, что замещение железа кобальтом в катионных слоях происходит статистически и катионы занимают пять структурно-неэквивалентных позиций. Ниже температуры магнитного упорядочения оба соединения также обладают ферромагнитной структурой с волновым вектором $k = 0$. Анализ нейтронографических данных показал, что атомы кобальта в соединениях $Fe_4Co_3X_8$ в пределах ошибки уточнения обладают нулевым магнитным моментом, как и в соединениях Co_7X_8 . Отсутствие магнитного момента на атомах Co и парамагнетизм Паули соединений Co_7X_8 объясняется коллективизацией $3d$ -электронных состояний из-за существенного ($\sim 10\%$) уменьшения межслоевых расстояний по сравнению с соединениями Fe_7X_8 [3]. Как и в титансодержащих соединениях, разное локальное окружение атомов железа в $Fe_4Co_3X_8$ приводит к разным значениям магнитных моментов μ_{Fe} . Установлено, что при охлаждении ниже T_N происходит сжатие решетки в базисной плоскости ab и рост параметра c . На примере соединения $Fe_4Co_3Se_8$ показано, что приложение гидростатического давления около 4.5 ГПа приводит к исчезновению дальнего магнитного порядка.

Полученные результаты показывают, что характер магнитного упорядочения и величины магнитных моментов атомов $3d$ -металлов в слоистых соединениях типа M_7X_8 в значительной степени определяются структурными параметрами и характером распределения M атомов и вакансий в катионных слоях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № FEUZ-2020-0054).

1. H. Wang, Phase Transition **78**, 547 (2005).
2. A.V. Powell et al., Physical Review B **80**, 014415 (2000).
3. V.L. Miller et al., J. Solid State Chemistry **178**, 1508 (2005).
4. N.V. Baranov et al., J. Physics: Condensed Matter **27**, 286003 (2015).
5. N.V. Baranov et al., Physica B **449**, 229 (2014)



ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИЧНЫХ И СРЕДНЕВЕКОВЫХ МОНЕТ НЕРАЗРУШАЮЩИМИ МЕТОДАМИ НЕЙТРОННОЙ ТОМОГРАФИИ И ДИФРАКЦИИ

Б. А. Бакиров^{1,2}, С. Е. Кичанов¹, И. А. Сапрыкина^{1,3}, Б. А. Абдурахимов¹,
Р. И. Храмченкова^{1,4}*

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Казанский федеральный университет, Казань, Россия

³Институт археологии РАН, Москва, Россия

⁴Институт археологии им. А.Х. Халикова Академии наук Республики Татарстан, Казань, Россия

*E-mail: bulatbakirov4795@gmail.com

Детальные исследования физико-химических свойств античных и средневековых монет современными неразрушающими методами являются важной задачей археологии и смежных с историей наук. Нумизматический материал хранит в себе ценную информацию о торгово-экономическом, технологическом и социальном развитии древних государств. Известно [1, 2], что изучение фазового и химического состава, внутренней структуры монет может дать важную информацию о месторождениях руды, из которой изготовлены монеты, соответствие определенному историческому периоду или особенностям чеканки, выявлению подделок. Следует отметить, что полученные экспериментальные данные имеют важное значение для развития методологии реставрации и сохранения не только нумизматических, но и других металлических археологических находок [3].

В данной работе было исследовано большое количество монет, найденных на разных территориях и соответствующих различным историческим периодам. Набор из девяти бронзовых монет из раскопок некрополя VI–III до нашей эры на Таманском полуострове (Краснодарский край, Россия) относится к Боспорскому царству и характеризует период активного взаимодействия греческого и варварского населения данного региона. Две серебряных монеты с территории Волжской Болгарии (Республика Татарстан, Россия), датируемые X и XIV веками нашей эры, соответствуют двум периодам максимального распространения металлических монет в торговых операциях этого средневекового государства. Другая серебряная монета ориентировочно X–XIII века нашей эры, чеканенная династией Караханидов и найденная на территории современного Узбекистана, является ярким маркером так называемого «серебряного кризиса». Таким образом исследования данных имеют большое значение для прояснения некоторых аспектов развития этих древних государств.

Для определения пространственного распределения химических элементов по объему монет были проведены эксперименты по нейтронной радиографии и томографии на специализированной экспериментальной станции на 14-ом канале импульсного высокопоточного реактора ИБР-2. Исследования кристаллической структуры и фазового состава монет проводились с помощью метода нейтронной дифракции на специализированном дифрактометре ДН-6 на 6-ом канале импульсного высокопоточного реактора ИБР-2, анализ дифракционных данных производился методом Ритвельда.

В результате для бронзовых монет была определена степень деградации (соотношение объемов металлической части и патины), фазовый состав патины, содержание

олова в медно-оловянном сплаве. Дополнительно были успешно восстановлены трехмерные модели поверхности трех монет, что позволило правильно идентифицировать их (Рис. 1). Для серебряных монет было установлено содержание медной фазы и пространственное распределение серебряной и медной фазы по объему монет (Рис. 2). Было обнаружено повышенное содержание серебра на поверхности двух монет, что указывает на серебрение поверхности.

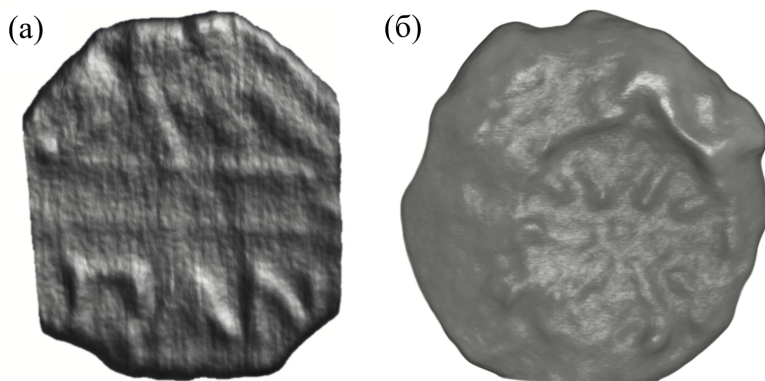


Рис. 1. Примеры реконструированных узоров на поверхности нескольких монет по данным нейтронной томографии. Монета (а) с изображением лука, стрелы и надписью «ПАН». Монета (б) с изображением «Двадцатилучевой звезды».

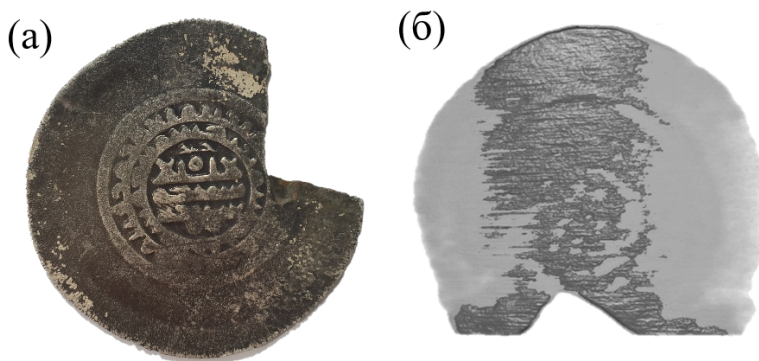


Рис. 2. Фотография (а) и трехмерная модель (б) монеты Волжской Булгарии. Градация серого показывает степень ослабления нейтронного пучка от низкой (светлые участки) до высокой (темные участки). Предполагается, что темные области соответствуют повышенному содержанию серебра.

1. Р. Х. Храмченкова, Е. Ф. Шайхутдинова, Е. А. Беговатов, и др., Поволжская археология **3**, 176 (2015).
2. B. Sodaee, M. Hajivaliei, F. Khademi Nadooshan, Mediterranean Archaeology and Archaeometry **13**, 161 (2013).
3. H. W. Nørgaard, Journal of Archaeological Science **64**, 110 (2015).

ПРЕОБЛАДАНИЕ ВКЛАДОВ МЕЖФАЗНЫХ ДЕФЕКТОВ В КОЭРЦИТИВНУЮ СИЛУ И ПОЛЕ ОБМЕННОГО СМЕЩЕНИЯ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ NiFe/Cu/IrMn

М. В. Бахметьев*, Р. Б. Моргунов

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

* E-mail: bakhmetiev.maxim@gmail.com

Обменное взаимодействие в магнитных структурах ферромагнетик-антиферромагнетик (ФМ–АФМ) широко используется в датчиках Холла, поскольку смещает петлю магнитного гистерезиса относительно нуля в технически востребованный интервал полей. Введение диамагнитного разделяющего слоя (ДРС) между ФМ и АФМ уменьшает поле обменного смещения [1,2], что является эффективным методом регулировки чувствительности датчиков Холла [3]. Поэтому варьируя толщину ДРС, возможно установить особенность формирования обменной связи ФМ–АФМ через ДРС и понять физический механизм зависимости поля обменного смещения от толщины ДРС. Нами были исследованы гетероструктуры NiFe(10 nm)/Cu(t_{Cu})/IrMn(10 nm) в интервале толщин прослойки $t_{Cu} = 0.1 - 5$ nm, обеспечивающем островковое и полное покрытие медью интерфейса NiFe/Cu/IrMn. Обнаружено, что с увеличением толщины медной прослойки поле обменного смещения H_B и коэрцитивная сила H_C ведут себя одинаково — зависят друг от друга линейно. Зависимости поля обменного смещения H_B от коэрцитивной силы H_C при температурах $T = 2$ К (1), 10 К (2), 50 К (3), 100 К (4) и 300 К (5) представлены на Рис.1.

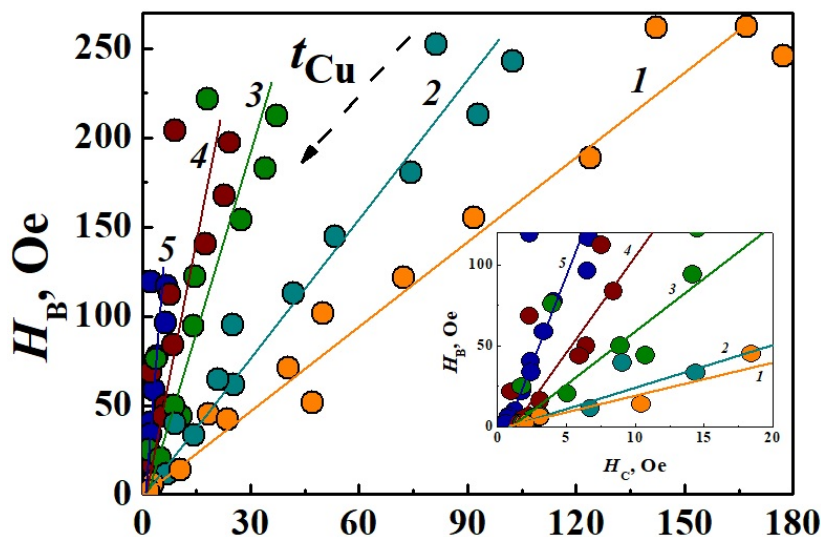
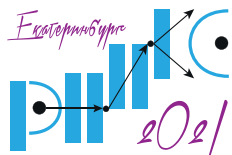


Рис. 1. Зависимости поля обменного смещения H_B от коэрцитивной силы H_C при температурах $T = 2$ К (1), 10 К (2), 50 К (3), 100 К (4) и 300 К (5). Направление изменения толщины медной прослойки показано стрелкой. На вставке представлены эти же зависимости в увеличенном масштабе.



Линейность между H_B и H_C свидетельствует об одинаковом механизме уменьшения H_B и H_C с увеличением толщины Cu . Наличие дефектов в объеме слоя NiFe приводило бы к отклонению линейной зависимости $H_B(H_C)$ в результирующие энергетические барьеры перемангничивания. Отсутствие отклонений в интервале температур $T = 2 - 300$ К свидетельствует о преобладании вклада дефектов на интерфейсе NiFe/IrMn как в коэрцитивную силу H_C , так и в поле обменного смещения H_B . Стоит отметить, что в области малых толщин слоя Cu связь между H_B и H_C становится нелинейной. Можно предполагать, что в части образцов с малой толщиной медной прослойки ($t_{\text{Cu}} = 0 - 0.16$ nm) дефектов в объеме слоя NiFe больше, чем на интерфейсе NiFe/IrMn .

Авторы выражают благодарность «ООО АкадемВак», при поддержке Приборостроительного Инкубатора Новосибирского Академпарка за образцы, предоставленные для исследований. Авторы благодарны профессору Чеолги Ким (лаборатория нанобиоматериалов и спинтроники, Институт науки и технологий Дэгу-Кёнгбук, Южная Корея) за помощь в обсуждении результатов.

1. М. В. Бахметьев, А. Д. Таланцев и Р. Б. Моргунов, ЖЭТФ **159**, 963 (2021).
2. Р. Б. Моргунов, М. В. Бахметьев и А. Д. Таланцев, ФТТ **62**, 1774 (2020).
3. T. Q. Hung, et al., J. Appl. Phys. **107**, 09E715-1 (2010).

НЕЙТРОННАЯ ФУРЬЕ-СТРЕСС-ДИФРАКТОМЕТРИЯ ПО ВРЕМЕНИ ПРОЛЕТА НА РЕАКТОРЕ ИБР-2 ДЛЯ РЕШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Г. Д. Бокучава, И. В. Папушкин, А. А. Круглов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*E-mail: Gizo.Bokuchava@jinr.ru

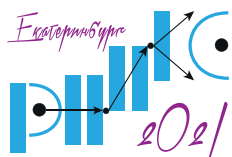
Метод изучения напряжений с помощью дифракции нейтронов начал применяться в середине 80-х прошлого столетия и впоследствии получил широкое распространение из-за ряда его существенных преимуществ по сравнению с традиционными методиками. Наиболее важным является то, что нейтроны могут проникать в материал на глубину до 3 см для сталей и до 10 см для алюминия. Достоинства метода дифракции нейтронов настолько существенны, что в течение последних лет практически во всех современных нейтронных центрах созданы специализированные нейтронные стресс-дифрактометры для изучения внутренних напряжений.

Для проведения исследований остаточных напряжений в промышленных образцах и конструкционных материалах в ЛНФ им. И.М. Франка ОИЯИ используется уникальная методика — нейтронная корреляционная фурье-дифрактометрия по времени пролета на источнике нейтронов с длинным импульсом — реакторе ИБР-2. Данная методика основана на использовании быстрого фурье-прерывателя для модуляции интенсивности первичного нейтронного пучка и RTOF-метода для накопления данных, что позволяет получать дифракционные спектры с необходимым высоким разрешением, $\Delta d/d \approx 2 \div 4 \times 10^{-3}$.

В настоящее время на реакторе ИБР-2 успешно функционируют два фурье-стресс-дифрактометра — ФСД [1,2] и FSS [3], на которых проводятся регулярные эксперименты по определению остаточных напряжений в объемных изделиях и новых перспективных материалах. За время эксплуатации фурье-дифрактометров определились их реальные возможности в решении тех или иных материаловедческих задач и сформировались основные направления научных исследований, которые связаны с достигнутыми уровнями разрешающей способности и светосилы и доступным диапазоном межплоскостных расстояний d_{hkl} .

Основная часть задач связана с определением остаточных напряжений в готовых деталях и конструкциях. Чаще всего источником возникновения напряжений являются различные технологические процессы. Такие задачи представляют интерес для промышленных производителей с точки зрения создания наиболее оптимальных свойств материала детали и оптимизации технологического процесса изготовления детали. Результаты подобных работ помогают создать оптимальное остаточное напряженное состояние в различных сечениях детали, и, соответственно, улучшить эксплуатационные свойства и срок работы детали [4,5].

Вторым важным направлением научной деятельности является изучение остаточного напряженного состояния и механических свойств современных материалов, таких как композиционные и градиентные материалы, а также различные марки сталей и сплавов. В этих задачах проводятся исследования сосуществования нескольких различных фаз в одном материале и их совместное влияние на упругие свойства и остаточное напряженное состояние материала. Такие задачи весьма важны для создания



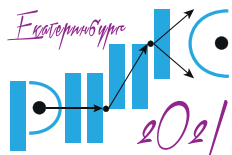
КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

● → ● → ● → Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

материалов с заранее заданными физико-химическими и механическими свойствами. Как результат этих работ появляется возможность создавать новые материалы с прогнозируемыми свойствами и поведением. Типичными примерами могут служить работы по изучению остаточного напряженного состояния и микроструктуры материала в сталях и сплавах, современных композитных и градиентных материалах [6,7].

В работе дано описание экспериментальной базы для проведения исследований, а также приведены примеры выполненных экспериментов.

1. Г. Д. Бокучава, А. М. Балагуров, В. В. Сумин, И. В. Папушкин, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования **11**, 9 (2010).
2. G. Bokuchava, Crystals **8**, 318 (2018).
3. G. Bokuchava, A. Kruglov, I. Papushkin et al., Proc. of ECNS-2019, July 1–5, 2019, St. Petersburg, Russia.
4. G. Bokuchava, P. Petrov, Metals **10**, 632 (2020).
5. G. Genchev, G. Bokuchava, P. Petrov et al., Journal of Constructional Steel Research **138**, 633 (2017).
6. Г. Д. Бокучава, И. В. Папушкин, В. И. Бобровский и др., Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования **1**, 49 (2015).
7. R. Fernández, G. Bokuchava, I. Toda-Caraballo et al., Advanced Engineering Materials **22**, 1901355 (2020).



ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ В ФУЛЛЕРЕНАХ С МАЛЫМИ ДОБАВКАМИ МЕТАЛЛОВ

П. А. Борисова^{1*}, М. С. Блантер², Е. С. Коваленко¹, В. В. Бражкин³, В. П. Филоненко³,
С. Г. Ляпин³, Е. В. Кукуева¹

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

²МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

³Институт физики высоких давлений имени Л.Ф. Верещагина РАН, Москва, Россия

*E-mail: Borisova_PA@nrcki.ru

Исследование взаимодействия металлов с фуллеренами представляет интерес, по крайней мере, в двух аспектах, как хороший материал-кандидат для инкапсуляции и адсорбции различных металлов – металлофуллеренов (фуллеридов) для использования в различных научных, технологических и медицинских областях, так и в качестве армирующей добавки для металл-матричных композиционных материалов, и как прекурсор для создания новых твердых конструкционных и других материалов, в том числе, материалов с улучшенными демпфирующими свойствами.

Методами дифракции нейтронов и рентгеновских лучей, рамановской спектроскопии исследовано влияние металлических добавок (7 ат.%) на фазовые превращения при давлениях 2 и 8 ГПа и температурах: 500, 800, 1100°С в фуллеренах C₆₀ и C₇₀. Томографическое исследование внутреннего строения синтезированных образцов, проведенное на синхротронном излучении на станции «ЛИГА» Курчатовского источника синхротронного излучения «КИСИ-Курчатов», показало, что образцы неоднородны по своему составу и существуют различия строения между основной центральной частью образца и его наружным слоем. Показано, что карбидообразующие элементы (Fe, Al) сильно повышают температуру превращения фуллеренов в разориентированный графит, тогда как не являющийся карбидообразующим элементом Ag такого эффекта не оказывает. Объяснение эффекта стабилизации кристаллических фуллеренов дается на основе известных данных по взаимодействию металлических атомов с молекулами фуллерена и сравнения с процессами образования фуллеридов.

Авторы выражают благодарность к.ф.-м.н. Свиридовой Т.А. за проведение рентгеноструктурного анализа. Рентгеновская дифракция и рамановская спектроскопия выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-02-00162, синхротронная томография выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-29-12035 мк.

EFFECT OF CARBON ADDITIVES ON THE STRUCTURE OF ELECTRODES FOR HIGH ENERGY DENSITY Li-ION BATTERIES BY SMALL-ANGLE NEUTRON SCATTERING

M. Yerdauletov^{1,3,5}, P. Napolsky², M. Avdeev^{1,2}, O. Ivankov¹, S. Bocharova², S. Ryzhenkova⁴, K. Mironovich⁶, D. Burlyaev⁶, and V. Krivchenko^{2,7}*

¹Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

²Dubna University, Dubna, Russia

³Institute of Nuclear Physics, Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

⁴M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁵L.N.Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

⁶NIIEI, JSC, Electrougli, Moscow region, Russia

⁷Institute of Arctic Technology of MIPT, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia

*E-mail: meyir2008@mail.ru

Energy storage technology based on lithium-ion electrochemical systems makes it possible to manufacture batteries with high specific energy and power densities. Over the past decades, such batteries have been the most widely used ones in applications related to electric vehicles, portable electronics, and robotics. Lithium-ion battery specific parameters can be significantly improved by reducing the mass contribution of inactive components, as well as by controlling the microstructure of the electrode layers.

Using small-angle neutron scattering (SANS), the effect of conducting carbon additives (carbon black, graphene, and carbon nanotubes (CNTs)) on the porous structure of positive electrodes based on lithium iron phosphate (LiFePO₄, or LFP) was studied. To separate scattering by closed pores from scattering by open pores, the electrodes were wetted with a deuterated electrolyte, which made it possible to match the scattering from open pores. The used additives were found to change the electrode porosity to different extents and affect the wettability of the material both through a different efficiency of the incorporation of the initial material into pores and due to a change in the LFP-matrix. Thus, CNT network embedded in the electrode layer provides its greater wettability by an electrolyte compared to widely used carbon black. This results in better electrode C-rate performance.

The structure analysis allowed us to improve and optimize the technology of the fabrication of high areal capacity LFP-based electrodes. It was demonstrated that the use of CNTs as conductive additives opens prospects for producing electrodes with areal capacity of more than 5 mAh·cm⁻². The practical applicability of the considered electrode technology was approved on the pouch cell prototype with specific energy density of 150 Wh·kg⁻¹/295 Wh·l⁻¹.

1. M. V. Avdeev, M. S. Yerdauletov, O. I. Ivankov, et al., J. Surf. Investigation **13**(4), 614 (2019).

2. F. Napolskiy, M. Avdeev, M. Yerdauletov, et al., Energy Technology **8**, 2000146 (2020).

NEUTRON TOMOGRAPHY OF TWO LAMPROPHYRE DIKE SAMPLES FROM UZBEKISTAN: APPLICATION OF 3D IMAGE ANALYSIS FOR THE CHARACTERIZATION OF ROCK FABRIC

I. Yu. Zel^{1}, B. A. Abdurakhimov^{1,2}, S. E. Kichanov¹, D. P. Kozlenko¹*

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

²Institute of Nuclear Physics, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan

*E-mail: zel@jinr.ru

Dikes are the main conducting channels of basaltic magma within the Earth's crust and upper mantle. Owing to the tabular shape of these intrusive rocks, having almost planar parallel contacts with a host rock, the flow of fluid is mainly laminar preserving this state at long distances. Hence, it would expect that dikes bear the record of magma flow direction and therefore can provide an important information about the location and the extent of magma sources. Rapid cooling of moving melted rock facilitates the conservation of imprints of magma flow through the development of the specific rock fabrics. The insights to these flow related fabrics are usually acquired by using well-developed easy-to-use magnetic anisotropy (AMS) measurements. However, there is a manifold in the relation of magnetic ellipsoid axes to the magma flow direction, which provokes the difficulties in the interpretation of AMS measurements.

Recently it has been shown that neutron tomography is an effective method to study internal structure of different igneous and metamorphic rocks as well as cement materials. In case of rock material high penetration ability of neutrons as compared to X-ray allow to measure sufficiently large volumes, while high contrast between hydrous and anhydrous minerals in neutron images provide the necessary conditions for phase segmentation. This is of particularly importance since igneous dikes are relatively dense rocks in a ground mass composed of amphiboles, while the spheroidal inclusions that may form a specific texture are presented by rather transparent for neutrons quartz, feldspars, calcite, etc.

In our work, we examined the internal structure of two samples of lamprophyre dikes from Koitash granitoid intrusion (Uzbekistan) by means of neutron tomography, diffraction and Raman spectroscopy. These dikes show the presence of spheroidal inclusions (vesicles and xenocrysts), which presumably form a texture related to the magma movement. The mineralogical composition of this inclusions is presented mostly by quartz, feldspar and minor calcite as confirmed by neutron diffraction and Raman spectroscopy. From neutron tomography measurements 3D virtual models of dike samples were obtained, showing the distribution of highly attenuative for neutrons dike body and relatively transparent anhydrous inclusions. We present an approach to analyze the 3D neutron data, that is based on 3D scanning method and inertia moment calculations, allowing for successful segmentation of dike body, determination of magma flow direction and preferred orientation of spheroidal inclusions. We have shown that the angle between minimum inertia axis of inclusions and normal to the plane of dike walls with a 95% confidence lie within $70^\circ \pm 15^\circ$ range. Therefore, xenocrysts tend to align their largest axes perpendicular to the dike walls and hence to the magma flow direction, what is in accordance with Jeffery's model of motion of ellipsoidal particles immersed in a moving viscous fluid. The observed correlation of the spheroid's orientations with an orientation of plane of magma flow may provide an aid in the interpretation of petrofabric of dikes derived from AMS measurements.

СТРУКТУРЫ НАНОАЛМАЗОВ С ФОТОАКТИВНЫМИ МОДИФИКАТОРАМИ

В. Т. Лебедев^{1*}, Ю. В. Кульвелис¹, Э. В. Фомин¹, О. И. Большакова¹, Н. П. Евлампиева²,
Е. Б. Юдина³, А. Я. Вуль³

¹Петербургский институт ядерной физики им. Б.П.Константинова, НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина, Ленинградская обл., Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Иоффе Институт, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: Lebedev_vt@pnpi.nrcki.ru

Представлен обзор нейтронных и физико-химических исследований в области био-медицинских наноматериалов в сотрудничестве НИЦ КИ – ПИЯФ, СПбГУ, Иоффе Института в направлениях получения водных дисперсий комплексов детонационных наноалмазов (ДНА) [1,2] с европием и фотосенсибилизатором Радахлорином® (РХ), стабилизированных поливинилпирролидоном (ПВП), водорастворимых производных эндофуллеренов с атомами Eu.

Детонационные наноалмазы ДНА Z⁻ с отрицательным потенциалом легировали с поверхности ионами Eu³⁺. Модифицированные алмазы демонстрировали высокую степень упорядочения в водных средах по данным рассеяния нейтронов.

На основе алмазов с положительным зарядом (ДНА Z⁺) синтезированы комплексы с молекулами дифталоцианина Eu (ДФЦ Eu), организованные в водной среде в разветвленные структуры из частиц наноалмаза, связанных через молекулы ДФЦ. При облучении рентгеновскими квантами частицы ДНА-(ДФЦ Eu) люминесцировали на длинах волн ~600 и 700 нм, характерных для ионов Eu³⁺. Данные структуры эффективно конвертировали рентгеновское излучение в оптический диапазон.

Синтезированные двойные и тройные комплексы РХ, ПВП и ДНА были изучены методами оптической спектроскопии, измерений люминесценции, динамического рассеяния света, вискозиметрии. Показано, что при связывании РХ с ПВП в водной среде выход синглетного кислорода при УФ облучении растворов повышается, а комплексы ДНА-ПВП-РХ вызывают генерацию синглетного кислорода не только за счёт РХ, но и через УФ возбуждение алмазов, передающих энергию окружению без излучения, что усиливает фотодинамический эффект.

Для различных комплексов и их компонент выполнены биологические МТТ-тесты на токсичность на клеточных культурах (нормальные и опухолевые клетки). Показано, что в основном полученные наноструктуры не токсичны в пределах концентрации 1 мкг/мл, что позволит внедрить эти материалы в разработки биомедицинских препаратов для Рентгеновской Фотодинамической Терапии.

Работа поддержана РФФИ (грант № 18-29-19008).

1. V. T. Lebedev, Yu. V. Kulvelis, A. I. Kuklin, A. Ya. Vul, *Condens. Matter.* **1**(10), 1 (2016).

2. Yu.V. Kulvelis, A.V. Shvidchenko, A.E. Aleksenskii, et al., *Diamond & Related Materials* **87**, 78 (2018).

MAGNETIC AND STRUCTURAL PROPERTIES OF TUNGSTEN OXIDES AT HIGH PRESSURES

O. N. Lis^{1,2*}, *S. E. Kichanov*¹, *D. P. Kozlenko*¹, *N. M. Belozero*¹, *E. V. Lukin*¹, *B. N. Savenko*¹,
*S. Balakumar*³

¹Frank Laboratory of Neutron Physics JINR, Dubna, Russia

²Kazan Federal University, Kazan, Russia

³University of Madras, Chennai, India

*E-mail: lisa_9477@mail.ru

Ferroelectric and multiferroic oxides with perovskite-like structures are the subject of intensive research owing to their technological importance and to the interplay between competing structural instabilities that can give rise to complex phase transitions.

Bi_2WO_6 (BWO) has been intensively studied for its various potential industrial applications. The Raman spectroscopy measurements at high pressure revealed that BWO experiences two possible second order structural transformations. However, the pressure effect on the crystal structure parameters of BWO are scarce. It should note, the high-pressure studies of the ferroelectric phase evolution, especially in the vicinity of para-ferroelectric phase transition are essential in order to reveal its formation mechanisms upon variation of interatomic distances. Lead iron tungstate $\text{Pb}(\text{Fe}_{2/3}\text{W}_{1/3})\text{O}_3$ (PFW) is one of the well-known relaxor compounds belonging to the family of lead-based complex perovskites which may be considered as the prototype compound for fundamental scientific understanding of the magnetoelectric interactions. PFW is ferroelectric and antiferromagnetic showing a perovskite-type structure (with $Pm\bar{3}m$ group), in which the two kinds of cations (Fe^{3+} and W^{6+}) are randomly distributed at the octahedral B-site positions. Despite intensive studies, understanding the exact nature of its multifunctional properties of PFW has remained a challenge for decades. Also, the detail studies of structural changes under extreme conditions were not carried out.

In present work was performed neutron diffraction studies of the compounds of BWO and PFW at high pressures. Neutron powder diffraction measurements at ambient and high pressures up to 7 GPa were performed at room temperatures with the DN-12 diffractometer at the IBR-2 high-flux pulsed reactor [FLNP, JINR, Dubna, Russia] using the sapphire anvil high-pressure cell. In order to improve the understanding of the lattice instabilities the Raman spectroscopy studies of the vibration spectra of the compounds under pressure up to 30 GPa were performed. A rich structural polymorphism in BWO was revealed. At $P \approx 3.5$ GPa a phase transition from the initial orthorhombic phase of $Pca2_1$ symmetry to the orthorhombic phase of $B2cb$ symmetry has been observed. This transition is caused by the complex spatial rotation of the WO_6 octahedra. The subsequent isostructural phase transition to another orthorhombic phase of $B2cb$ symmetry has been detected at $P \approx 5.9$ GPa. This transition is accompanied by the changes in both the mutual rotation and tilting of the oxygen octahedra with respect to the crystal b -axis. Two more pressure-induced phase transitions in the BWO at high pressures of 11.5 and 20 GPa were observed in Raman spectra. The pressure-driven phase transitions in the bismuth tungstate are accompanied by anomalies in the pressure dependences of the unit cell parameters, bond lengths, and angles, as well as the vibrational modes. Also, the magnetic structure of PFW have been investigated. Pressure dependences of the volume, unit cell parameters and of magnetic moments of antiferromagnetic (AFM) phase have been obtained.

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant RFBR N19-52-45009 IND_a.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИРИДИЯ С W_2B И TaB_2 С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ВРЕМЯПРОЛЁТНОЙ НЕЙТРОНОГРАФИИ

В. В. Лозанов^{1}, Н. И. Бакланова¹, А. И. Бескровный²*

¹Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

²Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*E-mail: lozanov.25@gmail.com

Поиск новых твёрдых и сверхтвёрдых соединений является актуальной задачей для современного материаловедения. Недавно было обнаружено, что бориды тантала [1], вольфрама [2] и иридия [3] относятся к классу сверхтвёрдых ($H \geq 40$ ГПа) соединений. В частности, было показано, что борид иридия состава $IrB_{1.1}$ имеет твёрдость 43 ГПа [3]. В настоящее время интенсивно исследуются тройные системы $W - X - B$ ($X = Ir, Rh, Os, Ta$) с целью обнаружения новых сверхтвёрдых соединений [4,5]. Формирование тройных систем возможно двумя способами. Первый способ заключается в сплавлении элементов в дуговой печи. Другой способ, основанный на взаимодействии иридия с боридом тантала или вольфрама, малоизучен. Значительным препятствием для изучения таких систем являются высокие коэффициенты поглощения рентгеновского излучения у тяжёлых атомов по сравнению с бором. Вследствие этого существует проблема получения корректного фазового состава продуктов реакции и интерпретации полученных результатов. Решить существующую проблему может применение метода дифракции нейтронов, так как проникающая способность нейтронов высока, что позволило бы более корректно оценить соотношение образующихся фаз. Таким образом, целью настоящей работы является изучение продуктов взаимодействия иридия с W_2B и TaB_2 комплексными методами с привлечением метода дифракции нейтронов.

С целью изучения взаимодействия в системе W_2B-Ir были приготовлены смеси из коммерчески доступных порошков W_2B (содержащий 20% W) и иридия (чистота 99.96%) в мольном соотношении 1:6 и 1:2. Для изучения взаимодействия в системе TaB_2-Ir смеси готовились из порошков TaB_2 (чистота 98%) и иридия (чистота 99.96%) в мольном соотношении 1:3 и 1:1. Смеси порошков были скомпактированы в таблетки $\varnothing = 25$ мм, помещены в пакеты из графойла и прогреты при $1600^\circ C$ в течение 4 часов. После термообработки образцы шлифовали и полировали алмазными суспензиями для выравнивания поверхности поликристаллического спёка.

Исследование морфологии продуктов реакции W_2B с иридием показало, что образцы пористые, состоят из спечённых между собой частиц порошков округлой формы размером 30 – 60 мкм. В образце с исходным соотношением $W_2B:Ir = 1:6$ наблюдаются многочисленные перешейки между частицами, образование агрегатов размером до 100 – 150 мкм, а также кристаллиты вытянутой и пластинчатой формы. По данным РФА, фазовый состав продуктов реакции после термообработки смеси с мольным соотношением 1:2 представлен фазами интерметаллического твёрдого раствора W_xIr_{1-x} и WB, а с соотношением 1:6 – представлен главным образом твёрдым раствором W_xIr_{1-x} .

Следует отметить, что по данным РФА определить степень упорядочения твёрдого раствора W_xIr_{1-x} (т.е. определить, имеет ли твёрдый раствор W_xIr_{1-x} разупорядоченную структуру типа Mg или формирует упорядоченные структуры типа WIr или WIr_3) является исключительно сложной задачей, так как малоинтенсивные рефлексы, характеризующие упорядоченное состояние, не проявляются на дифрактограмме. Задача по

разделению структур неупорядоченного твёрдого раствора W_xIr_{1-x} и упорядоченных состояний WIr и WIr_3 была решена с применением метода времяпролётной нейтронографии на дифрактометре ДН-2 (ОИЯИ, Дубна) [6,7]. Анализ нейтронограмм показал, что в составе продуктов после термообработки смеси с соотношением $W_2B:Ir = 1:2$ присутствуют фазы WIr (53%), разупорядоченный твёрдый раствор W_xIr_{1-x} (13%), упорядоченная фаза WIr_3 (10%) и WB (24%). В то же время в смеси с исходным соотношением 1:6 присутствуют фазы WIr_3 (50%) и W_xIr_{1-x} (45%), а также незначительное количество борида иридия Ir_5B_4 – фазы, более известной как $IrB_{1.1}$.

Исследование морфологии продуктов реакции TaB_2 с иридием в исходном соотношении 1:1 показало, что образцы представляют собой плотно спечённый конгломерат, состоящий из областей разного контраста размером до 150 мкм. Также встречались кристаллиты в виде шестиугольных призм размером до 30 мкм, вплавленные в конгломерат. Морфология образца после термообработки смеси состава $TaB_2:Ir = 1:3$ в целом схожа с образцом 1:1, но более однородна по контрасту. Выходы граней кристаллов на поверхности конгломерата наблюдались редко. Изучение фазового состава продуктов, формирующихся в процессе реакции иридия с TaB_2 осложнено наличием значительного количества неизвестной ранее тройной фазы. Состав фазы определён на основе статистического анализа данных, полученных методом энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) на микроскопе SU8220 (Hitachi, Япония) оснащённом детекторами QUAD и Quantax 60 (Bruker, Германия) с использованием ускоряющего напряжения 6 кВ, и составляет $TaIr_{1.92 \pm 0.03}B_{1.5 \pm 0.1}$. По данным РФА и нейтронографии было обнаружено, что кроме новой тройной фазы в составе продуктов смесей с исходным соотношением $TaB_2:Ir = 1:3$ и 1:1 присутствуют фазы TaB_2 , $TaIr_3$ и $IrB_{1.1}$. Однако, при переходе от соотношения 1:1 к соотношению 1:3 относительное содержание $TaIr_3$ увеличивается, TaB_2 резко уменьшается, а концентрация $IrB_{1.1}$ остаётся на прежнем уровне (20% масс.).

Таким образом с применением метода нейтронографии были получены достоверные данные о реакции иридия с W_2B и TaB_2 . Высокая проникающая способность нейтронов позволила более корректно оценить соотношение образующихся фаз, различить упорядоченное и разупорядоченное состояние интерметаллидов, и, соответственно, сделать корректные выводы о ходе процесса. Следует обратить внимание на то, что полученный по данным нейтронограмм фазовый состав продуктов близок к теоретически рассчитанному. В то же время, согласно данным РФА, содержание фаз существенно отличается вследствие того, что рентгеновское излучение не просвечивает крупные частицы порошка, что в конечном итоге может приводить к неверным выводам о процессах, происходящих в системе. В ходе работы показана необходимость применения метода времяпролётной нейтронографии для изучения фазообразования в тройных системах $W - Ir - B$ и $Ta - Ir - B$.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ (№ 18-19-00075).

1. V. Šroba et al. J. Vac. Sci. Technol. A. **38**, 033408 (2020).
2. A.G. Kvashnin et al. J. Phys. Chem. Lett. **9**, 3470 (2018).
3. A. Latini et al. ACS Appl. Mater. Interfaces. **2**, 581 (2010).
4. I. Zeiringer et al. J. Phase Equilib. Diffus. **35**, 384 (2014).
5. G. Akopov et al. J. Am. Chem. Soc. **139**, 17120 (2017).
6. A.M. Balagurov et al. J. Surf. Invest: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. **10**, 467 (2016).
7. <http://flnph.jinr.ru/en/facilities/ibr-2/instruments/dn-2>

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ И МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ СЛОЖНЫХ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ

Н. М. Белозерова, С. Е. Кичанов, Д. П. Козленко, Е. В. Лукин, Б. Н. Савенко*

Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия

* E-mail: nmbelozeroval@jinr.ru

Изучение ферритов со структурой шпинели имеет большое значение в связи с большим разнообразием их структурных и магнитных свойств, интересных с точки зрения фундаментальных и прикладных исследований [1]. В частности, в этих соединениях могут реализовываться скошенные состояния антиферромагнетика, ферримагнетика, спинового стекла [2].

Значительная намагниченность насыщения, относительно высокое электрическое сопротивление, низкие электрические потери и хорошая химическая стабильность делают ферриты шпинельного типа важными для широкого спектра технологических применений в качестве сердечников трансформаторов, радиочастотных цепей, стержневых антенн, устройств хранения данных [3,4]. Более того, такие ферриты могут быть полезны в биомедицине: как эффективный нагревательный агент для лечения раковых тканей посредством магнитной гипертермии, как биомаркеры для МРТ-диагностики и в магнитных системах доставки лекарств [4]. Широкий спектр магнитных свойств ферритов шпинели определяется особенностями распределения ионов железа между различными кристаллографическими позициями в кристаллических структурах шпинельного типа [3]. Одной из важных частей перспективных исследований ферритов типа шпинели Zn–Cu является синтез сложных ферритов с контролируемым перераспределением ионов железа между позициями A и B, приводящим к изменению магнитных свойств ферритов [4]. Понимание взаимосвязи между структурными свойствами и магнитным порядком ферритной шпинели может быть дано исследованиями модификаций магнитной структуры при изменении структурных параметров под действием давления.

В настоящей работе ферриты со структурой шпинели $Zn_{0.34}Fe_{2.53}O_4$ и $Zn_{0.3}Cu_{0.7}Fe_{1.5}Ga_{0.5}O_4$ были выбраны как модельные образцы для проведения нейтронографических исследований при высоком давлении и в широком диапазоне температур. Измерения дифракции нейтронов на порошке при температуре окружающей среды и высоких давлениях до 4.7 ГПа проводились на дифрактометре ДН-6 импульсного высокопоточного реактора ИБР-2 [ЛНФ, ОИЯИ] с использованием ячейки высокого давления с сапфировыми наковальнями.

Поведение магнитных моментов ионов железа в кристаллографических позициях A и B при изменении температуры и давления были изучены. Рассчитаны параметры решетки, длины и углы межатомных связей, магнитные моменты железа как функции температуры и давления. Обсуждаются структурные механизмы магнитного перехода в ферритах со структурой шпинели.

Работа поддержана грантом РФФИ № 20-02-00550-а.

1. R. Valenzuela, Physics Research International **2012**, (2012).
2. S. S. Ata-Allah, M. Yehia, Physica B **404**, 2382 (2009).
3. H. El. Moussaoui, et al., Journal of superconductivity and novel magnetism **25**(7), 2473 (2012).
4. M. Veverka, Z. Jiráček, O. Kaman, et al., Nanotechnology **22**(34), 345701 (2011).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛУЧЕННОГО ДИСПЕРСНОГО U-9%Mo/Al
ТОПЛИВА МЕТОДОМ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ**

О. А. Голосов^{1*}, С. Г. Богданов², А. Н. Пирогов², Н. В. Глушкова¹, М. С. Лютикова¹,
А. Е. Теплых²

¹Институт реакторных материалов, Заречный, Россия

²Институт физики металлов имени М. Н. Михеева, Екатеринбург, Россия

*E-mail: golosov_oa@irmatom.ru

Большинство эксплуатируемых в мире исследовательских реакторов переведено на топливо низкого обогащения, в том числе с использованием дисперсного уран-молибденового топлива в алюминиевой матрице (U-Mo)/Al. Одним из факторов, определяющих работоспособность твэлов с таким топливом, является стабильное поведение его компонентов в течение всего времени работы в реакторе.

Реакторными испытаниями и последующими исследованиями установлено, что при облучении твэлов с (U-Mo)/Al топливом изменяется структура топлива и алюминиевой матрицы. Вокруг частиц топлива образуются новые фазы типа (U,Mo)Al, представляющие собой слой взаимодействия между топливом (U-Mo) и окружающей алюминиевой матрицей и имеющие меньшую теплопроводность по сравнению с алюминиевой матрицей. С увеличением выгорания в топливе отмечено образование пузырьков газообразных продуктов деления с формированием макропор, а также газовых пор в слое взаимодействия и на его границах с алюминиевой матрицей. Все эти явления при достижении определенного уровня выгорания начинают негативно сказываться на поведении дисперсного (U-Mo)/Al топлива в реакторных условиях, приводя к повышению температуры топлива и преждевременному переходу твэлов из области стабильности в область ускоренного распухания твэлов при увеличении параметров облучения.

Исследованию влияния параметров облучения на изменение структуры дисперсного (U-Mo)/Al топлива уделяется достаточного много внимания. Однако эти исследования проводятся с использованием традиционных методов оптической металлографии, растровой электронной микроскопии, микронзондового рентгеноспектрального анализа и дифракции нейтронов. Все эти методы позволяют исследовать несовершенства топлива размером не менее десятых долей микрометра. Однако формирование таких несовершенств структуры (будь то газовые поры или зародыши новой фазы) происходит через стадию образования более мелких по размеру несовершенств.

В работе использован метод малоуглового рассеяния нейтронов для исследования влияния выгорания от 33 до 97 % и изохронного отжига в течение 1 часа в диапазоне температур от 150 до 580 °C на изменение субструктурных характеристик облученного дисперсного (U-Mo)/Al топлива.

Установлено, что структура облученного (U-Mo)/Al топлива характеризуется наличием частиц UAl_3 и неоднородностей типа зон Гинье-Престона, являющихся предшественниками образования газовых пор в алюминиевой матрице.

Показано, что содержание и размер частиц UAl_3 возрастают с выгоранием. При температурах отжига до ~300 °C содержание и размер частиц UAl_3 практически не меняется, а при температурах отжига выше 350 °C имеет место увеличение содержания частиц UAl_3 с перераспределением их размеров.

Выявлено, что зоны Гинье-Престона являются устойчивыми образованиями вплоть до ~500 °C, начиная с которой они разрушаются с образованием газовых пор.

СТРУКТУРА ГИДРАТИРОВАННОГО ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА

А. М. Гурьянов^{1*}, С. А. Гурьянов²

¹Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

*E-mail: gurjanovam@mail.ru

На прочность, долговечность, водостойкость, морозостойкость, коррозионную стойкость, и другие свойства цементного камня влияют распределение по форме и размерам наночастиц силикат-гидрата кальция (C-S-H), соотношение свободной и связанной воды, наличие пор и распределение их по форме и размерам, то есть структурные параметры материала на микро- и наноуровне. В данной работе с помощью метода малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) проведено исследование формирования структуры на наноуровне образцов гидратированного портландцемента, модифицированного нанодобавками как искусственного (нанопорошки альфа оксида алюминия $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, гамма оксида алюминия $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$), так и техногенного происхождения (карбонатный и алюмошелочной шламы), определены структурные параметры портландцементных композиций. Рассмотрено также влияние на структурные параметры поверхностно-активных веществ (ПАВ). Показано, что сочетание нанодобавок, имеющих различную направленность действия, можно управлять процессом формирования структуры (структурными параметрами) портландцементных композиций в процессе гидратации [1,2].

Спектры интенсивностей МУРН от образцов гидратированного портландцемента были измерены в Петербургском институте ядерной физики (г. Гатчина) с помощью дифрактометра «Мембрана-2», установленного на ядерном реакторе ВВР-М. Длина волны нейтронов была равной $\lambda = 0.3$ нм при ширине линии $\Delta\lambda/\lambda = 0.25$. Диапазон регистрируемых упругих переданных нейтронных импульсов q находился в пределах от 0.03 нм^{-1} до 0.8 нм^{-1} . Рассеянные образцами нейтроны регистрировались в интервале углов $\theta = \pm 0.017$ рад. Интенсивность пучка на образце измерялась с помощью двух счетчиков (мониторов), установленных перед образцом выше и ниже оси пучка нейтронов.

Для всех образцов наблюдалась степенная зависимость интенсивности рассеяния от переданного нейтронного импульса q . При выполнении условия $qR > 1$ (режим Порода) для интенсивностей малоуглового рассеяния имеет место степенная зависимость от переданного нейтронного импульса. Отклонение показателя степени n от асимптотики Порода ($n = 4$) указывает на фрактальные свойства рассеивающих объектов и позволяет определить их фрактальную размерность. В случае объемных или массовых фракталов показатель степени совпадает с фрактальной размерностью $n = D_V$ и принимает значение из интервала $1 < D_V < 3$. В случае рассеяния объектами, имеющими фрактальную поверхность, фрактальная размерность $D_S = 6 - n$ и принимает значение из интервала $2 < D_S < 3$. Соответственно показатель степени находится в интервале $3 < n < 4$. Таким образом, по наклону прямолинейных участков зависимостей МУРН, построенных в двойном логарифмическом масштабе, можно определить принадлежность рассеивающих объектов к определенному типу фрактала (объемному или поверхностному) и величину фрактальной размерности.

В Таблице 1 приведен состав и структурные параметры (значения фрактальная размерность D_s , средний размер R_c наночастиц С–S–Н) образцов исследованных образцов гидратированного портландцемента на седьмые, четырнадцатые и двадцать восьмые сутки после начала затворения (гидратации) портландцемента.

Таблица 1. Структурные параметры образцов гидратированного портландцемента.

Образец	Добавка (шлам)/ [%]	ПАВ, [%]	D_s , 7 суток	D_s , 14 суток	D_s , 28 суток	R_c , нм
1	—	—	2.35	2.39	2.49	65
2	Карбонатный / 5.0	—	2.40	2.52	2.55	60
3	Карбонатный / 5.0	0.2	2.41	2.55	2.58	45
4	Алюмощелочной / 4.5	—	2.50	2.62	2.76	42
5	Алюмощелочной / 4.5	0.2	2.58	2.71	2.85	40
6	Карбонатный / 3.0 + Алюмощелочной / 3.0	—	2.48	2.56	2.62	52
7	Карбонатный / 3.0 + Алюмощелочной / 3.0	0.2	2.52	2.58	2.68	43
8	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ / 5.0	—	2.50	2.58	2.60	48
9	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ / 5.0	0.2	2.54	2.62	2.68	44
10	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ / 5.0	—	2.35	2.36	2.48	52
11	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ / 5.0	0.2	2.40	2.41	2.52	50

Из Таблицы 1 видно, что нанодобавки изменяют структурные параметры образцов на наноуровне. Все нанодобавки в рассматриваемом диапазоне расстояний до 80 нм уменьшают средние размеры рассеивающих объектов. В указанном диапазоне расстояний рассеяние нейтронов происходит на фрактальных поверхностях. Возрастание фрактальной размерности в процессе гидратации указывает на повышение прочности контактной зоны формирующихся в процессе гидратации портландцемента частиц силикат-гидрата кальция. Влияние на структурные параметры рассмотренных нанодобавок связано не только с наноразмерностью их частиц. Важным фактором является направленность воздействия их на процесс гидратации. Карбонатные шламы, напорозы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ имеют небольшую химическую активность. Их, скорее всего, можно отнести к наполняющим нанодобавкам. С другой стороны, алюмощелочные шламы, а также комплексные нанодобавки, содержащие ПАВ, или являющиеся двухкомпонентными (смесь карбонатного и алюмощелочного шламов) можно отнести к модифицирующим нанодобавкам. Они оказывают большее влияние на структурные параметры. Направленное изменение структурных параметров цементных композиций введением поверхностно-активных веществ обусловлено адсорбционным механизмом модифицирования дисперсионных систем.

1. A.M. Guryanov, Proc. Engin. **111**, 283 (2015).
2. A.M. Guryanov, Proc. Engin. **153**, 217 (2016).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ — ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ КАЗАХСТАНА — С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ НЕЙТРОННОГО РАССЕЯНИЯ

А. Ж. Жомартова^{1,2}, С. Е. Кичанов¹, Б. А. Бакиров¹, Д. П. Козленко¹, Р. С. Жуматаев³*

¹Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

³Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

*E-mail: zhomartova@jinr.ru

Всесторонние исследования объектов культурного наследия, уносящие нас вглубь веков и позволяющие проследить становление и развитие цивилизаций и этносов, являются одной из важнейших задач археологии и других гуманитарных наук. Особая ценность и уникальность таких объектов требует применения современных методов неразрушающего контроля для их исследований. Современные методы неразрушающих исследований позволяют получить уникальную научную информацию об элементарном, химическом и фазовом составе исследуемого объекта, восстановить пространственное распределение компонентов, визуализировать скрытые элементы декора или крепежа. Следует особо отметить такие методы структурной неразрушающей диагностики, как нейтронная дифракция и томография. Природа взаимодействия нейтронов с веществом определяет высокую проникающую способность этих методов и чувствительность к водородсодержащим фазам или компонентам исследуемого объекта.

Территория Восточного Казахстана, в том числе Тарбагатай, с древних времен была важным этнокультурным центром различных племен и народов. Появление керамики и все изменения в ней определяются экономическими предпосылками, культурным развитием древних общин, уровнем развития технической базы гончарного ремесла. В докладе представлены результаты исследований нескольких фрагментов керамических объектов, найденных в древних городах современного Казахстана: несколько керамических образцов из раскопок средневекового городища Жайпак, расположенного в Алакулском районе, и коллекции керамики из древних курганов Елеке Сазы раннежелезного века и курганов Айнабулак и Сабырбай бронзового века.

Для определения минерального фазового состава исследуемой керамики применялся метод нейтронной дифракции с использованием нейтронного дифрактометра ДН-6 импульсного реактора ИБР-2 (ОИЯИ, г. Дубна, Россия). Особенности и пространственное распределение фаз исследовались методом нейтронной радиографии и томографии на специализированной экспериментальной станции НРТ на 14-ом канале импульсного высокопоточного реактора ИБР-2. Полученные данные о минеральном составе исследуемых керамических материалов указывают на производство посуды, в основном, из глины с естественной примесью полевых шпатов, кварца и слюды. Кроме того, были обнаружены дифракционные пики, связанные с присутствием фаз графита, анатаза и кальцита. В некоторых фрагментах зафиксированы включения органических примесей, предположительно растительность, навоз или птичий помет. Данные по нейтронной томографии позволили выдвинуть предположение о временах обжига исследуемой керамики, о равномерности термической обработки глиняной посуды. Нейтронная томография показала, что внешний слой керамики подвергается более высоким температурам, в то время как фрагмент из кургана Айнабулак имеет множество пор и трещин разного размера, а высокий коэффициент ослабления свидетельствует о наличии водородсодержащих групп и, соответственно, низкой температуре обжига.

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать предположение о рецептах формовочных масс для древних гончарных ремесел разных эпох древнего Казахстана, выявить уровень развития этого промысла в конкретный хронологический период.

СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ГОРНЫХ ПОРОД ИЗ МЕСТ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ: МЕТОДЫ НЕЙТРОННОГО РАССЕЯНИЯ

М. Р. Кенесарин^{1,2}, И. Ю. Зель¹, С. Е. Кичанов¹, М. Балашою^{1,3}, Д. П. Козленко¹,
К. М. Назаров^{1,4}, М. Nicu³, L. Ionascu³, A. C. Dragolici³, F. Dragolici³*

¹Лаборатория нейтронной физики имени Франка, ОИЯИ, Дубна, Россия

²Университет «Дубна», Дубна, Россия

³«Horia Hulubei» National Institute of Physics and Engineering, Bucharest-Magurele, Romania

⁴Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

*E-mail: muratkenessarin@jinr.ru

В настоящее время одним из перспективных проектов для захоронения радиоактивных отходов является глубокорасположенное хранилище в толще горы. Подобные хранилища размещаются в сейсмоустойчивых местах, где отсутствуют вулканическая активность или рудообразование. Для таких хранилищ единственным возможным путем загрязнения биосферы является перенос радионуклидов подземными водами, поэтому к горным породам, окружающим место захоронения, предъявляются достаточно жесткие критерии по механическим и физико-химическим свойствам, требования конструкционной стабильности до сотен лет. В своей работе мы делаем упор на развитие экспериментальных подходов к исследованиям кернов и образцов породы для выявления особенностей неоднородной внутри горных пород, выявление их петрофизических и морфологических параметров, расчетов механических свойств. Все эти параметры влияют на прочность и долговечность горных пород, выявляют возможные пути проникновения радионуклидов из хранилища во внешнюю среду.

В своих исследованиях мы использовали методы неразрушающей нейтронной диагностики: нейтронной радиографии и томографии, нейтронной дифракции, Раманский спектроскопий. В докладе представлены результаты исследования структурных особенностей горных пород из места захоронения радиоактивных отходов Баита Бихор (Băița Bihor), Румыния. В этом хранилище хранятся низко активные отходы средне активные отходы Евросоюза. Методы нейтронной структурной диагностики позволили получить фазовый состав этих горных пород, пространственное распределение этих фаз, провести соответствующие петрофизические расчеты на основе полученных нейтронных данных.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ НАНОПОРОШКОВ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и Fe_3O_4 , СИНТЕЗИРОВАННЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ

Т. В. Хамова¹, Г. П. Копица^{1,2*}, Н. В. Цвигун³, К. В. Фролов³, О. В. Геращенко²,
А. Е. Баранчиков⁴, О. А. Шилова¹

¹Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт»,
Гатчина, Россия

³ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

⁴Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия

* E-mail: kopitsa_gp@pnpi.nrcki.ru

Магнитные наночастицы оксидов железа привлекают непрестанный интерес исследователей, благодаря широкому спектру применений в различных областях, таких как магнитно-резонансная томография, запоминающие устройства, сенсоры, спинтроника, магнитная адресная доставка лекарств, биомедицина, очистка окружающей среды. В последнее время наночастицы оксидов железа стали представлять особый интерес для растениеводства, поскольку оказывают положительное влияние на рост, развитие и продуктивность сельскохозяйственных растений.

Для получения нанопорошков оксидов железа используют различные способы синтеза: химическое осаждение, механохимический метод, эмульсионный метод, гидротермальный метод, микродуговой плазменный метод, а также золь-гель метод. Каждый из перечисленных методов имеет свои достоинства и недостатки. К достоинствам золь-гель метода относятся простота и дешевизна технологического процесса, высокая химическая однородность получаемых материалов, низкая температуры их синтеза, возможность контролируемого управления свойствами материалов.

В настоящей работе комплексом методов: РФА, СЭМ, низкотемпературной адсорбции азота, индукционным методом измерения намагниченности мессбауэровской спектроскопии и МУРПН было проведено исследование структурных и магнитных свойств нанопорошков оксидов железа (магнетита и маггемита), полученных методом золь-гель синтеза из растворов этиленгликоля ($\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$) и нитрата железа ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) с последующей термообработкой в течение 2 часов при 300 °С в вакууме (Fe_3O_4) или на воздухе ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$).

Из анализа экспериментальных сечений $d\Sigma(q)/d\Omega$ малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов получен вид магнитного коррелятора и магнитно-ядерного кросс-коррелятора, определены характерные радиусы магнитных R_m и магнитно-ядерных корреляций R_{mn} . Проведено сравнение данных МУРПН с результатами, полученными методами: РФА, СЭМ, низкотемпературной адсорбции азота, мессбауэровской спектроскопии и индукционного измерения намагниченности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-13-00442).

ВЛИЯНИЕ ПОЛЯ РАССЕЙЯНИЯ НАНОЧАСТИЦ НА МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ СИНТЕТИЧЕСКОГО ФЕРРИМАГНЕТИКА CoFeV/Ta/CoFeV

Е. И. Куницына*, Р. С. Аллаяров, О. В. Коплак, Р. Б. Моргунов

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

* E-mail: kunya_kat@mail.ru

Биосенсоры на основе эффекта гигантского магнитосопротивления (ГМС) перспективны для чувствительной, недорогой и портативной биомолекулярной идентификации. Магниторезистивные датчики основаны на перемагничивании тонких ферромагнитных слоев, из которых состоит устройство. Перемагничивание происходит под действием магнитного поля, создаваемого наночастицами. Высокая чувствительность датчиков ГМС к рассеивающим магнитным полям частиц делает возможным локальное изменение сопротивления из-за эффекта ГМС. Наше исследование направлено на анализ магнитных откликов тонкопленочных ГМС-структур на осаждение наночастиц Fe/Fe₃O₄ на их поверхность и изучение влияния дипольного магнитного поля наночастиц на перемагничивание этих структур.

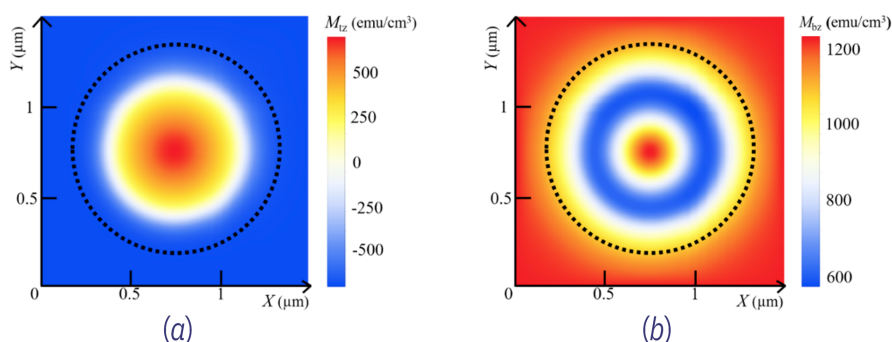


Рис. 1. Распределение проекций намагниченности верхнего M_{zz} (a) и нижнего M_{bz} (b) слоев платформы CoFeV/Ta/CoFeV под наночастицей радиусом 560 нм во внешнем поле 90 Ое под углом $\theta = 0^\circ$. Геометрическая граница наночастицы показана пунктирной линией.

Обнаружены области перемагничивания в спиновых клапанах CoFeV/Ta/CoFeV и сверхтонкой пленке CoFeV под действием дипольного диполя наночастиц Fe/Fe₃O₄, нанесенных на поверхность этих структур. Установлено изменение угловой зависимости производной микроволнового поглощения в CoFeV/Ta/CoFeV под действием поля рассеяния наночастиц. Слои CoFeV имеют область переключения намагниченности, индуцированную дипольным полем, создаваемым наночастицами. Микромагнитное моделирование демонстрирует изменение распределения намагниченности и сопротивления в локальных областях структур CoFeV/Ta/CoFeV под наночастицами (Рис. 1). Эффективная интегральная магнитная анизотропия системы платформа-частица контролируется магнитным дипольным взаимодействием системы CoFeV–Fe/Fe₃O₄. Значимость результатов заключается в новом методе обнаружения локального отклика магнитосопротивления спинового клапана на осаждение наночастиц путем бесконтактного измерения магнитосопротивления.

Работа выполнена в соответствии с программой Института проблем химической физики РАН АААА-А19-119092390079-8 и поддержана грантом Президента РФ 2644.2020.2.

ТЕРМООБРАБОТКА НА ВОЗДУХЕ И МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АМОРФНОГО МАГНИТОМЯГКОГО СПЛАВА Co–Fe–Ni–Cr–Mn–Si–B

Н. А. Скулкина^{1*}, Е. С. Некрасов¹, П. А. Кузнецов², А. К. Мазеева³

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, Россия

³Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

*E-mail: nadezhda.skulkina@urfu.ru

Термообработка (ТО) является стандартным приемом улучшения магнитных свойств быстрозакаленных магнитомягких сплавов. Вследствие сравнительно низкой температуры изотермической выдержки термообработки лент аморфных сплавов проводятся преимущественно на воздухе без видимого окисления поверхности. К основным причинам повышения уровня магнитных свойств относят релаксацию внутренних закалочных напряжений и структурные изменения в объеме ленты. Исследованию этих факторов уделяется достаточно большое внимание. Тем не менее, существует ряд дополнительных факторов, которые оказывают влияние на формирование уровня магнитных свойств при ТО на воздухе. К ним относятся взаимодействие поверхности ленты с атмосферным паром и формирование поверхностного аморфно-кристаллического слоя [1]. В результате взаимодействия поверхности ленты с паром (водой) при температурах ниже температуры Кюри индуцируются преимущественно плоские анизотропные растягивающие напряжения. Псевдоодноосные растягивающие напряжения поперек оси ленты обусловлены повышенной концентрацией внедренных в ее поверхность атомов водорода и кислорода согласно теории направленного упорядочения. Такие напряжения оказывают противоположное влияние на распределение намагниченности в ленте в состояниях с разными знаками констант магнитострикции. В настоящей работе представлены результаты исследования таких факторов на магнитные характеристики ленты аморфного сплава Co–Fe–Ni–Cr–Mn–Si–B.

Исследования проводили на образцах в форме полос размерами $100 \times 10 \times 0.020$ мм. Распределение намагниченности в ленте: относительные объемы доменов с ортогональной ($V_{орт}$) и планарной намагниченностью, ориентированной вдоль (V_{180}) и поперек (V_{90}) оси ленты определяли при помощи авторской методики [2]. Относительные погрешности определения максимальной магнитной проницаемости (μ_{max}) и распределения намагниченности не превышали 3 и 5% соответственно.

В Табл.1 и на Рис. 1 представлены результаты влияния ТО при 380°C с разной длительности изотермической выдержки (τ) и последующей обработки поверхности ленты паром (ОП) и водой (ОВ) на μ_{max} , $V_{орт}$ и остроту магнитной текстуры $\eta = V_{180}/V_{90}$.

Таблица 1. Влияние термообработок на воздухе при 380°C и обработок поверхности ленты паром (водой) на магнитные характеристики ленты

Состояние ленты	μ_{max}	$V_{орт}, \%$	η	Состояние ленты	μ_{max}	$V_{орт}, \%$	η
Закаленное (ЗК)	106000	12	2.7	ТО, $\tau = 10$ мин	410000	13.0	4.2
ТО+ОП	117000	12	4.2	ТО+ОВ	400000	14.3	10.0
ТО, $\tau = 21$ с	320000	4.2	7.2	ТО, $\tau = 40$ мин	250000	67	9.3
ТО+ОП	340000	4.6	13.3	ТО+ОВ	350000	14.5	2.9

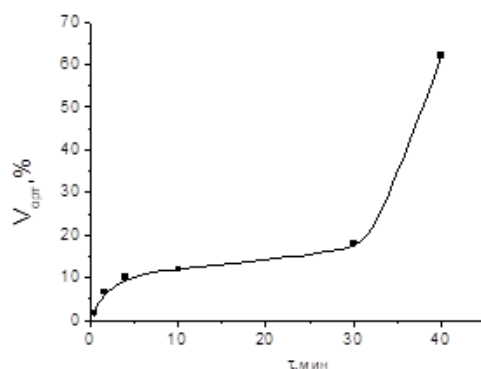


Рис. 1. Влияние длительности изотермической выдержки при $T = 380^\circ\text{C}$ на $V_{\text{орт}}$.

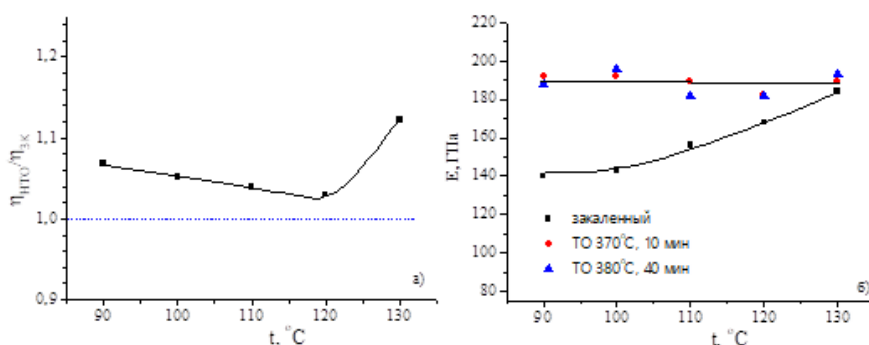


Рис. 2. Влияние низкотемпературной обработки с $t = 7$ мин на распределение намагниченности в плоскости ленты (а) и модуль Юнга (б).

Видно, что растягивающие напряжения, индуцируемые взаимодействием поверхности ленты с водой при малых t способствуют переориентации намагниченности перпендикулярно растягивающим напряжениям, увеличивая $V_{\text{орт}}$ и t что соответствует состояниям с $\lambda_s < 0$; при увеличении t до 40 мин формируется состояние с $\lambda_s > 0$ ($V_{\text{орт}}$ и t уменьшаются). На зависимости $V_{\text{орт}}(t)$ наблюдается резкое увеличение объема доменов с ортогональной намагниченностью, обусловленное преимущественным влиянием объемной компоненты растягивающих напряжений, индуцированных поверхностной кристаллизацией ленты. Термообработка при $90 - 130^\circ\text{C}$ на приводит к изменениям μ_{max} и $V_{\text{орт}}$ вследствие высокого уровня закалочных напряжений, но в плоскости ленты наблюдается увеличение η под действием анизотропных растягивающих напряжений, ориентированных поперек оси ленты, индуцированных взаимодействием ее поверхности с атмосферным паром (Рис. 2а). Некоторое уменьшение $\eta_{\text{по}}/\eta_{\text{зк}}$ при $100 - 120^\circ\text{C}$ связано с возрастанием модуля Юнга поверхностного слоя ленты в этом интервале температур, обусловленное выходом свободного объема.

1. Н.А.Скулкина, О.А. Иванов, Е.А. Степанова и др., ФММ **116**, 1242 (2015).
2. Н.А.Скулкина, О.А. Иванов, Е.А. Степанова, Известия РАН. Сер. физ. **65**, 1483 (2001).

ИССЛЕДОВАНИЕ КИАФОВ С РАСКОПОК ГРУНТОВОГО МОГИЛЬНИКА ВОЛНА-1 МЕТОДОМ НЕЙТРОННОЙ ТОМОГРАФИИ

В. С. Смирнова^{1}, С. Е. Кичанов¹, Д. П. Козленко¹, И. А. Сапрыкина^{1,2}, Р. А. Мимоход²*

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Институт археологии Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: veronicasm@jinr.ru

Всесторонние исследования объектов культурного наследия, уносящие нас вглубь веков и позволяющие проследить становление и развитие цивилизаций и этносов, являются одной из важнейших задач археологии и других гуманитарных наук. В связи с все нарастающим интересом к применению ядерно-физических методов для исследования различных археологических объектов проводится все больше междисциплинарных работ в этой области. Одним из таких методов, дающим подробную информацию о внутренней структуре исследуемых объектов, является нейтронная радиография и томография.

Так, на 14-м канале импульсного высокопоточного реактора ИБР-2, оснащенного установкой нейтронной радиографии и томографии, давно проводятся различные исследования археологических объектов [1-3]. Различие в полном сечении поглощения нейтронов для разных элементов позволяет визуализировать распределение неоднородностей состава или структуры в исследуемых объектах и материалах, получать их трехмерную модель для дальнейшего анализа.

В качестве объектов исследования были использованы бронзовые киафы, полученные из раскопок античного городского могильника Волна-1 (руководитель работ – Р. А. Мимоход). Погребения некрополя Волна-1, предположительно, были оставлены греческим и варварским населением. Самые ранние захоронения, возможно, были оставлены поселенцами, прибывшими с территории Великой Греции. Киаф – это чаша из глины или из металла с одной ручкой; использовалась как черпак для наливания вина [4].

В докладе представлены данные по пространственному распределению участков коррозии на бронзовых киафах, трехмерные данные по распределению основных компонентов в объеме объектов, выявлены геометрические особенности конструкции киафов. Полученные результаты нейтронной томографии демонстрируют возможности метода нейтронной томографии для неразрушающего контроля крупных металлических артефактов культурного наследия. Обсуждаются возможные технологические аспекты производства подобных предметов быта.

1. R.-M. Ion, C. Radulescu, S.E. Kichanov et al., Appl. Sci. **10**, 3781 (2020).
2. M. Mednikova, I. Saprykina, S. Kichanov, et al., Imaging **6**, 45 (2020).
3. S. Kichanov, I. Saprykina, D. Kozlenko et al., Imaging **4**, 25 (2018).
4. <https://rus-antiquites-dict.slovaronline.com/979%D0%9A%D0%B8%D0%B0%D1%84>

ВЛИЯНИЕ РАЗНЫХ МЕТОДОВ СУШКИ НА НАДМОЛЕКУЛЯРНУЮ СТРУКТУРУ НАТИВНОЙ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Л. А. Иванова¹, Н. В. Цвигун^{2*}, А. А. Кульминская¹, Х. Э. Ёров³, К. Б. Устинович³,
Ю. Е. Горшкова⁴, Т. В. Хамова⁵, В. В. Волков², А. Е. Баранчиков³, Р. Ю. Смыслов^{1,6},
А. К. Хрипунов⁶, Е. П. Остапенко⁶, Г. П. Копица^{1,5}

¹Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт»,
Гатчина, Россия

²ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

³Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия

⁴Лаборатория Нейтронной Физики им. И.М. Франка, Объединенный Институт Ядерных Исследований,
Дубна, Россия

⁵Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁶Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург, Россия

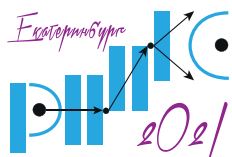
* E-mail: n_tsvigun@mail.ru

В последнее время с учетом новейших требований к материалам значительно возрос интерес к органо-неорганическим композитам, что связано с потенциальным применением подобных материалов в различных областях, включая оптоэлектронику, медицину, косметологию, текстильную промышленность и т.д. Композиты на основе целлюлозы обладают естественной способностью к биологическому разложению (биodeградации) и биосовместимостью, что делает их более привлекательными в медицине, пищевой промышленности и косметологии.

Целлюлоза является одним из наиболее распространенных природных биополимеров на Земле. Известно, что она может быть получена из разных эволюционных источников: её синтезируют растения, некоторые виды животных, например, принадлежащие подтипу Tunicata, или бактерий (например, *Gluconoacetobacter xylinum*). Причем биосинтез целлюлозы, осуществляемый различными организмами, приводит к морфологическим структурам, существенно отличающимся по надмолекулярной организации, которая, в первую очередь, и определяет физико-химические свойства полученных биополимеров.

Целлюлоза, продуцируемая бактериями, имеет сходную химическую структуру с растительной целлюлозой, однако структура БЦ отличается отсутствием таких типичных растительных компонентов, как лигнин, пектин и гемицеллюлоза, являясь более «чистым» полимером. Уникальная кристаллическая и надмолекулярная структура нативной БЦ определяет ее важные характеристики: высокую механическую прочность, гибкость и эластичность, также высокую влагоудерживающую способность, достигающую 100% ее сухого веса. Кроме того, БЦ не канцерогенна и превосходно совместима с биологическими системами. В то же время, для практического применения, в основном, используется не нативная, а подвергнутая предварительной обработке (механическая дезинтеграция, химический или ферментативный гидролиз, сушка в разных условиях) бактериальная целлюлоза.

В настоящей работе выполнено комплексное исследование влияния разных методов сушки на микро- и мезоструктуру нативной БЦ, синтезированной с использованием штамма бактерий *Gluconoacetobacter hansenii* ATCC 10821 на базе Лаборатории энзимологии (ОМРБ, НИЦ КИ – ПИЯФ). Высушенные образцы БЦ были получены с использованием: сушки на воздухе, лиофильной сушки, сушки методом замены растворителей (изопропиловый спирт – МТВЕ – гептан) при атмосферном давлении, а также,



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

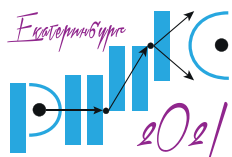
● → ● → ● → Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

методом сверхкритической сушки в CO_2 . Нативный и высушенные различными способами образцы БЦ были исследованы комплексом физико-химических методов: РФА, МУРН, УМУРН, МУРР, СЭМ, АСМ, вискозиметрии и низкотемпературной адсорбции азота.

Комплексный анализ экспериментальных данных показал, что все высушенные образцы БЦ представляют собой пористые системы со сложной иерархической организацией надмолекулярной структуры, состоящие, на первом структурном уровне, из случайно ориентированных анизодиаметричных объектов (нанолемент), обладающих развитой фрактальной поверхностью, из которых на следующем структурном уровне, путем взаимного проникновения (переплетения, запутывания), формируется трехмерная (3D) полимерная сеть. При этом установлено, что метод сушки нативной БЦ оказывает существенное влияние как на структурные параметры нанолемент (характерные размеры, фрактальная размерность поверхности), так и на организацию 3D структуры полимерной сети в целом.

Обнаружено, что сушка на воздухе при обычных условиях приводит к наиболее значительным изменениям надмолекулярной структуры нативной БЦ, а самым щадящим методом сушки является метод сверхкритической сушки в CO_2 . В то же время, результаты вискозиметрии показали, что сверхкритическая сушка в CO_2 приводит к значительному, почти на порядок, уменьшению молекулярной массы нативной БЦ.

Секция 9.
**Радиационные дефекты
в конструкционных материалах**



КОМПЛЕМЕНТАРНЫЙ АНАЛИЗ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В МАТЕРИАЛАХ

С. В. Рогожкин^{1,2*}

¹Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова
НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

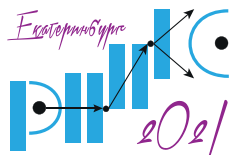
*E-mail: sergey.rogozhkin@itep.ru; SVRogozhkin@mephi.ru

Прогнозирование радиационной стойкости конструкционных материалов в радиационных полях неразрывно связано с пониманием процессов эволюции микроструктуры (формирования радиационных дефектов, предвыделений и выделений фаз, перераспределения примесей и легирующих элементов). В настоящее время накоплен значительный объем экспериментальных данных о закономерностях изменения механических свойств конструкционных материалов в условиях эксплуатации и микроскопических причинах этих явлений. Хорошо известно, что существенные макроскопические проявления, такие как набухание, охрупчивание и т.д., непосредственно связаны с процессами, протекающими на атомно-либо нано-масштабном уровне. В тоже время экспериментальное изучение процессов на таких масштабах в сталях и других многокомпонентных материалах было затруднительно. Изучение структуры материалов проводится с использованием ряда экспериментальных методик. Высокую степень разрешения обеспечивают: просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) (см., например [1, 2]), объединенная с рентгеновской спектроскопией или спектрометрией электронных энергетических потерь [3], атомно-зондовая томография (АЗТ) [4], малоугловое рассеяние нейтронов (МУРН) [5], позитронная аннигиляционная спектроскопия (ПАС) [6]. Эти методы являются взаимодополняющими, и исчерпывающую информацию дает только комплексный анализ радиационно-индуцированных эффектов [5, 6].

Универсальным методом анализа микроструктуры материалов является просвечивающая электронная микроскопия, позволяющая анализировать зёрненную структуру, фазовое состояние и различные включения. Мельчайшие включения и кластеры можно обнаружить с помощью малоуглового рассеяния нейтронов или с помощью атомно-зондовой томографии. МУРН позволяет определить с высокой точностью объемную плотность включений и нанокластеров, а также получить их распределение по размерам. Химический состав и пространственное распределение этих кластеров могут быть детально изучены с помощью атомно-зондовой томографии. АЗТ исследования показывают, что состав наноразмерных включений зачастую отличается от состава больших стехиометрических включений фаз.

В настоящей работе представлены результаты анализа наноструктуры различных реакторных сталей. Значительное внимание уделено дисперсно-упрочненным оксидами сталям, содержащим высокую плотность оксидных включений и нанокластеров, обогащенных Y, O и другими легирующими элементами.

1. S. V. Rogozhkin, A. A. Bogachev, A. A. Nikitin, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B **486**, 1 (2021).
2. S. V. Rogozhkin, A. A. Khomich, A. A. Bogachev, et al. Physics of Atomic Nuclei **83**(11), 1519 (2020).
3. M. Klimenkov, R. Lindau, A. Möslang, J. Nucl. Mater. **386–388**, 553 (2009).
4. S. V. Rogozhkin, A. A. Aleev, A. G. Zaluzhnyi, et al, J. Nucl. Mater. **409**, 94 (2011).
5. E. Meslin, M. Lambrecht, et al, J. Nucl. Mater. **406**, 73 (2010).
6. A. Kryukov, L. Debarberis, A. Ballesteros, et al, J. Nucl. Mater. **429**, 190 (2012).



ОТЛОЖЕНИЯ НА КАНАЛАХ СУЗ РБМК ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Д. Н. Вельмогин, С. А. Аверин, В. А. Цыгвинцев, В. И. Пастухов, М. В. Чернецов,
А. Р. Исинбаев

АО «ИРМ», г. Заречный, Россия

E-mail: irm@irmatom.ru

Цирконий и его сплавы широко используются в атомной энергетике. К наиболее известному его применению относятся технологические каналы и каналы системы управления и защиты (СУЗ) реактора РБМК. Циркониевые сплавы обладают достаточно высокой коррозионной стойкостью по отношению к воде и относительно малым поперечным сечением поглощения тепловых нейтронов.

Проблемой является то, что при эксплуатации циркониевые каналы подвергаются наводороживанию. На внутренней поверхности каналов СУЗ появляются крупные и мелкие локальные скопления гидридов, неравномерно распределённые по длине канала, природа образования которых до конца не выявлена. Изучение данной проблемы вызывает интерес. Причиной такого неравномерного наводороживания, могут быть образующиеся при эксплуатации на внутренней поверхности каналов СУЗ отложения, которые являются смесью различных модификаций гидроксидных фаз алюминия.

В докладе представлены результаты исследований отложений на внутренней поверхности каналов СУЗ РБМК с 2019 (канал из 2 блока КуАЭС, 3 блока КуАЭС) по 2021 (канал из 1 блока САЭС) годы.

Проводились следующие исследования: металлографические исследования, электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, а так же исследовалось содержание водорода в материале каналов.

Характер отложений на разных участках каналов различен. По виду отложения могут быть как рыхлыми, так и плотными, кристаллического и аморфного состояния, неплотно прилегающие к поверхности, легко отслаиваемые при изготовлении образцов, так и плотно прилегающие.

Электронная микроскопия показала, что в отложениях основными элементами являются Al и O, присутствуют Fe, Zr, Nb и Ca. Результаты рентгеноструктурного анализа показывают, что в основном отложениями являются смеси разных модификаций гидроксидных фаз алюминия. Фазовый состав отложений на каналах разный, количественно и качественно меняется по высоте каналов.

Распределение водорода по высоте каналов и по окружности неоднородно. В основном водород находится в форме гидридов, так же образуются скопления гидридов в виде «блистеров».

Образование скоплений гидридов на поверхности, возможно, может быть связано с характером отложений. Под плотно прилегающими отложениями скоплений гидридов не обнаружено. Для выяснения влияния отложений на кинетику наводороживания необходимо продолжать исследования каналов СУЗ.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙТРОННОЙ ДИФРАКЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ СТРУКТУРНЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В ТВЭЛАХ ИЗ СТАЛЕЙ ЧС-68 И ЭК-164

В. И. Воронин

Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: voronin@imp.uran.ru

Устный доклад

Методом нейтронной дифракции изучены микроструктуры образцов ТВЭЛ из аустенитной стали ЧС-68 и ЭК-164 после облучения быстрыми нейтронами в реакторе БН-600 в широком интервале флюенсов и температур. Было найдено, что структурное состояние оболочек ТВЭЛов после облучения зависит от начального, которое имеет различия на стадии изготовления даже в тех трубках, которые соответствуют техническим требованиям. Считается, что основными факторами, оказывающими влияние на величину механических свойств и распухания аустенитных нержавеющих сталей, являются твердорастворный фактор, определяемый концентрацией легирующих и примесных элементов; фактор фазовой нестабильности, проявляющийся в образовании мелкодисперсных выделений; дислокационный фактор. Наиболее чувствительным параметром к таким процессам является ширина рефлексов, определяемая величиной микронапряжений, анизотропия уширения которых обусловлена дислокациями. Установлены механизмы влияния многих типов радиационных дефектов (дислокационные петли, выделения, вакансионные кластеры, дислокации и пр.) на движение дислокаций и получены выражения, связывающие параметры дефектной структуры с величиной радиационного упрочнения, или с соответствующей зависимостью механических свойств. Выражение (уравнение Тейлера), связывающее напряжения пластического течения с квадратным корнем от плотности дислокаций:

$$\sigma = \sigma_0 + M\alpha Gb\sqrt{\rho},$$

где σ – напряжение, коэффициент Тейлора M равен 3, G – напряжение сдвига стали, b – длина вектора Бюргерса для системы скольжения $\langle 111 \rangle \{110\}$, ρ – плотность дислокаций, α – коэффициент, описывающий силу препятствий, которые должна преодолевать движущаяся дислокация во время пластической деформации; для металлов значение α обычно составляет 0.3.

Исследования показали, плотность дислокаций в сталях ЧС-68 и ЭК-164 преимущественно контролируется температурой облучения, по крайней мере, при высоких дозах. Максимальная плотность дислокаций, определенная из измерений дифракции нейтронов, соответствует температурному интервалу 400 – 450°C и она выше для стали ЭК-164. Эти данные плотности дислокаций согласуются с выводом [1], где показано, что механические свойства стали ЭК-164 выше, чем ЧС-68.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России по темам «Поток» (№ АААА-А18-118020190112-8) и «Нейтрон» (№ АААА-А19-119112590082-1).

1. С. В. Барсанова, А. В. Козлов, О. Б. Шило, Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы **5** (96), 4 (2018).

**ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ПОРИСТОСТИ, РАЗВИВАЮЩЕЙСЯ
В ОБОЛОЧКАХ ТВЭЛОВ РАЗЛИЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ИЗ СТАЛИ ЧС68, НА РЕСУРС ЭКСПЛУАТАЦИИ ТВС В РЕАКТОРЕ БН-600**

А. Р. Исинбаев^{1,2,*}, А. В. Козлов¹, И. А. Портных¹

¹Институт реакторных материалов, Заречный, Россия

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина,
Екатеринбург, Россия

*E-mail: isinbaev.artur@urfu.ru

При эксплуатации в реакторах на быстрых нейтронах в оболочках твэлов протекают радиационно-индуцированные процессы, вызывающие изменения структуры и свойств, которые ограничивают ресурс их эксплуатации. Одним из доминирующих факторов является радиационное распухание, вызванное образованием и ростом радиационных пор [1]. Целью работы является расчет остаточного и предельного ресурсов твэлов с оболочкой из стали ЧС68, отработавших в составе опытной тепловыделяющей сборки в активной зоне реактора БН-600 для сравнения оболочек твэлов изготовленных по различной технологии.

На образцах из аустенитной стали ЧС68 были проведены исследования по определению пористости методами электронной микроскопии. Образцы были вырезаны из разных участков оболочки твэла с различными параметрами облучения (температура и повреждающая доза). В результате исследований образцов на электронном микроскопе были получены изображения, по которым впоследствии определялись характеристики радиационной пористости, такие как: распухание, интегральная площадь поверхности пор, средний диаметр и концентрация пор. Полученные данные были использованы в качестве начальных параметров для последующего прогнозирования остаточных ресурсов твэлов по модели завершающего этапа стадии нестационарного распухания [2]. Расчеты были проведены для случая облучения с теми же параметрами температуры и скорости увеличения повреждающей дозы, что и перед извлечением твэлов из реактора. В качестве предельного значения пористости использована величина в 13%, соответствующая 15% распухания [3]. Сравнение остаточного ресурса твэлов с разными технологиями изготовления оболочки выявили следующее: для образцов, изготовленных по усовершенствованной технологии из стали ЧС68 максимальная повреждающая доза на твэле составила 107 сна при начальной повреждающей дозе в 80 сна, что соответствует предельному ресурсу в 599 эф.сут включающая остаточный ресурс в 27 эф.сут., при стандартной технологии максимальная повреждающая доза на твэле равна 85 сна при начальных значениях в 80 сна, что соответствует предельному ресурсу в 580 эф.сут. включающая 9 эф.сут. остаточного ресурса. Прогнозирование распухания позволяет провести оценки остаточных ресурсов оболочек твэлов и сравнить влияние исходной структуры на величину остаточного ресурса. Усовершенствование технологии изготовления оболочек позволило снизить концентрацию пор для стали ЧС68 – в 1,6 раза, с практически не отличающимся средним диаметром пор.

Возможно, это связано с формированием более однородной зереной структуры и гомогенности распределения компонентов стали, а также с различиями дислокационной и двойниковой структур, что способствует увеличению радиационной стойкости.

1. В. И. Щербак, В. Д. Дмитриев, ФММ 64, (1987).

2. A. V. Kozlov, I.A. Portnykh, A.R. Isinbaev, The Physics of Metals and Metallography **7**, 121 (2020).

3. М. В. Баканов, Известия вузов. Ядерная энергетика **1**, (2011).

МЕССБАУЭРОВСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЛИ ЭП823 ПОСЛЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ В РЕАКТОРЕ БН600

К. А. Козлов^{1*}, В. А. Шабашов¹, В. А. Семенкин², А. Е. Заматовский¹

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Екатеринбург, Россия

*E-mail: kozlov@imp.uran.ru

Нержавеющие ферритно-мартенситные стали, в частности, сталь ЭП823, рассматриваются, как перспективные конструкционные материалы ядерных реакторов на быстрых нейтронах. В состав стали входят улучшающие коррозионные свойства Сг и Мо. Однако в процессе облучения стали этого состава подвержены охрупчиванию вследствие роста зерен, выделения интремаллидных фаз и α' выделений.

Целью работы было исследование радиационно-индуцированного атомного перераспределения и эволюции структуры нержавеющей ферритно-мартенситной стали ЭП823 после высокодозного облучения в реакторе на быстрых нейтронах БН600.

Изучение изменений фазового состава и ближнего атомного перераспределения проводилось при помощи мессбауэровской спектроскопии, дающей информацию о неэквивалентных положениях ^{57}Fe в структуре и позволяющей проводить количественный фазовый и концентрационный анализ. В современной литературе отсутствуют мессбауэровские работы по высокодозному нейтронному облучению, что, в частности, объясняется отсутствием соответствующего мессбауэровского оборудования. Важной частью исследования являлась разработка мессбауэровского спектрометра, адаптированного для работы в условиях высоких фоновых нагрузок, возникающих в исследуемых материалах после облучения нейтронами.

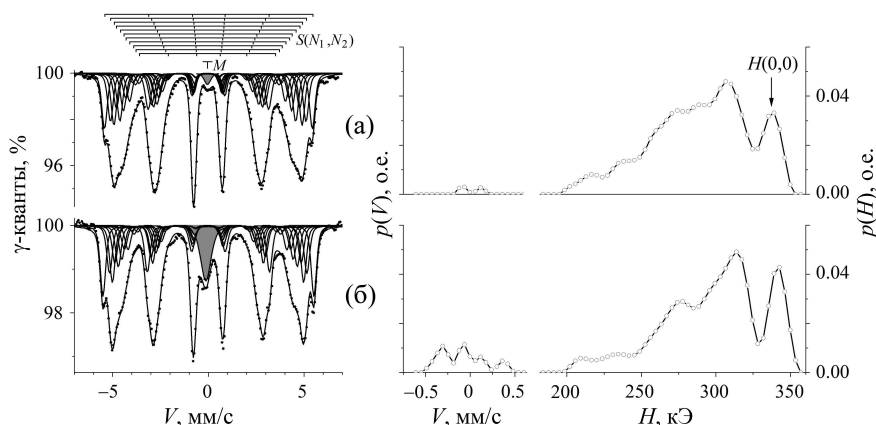


Рис. 1. Мессбауэровские спектры, распределения $p(V)$ центрального синглета и распределения $p(H)$ секстета стали ЭП823 в исходном (а) и облученном до 75 сна при 600 °С (б) состояниях.

На Рис. 1 и 2 приведены мессбауэровские спектры стали ЭП823 в исходном состоянии и после облучения. Экспериментальные спектры α -фазы моделировали как сумму подспектров $S(N_1, N_2)$, каждый из которых соответствует различным окружениям ^{57}Fe

атомами примеси в двух ближайших координационных сферах. Анализ парциальных вкладов подспектров позволяет рассчитать значение эффективной концентрации хрома в матрице ферритной фазы и оценить процессы атомного перераспределения.

В результате облучения наблюдаются изменения мессбауэровских параметров α -фазы, а также появление уширенного синглета в центре интегрального спектра, см. Рис. 1. Наблюдаемые изменения нарастают с увеличением дозы облучения, что проявляется в снижении эффективной концентрации хрома $c(\text{Cr})$ в α -фазе, а также сопутствующем росте относительной интенсивности синглетной компоненты, соответствующей парамагнитной железосодержащей фазе, см. Табл. 1. Очевидно, что наблюдаемые изменения происходят вследствие перераспределения элементов легирования (хрома и молибдена) и переходом их из состава α -твердого раствора в состав новой структуры. Измерения центральной части спектра стали показали, что центральный синглет можно представить в виде суперпозиции спектров интерметаллидной χ -фазы и карбидов железа (Рис. 2).

Таким образом показано, что результаты мессбауэровской спектроскопии позволяют получить информацию о структурно-фазовых переходах, количественно определить степень легирования ферритной компоненты, а также идентифицировать и оценить объем железосодержащих интерметаллидных и карбидных фаз.

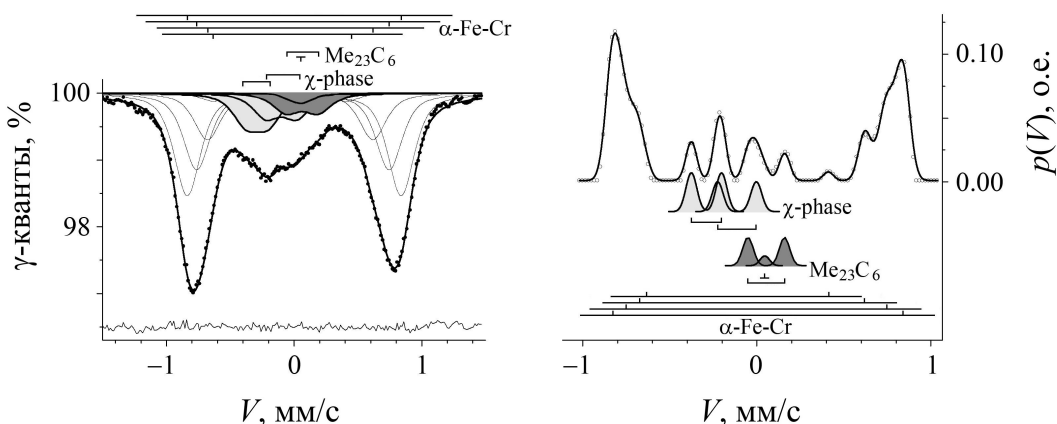


Рис. 2. Мессбауэровский спектр и распределение $p(V)$ центральной части спектра стали ЭП823 облученной до 75 сна при 600 °С.

Таблица 1. Режимы обработки, эффективная концентрация хрома в α -фазе и количество χ и M_{23}C_6 фаз в стали ЭП823.

Обработка	Концентрация хрома в α -фазе, ат. %	Количество фаз χ и M_{23}C_6 , об. %
Исходное состояние	14.3	0.9
Доза 50 сна, $T = 660^\circ\text{C}$	12.4	3.1
Доза 75 сна, $T = 660^\circ\text{C}$	11.8	6.7

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Структура», № АААА-А18-118020190116-6.

ОСОБЕННОСТИ СДВИГОВОГО $\gamma \rightarrow \alpha$ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛЯХ X18N9 И X18N10T ПОСЛЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

В. И. Пастухов^{1*}, В. Л. Панченко¹, И. А. Портных¹, А. Р. Исинбаев^{1,2}, М. Л. Лобанов²

¹АО «Институт реакторных материалов», Заречный, Россия

²УрФУ, Екатеринбург, Россия

* E-mail: vladimir.pastuhov1991@gmail.com

Стали аустенитного класса типа X18N9 и X18N10T имеют широкий спектр применения в ядерной энергетике. Это обеспечивается уникальным сочетанием конструктивной прочности и коррозионной стойкости, присущими структурному состоянию, формирующемуся при соответствующей термической обработке. Применение данных сталей в реакторах на быстрых нейтронах сопровождается дополнительными требованиями к их радиационной стойкости. Продолжительное нейтронное облучение приводит к структурным изменениям материала на микроуровне, и как следствие это отражается на макро свойствах материала. Важным требованием, предъявляемым к подобным аустенитным сталям, является предсказуемость и стабильность их свойств.

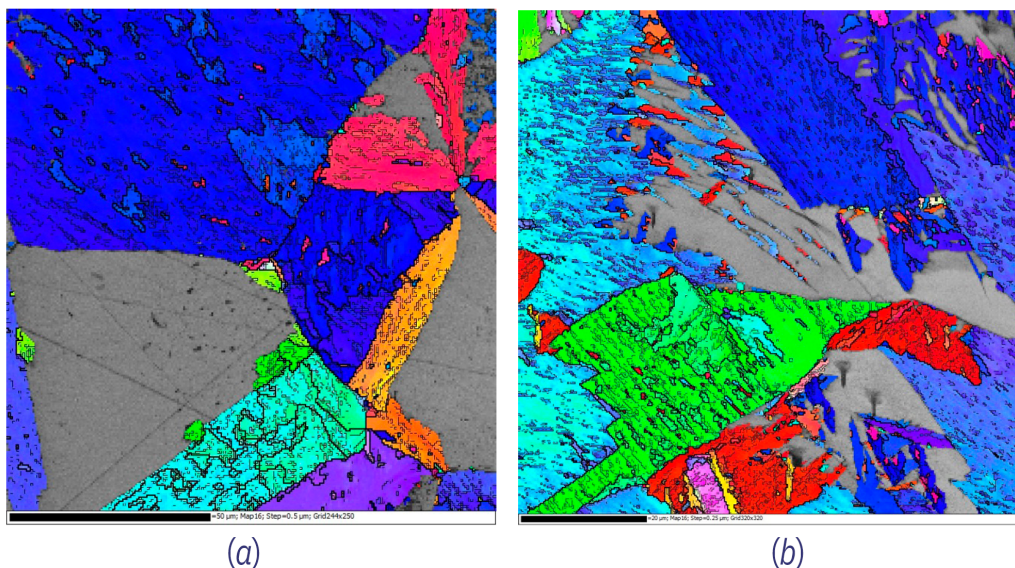
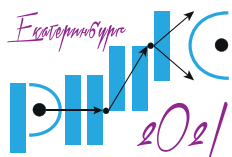


Рис. 1. Структурное состояние поверхности образцов из стали X18N9 (а) и стали X18N10T (б) после нейтронного облучения; ориентационные IPF-карты, цветным выделены ориентировки α -фазы в направлении нормальном плоскости поверхности, серым цветом выделена γ -фаза.

Методами сканирующей [1] и просвечивающей электронной микроскопии проведено исследование структурного состояния стали X18N9 после нейтронного облучения в течение продолжительного времени до максимальной повреждающей дозы 33 сна и стали X18N10T после нейтронного облучения до повреждающей дозы 80.5 сна при



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

● → ● → ● → Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

температуре 475 °С. В отличие от стали X18H10T, облучение материала стали X18H9 происходило в температурном диапазоне 370 — 460 °С при низких скоростях набора повреждающей дозы. В обоих случаях облучение материала привело к структурным изменениям, а именно радиационному порообразованию и радиационно стимулированным фазовым превращениям.

Отличительной особенностью обоих материалов явилась реализация в тонком поверхностном слое подготавливаемых к исследованиям образцов сдвигового $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения [2, 3], Рис. 1.

Установлено, что сдвиговое превращение для сталей имело схожий характер для обоих типов сталей. Показана выраженная кристаллографическая направленность распада, инициированная исходными ориентировками зерен аустенита и действием напряжений, направленных нормально к поверхности изделия. Отмечено, что зарождение зерен α -фазы происходило на когерентных двойниковых границах ($\Sigma 3$ в модели решетки совпадающих узлов) между зернами аустенита. Также зафиксировано, что фазовое превращение реализуется в соответствии с ориентационными соотношениями, одинаково близкими к ОС Курдюмова-Закса и ОС Нишиямы-Вассермана и ОС $\{113\}\gamma \parallel \{112\}\alpha$, $\langle 110 \rangle \gamma \parallel \langle 111 \rangle \alpha$.

1. V. I. Pastukhov, J. Nucl. Mater. **480**, 289 (2016).
2. V. I. Pastukhov, Solid State Phenomena. **284**, 253 (2018).
3. M. L. Lobanov, Met. Sci. Heat. Treat. **62**, 423 (2020).

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ОБЛУЧЕНИЯ СЛИТКОВ КРЕМНИЯ В РЕАКТОРЕ ВВР-К

*М. Т. Айткулов, Ш. Х. Гизатулин, Д. С. Дюсамбаев, А. Л. Мартюшов, Д. А. Накипов,
Н. К. Романова*, Д. С. Сайранбаев, А. А. Шаймерденов*

РГП «Институт ядерной физики» Министерства энергетики Республики Казахстан (РГП ИЯФ),
Алматы, Республика Казахстан

*E-mail: romanova@inp.kz

Бурное развитие электронной промышленности и зеленых технологий во всем мире повышает спрос к легированному кремнию. Одним из наиболее эффективных методов легирования кремния является метод нейтронно-трансмутационного легирования, который возможно реализовать на базе исследовательского реактора.

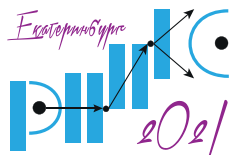
В настоящее время на ядерных установках всего мира в основном легируют слитки кремния диаметром 6-8 дюймов, но маркетинговый анализ рынка показывает, что имеется тенденция на увеличение диаметра слитка [1].

В РГП ИЯФ проводится научно-исследовательская работа по возможности реализации облучения слитков кремния большого диаметра в реакторе ВВР-К при целевом значении объемного коэффициента неравномерности $\sim 4\%$ [2].



Рис. 1. Исследовательский реактор ВВР-К.

ВВР-К — это исследовательский реактор, бакового типа. Номинальная мощность реактора составляет 6 МВт (Рис. 1). Максимальная плотность потока тепловых нейтронов



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

● → ● → ● → Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

в центральных облучательных каналах активной зоны, составляет $2 \times 10^{14} \text{ см}^2 \times \text{с}^{-1}$ [3]. Реактор снабжен горизонтальными и вертикальными облучательными каналами.

Ранее проведенные исследования по отработке технологии нейтронно-трансмутационного легирования кремния в облучательном канале на периферии активной зоны реактора ВВР-К показали, что возможно легирование слитков кремния диаметром 6 дюймов с объемной неравномерностью не более 7% [4,5]. Для коммерческого производства легированного кремния диаметром более 8 дюймов рассматривается ниша экспериментальных устройств. Остальные облучательные каналы не подходят для облучения крупноразмерных объектов.

Оценены условия облучения слитков кремния в нише экспериментальных устройств. Определены температурный градиент по высоте облучаемого слитка и значение плотности потока тепловых нейтронов.

Работа выполнена в рамках программы Министерства энергетики Республики Казахстан №BR09158958 «Развитие ядерно-физических методов и технологий для инновационной модернизации экономики Казахстана».

1. Н. К. Романова, А. А. Шаймерденов, и др., Вестник НЯЦ РК, **4** (72), 95 (2017).
2. N. Romanova, Sh. Gizatulin, D. Dyussambayev, et al., Journal of Physics: Conf. Series **1115**, 032052 (2018).
3. Ф. М. Аринкин, А. А. Шаймерденов и др., Атомная энергия **123**(1), 15 (2017).
4. Н.К. Романова, Ш.Х. Гизатулин, и др. Исследование возможности трансмутационного легирования кремния на реакторе ВВР-К, Материалы 11-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твёрдым телом» (23-25 сентября 2015), г. Минск, 147 (2015).
5. N. Takemoto, N. Romanova, et al. Irradiation Test with Silicon Ingot for NTD-Si Irradiation Technology, JAEA-Technology 2015-021, (2015).

НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОНКОСТЕННЫХ ПЛАСТИНАХ ИЗ СПЛАВА Ti-6Al-4V, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

С. А. Рылов^{1*}, И. Д. Карпов¹, В. Т. Эм¹, С. Ю. Иванов^{2,3}, Е. В. Земляков^{2,3}, К. Д. Бабкин^{2,3}

¹Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

³Институт лазерных и сварочных технологий,

Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: rylovsergey25@gmail.com

В изготавливаемых методами аддитивных технологий деталях обычно возникают значительные внутренние напряжения, которые могут привести к серьезным деформациям этих деталей или же, к их разрушению в процессе эксплуатации. Именно поэтому количественная информация об остаточных напряжениях важна для понимания модели их формирования и разработки методик по их уменьшению.

В настоящей работе были проведены нейтронно-дифракционные исследования в двух тонкостенных пластинах толщиной 3 мм и 9 мм, изготовленных методом прямого лазерного выращивания на жестких подложках. Результаты исследований демонстрируют большую схожесть в картинах распределения остаточных напряжения в пластинах, а небольшие отличия наблюдаются лишь в величине напряжений.

Максимальные растягивающие нормальные напряжения формируются вблизи жесткой подложки возле боковых граней пластин и уменьшаются по мере приближения к верхней грани и середине пластин. В середине пластины возле подложки напряжения переходят в растягивающие. Максимальные растягивающие продольные напряжения формируются вблизи верхней грани пластины и уменьшаются по мере приближения к подложке и боковым граням пластины.

Для пластины толщиной 9 мм показано распределение компонент напряжений по толщине в центральной части. Распределение нормальной компоненты имеет вид параболы с ветвями, направленными вверх. Сжимающие напряжения в центральной части резко переходят в растягивающие напряжения вблизи поверхности.

Распределение напряжений в исследуемых пластинах значительно отличается от распределения в пластине из аналогичного сплава, выращенной на гибкой подложке [1].

1. V. Luzin, N. Hoyer, Materials Research Proceedings **2** 497 (2016).

ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОГО КЛАССА

*А. Е. Устинов**, А. В. Козлов, В. Л. Панченко, В. И. Пастухов, В. Ю. Ярков

АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный, Российская Федерация

*E-mail: sanya.ustinow@yandex.ru

Для развития атомной промышленности в России необходимо создание современных ядерных реакторов на быстрых нейтронах с применением материалов, обладающих оптимальными свойствами для работы в условиях повышенных температур, коррозионно-активных сред, длительного действия нейтронного облучения [1].

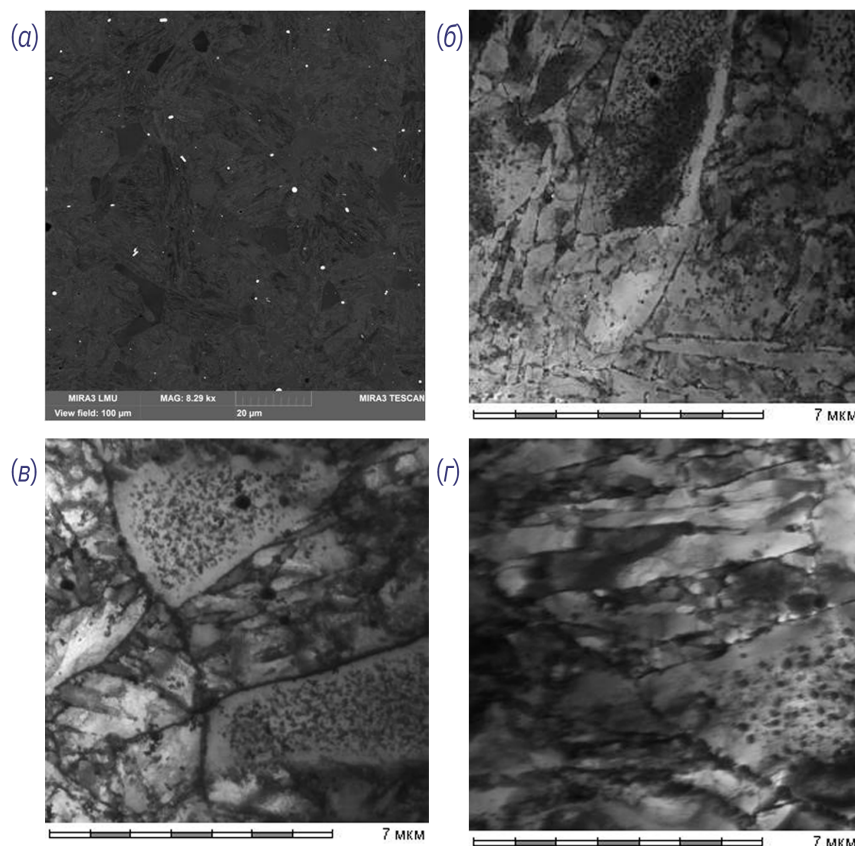


Рис. 1. Структура стали X12HMBФCР после закалки и отпуска: (а) – изображение структуры в отраженных электронах (СЭМ); (б, в, г) – изображение структуры стали в просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ); (б) – после облучения $T_{\text{обл.}} \sim 570^\circ\text{C}$, $D \sim 81$ сна; (в) – после облучения $T_{\text{обл.}} \sim 600^\circ\text{C}$, $D \sim 75$ сна, (г) – после облучения $T_{\text{обл.}} \sim 660^\circ\text{C}$, $D \sim 51$ сна

Одним из перспективных материалов является сталь X12HMBФСР, которая обладает высокой коррозионной стойкостью в среде жидкометаллических теплоносителей реакторов БН и БРЕСТ, незначительным радиационным распуханием, удовлетворительным сопротивлением ползучести при температурах эксплуатации в реакторах на быстрых нейтронах.

Данная работа посвящена анализу влияния нейтронного облучения на фазовые и структурные составляющие стали. Исследования проводились на образцах оболочек твэлов, облученных в составе материаловедческой сборки в реакторе БН-600 при температурах 570, 600, 660 °С до повреждающих доз 51.3, 75.1 и 81.1 сна.

Определялись методами металлографии и стереометрического анализа характеристики структурных составляющих, вторичных фаз, образовавшихся в процессе облучения, оценивались характеристики радиационной пористости, плотность дислокаций [2, 3].

Исследования были выполнены на сканирующем электронном микроскопе MIRA3 FEG-SEM, оснащенный детекторами вторичных и отраженных электронов и приставкой энергодисперсионного анализа характеристического рентгеновского излучения x-Act 6 фирмы Oxford Instruments [4]. Так же проводились исследования на просвечивающем электронном микроскопе фирмы JEM-2000EX при ускоряющем напряжении 100 кВ в просвечивающем режиме. Количественная обработка изображений для получения размерных характеристик выделений проводилась с использованием программного обеспечения «Цифровая фотолаборатория SIAMS Photolab» [2, 3].

Проведенное исследование стали X12HMBФСР в исходном состоянии показало (Рис. 1), что ее структура состоит из мартенсита, остаточного феррита, крупных карбидов на основе Nb (округлые светлые частицы как по границам, так и в теле зерен, Рис. 1а) и по границам ферритных зерен и мартенситных реек, образуются карбиды типа $M_{23}C_6$. После нейтронного облучения содержание карбидов типа $M_{23}C_6$ увеличивается, в зернах феррита образуется χ -фаза, по границам обнаружена мелкодисперсная α' -фаза, так же по границам дислокационной структуры образуются поры [5].

Прошедшие изменения микроструктуры под воздействием нейтронного облучения не привели к существенным изменениям механических свойств.

1. С.А. Аверин и др., Исследования радиационной стойкости ферритно-мартенситных сталей после облучения в реакторе БН-600, Научно-технический сборник «Вопросы атомной науки и техники», серия «Материаловедение и новые материалы», (2007).
2. П. Хирш и др., Электронная микроскопия тонких кристаллов, Изд. «Мир» Москва, (1968).
3. С. А. Салтыков, Стереометрическая металлография: учебное пособие для вузов, М.: Металлургия, (1976).
4. V.I. Pastukhov and et. al., Materials Science Forum (2019).
5. С.В. Барсанова и др., Вопросы атомной науки и техники, Серия «Материаловедение и новые материалы» (2007).

МЕССБАУЭРОВСКИЙ АНАЛИЗ БЛИЖНЕГО АТОМНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ В Fe–Cr И Fe–Ni СПЛАВАХ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ РАДИАЦИОННОМ И ДЕФОРМАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

В. А. Шабашов, К. А. Козлов*

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*E-mail: shabashov@imp.uran.ru

В сплавах Fe–Cr и Fe–Ni с ОЦК и ГЦК кристаллическими решетками, представляющих большой класс конструкционных материалов на основе железа обнаружены индуцированные облучением (электроны и быстрые нейтроны) и сверхвысокой пластической деформацией (СВПД) аномальные диффузионные структурно-фазовые переходы со сменой направления атомного перераспределения в зависимости от состава сплавов и температуры воздействия [1–4].

В бинарных Fe–Cr сплавах — прототипе радиационно-стойких ферритно-мартенситных нержавеющих сталей — установлена инверсия знака ближнего порядка в зависимости от содержания вблизи 9 ат.% хрома, обусловленная ферромагнитным состоянием железа антиферромагнитным обменом между соседями Cr–Cr, создающим фрустрацию магнитной структуры [3], см. Рис. 1.

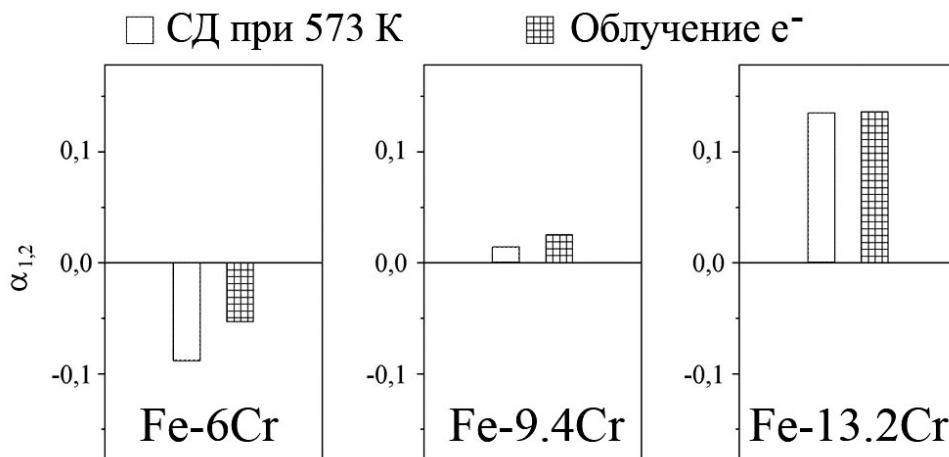


Рис. 1. Инверсия параметра Каули при теплом сдвиге под давлением и облучении электронами в зависимости от содержания хрома в Fe–Cr сплавах.

В бинарных Fe–Ni сплавах инварного диапазона составов обнаружено ускоренное СВПД при температуре выше 373 К сравнимое с ускоренным облучением электронами гомогенное ближнее упорядочение и вторая стадия упорядочения по типу L10 [4]. Ближнее упорядочение снижает инварные свойства Fe–Ni сплавов. Снижение температуры СВПД до комнатной и криогенных температур разрушает ближний порядок в Fe–Ni сплавах.

В тройных стареющих Fe–Ni–Me(Al,Ti) сплавах установлены общие закономерности индуцированных радиационным воздействием и СВПД фазовых переходов [1]: (i) ускорение упорядочения при теплой (выше 373 K) деформации сдвигом под давлением или облучением высокоэнергетическими электронами; (ii) температурная инверсия атомного перераспределения от ускоренного старения до растворения интерметаллидов и обогащением никелем аустенитной матрицы при СВПД, и нейтроном облучении, Рис. 2. Ускоренное старение проявляется в уменьшении содержания никеля из металлической ГЦК матрицы в связи с выходом никеля в интерметаллидную γ' -фазу. Растворение интерметаллидов проявляется в обратном изменении содержания никеля в аустените.

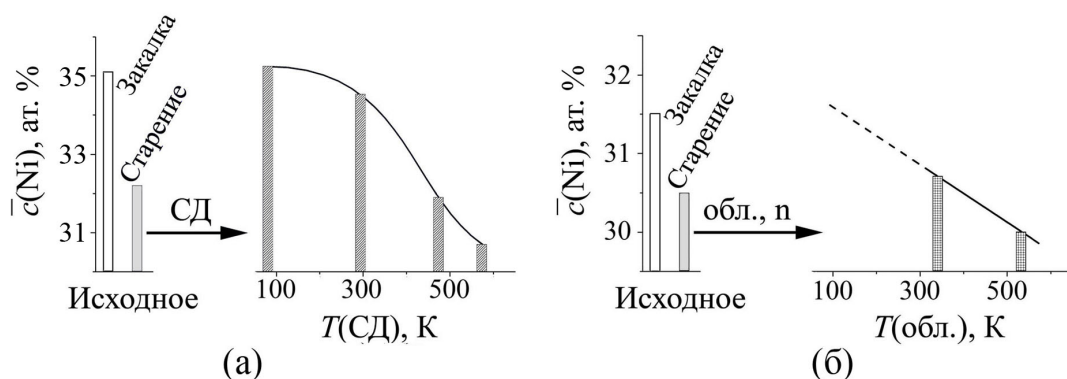


Рис. 2. Зависимость концентрации Ni от температуры сдвига под давлением и облучении нейтронами с флюенсом 10^{20} см^{-1} в ГЦК матрицах сплавов Fe–36Ni–9Al (а) и Fe–33.4Ni–3.1Ti (б).

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Структура», № АААА-А18-118020190116-6.

1. V. Shabashov, V. Sagaradze, K. Kozlov and Y. Ustyugov, Metals **8**, 995 (2018).
2. V. A. Shabashov, K. A. Kozlov, A. L. Nikolaev, et al., Philos. Mag. **100**, 1 (2020).
3. K. Kozlov, V. Shabashov, A. Zamatovskii, et al., Metals **10**, 659 (2020).
4. В. А. Шабашов, К. А. Козлов, А. Е. Заматовский и др., ФММ **120**, 746 (2019).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ РЭМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СПЛАВА Э125 ДО И ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ

В. Ю. Ярков^{1,2*}, С. А. Аверин², В. И. Пастухов², А. Е. Устинов^{1,2}, М. Л. Лобанов¹

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

²Институт реакторных материалов, Заречный, Россия

*E-mail: valick99@gmail.com

Периодический контроль состояния труб каналов системы управления защитой из сплава Э125 обеспечивает надежную и безопасную эксплуатацию уран-графитовых реакторов. Важным элементом периодического контроля является анализ структурного состояния труб после эксплуатации методами оптической и электронной микроскопии.

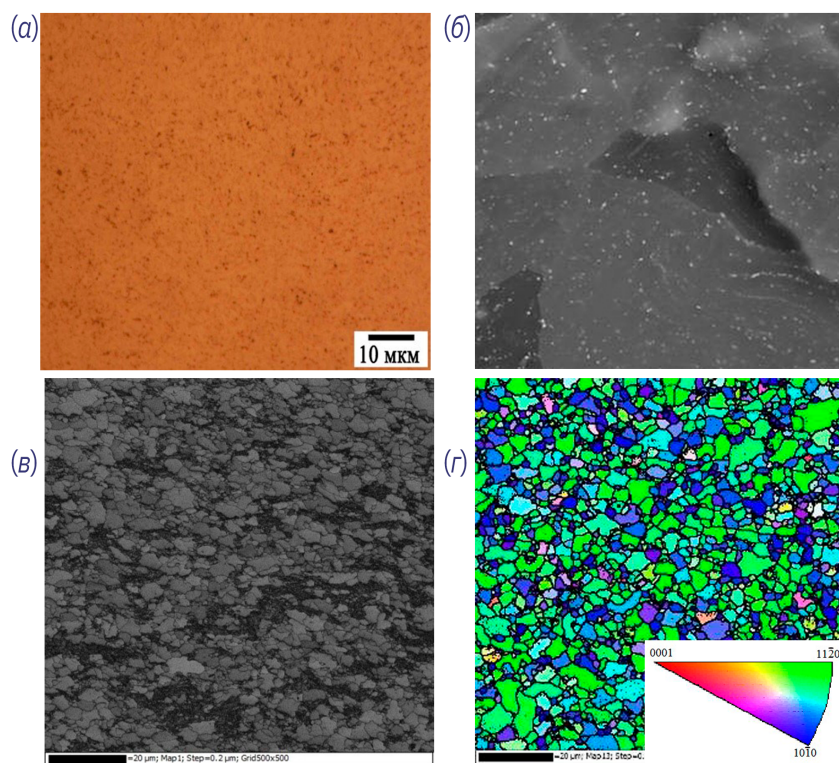


Рис. 1. Микроструктура трубы канала СУЗ из сплава Э125: (а) – оптическая металлография; (б) – РЭМ, отраженные электроны; (в, г) – ориентационная микроскопия (EBSD); (в) – обратно рассеянные электроны; (г) – ориентационная карта в расцветке с направления, параллельного оси трубы.

Невозможность полного анализа основных параметров мелкозернистой структуры оптической металлографией предопределило использование растровой электронной микроскопии, и, в частности, ориентационной микроскопии для более полного понимания структурного состояния изделий из сплава Э125 после облучения, Рис. 1.

Работа посвящена определению структурного состояния труб каналов СУЗ после длительной эксплуатации в ядерных реакторах. Объектом исследования являлись образцы, вырезанные из верхней, центральной и нижней части труб каналов СУЗ после эксплуатации (38 лет) в РБМК-1000 в продольном и поперечном направлении, а также образцы-свидетели, не подвергнутые облучению.

Исследования проводились на растровом электронном микроскопе TESCAN Mira 3, оснащенный детекторами вторичных и отраженных электронов, а также приставкой дифракции обратно рассеянных электронов Nordlys Nano фирмы Oxford Instruments. Для подсчета удельной поверхности границ в продольном и поперечном сечениях строились карты преимущественных ориентировок кристаллитов при углах разориентировок 5° , 10° , 15° , 20° , на которые накладывалась сетка случайных секущих.

Опираясь на литературные данные [1 – 3] и проведенный анализ структуры образцов, установлено, что зеренная структура и текстура изделия из сплава Э125 практически не изменяются во время эксплуатации. Главным различием в структуре трубы до и после эксплуатации из сплава Zr–2.5% Nb является появление гидридов ZrH и ZrH_{1.66}, приводящие к изменению механических свойств канала СУЗ. Основные отличия исследованных каналов СУЗ (размер, доля рекристаллизации, удельная поверхность границ) в выявленном структурном состоянии объясняются разницей в технологии изготовления трубных изделий [1 – 3].

1. А.В. Никулина, Н.Г. Решетников, П.В. Шебалдов, Технология изготовления канальных труб из сплава Zr–2.5%Nb, установленных в реакторах РБМК, Вопросы атомной науки и техники, (1990).
2. Г.П. Кобылянский, А.Е. Новоселов, Радиационная стойкость циркония и сплавов на его основе. Справочные материалы по реакторному материаловедению, Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, (1996).
3. Б.А. Калинин, Том 6. Конструкционные материалы ядерной техники, МИФИ, Москва, (2012).

NEUTRON DIFFRACTION STUDY OF HIGH-TECH ALLOY FOR EFFECTS CAUSED BY HEAVY ION IRRADIATION

*E. P. Popov^{1,2,3}, M. N. Mirzayev^{1,4}, V. A. Skuratov¹, E. Demir⁵, A. A. Donkov^{1,3}, K. Siemek^{1,6},
A. Olejniczak^{1,7}, T. Vershinina^{1,8}, I. G. Genov^{1,9*}, A. I. Beskrovnyi¹, D. Neov^{1,2}, E. Korneeva¹,
Ö.Vural^{1,2,3,5}, Z. A. Sharipov¹, F. Mamedov^{1,10}, K. Krezhov^{4,11}, A. H. Valizade²,
A. S. Doroshkevich^{1,12}*

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow distr., Russia

²Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

³Georgi Nadjakov Institute of Solid-State Physics, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

⁴Institute of Radiation Problems, Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

⁵Yeditepe University, Physics Department, Istanbul, Turkey

⁶Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Sciences, Krakow, Poland

⁷Faculty of Chemistry, Nicolaus Copernicus University, Toruń, Poland

⁸Dubna State University, Dubna, Russian Federation

⁹Acad. E. Budevski Institute of Electrochemistry and Energy Systems, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

¹⁰Czech Technical University in Prague, CZ-11000 Prague, Czech Republic

¹¹Institute of Electronics, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

¹²Donetsk Institute for Physics and Engineering named after O.O. Galkin NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

*E-mail: dedfin45@abv.bg

In this paper WC–6Co alloy irradiated with 167 MeV ¹³²Xe ions has been studied with Neutron Diffraction (ND), X-ray diffraction (XRD), Raman Spectroscopy in order to investigate its microstructure changes before and after irradiation.

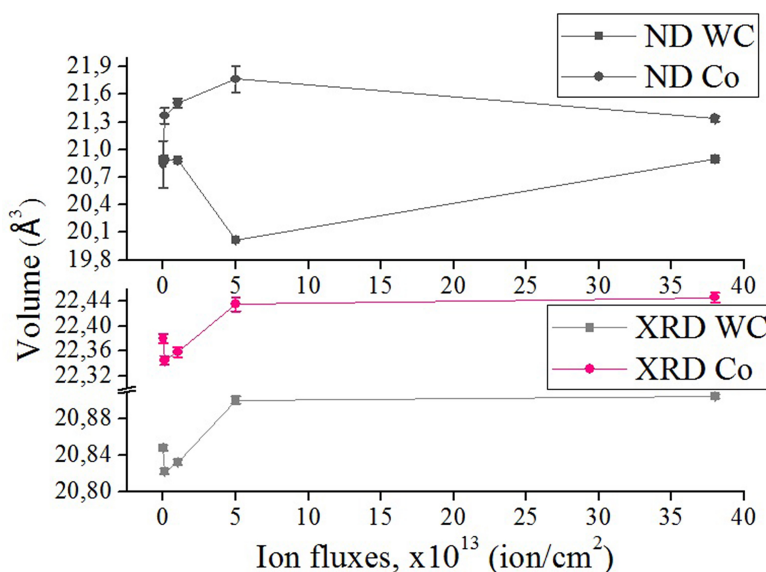


Рис. 1. Change of lattice parameters vs. ¹³²Xe ions fluence.

All samples were irradiated to different fluencies of 5.0×10^{12} , 1.0×10^{13} , 5.0×10^{13} and $3.83 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ at room temperature. It was determined that all WC samples possess a hexagonal crystal structure with space group $P-6m2$, and Co has hexagonal structure with space group $P63/mmc$. No presence of additional phases was noticed. ND spectra exhibit increase of the intensity of the reflections at irradiated specimens, implying that some relaxation of defects in the crystal lattice may take place. This is probably due to conversion of the kinetic energy of heavy ions from the flow into heat, which leads to local annealing in zones from the grains. Also observed is a displacement of the position of the small peaks and their return to the original at higher fluencies. Similarly, XRD spectra show that the irradiation of the samples shifts the peaks in the X-ray diffraction patterns to the region of the smaller angles. This may be due to the formation of residual stresses in the surface layers of the material, as reported by other authors. In the course of irradiation, initially the width of the peaks decreases, and then increases again. Assessment of the contribution from microstresses and the size of crystallites can be seen in an analogy with the results from Raman Spectroscopy. Probable explanation for decrease of the peaks width is a dislocation structure reorganization. If the formed subgrains still exceed 150 – 200 nm, then we observe a decrease in the width of the peaks. If, with an increase in the dose, there is further reorganization of the dislocation structure, this leads to an increase in the length of the boundaries in the carbide and, as a consequence, a decrease in the size of crystallites, i.e. we monitor a peak broadening. The changes in unit cell volumes obtained by XRD and ND for original and irradiated WC+6Co samples are shown at Fig. 1.

The comparison of both XRD and Raman's results show an inverse dependency between the change in lattice volume and the size of the crystallites. Also, some compensation in change of WC lattice constant takes place relative to Co ones.

NUCLEAR METHODS TO STUDY IRRADIATED MULTILAYER STRUCTURES

A. I. Madadzada^{1,2}, M. Kulik^{1,3}, P. L. Tuan^{1,4}, T. V. Phuc^{1,4,5}, R. Sh. Isayev^{1,2},
T. Yu. Zelenyak^{1,1}, A. S. Doroshkevich^{1,6}*

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow region, Russia

²National Nuclear Research Center, Baku, Azerbaijan

³Institute of Physics, Maria Curie-Skłodowska University, Lublin Poland

⁴Vietnam Atomic Energy Institute, 59 Ly Thuong Kiet, Hoan Kiem, Hanoi, Vietnam

⁵Graduate University for Science and Technology, Hanoi, Vietnam

⁶Donetsk Institute for Physics and Engineering named after O.O. Galkin, Kiev, Ukraine

*E-mail: madadzada@jinr.ru

Under ion irradiation materials undergo significant atomic rearrangement. The most obvious example of this phenomenon is the atomic intermixing and alloying that can occur at the interface separating two different materials during ion irradiation. This process is known as ion beam mixing [1].

Influence of the energy and mass of ions on the mixing process of TiO₂/SiO₂ bilayers was investigated using Rutherford Backscattering Spectrometry (RBS) method. The samples were irradiated by Xe ions with different energies of 100, 150, 200, 250 keV. Depth profile of the elements in samples that were determined by RBS spectra pointed out the structure and thickness of the layers in the systems before and after implantation. It was found that thickness of the initial transition layers between TiO₂ and SiO₂ layers increase with increasing energy of incident ions. This effect refers to the increasing amount of mixing at TiO₂/SiO₂ interface. With the help of the Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM)-2008 for theoretical calculation, variation of transition layers could be explained by defect concentration profiles and the energy loss of the ion in these layers. Thickness of the layers that was obtained from the RBS results have good agreement with the Ellipsometry Spectroscopy (ES) method. Using the ES method the optical constants of implanted and non-implanted TiO₂/SiO₂ structures were investigated as well. The waveforms measured at different incidence angles may suggest that the measurements are carried out near the main Principle point. The yields of $\Psi(\lambda)$ and $\Delta(\lambda)$ band changes with a change in the incident angle may be associated with interference processes of light reflected from the examined structure. The refractive index and extinction coefficient were found that increase after implantation up to 200 keV Xe then decrease for the case of 250 keV.

In summary, Xe irradiation influence significantly to the TiO₂/SiO₂ bilayers for both structural and the optical properties. Ion beam induced mixing at the TiO₂ and SiO₂ interfaces was indicated by shifting the borders of RBS spectra. With the primary parameters that are measurable by the experimental techniques the amount of mixing was qualified. In which, decreasing of difference FWHM of Ti peaks and increasing of relative thickness of transition layers indicated that degree of mixing increase with increasing of ion energy. These effects could be explained by increasing of vacancies and displacements atoms due to increasing of deposited energy of the ions in the transition layers that was calculated by SRIM code. Ellipsometric measurements of the spectra of $\Psi(\lambda)$ and $\Delta(\lambda)$ for the material before and after ion implantation shown changes yields of the bands with changes in the angle of incidence. This associated with interference processes of light reflected from the examined structure. On the basis of the measurements, increasing thickness of transition layers between the TiO₂ and SiO₂ layers was observed that shown a good agreement with the RBS results.

1. M. Nastasi, J.W. Mayer, ION BEAM MIXING. In: Sickafus K.E., Kotomin E.A., Uberuaga B.P. (eds) Radiation Effects in Solids. NATO Science Series, vol 235. Springer, Dordrecht (2007).

INVESTIGATION AND ANALYSIS OF TUNGSTEN ALLOYS USING NEUTRON DIFFRACTION

I. G. Genov^{1,2}, E. Popov^{1,3,4}, M. N. Mirzayev^{1,5}, E. Demir⁶, A. I. Beskrovnyi¹,
A. Doroshkevich¹, A. A. Donkov^{1,4}, A. H. Valizade⁵, R. Isayev^{1,7,8}*

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow distr., Russia

²Institute of Electrochemistry and Energy Systems, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

³Institute of Solid-State Physics, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

⁴Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

⁵Institute of Radiation Problems, Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

⁶Yeditepe University, Physics Department, Istanbul, Turkey

⁷National Center for Nuclear Research, Baku, Azerbaijan

⁸National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation

*E-mail: epopov@jinr.ru

We have the opportunity to make a comparison between two alloys of the same type with a predominant percentage of tungsten. The first material consists from W–6wt% VC–1wt% C. The second material consists of four components W–6wt% B4C–2wt% TiC–1wt%C. In the first alloy were confirmed the size of the defects on the surface of the sample caused by irradiation with alpha particles and by means of neutron diffraction at small angles. Since the size of the sample is 10 mm (diameter) and the change in the angle at which the neutrons fall is 0.01° , we can determine the height of the defects in the range of $1.5 - 2 \mu_m$ ($x = \sin \beta$). There is a sharp change in the intensity of diffraction neutrons in two regions. There is shown when space group of C is $P63/mmc$, the volume of the cell for V_C phase strongly increase. At the same comparison at the pattern when the C is in space group $P63mc$, the ND show low increased of the volume of the cell for V_C phase. For the second alloy the structure of the alpha-irradiated sample has fewer defects and peaks are more distinct. This is especially, in the interval of 280 – 350 channels ($1 - 2.5 \text{ \AA}$). The initial (without irradiation) sample has less pronounced peaks. Particularly low is the intensity of the peaks in the range of 280 – 350 channels. There are many defects in the structure, most likely due to lack of annealing. There we considered W crystal structure, with monoclinic symmetry and space group $P2_1/m$ (No.10), BC with trigonal symmetry and space group $R3m$ (No.166), TiC with cubic symmetry and space group $Fm3m$ (No.225) and C with orthorhombic symmetry and space group $Cmme$ (No.67). Followed the results from first composite of this discussion, we can extrapolate this part where have angular scanning with neutron diffraction, because the main component in both cases is tungsten.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ

М. Л. Федосеев^{1}, С. Н. Петров¹, М. С. Михайлов¹, А. Х. Исламов²*

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И. В. Горынина Государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*E-mail: nphk3@crism.ru

Количественные исследования карбидов незаменимы при разработке новых сталей, поскольку их размер, форма и химический состав заметно влияют на свойства материала. Для более детального исследования данного вопроса необходимо комплексное применение различных методов исследования. Целью данного исследования является определение морфологии и объемной доли карбидов в высокопрочной стали, содержащей 0.42% вес. углерода, после закалки и отпуска в диапазоне температур от 150 до 600 °С. Именно совместное применение нескольких взаимодополняющих интегральных и локальных методов позволяют добиться поставленных целей исследования. В работе применены методы малоуглового нейтронного рассеяния (МУРН), нейтронной дифракции (НД), а также высоколокальный метод исследования – просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ).

При помощи широко распространенного, но достаточно трудоемкого метода анализа ПЭМ проведено исследование параметров мелкодисперсных выделений трех образцов после отпусков: 150 °С, 300 °С, 500 °С, см. Рис. 1. Так как время исследования и предварительная подготовки образцов для МУРН значительно меньше, чем для ПЭМ, при помощи МУРН исследовано 12 образцов в обозначенном выше диапазоне начиная от закаленного и заканчивая температурой отпуска 600 °С. Следует отметить, что исследования на нейтронных инструментах проводились на реакторе ИБР-2 в ОИЯИ, г. Дубна и это требует некоторой предварительной работы.

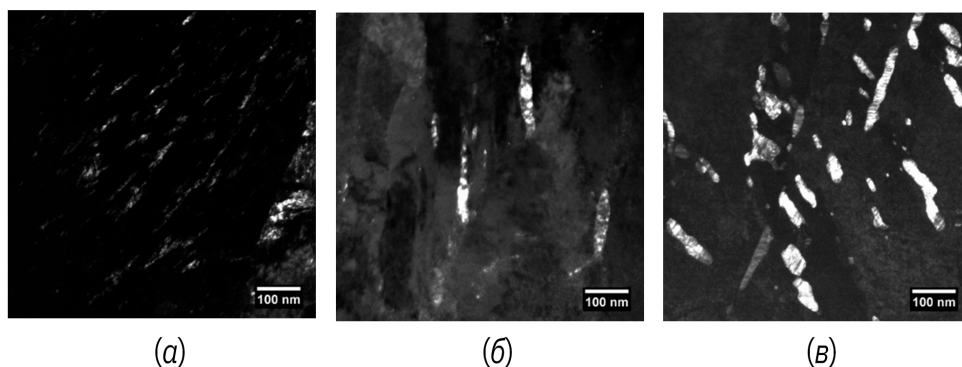


Рис. 1. (а) — Карбидные частицы самоотпуска после отпуска при 150 °С. (б) — Карбиды самоотпуска и дисперсные карбидные частицы после отпуска при 300 °С. (в) Карбиды самоотпуска и дисперсные карбидные частицы после отпуска при 500 °С.

На основе анализа данных малоуглового рассеяния и просвечивающей электронной микроскопии можно сделать предположение о механизме структурных превращений в стали при отпуске: после закалки и отпуска 150 °С начинается рост карбидных частиц Fe_2C , затем по мере увеличения температуры отпуска Fe_2C сменяется более стабильным Fe_3C . При температуре отпуска 300 °С начинается коагуляция карбидов, приводящая к тому, что в исследуемом диапазоне размеров происходит уменьшение среднего размера выделений, при этом они начинают регистрироваться методом нейтронной дифракции, которая также выявляет растворение остаточного аустенита.

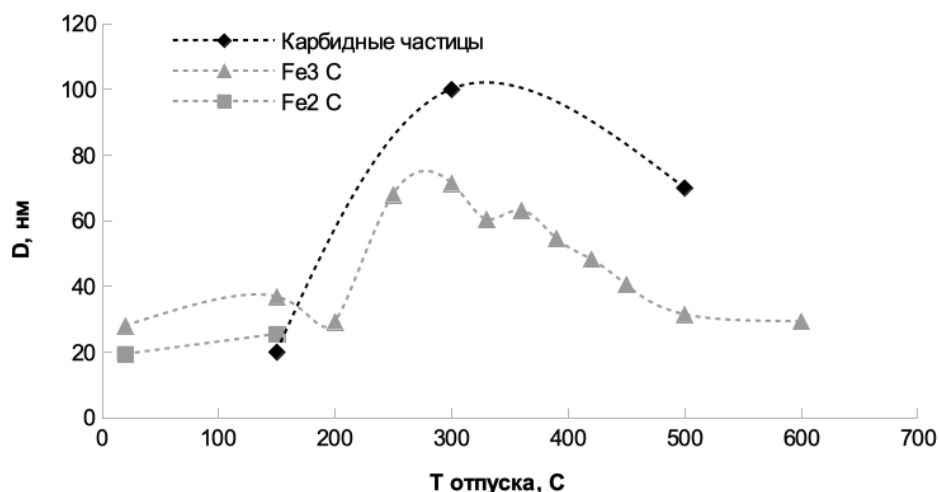


Рис. 2. Размер дисперсных выделений по данным ПЭМ (◆), МУРН при аппроксимации Fe_2C (■), Fe_3C (▲).

Комплексное исследование дисперсных выделений на основе данных нейтронной дифракции, а также ПЭМ, позволило уточнить представленную ранее [1] модель поведения мелкодисперсных карбидных частиц в высокопрочной среднеуглеродистой стали.

Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования научным оборудованием «Состав, структура и свойства конструкционных и функциональных материалов» НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей».

1. М. Л. Федосеев, С. Н. Петров, А. Х. Исламов, Письма о материалах **8**, 323 (2018).

Секция 10.

**Фундаментальные исследования
с нейтронами**

ЭФФЕКТ УСКОРЕНИЯ В КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ И НЕЙТРОННАЯ ОПТИКА

А. И. Франк, М. А. Захаров, Г. В. Кулин*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

* E-mail: frank@nf.jinr.ru

Доклад посвящен развитию представлений об Эффекте Ускоряющегося Вещества, состоящем в изменении частоты волны, прошедшей через преломляющий образец, движущийся с ускорением. В разное время теоретические предсказания такого изменения частоты были сделаны для электромагнитных волн, проходящих через диэлектрическую пластину, движущуюся с ускорением [1], нейтронных волн, проходящих через ускоренный образец [2,3], а позже и для электронных нейтрино, проходящих через ускоряющийся слой вещества [4]. Экспериментальное подтверждение эти предсказания нашли лишь для нейтронных волн [5,6]. Поскольку явление преломления в среде существует для волн любой природы, в [5] делался вывод о весьма общем характере этого оптического эффекта.

Однако из простого рассмотрения, основанного на принципе эквивалентности, следует, что представление о связи эффекта только с явлением преломления является необоснованно узким, а изменение частоты волны неизбежно должно возникнуть при рассеянии на любом объекте, движущимся с ускорением [7]. Таким объектом может быть, например, кристалл в условиях дифракции нейтронной или рентгеновской волны [6], элементарный рассеиватель, участок оптического волокна, ретранслятор радиосигнала, или что-либо иное. Во всех случаях изменение частоты волны описывается простым соотношением

$$\Delta\omega = ka\Delta t, \quad (1)$$

где k – волновое число, a – ускорение и Δt – задержка, вносимая ускоряющимся объектом.

Такой Эффект Ускорения (ЭУ) имеет почти столь же общую природу, что и известный эффект Доплера, однако сдвиг частоты определяется не скоростью объекта, а его ускорением. Эта связь с эффектом Доплера не является случайной, поскольку с некоторыми оговорками эффект может быть интерпретирован как дифференциальный эффект Доплера, при котором захват и испускание волны разделены промежутком времени, за которое скорость объекта изменяется.

Важнейший вопрос состоит в том, действительно ли ЭУ справедлив в квантовой механике, когда процесс взаимодействия частицы с ускоряющимся объектом – потенциальной структурой, не может быть разделен на фазу поглощения и испускания. Вместе с тем процесс взаимодействия всегда имеет конечную длительность, а в качестве приближенной оценки которой часто принимают так называемое групповое время задержки (ГВЗ) [8,9]

$$\tau = \hbar \frac{d\phi}{dE}, \quad (2)$$

где ϕ – фаза амплитуды волны, испытавшей взаимодействие, а E – энергия. Положительный ответ на этот вопрос был недавно получен в работе, посвященной численному исследованию проблемы взаимодействия ультрахолодных нейтронов (УХН) с потенциальными структурами, движущимися с ускорением [10].

Приняв, что ЭУ справедлив в квантовой механике мы должны заключить, что вывод об изменении частоты и энергии нейтрона должен быть справедлив и в случае рассеяния нейтрона на атомном ядре, движущимся с ускорением. Легко показать, что ГВЗ при рассеянии нейтрона на атомном ядре описывается простым соотношением

$$\tau = \frac{|b|}{v}, \quad (3)$$

где b — длина рассеяния и v — скорость нейтрона. В случае УХН $\tau \approx 10^{15}$ s. Таким образом следует допустить, что в случае среды, движущейся с ускорением, рассеяние нейтронных волн на ядрах является неупругим, и при рассеянии нейтрон меняет энергию на величину $\Delta E = \hbar \Delta \omega$, где изменение частоты определяется формулой (1), а в качестве задержки Δt в ней следует подразумевать (3). Это не может не повлечь существенную коррекцию наших представлений о законе дисперсии нейтронных волн в среде, движущейся с ускорением. Вопрос о применимости понятия эффективного потенциала

$$U = \frac{2\pi \hbar^2}{m} \rho b \quad (4)$$

в случае ускоряющейся среды ставился под сомнение и ранее [5, 11]. Здесь m — масса нейтрона, ρ — объемная плотность ядер.

Что касается возможности экспериментального подтверждения ЭУ в нейтронном эксперименте, то следует, по-видимому, рассматривать две возможности. Во-первых, вместо постоянного ускорения образца можно использовать образец, осциллирующий в пространстве, как в известном эксперименте [12]. При этом при выборе образца решающим обстоятельством должно быть большое время отражения [13] нейтронов. Вопрос о влиянии ЭУ на состояние волн, отраженных от колеблющегося образца, требует дополнительного теоретического анализа. Возможна также и модификация опыта с наблюдением волн, прошедших через область с осциллирующим потенциалом.

Другая возможность состоит в поиске отклонения пучка нейтронов при его прохождении через вращающийся диск. В этом случае нейтронная волна будет рассеиваться на ядрах вещества диска, движущихся с большим центростремительным ускорением и отклоняться в направлении центра вращения. Хотя величину переданного импульса при рассеянии на одном ядре оценить достаточно легко, теоретическое описание опыта в целом затруднено неопределённостью понятия числа элементарных рассеяний из-за существенно когерентного характера взаимодействия волны с ядрами. Некоторые предельные оценки дают основание надеяться, что эффект отклонения пучка может быть зарегистрирован в опыте с ультрахолодными нейтронами.

1. K. Tanaka, Phys. Rev. A **25**, 385 (1982).
2. F. V. Kowalski, Phys. Lett. A **182**, 335 (1993).
3. V. G. Nosov, A. I. Frank, Phys. of Atomic Nuclei **61**, 613 (1998).
4. A. I. Frank, V. A. Naumov, Phys. of Atomic Nuclei **76**, 1423 (2013).
5. A. I. Frank, P. Geltenbort, M. Jentschel, et al. Phys. of Atomic Nuclei **71**, 1656 (2008).
6. V. V. Voronin, Ya. A. Berdnikov, A. Ya. Berdnikov, JETP Lett. **100**, 497 (2014).
7. A. I. Frank, Physics-Uspokhi **63**, 500 (2020).
8. D. Bohm, Quantum Theory (New York: Prentice-Hall, 1951) p. 257-261.
9. E. P. Wigner, Phys. Rev. **98** 145 (1955).
10. M. A. Zakharov, G. V. Kulin and A. I. Frank, Eur. Phys. J. D **75**, 47 (2021).
11. A. I. Frank, JETP Letters **100**, 613 (2014).
12. J. Felber, R. Gähler, C. Rausch and R. Golub, Phys. Rev. A **53** 319 (1996).
13. V. A. Bushuev, A. I. Frank, Phys. Usp. **61**, 952 (2018).

**ОТРАЖЕНИЕ НЕЙТРОНОВ ОТ РЕЗОНАНСНОГО ПОТЕНЦИАЛА,
ОСЦИЛЛИРУЮЩЕГО В ПРОСТРАНСТВЕ**

М. А. Захаров, А. И. Франк, Г. В. Кулин*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*E-mail: zakharovmax@jinr.ru

Проблема взаимодействия частицы с потенциалом, изменяющимся во времени, исследовалась теоретически и экспериментально в большом числе работ. На возможность изучения нестационарных квантовых эффектов в экспериментах с нейтронами впервые обращалось внимание в работе А. С. Герасимова и М. В. Казарновского [1]. Р. Гейлер и Р. Голуб рассматривали явления, обусловленные быстрым однократным изменением условий распространения нейтронной волны [2, 3].

В. Носов и А. Франк обобщили случай однократного действия быстрого (квантового) прерывателя на случай его периодического действия [4], что привело позже к идее о модуляции нейтронной волны с помощью периодической структуры, дифракционной решетки, движущейся поперек направления распространения нейтронной волны [5].

В работе [6] обращалось внимание на то обстоятельство, что при скользящем падении нейтронов на границу области с периодически меняющимся потенциалом, волны с различающимися волновыми числами и энергиями должны характеризоваться и различными углами отражения и, следовательно, разделяться в пространстве. Это явление наблюдалось в работе [7] где теоретически и экспериментально исследовалось отражение очень холодных нейтронов от поверхности вибрирующего зеркала. Результаты эксперимента хорошо согласовывались с результатами расчета, основанного на решении уравнения Шредингера с переменными граничными условиями.

Отметим, что ни в одной из цитированных выше работ не затрагивался вопрос о соотношении периода изменения осциллирующего потенциала и характерного времени взаимодействия волнового пакета с потенциалом. В обычных условиях время отражения нейтронов от осциллирующего потенциала столь мало, что едва ли может оказывать сколько-нибудь заметное влияние на состояние отраженных волн. Можно, однако, ожидать, что в общем случае соотношение между временем взаимодействия и частотой осцилляции может быть существенным.

Для исследования этого вопроса мы обратились к потенциальной структуре, характеризующейся большим временем формирования отраженного состояния. В частности, для этой цели хорошо подходит двухступенчатая потенциальная структура [8]. Она обладает ярко выраженными резонансными свойствами и в условиях резонанса время полного отражения нейтронов от нее может превышать обычное на несколько порядков.

Теоретический анализ проблемы отражения нейтронов от такой структуры был выполнен тремя методами: на основе квазистационарного решения задачи, как это делалось в [6], решением уравнения Шредингера для осциллирующего потенциала на основе уравнений непрерывности [9], и путем численного решения методом расщепления оператора эволюции [10]. Из этих трех методов только последний, подразумевающий пошаговое нахождение решения в последовательные моменты времени, может быть в принципе чувствительным к величине времени отражения. В качестве численных значений параметров в задаче были взяты величины, характерные для ультрахолодных

нейтронов, как частиц, наиболее удобных для экспериментальной проверки полученных результатов.

Вне резонансных условий решения найденные всеми тремя способами хорошо совпадают между собой и с решением задачи об отражении от обычной потенциальной задачи. При выполнении резонансных условий, при значительном возрастании времени отражения численный метод дает результат отличный от всех остальных. Отличие заключается в существенном росте интенсивности пика нулевого порядка, соответствующему упругому отражению, за счет подавления пиков более высоких порядков, отвечающих рассеянию с передачей энергии (Рис. 1).

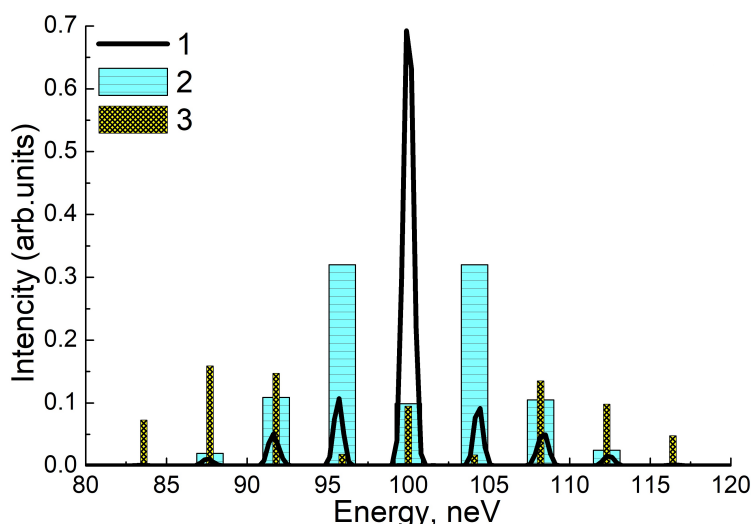


Рис. 1. Энергетические спектры отражённого состояния, полученные численным расчётом (кривая 1), в приближении малых амплитуд (2), и в квазистационарном приближении (3).

Проведённое дополнительно сравнение с отражением волны от аналогичной резонансной структуры неподвижной в пространстве, но с потенциалом, осциллирующим по величине, дает основание заключить, что указанное подавление линий ненулевого порядка в резонансе обусловлено не соотношением между частотой осцилляции и величиной времени отражения, а связано с фактом пространственной осцилляции потенциала. Можно предполагать, что какую-то роль здесь играет эффект ускорения [10], величина которого зависит от ускорения объекта, на котором рассеивается волна, и времени взаимодействия.

1. A. S. Gerasimov and M. V. Kazarnovskii, Sov. Phys. JETP **44**, 892 (1976).
2. J. Felber, G. Muller, R. Gähler and R. Golub, Physica B **162**, 191 (1990).
3. Th. Hils, J. Felber, R. Gähler et al., Phys. Rev. A **58**, 4784 (1998).
4. V. G. Nosov, A. I. Frank, J. Mosc. Phys. Society **1**, 1 (1991).
5. A. I. Frank, V. G. Nosov, Phys. Lett. A. **188**, 120 (1994).
6. A. I. Frank, D. B. Amandzholova, Ann. N.Y. Acad. Sci. **755**, 858 (1995).
7. J. Felber, R. Gähler, C. Raush and R. Golub, Phys. Rev. A **53**, 319 (1996).
8. G. V. Kulin, A. I. Frank, V. A. Bushuev et al., J SURF INVEST-X-RAY+ **14**, 127 (2020).
9. D.L. Haaving, R. Reifengerger, Phys. Rev. B **26**, 6408 (1982).
10. M. A. Zakharov, G. V. Kulin and A. I. Frank, Eur. Phys. J. D **75**, 47 (2021).

НЕСТАЦИОНАРНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ НЕЙТРОНОВ ПРИ ДИФРАКЦИИ НА ДВИЖУЩЕЙСЯ РЕШЕТКЕ И ПАВ

Г. В. Кулин*, А. И. Франк

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*E-mail: kulin@nf.jinr.ru

Нейтрон является очень подходящим объектом для демонстрации и исследования волновых свойств массивных частиц. Особый интерес представляет нестационарная нейтронная оптика, когда параметры, описывающие взаимодействие нейтронной волны с объектом, зависят от времени.

В девятые годы прошлого столетия было осознано, что периодическая структура, двигающаяся поперек монохроматического пучка нейтронов, формирует дискретный спектр [1]. Фактически, эта работа, в которой обсуждался не только сам квантовый феномен, но и возможность его наблюдения, положила начало длительному периоду исследования дифракции нейтронов на движущейся решетке. В 2001 г. первый эксперимент по наблюдению нестационарной дифракции нейтронов на движущейся решетке был осуществлен [2] с ультрахолодными нейтронами (УХН) (Рис. 1).

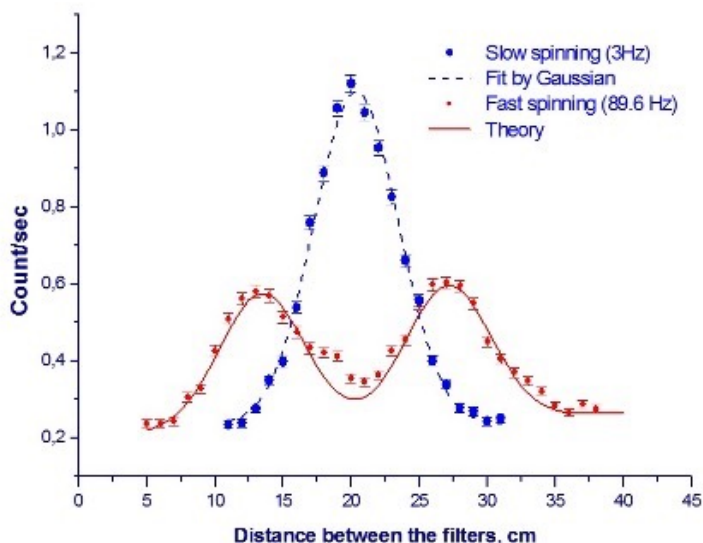


Рис. 1. Первая демонстрация расщепления энергетического спектра УХН при дифракции на движущейся решетке.

Проведённое дополнительно сравнение с отражением волны от аналогичной резонансной структуры неподвижной в пространстве, но с потенциалом, осциллирующим по величине, дает основание заключить, что указанное подавления линий ненулевого порядка в резонансе обусловлено не соотношением между частотой осцилляции и

величиной времени отражения, а связано с фактом пространственной осцилляции потенциала. Можно предполагать, что какую-то роль здесь играет эффект ускорения [10], величина которого зависит от ускорения объекта, на котором рассеивается волна, и времени взаимодействия.

Позже появилось понимание, что с помощью аperiодической движущейся структуры можно создать временную нейтронную линзу, являющуюся временным аналогом зонной пластинки Френеля [3]. Возможность временной фокусировки была продемонстрирована в эксперименте [4]. Совсем недавно было осознано, что принцип временной фокусировки может послужить методической основой для создания интенсивных источников УХН на импульсных реакторах периодического действия [5].

Развитие гравитационной спектроскопии состояний с дискретным спектром, возникающих при дифракции на движущейся решетке, привело к идее о возможности осуществления гравитационного эксперимента по проверке слабого принципа эквивалентности [7]. Эксперимент был успешно осуществлен [8].

В работах [1-8] дифракция УХН на движущейся решетке рассматривалась в рамках кинематического приближения, в котором решетка фактически полагается плоским объектом. Практическое же использование данного явления потребовало создания более корректной теории [9] и нового метода спектрометрии дискретных спектров при дифракции на движущейся решетке, а именно – времяпролетной Фурье-дифрактометрии УХН [10]. Спектры такого рода успешно наблюдались [11] в эксперименте (Рис. 2).

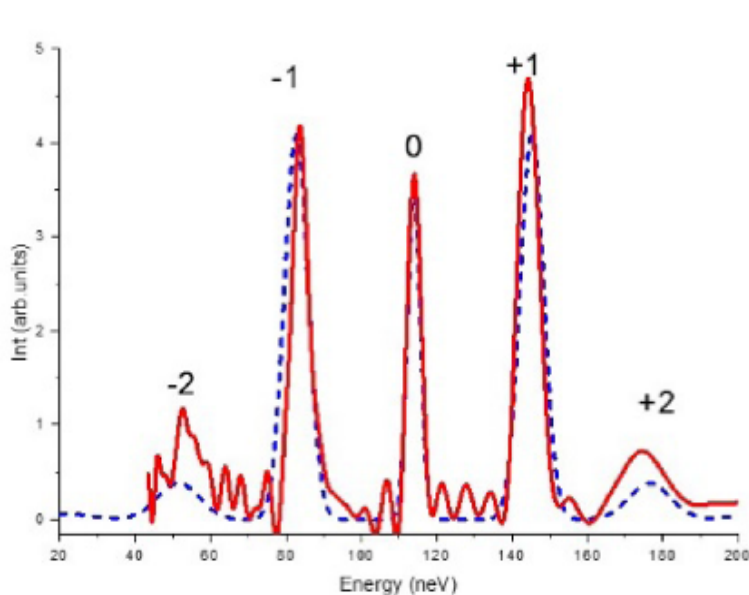


Рис. 2. Энергетический спектр нейтронов, дифрагированных на движущейся решетке, измеренный времяпролетным Фурье-дифрактометром. Эксперимент (сплошная кривая) и теория (пунктир).

Физически родственным феноменом дифракции на движущейся решетке является дифракция на бегущей поверхностной акустической волне (ПАВ). Впервые возможность неупругого процесса дифракции нейтронов на поверхностных (рэлеевских) вол-

нах обсуждалась в работе [12]. Прямой эксперимент по наблюдению дифракции нейтронов на ПАВ был проведен в 1987 году [13]. Совсем недавно были осуществлены эксперименты [14] по дифракции нейтронов на бегущих и стоячих ПАВ (Рис. 3).

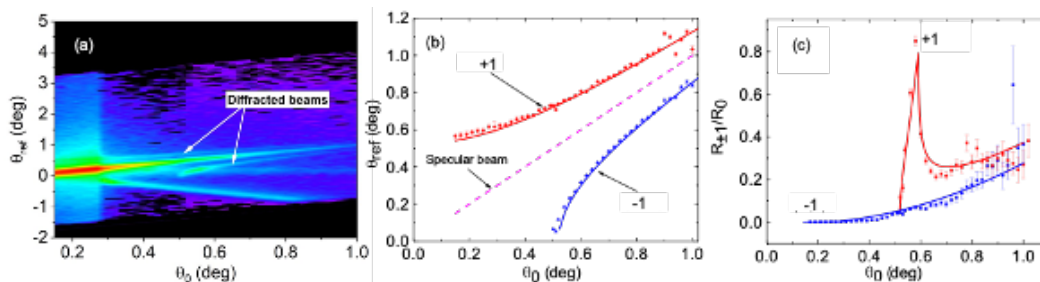


Рис. 3. 2D-карта рассеяния (а), угловые распределения (б) и амплитуды +1 и –1 дифрагированных пучков (в) в зависимости от угла падения для случая бегущей ПАВ.

1. A. I. Frank, V. G. Nosov, Phys. Lett. A **188**, 120 (1994).
2. A. I. Frank, S. N. Balashov, I. V. Bondarenko et al., Phys. Lett. A **311**, 6 (2003).
3. А. И. Франк, Р. Гэйлер, Ядерная Физика **63**, 605 (2000).
4. S. N. Balashov, I. V. Bondarenko, A. I. Frank et al., Physica B **350**, 246 (2004).
5. А. И. Франк, Г. В. Кулин, Н. В. Реброва, М. А. Захаров, Препринт ОИЯИ РЗ-2021-22 (2021).
6. A. I. Frank, S. V. Masalovich, V. G. Nosov, Proc. ISINN-12 JINR E3-2004-169, 215 (2004).
7. А. И. Франк, П. Гелтенборт, М. Жентшель, Письма в ЖЭТФ **86**, 255 (2007).
8. В. А. Бушуев, А. И. Франк, Г. В. Кулин, ЖЭТФ **149**, 41 (2016).
9. G. V. Kulin, A. I. Frank, S. V. Goryunov et al., NIM A **819**, 67 (2016).
10. G. V. Kulin, A. I. Frank, S. V. Goryunov et al., Phys. Rev. A **93**, 033606 (2016).
11. I. M. Frank, JINR Communications R4-8851 (1975).
12. W. A. Hamilton, A. G. Klein, G. I. Opat and P. A. Timmins, Phys. Rev. Lett. **58**, 2770 (1987).
13. G. V. Kulin, A. I. Frank, V. A. Bushuev et al., Phys. Rev. B **101**, 165419 (2020).

ИСТОЧНИК УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ ДЛЯ РК ПИК

А. П. Серебров, В. А. Лямкин, А. К. Фомин, М. С. Онегин*

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

*E-mail: lyamkin_va@pnpi.nrcki.ru

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ создается высокоинтенсивный источник ультрахолодных нейтронов (УХН) для научных исследований в области фундаментальной физики и физики твёрдого тела. В источнике на базе РК ПИК будет использоваться сверхтекучий гелий, который позволит достичь плотности ультрахолодных нейтронов $2.2 \cdot 10^3$ н/см³, которая ещё нигде в мире не достигнута, что сдерживает прогресс в фундаментальных и прикладных научных исследованиях [1]. Использование сверхтекучего гелия существенно превышает интенсивность существующих в мире источников ультрахолодных нейтронов.

В области фундаментальной физики ультрахолодные нейтроны используются для измерения электрического дипольного момента и времени жизни самого нейтрона, а также для изучения асимметрии нейтронного β -распада [2]. Стоит отметить, что наиболее точные эксперименты по поиску ЭДМ нейтрона [3] и прецизионному измерению времени жизни свободного нейтрона [4] были выполнены именно с использованием ультрахолодных нейтронов, и точность проведенных измерений уже ограничена статистикой нейтронов (возможностями существующих источников УХН). Эти эксперименты и планируемые прецизионные корреляционные исследования β -распада нейтрона имеют решающее значение для физики фундаментальных взаимодействий: они связаны с решением проблем Стандартной Модели (СМ) при описании СР-нарушения и объяснении наблюдаемых космологических фактов (барионная асимметрия Вселенной). Именно поэтому данное научное направление – использование ультрахолодных нейтронов для изучения фундаментальных взаимодействий – активно развивается в последнее время.

Источник УХН будет установлен на самый большой из имеющихся экспериментальных каналов РК ПИК – горизонтальный экспериментальный канал ГЭК4. Диаметр канала – 220 мм. Плотность потока тепловых нейтронов на выходе из канала ожидается на уровне $3 \cdot 10^{10}$ см⁻²с⁻¹. На фланце канала будет расположена носовая части источника УХН, в состав которой входят: графитовый замедлитель, низкотемпературный предзамедлитель и конвертор нейтронов из сверхтекучего гелия.

1. А. П. Серебров, Вестн. Рос. академии наук **1**, 23 (2009).
2. А.П. Серебров, Успехи физических наук **11**, 1179 (2015).
3. С. Abel et al., Physical Review Letters. **8**, 124, 081803 (2020).
4. А.П. Серебров, Успехи физических наук **6**, 635 (2019).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ С УЛЬТРАХОЛОДНЫМИ НЕЙТРОНАМИ НА РЕАКТОРЕ ПИК

*А. К. Фомин**, *А. П. Серебров*

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

*E-mail: fomin_ak@npfi.nrcki.ru

Данная работа посвящена моделированию комплекса исследований с ультрахолодными нейтронами (УХН) на реакторе ПИК. Комплекс создается на базе высокоинтенсивного источника УХН на канале ГЭК-4. Разработана Монте-Карло модель, включающая в себя источник, нейтроноводную систему и экспериментальные установки с учетом их реального расположения в главном зале. Нейтроноводная система включает в себя разветвитель, затворы и разделительные фольги. При помощи расчетов можно получить абсолютные значения счетов нейтронных детекторов в установках.

Источник УХН основан на использовании сверхтекучего гелия [1]. Объем камеры источника составляет 35 л. Время хранения в сверхтекучем гелии составляет 100 с при температуре 1 К. При $\Phi(\lambda = 9 \text{ \AA}) = 1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$, скорость производства УХН в сверхтекучем гелии составляет $100 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$. Камера имеет внутри напыление $^{58}\text{NiMo}$ с граничной скоростью 7.8 м/с и коэффициентом потерь $3 \cdot 10^{-4}$. Плотность УХН в закрытой камере источника составляет $3.5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$. На источнике запланирована программа фундаментальных исследований [2], включающая в себя эксперименты по поиску электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона и измерению времени жизни нейтрона.

Для тестирования элементов источника создан испытательный стенд. Разработана программа для моделирования этого стенда. При моделировании стенда могут тестироваться камеры хранения, нейтроноводные системы с поворотами, разветвительные тройники, прерыватели пучка, решетки и фольги мембранных узлов. В программу включен турбулизатор, стоящий на входе в стенд и служащий для преобразования спектра нейтронов, идущего от источника.

В эксперименте по поиску ЭДМ нейтрона используется двухкамерный магниторезонансный спектрометр с длительным удержанием УХН [3]. В результате моделирования эксперимента получено, что плотность УХН в камерах спектрометра составит 200 см^{-3} . Это в 50 раз выше, чем на источнике УХН в Институте Лауэ-Ланжевена (ИЛЛ). Такая плотность позволит достичь чувствительности измерений $1 \cdot 10^{-27} \text{ е.см/год}$.

В эксперименте по измерению времени жизни нейтрона используется установка с большой гравитационной ловушкой УХН [4]. Учет потерь УХН на стенках ловушки осуществляется методом размерной экстраполяции. В результате моделирования эксперимента получено, что счет детектора при сливах будет увеличен в 16 раз по сравнению с ИЛЛ, что позволит достичь статистической точности результата измерения 0.2 с.

Представленные расчеты произведены в том числе с использованием Центра обработки данных реактора ПИК.

1. A. P. Serebrov and A. K. Fomin, Technical Physics **60**, 1238 (2015).
2. A. P. Serebrov et al., Physics of Atomic Nuclei **79**, 293 (2016).
3. A. P. Serebrov et al., Physical Review C **92**, 055501 (2015).
4. A. P. Serebrov et al., Physical Review C **97**, 055503 (2018).

ПОИСК НОВЫХ МЕЖНУКЛОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В РАССЕЯНИИ НЕЙТРОНОВ НА ЯДРЕ

В. В. Воронин, Д. Д. Шапиро*

Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

*E-mail: shapiro@mail.ru

Устный доклад

Известно, что в природе существует 4 вида взаимодействия – сильное, слабое, электромагнитное и гравитационное, однако в литературе широко обсуждается возможность существования других взаимодействий, выходящих за рамки Стандартной Модели физики частиц [1 – 3].

В данной работе рассматривается применение метода нейтронного рассеяния, в частности порошковой дифракции на кремнии, для наложения ограничений на константу связи новых межнуклонных спин-независимых сил, осуществляемых массивными бозонами.

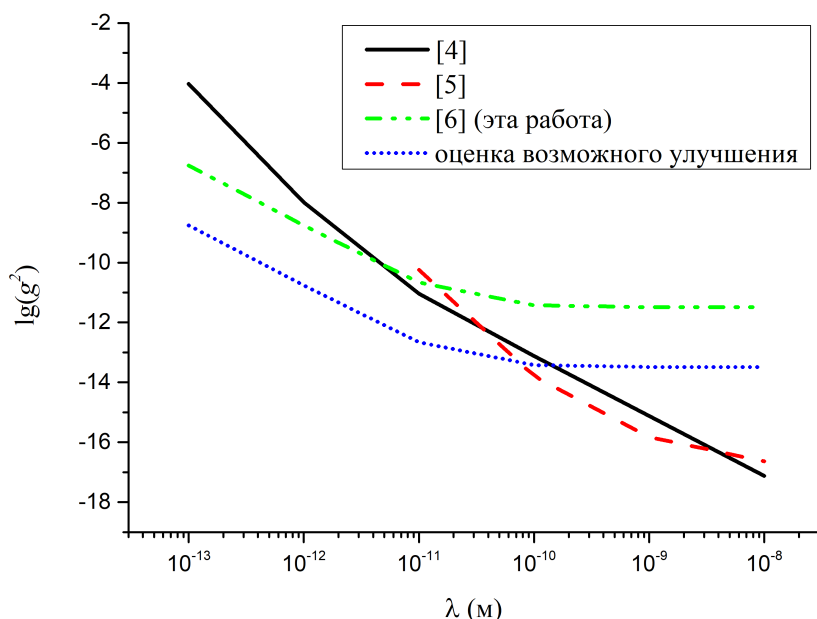
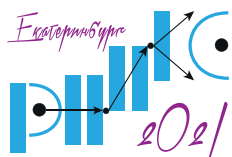


Рис. 1. Ограничения на константу связи g нового межнуклонного спин-независимого взаимодействия в зависимости от радиуса взаимодействия λ . Разрешённая область значений расположена под линиями.

Суть метода состоит в получении зависимости амплитуды рассеяния нейтронов от переданного импульса (или от угла рассеяния) из данных порошковой дифракции. Анализ этой зависимости позволяет получить искомые ограничения на константу связи. В



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

рамках настоящей работы был проведен расчет, показывающий состоятельность описанного метода. Из калибровочных данных, полученных на дифрактометрах SPODI (FRM II, Мюнхен, Германия) и D1B (ILL, Гренобль, Франция), были вычислены ограничения на константу связи нового взаимодействия. Показано, что они находятся на уровне лучших существующих значений (Рис. 1). Получена оценка систематической погрешности.

В сентябре 2020 был проведен эксперимент на дифрактометре D20 (ILL, Гренобль, Франция) с целью улучшения искомых ограничений на константу связи. В настоящий момент идет обработка полученных данных.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90202.

1. I. Antoniadis, S. Baessler, M. Buchner, et al., C.R. Physique **12**, 755 (2011).
2. J. Murata and S. Tanaka, Clas. Quantum Gravity **32**(3), 033001 (2015).
3. B. A. Dobrescu and I. Mocioiu, JHEP **11**, 005 (2006).
4. V. V. Nesvizhevsky, G. Pignol, K. V. Protasov, Phys.Rev. D **77**, 034020 (2008).
5. Y. Kamiya, K. Itagaki, M. Tani, et al., Phys. Rev. Lett. **114**, 161101 (2015).
6. В. В. Воронин, И. А. Кузнецов, Д. Д. Шапиро, Письма в ЖЭТФ **107**, 3 (2018).

ЭФФЕКТЫ НЕЙТРОННОЙ ОПТИКИ ВБЛИЗИ БРЭГГОВСКОГО ОТРАЖЕНИЯ В ОСЦИЛЛИРУЮЩЕМ КРИСТАЛЛЕ

*В. В. Федоров, В. В. Воронин, С. Ю. Семенухин, Ю. П. Брагинец and М. В. Ласица**

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, РФ

*E-mail: lasitsa_mv@pnpi.nrcki.ru

Нейтрон в идеальном кристалле взаимодействует со всем ансамблем атомных ядер. В периодической структуре последнего, возможно выделить системы кристаллографических плоскостей, каждая из которых будет определяться вектором обратной решетки g . Представление периодического потенциала кристалла, посредством Фурье преобразования, позволяет сопоставить каждой, из полученного набора гармоник V_g , собственную систему плоскостей. В случае выбора одной системы плоскостей в двухволновом приближении, энергия нейтрона в кристалле будет определяться как:

$$\tilde{E}_k = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^2} = E_0 - V_0 - \frac{\Delta_B}{\Delta_B^2 + 1} V_g \quad (1)$$

Где E_k — энергия нейтрона в кристалле, E_0 — энергия падающего нейтрона, V_0 — средний потенциал кристалла, Δ_B — параметр отклонения от условия Брэгга.

Для каждой системы плоскостей определено условие дифракции по Брэггу. При приближении к его точному выполнению гармоника потенциала связанная с данной системой плоскостей резонансно возрастает. Последнее влияет на изменение энергии нейтрона при пересечении границы входной и выходной поверхности. В стационарном случае изменение энергии нейтрона на входной и выходной поверхности идентично. Но если, за время пребывания нейтрона в кристалле, отклонение от условия Брэгга на выходной поверхности будет отличаться от такового на входной, то покинувший кристалл нейтрон будет обладать отличной энергии, чем падающий.

$$\Delta \tilde{E}_k = \frac{1 - \Delta_{B_0}^2}{(1 + \Delta_{B_0}^2)^2} 4 \frac{E_B}{v_n} \Delta v(t_1) \quad (2)$$

Где Δ_{B_0} — параметр отклонения от условия Брэгга связанный с тепловым расширением кристалла, E_B — энергия соответствующая точному выполнению условия Брэгга, v_n — скорость нейтрона, $\Delta v(t_1)$ — разность относительной скорости на входной и выходной поверхности.

Эксперимент был проведен лабораторией рентгеновской и гамма спектроскопии ПИЯФ. Эффект изменения энергии нейтрона наблюдался на кристалле кварца с плоскостью (110) при угле Брэгга $\Theta = 89^\circ$. Кристалл был установлен на осциллирующей станине, частота колебаний которой составляла 4.461 кГц. Длина кристалла вдоль направления нейтронов равнялась 50 мм, что дало время пребывания нейтрона в кристалле 63 мкс при периоде и амплитуде колебаний соответственно 222 мкс и 0.11 мкм. Таким образом, за время нахождения нейтрона в кристалле, сдвиг фазы его колебания составлял $\approx \pi/4$. Что дало разность отклонений от условий Брэгга на входной и выходной поверхности.

Сдвиг фазы колебания позволил получить изменение энергии нейтрона на величину 45 ± 5 нЭв, а полная обработка данных позволила восстановить форму V_g гармоники потенциала Рис. 1.

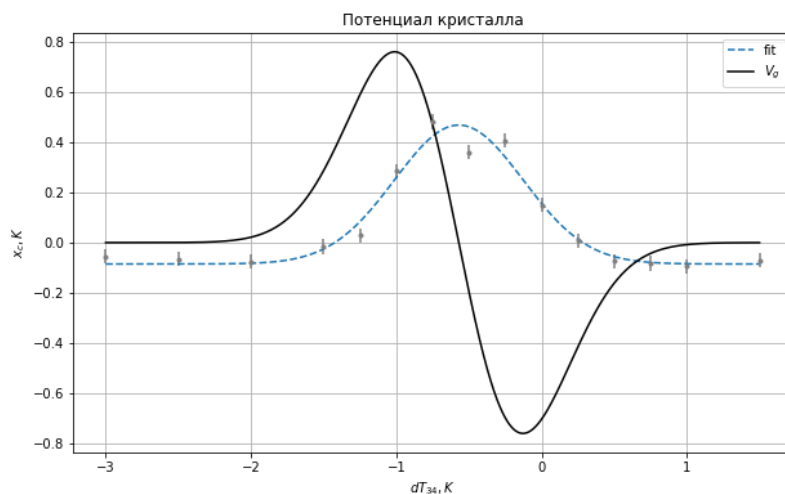


Рис. 1. Потенциал кристалла в единицах теплового расширения кристалла кварца, вблизи выполнения условия Брэгга. Серыми точками указано изменение энергии нейтрона в единицах теплового расширения кристалла. Пунктирная линия соответствует аппроксимации изменения энергии нейтрона. Черная линия соответствует форме потенциала кристалла, полученной путем дифференцирования аналитического выражения аппроксимации.

1. Yu.P. Braginetz, Ya.A. Berdnikov, V.V. Fedorov, et al., Physica B: Physics of Condensed Matter (2017).
2. Ю.П. Брагинец, Я.А. Бердников, В.В. Федоров, и др., Ядерная физика **80**(1), 39 (2017).

Секция 11.

**Реактор ПИК: научная программа
приборной базы**

ФИЗИКА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ С НЕЙТРОНАМИ И НЕЙТРИНО НА РЕАКТОРЕ ПИК

А. П. Серебров*

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

*E-mail: serebrov_ap@pnpi.nrcki.ru

В современной физике элементарных частиц тесно переплелись и космология, и свойства Вселенной на ранней стадии образования, и собственно структура элементарных частиц и их взаимодействий, ядерная физика и физика фазовых превращений. Один из путей получения новых данных в этой области – это увеличение точности измерений в физике низких энергий, в частности в нейтронной физике. Для этой цели необходимы высокоинтенсивные источники нейтронов, поскольку для увеличения точности необходимо увеличение статистики; кроме того, необходимы также новые идеи, методики и нестандартное оборудование.

На реакторе ПИК создается источник для производства ультрахолодных нейтронов (УХН) с плотностью, в 10 – 100 раз превышающей плотность УХН на существующих в мире источниках. Такое увеличение интенсивности УХН будет достигнуто за счет применения новой технологии со сверхтекучим гелием. На источнике УХН запланирована программа исследований фундаментальных взаимодействий, включающая в себя поиск электрического дипольного момента нейтрона и прецизионное измерение его времени жизни. Обе задачи имеют принципиальное значение для физики элементарных частиц и космологии.

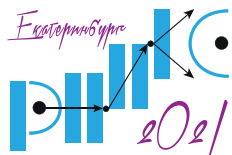
Эксперимент по поиску электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона связан с общей проблемой теории элементарных частиц: адекватным описанием процессов, идущих с нарушением CP- и T-симметрии. Величина ЭДМ в современных теоретических моделях возникает в первом порядке слабого взаимодействия и оказывается на уровне 10^{-26} – 10^{-28} э.см.

Создание нового источника УХН на реакторе ПИК с плотностью на два порядка выше, чем в ИЛЛ, позволит получить точность измерений ЭДМ на уровне лучше чем 10^{-27} э.см. Обнаружение ЭДМ нейтрона либо новое ограничение на его величину на таком уровне может стать решающим фактором при выборе теории, адекватно описывающей явления нарушения CP-симметрии.

Создается также установка «ЭДМ нейтрона кристалл-дифракционным методом» (DEDM). Основная идея заключается в использовании гигантских электрических полей нецентросимметричного кристалла. Величина полей на всем пути нейтрона через кристалл составляет 10^8 – 10^9 В/см, что более чем в 10^4 раз превышает поля, достижимые в лаборатории обычными методами. При поиске ЭДМ нейтрона возможно достижение точности $(2 - 3) \times 10^{-27}$ э.см с использованием нового класса кристаллов (BSO, BGO).

Увеличение точности измерения времени жизни нейтрона позволит проверить справедливость теоретических моделей нуклеосинтеза в ранней Вселенной и справедливость Стандартной Модели элементарных частиц. В установке используется принцип гравитационного затвора для удержания УХН в материальной ловушке. Плотность УХН в новой ловушке примерно в 30 раза больше, чем в предыдущей. Ожидается, что точность измерения времени жизни нейтрона в данной установке составит 0.2 с.

Установка для измерения времени жизни нейтрона с использованием магнитного хранения УХН (МТ). Магнитное удержание нейтронов позволяет исключить соударение нейтронов со стенками. В магнитной ловушке УХН определенной поляризации отражаются



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

магнитным барьером и не испытывают соударений со стенками. Задача данного эксперимента – достичь статистической чувствительности в измерении времени жизни нейтрона на уровне 0.3 с.

Установка «Бета-распад нейтрона». Основная цель эксперимента – измерение электронной асимметрии β -распада нейтрона с относительной точностью $(1 - 2) \times 10^{-3}$. Основу экспериментальной установки составляет сверхпроводящий соленоид с напряженностью магнитного поля 0.35 Тл в области однородного поля и 0.80 Тл в области магнитной пробки при токе 1000 А.

Установка «Нейтрино». Стерильное нейтрино является кандидатом в частицы темной материи. Гипотеза осцилляций в стерильное состояние может быть проверена прямым измерением зависимости нейтринного потока и нейтринного энергетического спектра на различных расстояниях в диапазоне 6 – 12 м. Реактор ПИК открывает замечательные возможности для таких исследований благодаря компактной зоне и большой мощности реактора. Ожидаемая скорость счета антинейтринных событий для детектора объемом 2 м³ на расстоянии 8 м от активной зоны реактора ПИК может составлять ~800 в сутки.

Поиск зеркальной темной материи в лабораторном эксперименте с ультрахолодными нейтронами. Из-за нарушения пространственной инвариантности слабого взаимодействия наш мир оказался левым. Причина такого неравноправия левого и правого неизвестна. Стандартная Модель успешно объясняет, как устроено слабое взаимодействие, но не объясняет почему выбор пал на левый (V-A) вариант теории. В принципе, если существует левая асимметрия, то почему не может существовать правая, т.е. ее зеркальное отображение?

Измерения уже проводились в ИЛЛ на пучке УХН, подготовленном ПИЯФ для ЭДМ-эксперимента. Эффект осцилляций не был обнаружен, а предел на время осцилляций составил 448 с, соответствующий предел на энергию смешивания составляет 1.4×10^{-18} эВ. На реакторе ПИК этот предел может быть значительно улучшен благодаря высокоинтенсивному источнику УХН.

На реакторе ПИК планируется создать *уникальный комплекс для получения и исследования экзотических короткоживущих изотопов – проект ИРИНА (Исследование Радиоактивных Изотопов на Нейтронах)*. Он будет обладать рекордными параметрами выхода нейтронно-избыточных ядер за счет высокого потока тепловых нейтронов на образце и оптимальной системы организации вывода ядер.

Установка исследования множественности осколков деления (FISCO). Создаваемая установка располагается в зале наклонных каналов на нейтронном пучке НЭК-2 реактора ПИК и предназначена для корреляционных исследований в делении ядер при помощи разных методов: исследования распределений множественности нейтронов деления в зависимости от характеристик осколков деления и делящихся систем; изучения угловых и энергетических корреляций нейтронов, β -квантов и третьих частиц в делении.

Спектрометр ядерных излучений (PROGRAS). Спектрометр ядерных излучений PROGRAS будет использоваться для исследований структуры атомного ядра в (n, γ) -реакциях на тепловых нейтронах по спектрам совпадений $(\gamma - \gamma)$, нейтронно-радиационного анализа элементного и изотопного состава образцов, а также для измерения сечения взаимодействия нейтронов с веществом.

Установка нейтронно-активационного анализа (ИНАА). Установка позволит определять содержание Li, B, N, O, F, Ne, Al, V, Pb в образцах по их короткоживущим изотопам, что невозможно сделать обычными методами нейтронно-активационного анализа. Эта открывает уникальную возможность определять эти элементы в сверхтвердых и жаростойких сплавах, от содержания которых очень сильно зависят их свойства, исследовать геологические образцы и биологические объекты.

УСТАНОВКИ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ НА РЕАКТОРЕ ПИК

Л. А. Азарова^{1,2}, Е. Г. Яшина^{1,2}, Е. В. Алтынбаев^{1,2}, Д. О. Сканченко¹, Ю. О. Четвериков¹,
Л. А. Аксельрод¹, Г. П. Копица¹, С. В. Григорьев^{1,2*}

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

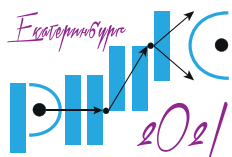
*E-mail: grigoryev_sv@npfi.nrcki.ru

В Петербургском Институте Ядерной Физики (НИЦ «Курчатовский институт») приступили к созданию приборной базы реактора ПИК. Малоугловое рассеяние нейтронов (МУРН) — одна из ключевых, наиболее востребованных методик, используемых в исследованиях конденсированного вещества с помощью нейтронов. Метод нашел свое применение во всем спектре научных дисциплин: физике, химии, биологии, материаловедении, инженерии и геонауке. Малоугловое рассеяние нейтронов — это неразрушающий дифракционный метод, в котором рассеяние холодных нейтронов на крупномасштабных неоднородностях (от 1 нанометра до 10 микрометров) происходит на малые углы.

Доклад посвящен реализации планов по созданию установок МУРН на базе реактора ПИК, среди которых установки «TENZOR», «MEMBRANA», «SANS2» и «SESANS». Установки «TENZOR» и «SANS2» создаются для решения задач, связанных с магнетизмом и материаловедением. Установка «MEMBRANA» предназначена для исследований в области биологии, физики полимеров, материаловедения и изучения кинетики в образцах. Установка «SESANS» занимает нишу ультрамалоугловых машин, и рассчитана на исследование внутренней структуры ядра биологической клетки, распределения размеров пор в керамике, частиц в порошке или коллоидах.

Установки «TENZOR» и «SANS2» сконструированы как классические монохроматические высокопоточные малоугловые установки мирового класса с возможностью использования поляризованных нейтронов. При измерениях в стандартном режиме монохроматизация первичного пучка нейтронов будет происходить на селекторе скоростей нейтронов (в соответствии с требуемым диапазоном углов рассеяния), для получения поляризованного пучка нейтронов будет использован трансмиссионный суперзеркальный поляризатор, коллимация пучка нейтронов будет осуществляться с помощью системы щелей, покрытых поглощающим нейтроны веществом (в соответствии с требуемым диапазоном углов рассеяния), далее будет происходить рассеяние монохроматического и сколимированного пучка нейтронов на образце, и регистрация рассеянных нейтронов двумерным позиционно-чувствительным детектором с опцией перемещения вдоль оси трубы детекторной системы.

Установка «MEMBRANA» сконструирована для работы и в монохроматическом, и во время-пролетном режимах. Время-пролетный режим работы вместе с двухдетекторной системой регистрации открывает возможности для проведения экспериментов, таких, например, как измерения *in-situ* и кинетики. Предполагается, что прибор отличается гибкостью в выборе разрешения, одномоментным широким диапазоном переданных импульсов, а также высокой скоростью измерений. При измерениях в монохроматическом режиме происходит монохроматизация первичного пучка нейтронов на селекторе скоростей нейтронов (в соответствии с требуемым диапазоном углов рассеяния), затем коллимация пучка в коллимационной системе (в соответствии с требуемым



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

● → ● → ● → Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

диапазоном углов рассеяния), далее — рассеяние монохроматического и сколимированного пучка нейтронов на образце, и регистрация рассеянных нейтронов системой из нескольких двухмерных позиционно-чувствительных детекторов с возможностью перемещения вдоль оси трубы детекторной системы. При измерениях в полихроматическом режиме подготовка импульсной структуры пучка и его спектрального распределения осуществляется системой из четырех прерывателей и зеркального фильтра.

Установка «SESANS» предназначена для исследований неоднородностей вещества в диапазоне, покрывающем три порядка по шкале размеров от 100 нм до 40 мкм. В основе работы прибора лежит один из вариантов метода спинового эха, в котором реализуется прецессия вектора поляризации нейтронного пучка в двух идентичных областях с равным по величине и противоположно направленным постоянным магнитным полем («два плеча установки»). При прохождении пучка поляризованных нейтронов через каждое «плечо установки» происходит прецессия вектора поляризации вокруг направления магнитного поля. Угол поворота поляризации пропорционален величине поля, длине пути нейтрона и времени нахождения нейтрона в данном поле. Поскольку области идентичны, а поворот поляризации в них идет в противоположные стороны, то поляризация на выходе установки совпадает с поляризацией на входе. Если между «плечами установки» расположить исследуемый образец, при взаимодействии с которым нейтроны меняют свою траекторию движения, то поворот поляризации во втором «плече установки» уже не будет равным повороту в первом плече, и эта разница несет информацию о процессе взаимодействия нейтронов с образцом. SESANS отличается от установок классического спинового эха тем, что области прецессии имеют форму параллелограмма. Это приводит к тому, что после изменения направления траектории движения в результате рассеяния нейтронов на образце, длина пути в магнитном поле второго плеча установки сильно изменяется, и угол рассеяния оказывается связанным с измеряемым изменением поляризации. Кроме того, в предлагаемом варианте установки предусмотрено использование адиабатических радиочастотных флипперов, что приведет к удвоению фазы прецессии за счет «прецессии в нулевом поле» и, соответственно, расширению диапазона измеряемых размеров структурных неоднородностей.

В докладе будут представлены основные параметры и характеристики установок.

КОМПЛЕКС СПЕКТРОМЕТРОВ НА РЕАКТОРЕ ПИК

*И. А. Зобкало**

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

*E-mail: zobkalo_ia@pnpi.nrcki.ru

В докладе представлен обзор установок неупругого рассеяния нейтронов, создаваемых в настоящее время рамках Приборной программы реактора ПИК. Нейтронная спектроскопия открывает широкие возможности по изучению динамики вещества методами неупругого нейтронного рассеяния. Изучение особенностей дисперсии акустических фононов, мягких фононов, спиновых волн, квазиупругого рассеяния, а также тонкое изучение модулированных структур методами нейтронного рассеяния дает уникальную информацию о взаимодействиях, эффективных в твердом теле, формирующих ту или иную структуру в веществе. Нейтронная спектроскопия также может быть использована для изучения динамики неупорядоченных сред, таких, как аморфные системы и спиновые стекла.

Комплекс нейтронных спектрометров настоящей Приборной программы состоит из трех трехосных спектрометров и одного спектрометра по времени пролета (Рис. 1). Будучи самым мощным в мире источником тепловых нейтронов с постоянным потоком, реакторный комплекс ПИК должен быть оснащен, в том числе, самыми современными установками для исследования неупругих процессов в веществе. В первую очередь, это относится к созданию трехосных спектрометров, для эффективной работы которых необходима высокая интенсивность тепловых нейтронов. Трехосные спектрометры – это своеобразные рабочие лошади нейтронной спектроскопии, являются основными инструментами для глубоких исследований неупругих процессов в твердом теле.

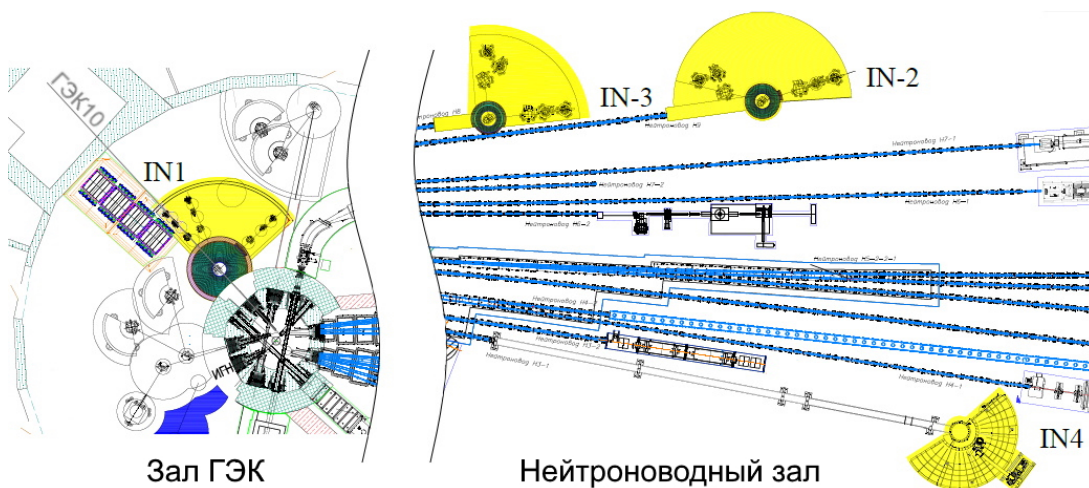
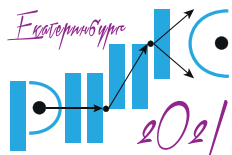


Рис. 1. Схема расположения спектрометров на РК ПИК.

Трехосные спектрометры имеют существенное преимущество перед времяпролетными спектрометрами в тех ситуациях, когда исследуется большое количество диспер-



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

сионных ветвей. Кроме того, трехосные спектрометры незаменимы, когда нужно провести детальное исследование конкретных участков зоны Бриллюэна, где различные дисперсионные ветви энергетически близки друг к другу и имеют различные интенсивности рассеяния. Метод трехосной спектроскопии позволяет настроить спектрометр на измерения в любой точке пространства энергия-импульс, субъектами исследований являются монокристаллы. Нейтронный спектрометр по времени пролета предназначен для измерений спектров неупругого рассеяния нейтронов в различных материалах, как упорядоченных, так и неупорядоченных, в широком диапазоне переданных импульсов и энергий.

Спектрометр тепловых нейтронов IN1 предназначен для исследования неупругого рассеяния нейтронов на коллективных возбуждениях. Диапазон энергий нейтронов $E_i = 15 - 100$ мэВ.

Спектрометр холодных нейтронов IN2 предназначен для исследования с хорошим разрешением неупругого рассеяния нейтронов на коллективных возбуждениях с низкими энергиями.

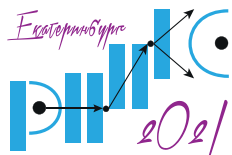
- Диапазон энергий нейтронов $E_i = 2.3 - 36$ мэВ;
- Энергетическое разрешение $\Delta E \leq 25; 80; 120$ мэВ для энергий падающих нейтронов 2.3, 4 и 5 мэВ.

В **спектрометре поляризованных нейтронов IN3** наряду с анализом энергии проводится анализ спинового состояния рассеянных на образце нейтронов. Это обеспечит эффективное решение сложных ситуаций с близкими по энергии/импульсу магнитными и решеточными возбуждениями.

- Диапазон энергий нейтронов $E_i = 15 - 100$ мэВ;
- Поляризация $P \geq 95\%$.

Характеристики **спектрометра IN4**:

- Диапазон энергий нейтронов $E_i = 0.5 - 20$ мэВ;
- Энергетическое разрешение ΔE в позиции упругого пика не хуже 5%.



ДИФРАКТОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС РЕАКТОРНОГО КОМПЛЕКСА ПИК

А. И. Курбаков*

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

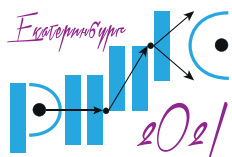
*E-mail: kurbakov_ai@npfi.nrcki.ru

Точное знание деталей атомной и магнитной структуры материалов является основой для правильной трактовки и понимания их физических свойств и дает возможность целенаправленно изменять эти свойства. Дифракции нейтронов наиболее эффективна в структурном анализе соединений, состоящих из легких и тяжелых атомов (гидриды, оксиды), материалов с близкими по номеру элементами (сплавы, интерметаллиды), биологических соединений с применением изотопического контрастирования (в основном с заменой водорода на дейтерий) их отдельных фрагментов и анализ магнитной структуры кристаллов, т.е. определение величины и направления атомных магнитных моментов. Общий технический прогресс и новые идеи в конструкции дифрактометров, формировании нейтронных пучков и создании детекторных систем позволили достичь таких возможностей в нейтронодифракционных исследованиях, которые еще 15 – 20 лет тому назад казались немыслимыми. В настоящее время возможны определение *ab initio* структуры кристаллов, уточнение сложной структуры как обычных, так и наноматериалов, анализ локальных искажений структуры с точностью $\sim 0.1 \text{ \AA}$, анализ переходных процессов с характерными временами на уровне 10 с, работа с образцами, объем которых составляет $\sim 1 \text{ мм}^3$. Уникальной областью применения нейтронной дифракции является исследование магнитной структуры кристаллов на атомном уровне, т.е. пространственного распределения магнитной плотности. При этом комплексное использование дифракции как неполяризованных, так и поляризованных нейтронов дает уникальную дополнительную информацию как о дальнем магнитном порядке, так и о локальных спиновых корреляциях и позволяет описать всю температурную эволюцию формирования магнитного упорядочения.

На реакторе ПИК будет построен комплекс нейтронных дифрактометров. Главным принципом выбора типов приборов первой очереди стал принцип максимальной специализации. При этом в приоритете будут дифрактометры, которые позволят решать широкий круг как самых фундаментальных, так и прикладных задач.

Согласно плану реализации в конце 2022 г. должен быть создан порошковый нейтронный дифрактометр высокого разрешения D1, в конце 2023 г. – 4-х кружный монокристалльный нейтронный дифрактометр DC-1, в конце 2024 г. – порошковый нейтронный дифрактометр высокой светосилы D3. Параллельно в рамках проекта Cremlin+ осуществляется создание дифрактометра поляризованных нейтронов DIPOL. Уже собраны после модернизации и установлены на горизонтальных пучках в реакторном зале ПИКа текстурный дифрактометр TEX-3 и дифрактометр поляризованных нейтронов DPN.

Порошковый дифрактометр тепловых нейтронов высокого разрешения D1, расположенный в реакторном зале на горизонтальном пучке ГЭК 6', является дифрактометром высокого и сверхвысокого разрешения $\Delta d/d \leq 0.3\%$ благодаря большому углу вылета нейтронов $2\theta \leq 155^\circ$ и системе коллимации. При этом он легко может быть перестроен для работы в режиме высокой светосилы.



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

Комплементарным D1 будет **порошковый нейтронный дифрактометр высокой светосилы D3**, расположенный в реакторном зале на пучке ГЭК 9, для реализации экспериментов *in situ* и *in operando*, для которых важна скорость сбора данных. Вторая категория экспериментов включает в себя измерения, когда доступно крайне малое количество образца (иногда всего 10 мг). Другие примеры экспериментов, для которых важна высокая светосила, – это структурные исследования водородсодержащих образцов, слабые эффекты в фундаментальной физике магнетиков, в функциональных материалах (в частности нано-материалах) и многое другое.

Монокристалльный четырехкружный дифрактометр тепловых нейтронов DC-1, расположенный в реакторном зале на пучке ГЭК 8, смотрящем на будущий источник горячих нейтронов, предназначен для решения очень широко круга традиционных задач, а именно, определение кристаллической и магнитной структуры с возможностью наблюдать более тонкие особенности структуры, недоступные для дифракции на порошке благодаря возможности надежно измерять очень слабые брэгговские отражения. Дифрактометр DC-1 позволит изучать кристаллические и магнитные фазовые переходы, атомный ангармонизм, структурный беспорядок, структуры сплавов, сверхрешетки, двойниковые кристаллы и многодоменные/многофазные кристаллы. Будет возможно исследование теплового диффузного рассеяния и диффузного рассеяния ближнего порядка. TEX-3 – четырехкружный дифрактометр тепловых нейтронов, оптимизированный для исследования текстуры в поликристаллических материалах. Текстурированный дифрактометр TEX-2 был передан ПИЯФ НИЦ КИ после закрытия исследовательского реактора FRG-2 (Helmholtz-Zentrum Geesthacht) в рамках российско-германского проекта «PIK-GGBase». После замены устаревшего оборудования и существенной перестройки для возможности работы на высокопоточном реакторе ПИК, он получил название TEX-3 и его планируется разместить на ГЭК-6.

Дифрактометр поляризованных нейтронов DIPOL будет делить ГЭК-9 с D3. Он предназначен для широкого спектра магнитных исследований. Для реализации всех возможностей в схеме дифрактометра предусмотрена работа в двух режимах: классической дифракции поляризованных нейтронов без анализа поляризации и в режиме XYZ-поляризационного анализа, который эффективен для разделения ядерного и магнитного вкладов в нейтронное рассеяние и высоко востребован при изучении систем с взаимодействующими параметрами порядка. Поляризационный анализ также позволяет проводить исследования спиновой киральности в сложных магнитных системах.

Реализация описанной программы создания дифракционного комплекса для реактора ПИК позволит осуществлять очень широкий набор различных нейтрон-дифракционных экспериментов в рамках пользовательской программы и сделает реакторный комплекс ПИК абсолютно самодостаточным.

Дальнейшее развитие нейтронного дифракционного комплекса должно в первую очередь ориентироваться на использование холодных нейтронов. Это создание **порошкового нейтронного дифрактометра холодных нейтронов** для исследования магнитных структур, в том числе в условиях высоких давлений на образце, кристаллических и магнитных структур в молекулярных кристаллах с большим числом атомов в элементарной ячейке, соизмеримых и несоизмеримых структур с большим периодом и т. д. Необходим **био-дифрактометр** для исследования длиннопериодических и макромолекулярных структур для решения некоторых биологических проблем, связанных, в частности, с созданием наносистем медицинского назначения.

Должны быть созданы нейтронные **стресс-дифрактометр** и **Лауэ-дифрактометр**.

ПРОГРАММА ЯДЕРНО-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В РЕАКЦИЯХ НЕЙТРОННОГО ЗАХВАТА НА РЕАКТОРЕ ПИК

*И. А. Митропольский**

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

*E-mail: Mitropolsky_IA@pnpi.nrcki.ru

Классические спектроскопические исследования ядерной структуры остаются актуальными. Так, например, недавно при изучении динамики гамма-спектров распада ^{89}Zr было измерено рекордное сечение захвата тепловых нейтронов $\sigma=8.6(7)\times 10^5$ бн ядрами ^{88}Zr , лишь немного уступающее рекордному сечению на ^{135}Xe и превосходящее значение для ^{157}Gd [1]. Измерение сечений нейтронного захвата по изучению спектров распада дочерних ядер, включая их бета-распад, представляет большую ценность как для астрофизических моделей, так и для уточнения имеющихся ядерных моделей.

Спектры возбужденных состояний нечетно-нечетных ядер отличаются большей плотностью уровней и смягчением связи одночастичного и коллективных видов движения нуклонов по сравнению с соседними нечетными и четно-четными ядрами. В то же время, они изучены менее подробно. Основным каналом таких исследований являются реакции нейтронного захвата. На Рис. 1 представлено распределение по массовому числу нуклидов, схемы уровней которых изучены в (n, γ) реакции с тепловыми нейтронами, характеризующее степень изученности ядерной структуры в реакции нейтронного захвата с тепловыми нейтронами [2].

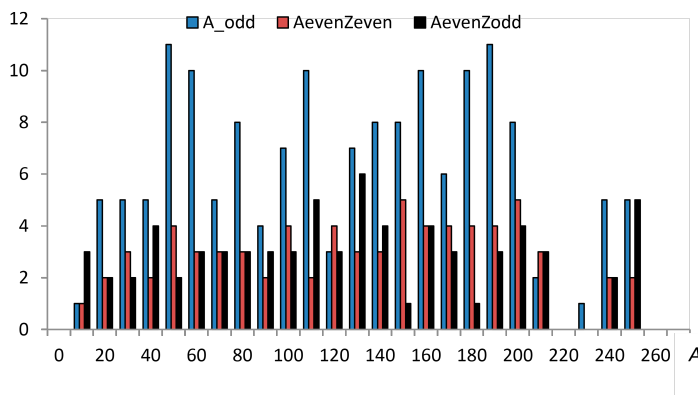


Рис. 1. Распределение по массовому числу нуклидов, схемы уровней которых изучены в (n, γ) реакциях с тепловыми нейтронами. В один канал гистограммы собраны данные, отвечающие изменению массового числа на 10 единиц.

Для изучения реакций с тепловыми нейтронами на реакторе ПИК создается двухплечевой спектрометр PROGRAS (PROmt Gamma RAY Spectrometer) с внутриканальным логарифмическим нейтроноводом. Схема такого нейтроновода показана на Рис. 2 Он формирует плоский монохроматический нейтронный пучок, направление распространения которого не совпадает с осью канала реактора, что позволяет эффективно избавляться от фонового гамма-излучения из активной зоны реактора. Первый отражатель изогнут по логарифмической спирали, полюс которой находится на доньшке канала (точка с координатами $=0$ и $=0$ на Рис. 2). Угловым параметром этой спирали $\theta=12.7$

угловых минут соответствует критическому углу полного отражения тепловых нейтронов с длиной волны $\lambda=1.8$ Å для ^{58}Ni . Второй отражатель – выпуклый и служит для формирования параллельного пучка. Его положение относительно первого отражателя и изгиб выбраны так, что на его поверхность попадают только те нейтроны, которые отразились от первого зеркала. Нейтроны падают на второе зеркало под разными углами, но все отражаются в одном направлении.

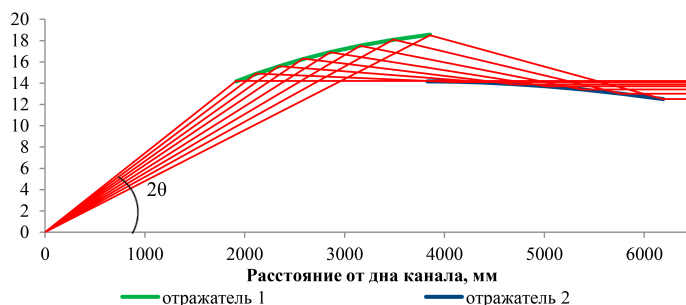


Рис. 2. Схема логарифмического нейтронОВОДА установки PROGRAS.

Исследование временных корреляций в спектрах вторичного излучения позволит не только измерять времена жизни ядерных состояний, но и исследовать свойства ядерных изомеров – традиционная для нашей лаборатории тема.

Явление ядерной изомерии было открыто ровно 100 лет назад, тем не менее, оно привлекает внимание до сих пор. Ядерные изомеры являются аккумуляторами энергии, поэтому поиск способов управляемого девозбуждения открыл бы путь к новому источнику энергии [3]. В том, что такая постановка вопроса имеет смысл, убеждает открытие явления ускорения нейтронов в «изомерной» среде, когда тепловые нейтроны, неупруго рассеиваясь на изомерах, уносят их энергию. Сечение такого процесса на изомерном состоянии ^{180m}Hf составляет $\sigma_{in}=52(13)$ бн [4].

Возбуждение изомеров в нейтронном захвате позволяет изучать влияние резонансного окружения на их время жизни. Так, например, для изомера $^{119m}\text{2Sn}$ было получено увеличение наблюдаемого времени жизни на 5% в зависимости от увеличения концентрации ядер олова и создания месбауэровских резонансных условий [5]. Продолжение этих исследований открывает новые перспективы для использования этого явления в ядерных технологиях.

Программа спектроскопических исследований включает информационную составляющую – создание специализированных баз данных и программ-интерфейсов к ним, оценку и систематику данных, поиск новых закономерностей в больших массивах однородных данных [6]. Примером может служить программа MIR, моделирующая процессы нейтронного захвата и распадов при облучения и представляющая гамма-спектры вторичного излучения в любой момент времени [7].

1. J. A. Shusterman et al. Nature **565**, 328 (2019).
2. ENSDF 2021: <https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>.
3. В. В. Ватулин и др. Известия РАН, сер. физ. **81**, 1296 (2017).
4. И. А. Кондуров и др. Письма в ЖЭТФ **31**, 254 (1980); Phys. Lett. B, **106**, 383 (1981).
5. Ю. Е. Логинов и др. Письма в ЖЭТФ **87**, 7 (2008).
6. Л. П. Кабина и др. Вопросы атомной науки и техники, сер. ядерно-реакторные константы, **5**, 11 (2015).
7. Л. П. Кабина и др. Препринт ПИЯФ 2483, 23 с. (2002).

УСТАНОВКА НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННОГО АНАЛИЗА INAA НА РЕАКТОРЕ ПИК И ПРОГРАММА ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

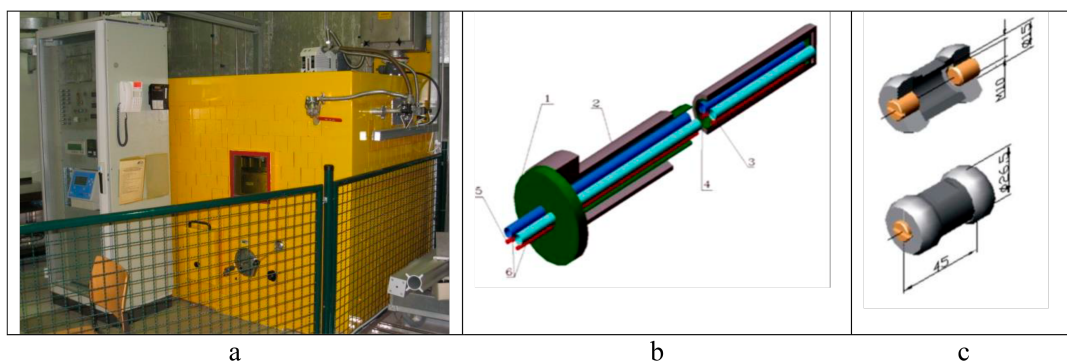
*И. А. Митропольский**

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

*E-mail: Mitropolsky_IA@npfi.nrcki.ru

Нейтронно-активационный анализ (НАА) – это один из ядерно-физических методов неразрушающего количественного анализа состава вещества, основанный на использовании (n, γ) реакции для идентификации элементов или изотопов по характерным γ -линиям. К его достоинствам можно отнести высокую чувствительность ко многим элементам (изотопам), независимость результатов от основного состава матрицы образца, отсутствие пробоподготовки, т.е. невозможность потерять какие-либо элементы или внести посторонние примеси и загрязнения.

Установка INAA для облучения образцов в наклонном канале реактора ПИК является пневмо-транспортной системой для доставки образца в зону нейтронного облучения, контролируемой по времени экспозиции в нейтронном поле и доставки облученного образца в горячую камеру лабораторного помещения. В горячей камере образец извлекается из контейнера, может помещаться непосредственно на детектор излучения, а может выдерживаться продолжительное время, после чего опять может помещаться на детектор. На Рис. 1 представлен внешний вид горячей камеры, схема внутриканальных магистралей и вид транспортного контейнера из сверхчистого графита (с).



1 – фланец, 2 – корпус канала, 3 – магистраль с кадмиевым экраном, 4 – магистраль без кадмиевого экрана, 5 – трубка охлаждения, 6 – трубки поддува CO_2 .

Рис. 1. Вид горячей камеры (а), схема внутриканальных магистралей (б), вид транспортного контейнера из сверхчистого графита (с).

Скорость транспортировки образца в контейнерах – 10 м/с. Рабочий газ – CO_2 при давлении 0.4–0.6 МПа. Вес исследуемого образца от 10 до 100 мг. Чувствительность метода 0.1% для основных элементов и 10^{-6} – 10^{-9} для микроэлементов. Погрешность определения 5 – 15%.

Научная программа исследований базируется на разработке новых методик НАА, направленных на повышение чувствительности и точности анализа. Примером могут служить ранее выполненные работы.

Разработка метода нейтронно-активационного анализа состава нефти из месторождений Восточной Сибири [1]. В энергетике и химической промышленности для переработки нефти используются химические катализаторы, такие как Fe, Co, Ni, V, W, Mo, Pt, Pd, с другой элементы N, P, As, Sb, Bi, O, S, Se, Te являются каталитическими ядами. Содержание этих элементов в сырой нефти может изменяться от 10^{-9} до 0.5%. Поэтому оценка их содержания в исходном сырье позволит скорректировать технологический процесс переработки нефти и сэкономить дорогостоящее сырье, к которому относятся, например, платина и палладий.

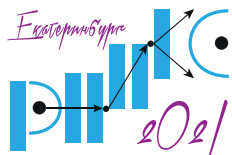
Определение элементного состава и исследование свойств сцинтилляционных керамик $Gd_2O_3:Pr,Ce$ с помощью нейтронно-активационного анализа [2]. Установлено содержание As, Ce, Co, Cr, Cs, Eu, Fe, La, Sc, Tb, Zn, Zr, Pr, Gd, Na в исследуемых образцах в диапазоне концентраций от 3×10^{-8} до 2.0%. Пределы обнаружения определяемых элементов составили рекордную величину $(0.6 - 1.3) \times 10^{-8}\%$.

Радиохимическое определение Pt, Pd, Re, Ir, Au в образцах с места падения Карского метеорита [3]. Разработаны методики инструментального и радиохимического нейтронно-активационного определения Pt, Au, Ir, Re, Pd и РЗЭ в геологических образцах, отобранных в районе Карской астроблемы, Ямало-Ненецкий автономный округ Россия. Определено содержание 31 элемента в исследуемых образцах с пределами обнаружения на уровне $10^{-4} - 10^{-9}\%$ по массе.

Инструментальное и радиохимическое определение Pt, Pd, Re, Ir, Au и других элементов в кварц-адюлярных жилах Милоградовского золотосеребряного месторождения, Дальний Восток [4]. Найдены оптимальные условия для концентрирования и отделения Au, Pt и других ЭПГ от Ca, Sc, Fe, As, W, Mo и других неблагородных металлов. Разработаны методики инструментального и радиохимического нейтронно-активационного определения Pt, Au, Ir, Re, Pd и РЗЭ в образцах Милоградовского геотермального золотосеребряного месторождения. Подтверждено наличие четвертого в мире геотермального месторождения с платиновым оруднением. Определено содержание 34 элементов в исследуемых образцах с пределами обнаружения на уровне $10^{-4} - 10^{-10}\%$ по массе.

Программа прикладных исследований включает информационную составляющую – создание специализированных баз данных и программ-интерфейсов к ним. Примером может служить программа MIR [5], с помощью которой проводится расчет активностей и спектров гамма-излучения радионуклидов, возникающих при облучении вещества нейтронами.

1. V. G. Zinoviev et al. World Journal of Nuclear Science and Technology **3**, 136.
2. V. G. Zinoviev et al. World Journal of Nuclear Science and Technology **4**, 139 (2014).
3. V. G. Zinoviev et al. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry **307**, 1315 (2016).
4. V. G. Zinoviev et al. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry **311**, 141 (2017).
5. Л. П. Кабина и др. Препринт ПИЯФ 2483 2002, 23 с.
6. Л. П. Кабина и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015618707, Роспатент, 2015.



ПРОЕКТ УСТАНОВКИ ИРИНА НА РЕАКТОРЕ ПИК

В. Н. Пантелеев, А. Е. Барзах, П. Л. Молканов*, М. Д. Селиверстов, Д. В. Федоров

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

*E-mail: molkanov_pl@pnpi.nrcki.ru

Использование ISOL (Isotope Separator On-Line) установок в исследованиях нейтрондефицитных и нейтроноизбыточных ядер обеспечивает все более широкий вклад как в развитие различных областей фундаментальной науки, так и в прикладные исследования. На ISOL-установках с использованием пучков различных бомбардирующих частиц (протонов, нейтронов, тяжелых ионов) проводятся исследования в области атомной и ядерной физики, астрофизики, физики твердого тела, а также в области ядерной радиоизотопной медицины. Для ядерной физики и астрофизики наибольший интерес представляют исследования крайне удаленных от полосы бета-стабильности короткоживущих нейтроноизбыточных ядер.

Для проведения таких исследований в НИЦ «КИ» – ПИЯФ разрабатывается проект ISOL-установки ИРИНА (Исследование Радиоактивных Изотопов на Нейтронах) для получения и исследования изотопов вблизи границы их нейтронной устойчивости. Данная установка, построенная на одном из каналов высокопоточного реактора ПИК, обеспечивает рекордные интенсивности пучков нейтроноизбыточных ядер для исследований по физике ядра и астрофизике.

Основным направлением исследований на установке ИРИНА будет изучение характеристик основных и изомерных состояний короткоживущих ядер (спины, среднеквадратичные зарядовые радиусы, электромагнитные моменты и т.д.). Для этой цели будет использован метод резонансной лазерной спектроскопии в лазерном ионном источнике, разработанный и впервые примененный в ПИЯФ на установке ИРИС (Исследование Радиоактивных Изотопов на Синхроциклотроне).

Одной из наиболее интересных задач для ядерно-физических исследований на установке ИРИНА является исследование оболочечного эффекта в среднеквадратичных зарядовых радиусах нуклидов, удаленных от полосы бета-стабильности, т.е. резкого изменения хода изотопической зависимости при достижении нейтронного магического числа. В этом отношении, наиболее интересными объектами для изучения являются изотопы Sb, Sn, In, Cd, Ag с близким к магическому ($N=82$) числом нейтронов. Также представляют интерес область ядер Ge, Ga, Zn, Cu и Ni с количеством нейтронов около магического числа $N=50$.

Также планируется установка “в линию” с масс-сепаратором ИРИНА системы ионных ловушек Пеннинга (Penning traps) для высокоточного измерения масс ядер, удаленных от области стабильности.

Кроме того, будет создан специальный ионный тракт для получения пучков радионуклидов для использования в исследованиях по физике твердого тела, а также для накопления изотопически чистых источников долгоживущих радионуклидов для использования в ядерной медицине.

В настоящее время утвержден следующий поэтапный план по созданию установки ИРИНА:

1. Проектирование и изготовление конструкторской документации – 2021–2022;
2. Моделирование, создание и испытания прототипов наиболее сложных частей установки ИРИНА – 2022–2023;
3. Изготовление и тестирование частей установки – 2022–2023;
4. Транспортировка, сборка и тестирование собранной установки – 2023.

ПЛАНИРУЕМЫЕ НЕЙТРОННЫЕ РЕФЛЕКТОМЕТРЫ НА РЕАКТОРЕ ПИК

*Н. К. Плешанов**, М. В. Дьячков, В. А. Матвеев, В. Г. Сыромятников, В. В. Тарнавич,
В. А. Ульянов

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

* E-mail: pleshanov_nk@npni.nrcki.ru

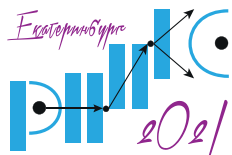
Нейтроны, отражаясь и рассеиваясь при скользящем падении на зеркальную поверхность образца, несут богатую и уникальную информацию о структуре и магнетизме приповерхностных областей, как естественных, так и искусственных, составленных, например, из множества слоев или латерально упорядоченных структур, а также о процессах на межфазовых границах. С помощью нейтронной рефлектометрии решаются фундаментальные и прикладные задачи, относящиеся к физике, химии, биологии или находящиеся на их стыке. На реакторе ПИК будет построен ансамбль специализированных, дополняющих друг друга, нейтронных рефлектометров. Рефлектометрический комплекс включает три исследовательских и один тестовый рефлектометр.

Рефлектометр NERO-2 создается на базе прибора, переданного из GKSS (Геестхахт, Германия); предназначен для исследования структуры и магнетизма тонких пленок и многослойных систем, границ раздела и латеральных неоднородностей (например, наночастиц) внутри пленок. Исследования будут проводиться с использованием монохроматического ($5.2 \text{ \AA}$), неполяризованного или поляризованного, пучка, с высоким ($\Delta\lambda/\lambda \sim 0.01$) или средним ($\Delta\lambda/\lambda \sim 0.04$) разрешением. Доступный диапазон q (зеркальное рассеяние): $0.001 \div 2 \text{ \AA}^{-1}$.

Высокопоточный рефлектометр Sonata предназначен для исследования тонких и атомарно тонких пленок, слоистых и латерально упорядоченных структур, магнетизма в таких структурах и процессов на границах с быстрой кинетикой. Оптимизирован для съемок с вертикальными образцами с площадью поверхности $\sim 1 \text{ см}^2$. Режимы работы – времяпролетный и с монохроматическим пучком; разрешение $5 \div 15\%$, длина волны $2 \div 25 \text{ \AA}$; диапазон q (зеркальное рассеяние): $0.001 \div 1 \text{ \AA}^{-1}$. Стандартная схема рефлектометрии поляризованных нейтронов будет дополнена векторным анализом поляризации.

Рефлектометр Harmony – времяпролетный прибор для изучения образцов с горизонтальной поверхностью; предназначен, главным образом, для исследований в области физики мягкой материи (в т. ч. жидкостей, жидких кристаллов, мембран, полимеров, сложных растворов и т. д.), физических, химических и био- процессов на границах разделов жидкости с газом или твердым телом. Режимы работы – с неполяризованным или поляризованным пучком, переменным разрешением; рабочие длины волн $2 \div 20 \text{ \AA}$; диапазон q (зеркальное рассеяние): $0.005 \div 0.5 \text{ \AA}^{-1}$.

Рефлектометр TNP – для тестирования и исследования нейтронных покрытий (зеркал, суперзеркал). Основной режим работы – времяпролетный, возможны съемки с монохроматическим пучком; диапазон q (зеркальное рассеяние): $0.003 \div 0.3 \text{ \AA}^{-1}$. Предусмотрена работа как с неполяризованными, так и с поляризованными пучками.



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

→ → → Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

ПЕРВЫЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СТАНЦИИ РЕАКТОРНОГО КОМПЛЕКСА ПИК

В. В. Тарнавич*

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

*E-mail: tarnavich_yv@npfi.nrcki.ru

Высокопоточный пучковый исследовательский реактор ПИК предназначен для проведения широкого круга работ в области ядерной физики и физики слабого взаимодействия, физики конденсированного состояния, структурной и радиационной биологии и биофизики, радиационной физики и химии, а также для решения прикладных технических задач. Большинство экспериментов на новом реакторе должно выполняться на выведенных нейтронных пучках.

В рамках выхода реактора ПИК на энергетическую мощность в 2020 году были введены в эксплуатацию пять тестовых экспериментальных станций, обеспечивающих минимальный набор нейтронных методик: дифрактометрия, рефлектометрия и спектрометрия. На этапе ввода были проведены настройка и юстировка элементов станций, а также отработаны методики нейтронных исследований.

СТАТУС ПРОЕКТА «ПОРОШКОВЫЙ НЕЙТРОННЫЙ ДИФРАКТОМЕТР D1 ДЛЯ РЕАКТОРНОГО КОМПЛЕКСА ПИК»

В. А. Ульянов*, А. И. Курбаков, С. О. Сумбаев, А. А. Булкин, С. И. Калинин,
Д. С. Головастов, Н. А. Коваленко, Ю. М. Киреенко, М. В. Дьячков, М. Р. Колхидашвили,
В. А. Соловей

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

*E-mail: ulyanov_va@pnpi.nrcki.ru

Основные проектные физические параметры суперпозиционного многосекционного нейтронного порошкового дифрактометра D1: монохроматор кристаллический Ge фокусирующий, поверхность кристаллов – плоскость (533), возможные отражающие плоскости – (553), (331), (511), (337), (311). Мозаичность кристаллов монохроматоров анизотропная и составляет: горизонтальная $20'$, вертикальная $10'$. Угол выхода монохроматора ($2\theta_m$) $112.5^\circ < 2\theta_m < 155^\circ$. Длина волны нейтронов (λ_m) ($1.2 - 2.5$) Å.

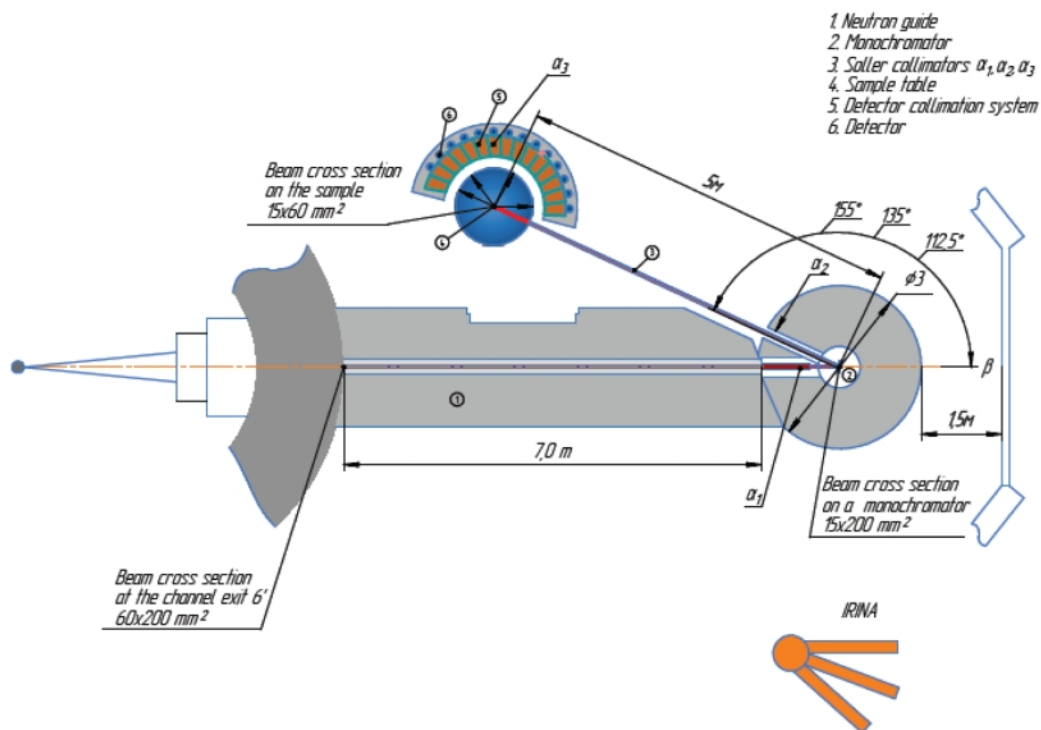


Рис. 1. Общий вид комплекса дифрактометра D1, с проектными параметрами.

Нейтронный поток на образце $> 5 \times 10^6$ н/см²с. Рабочий шаг сканирования ($2\theta_i$) 0.05° . Угловой диапазон сканирования ($2\theta_{min} - 2\theta_{max}$) $4^\circ < 2\theta < 168^\circ$ (максимальный переданный импульс $Q_{max} = 12.5$ Å⁻¹). Доступная область межплоскостных расстояний ($d_{min} -$

d_{max}) $0.5 \text{ \AA} < d < 50 \text{ \AA}$. Разрешение $\Delta d/d$ не хуже 0.003 в минимуме. Данные физические параметры подлежат уточнению в ходе разработки эскизной и конструкторской документации.

Предполагается, что дифрактометр D1 будет состоять из четырех основных блоков (см. Рис. 1): **блока формирования пучка**, который состоит из нейтронорода, коллимационной системы с возможностью изменять расходимость падающего на образец пучка, монохроматора, с радиационной защитой и юстировочными устройствами, **блока узла образца** с юстировочными устройствами, **блока детектора**, который наряду с монохроматором является ключевым элементом дифрактометра, **блока управления и сбора информации**.

Исходя из заданных физических и технических параметров были проведены математическое моделирование с целью получения основных нейтрон – физических параметров D1 и расчет радиационной защиты. Основываясь на этих результатах, выполнено эскизное и начато детальное проектирование дифрактометра D1. На Рис. 2. Показан 3D общий вид комплекса дифрактометра D1 с обозначениями основных узлов и элементов.

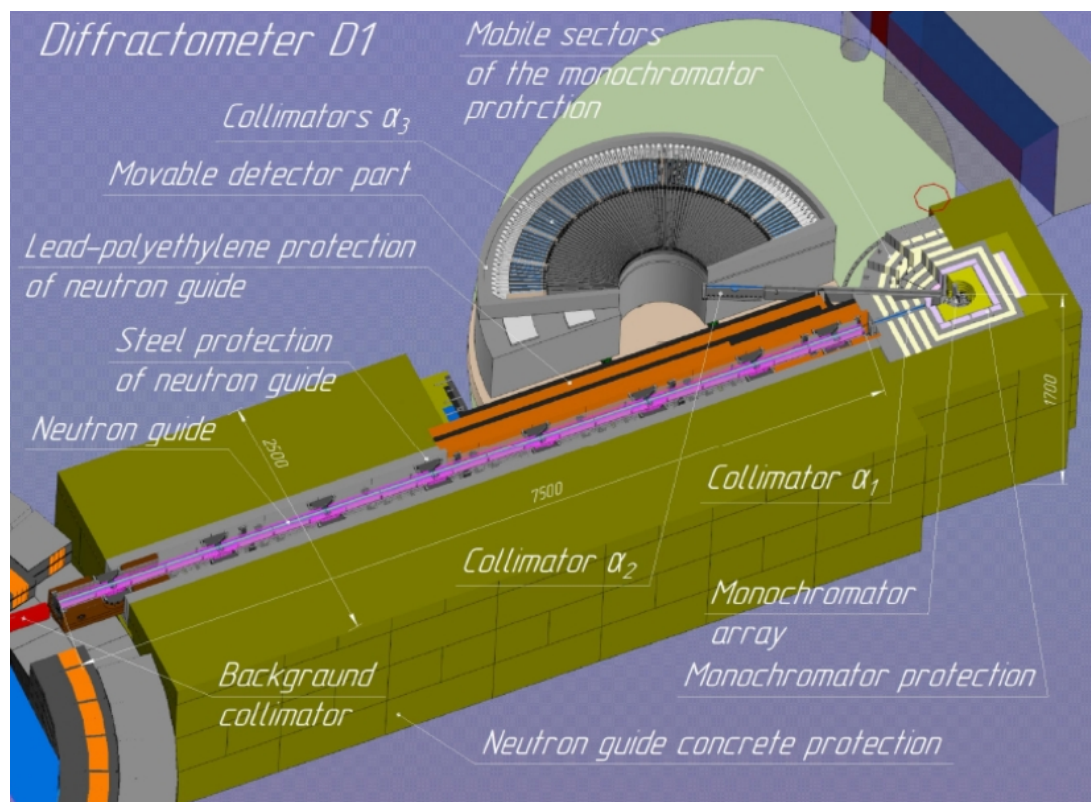


Рис. 2. 3D общий вид комплекса дифрактометра D1, полученный в результате проектирования.

ПОРОШКОВЫЙ ДИФРАКТОМЕТР ВЫСОКОЙ СВЕТОСИЛЫ D3 ДЛЯ РЕАКТОРА ПИК

К. А. Дрожзов*, И. В. Голосовский

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

*E-mail: drozhzhov_ka@npni.nrcki.ru

В рамках текущего проекта «Создание приборной базы реакторного комплекса «ПИК» реализуемого в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ будет построен порошковый дифрактометр высокой светосилы D3, предназначенный для структурных исследований с помощью упругого рассеяния тепловых нейтронов на постоянной длине волны.

Порошковая дифракция является наиболее востребованной методикой. Три порошковых дифрактометра в ILL (Институт Лауэ-Ланжевена, Франция) обеспечивают более четверти всех проводимых измерений в данном институте.

Направления исследований на высокоинтенсивном дифрактометре:

- материалы *in-situ* или *in-operando*; — наносистемы, которые обычно доступны в очень небольшом количестве;
- тонкие и слабые эффекты в сложных системах;
- экстремальные условия: высокое давление и высокое магнитное поле с малыми образцами;
- прочее.

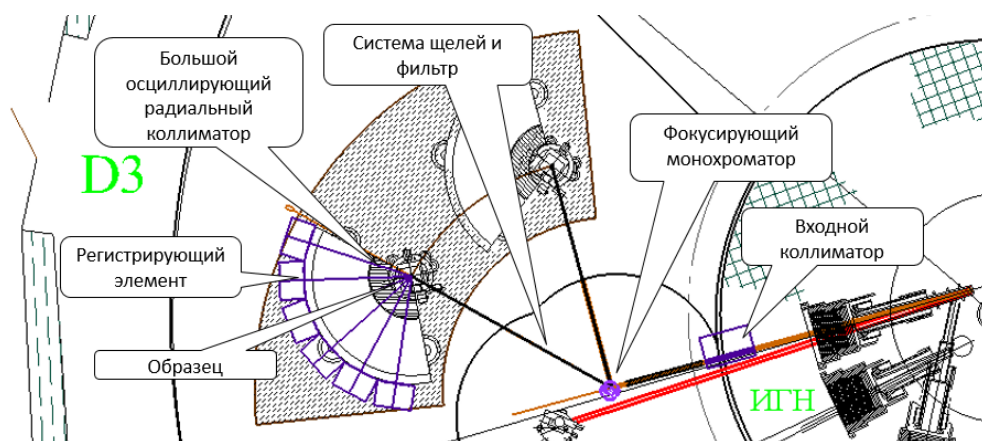
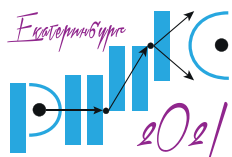


Рис. 1. Схема дифрактометра D3.

Монохроматизация первичного пучка обеспечивается фокусирующим в вертикальной плоскости кристаллом-монохроматором, который размещается в блоке защиты (Рис. 1). Предусмотрено два угла кристалла-монохроматора: 44.22° и 90° , которые соответствуют двум режимам работы. При угле монохроматора $2\theta_m = 44.22^\circ$ реализуется режим высокой светосилы, это основной режим, тогда как режим работы с высоким разрешением соответствует углу монохроматора $2\theta_m = 90^\circ$. При изменении режима работы детектор и узел образца двигаются как единое целое относительно оси поворота



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)


 Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

кристалла-монокроматора. Таким образом, дифрактометр может занимать две позиции относительно кристалла-монокроматора.

Отраженный пучок формируется несколькими щелями, проходит через фильтр из кристаллов пирографита для подавления паразитного вклада от нейтронов с половиной длины волны и рассеивается на образце. Рассеянные нейтроны, после прохождения большого осциллирующего коллиматора, задача которого подавление фона, регистрируются большим позиционно-чувствительным детектором.

Основные параметры дифрактометра D3:

- Предполагается использовать два типа кристалла-монокроматора HOPG (002) и Ge (115/113), при этом получаем рабочие длины волн (Табл. 1).
- Три входных соллеровских коллиматора с разной расходимостью (10', 20' и 30') размещаются в устройстве револьверного (барабанного) типа.
- Осциллирующий радиальный коллиматор с расходимостью 1° располагается перед детектором для подавления фона от окружения образца.
- Двухкоординатный позиционно-чувствительный детектор (ПЧД) представляет собой сборку из 144 (6 по горизонтали и 24 по вертикали) гелиевых, линейных позиционно-чувствительных счетчиков. Предполагаемое разрешение данного ПЧД в горизонтальной плоскости 2.5 мм, в вертикальной плоскости 8 мм.

Таблица 1. Рабочие длины волн.

Угол Монокроматора $2\theta_M$	HOPG (002)	Ge (113)	Ge (115)
44.22°	2.53 Å	1.28 Å	0.82 Å
90°	4.74 Å	2.41 Å	1.54 Å

ТЕСТОВЫЙ НЕЙТРОННЫЙ РЕФЛЕКТОМЕТР (ТНР) В ЗАЛЕ РЕАКТОРА ПИК

М. В. Дьячков*, В. А. Ульянов, В. Г. Сыромятников, С. И. Калинин, М. Р. Колхидашвили,
В. А. Соловей

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

*E-mail: dyachkov_mv@pnpi.nrcki.ru

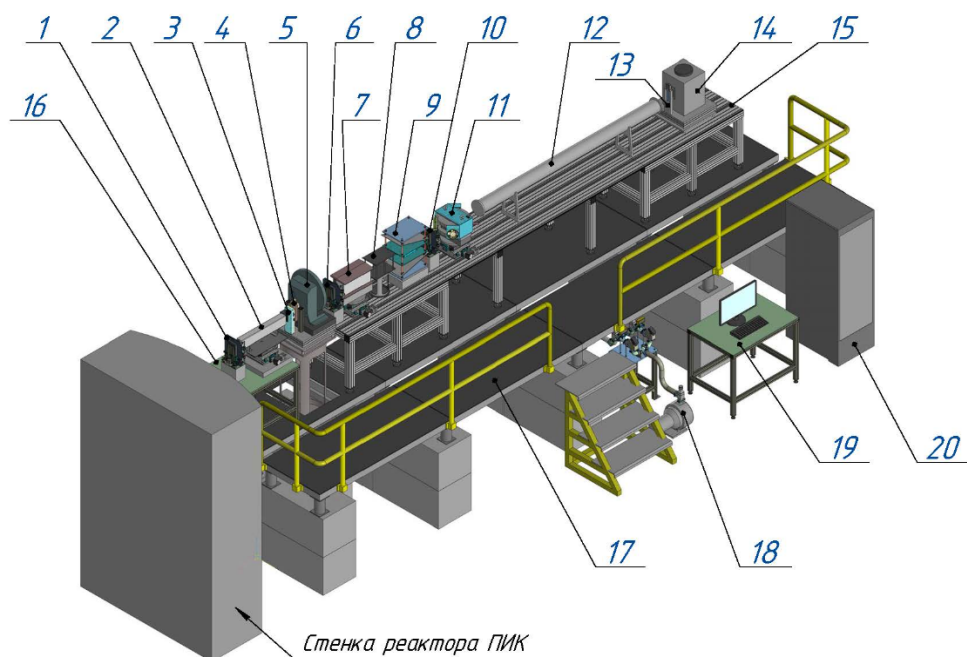


Рис. 1. Схема расположения основных узлов и функциональных компонентов рефлектометра ТНР. 1, 6, 10 – дистанционно управляемые диафрагмы на юстировочных столах для формирования нейтронного пучка; 2 – отклоняющее (фильтрующее) пучок зеркало с коллиматором на юстировочном столе; 3 – заслонка пучка из нейтрон поглощающего материала; 4 – монитор падающего пучка; 5 – прерыватель нейтронного пучка на юстировочном столе, установлен на отдельном стапеле механически не связанном со стапелем ТНР; 7 – 4-х модовый нейтронно-оптический формирователь пучка (поляризатор) в постоянном магните на юстировочном столе; 8 – ведущее магнитное поле; 9 – Р/С флиппер; 11 – изучаемый зеркальный образец в электромагните на юстировочном столе; 12 – вакуумный тракт между образцом и детектором; 13 – дистанционно управляемая коллимационная диафрагма перед детектором; 14 – детектор нейтронов в защите на юстировочном столе; 15 – базисная немагнитная платформа для размещения узлов ТНР; 16 – опорный виброустойчивый стапель для ТНР; 17 – опорный стапель для персонала ТНР; 18 – дистанционно управляемая вакуумная система; 19 – управляющий компьютер; 20 – шкаф с управляющей и регистрирующей электроникой.

Тестовый нейтронный рефлектометр (ТНР) был установлен на канале ГЭК-9 РК ПИК в 2020 г. в рамках программы по вводу в эксплуатацию пяти станций первой очереди приборной базы РК ПИК. Данная установка предназначена для тестирования нейтронных поляризующих и неполяризующих суперзеркал необходимых при создании нейтроноводов и других нейтронно-оптических устройств РК ПИК. Схема расположения основных узлов и функциональных компонентов рефлектометра ТНР на канале ГЭК-9 представлена на Рис. 1. Основные физические параметры тестового нейтронного рефлектометра. Четыре режима работы ТНР: «белый» неполяризованный пучок (*I режим* — время-пролетный), «белый» поляризованный пучок (*II режим* — время-пролетный), монохроматический неполяризованный пучок (*III режим* — с фиксированной длиной волны), монохроматический поляризованный пучок (*IV режим* — с фиксированной длиной волны). Параметры ТНР для ГЭК-9: максимальный доступный диапазон по переданному импульсу в рефлектометре $q = (0.003 - 0.275) \text{ \AA}^{-1}$. Расчетный максимальный интегральный поток на образце порядка $2.6 \cdot 10^6 \text{ н/см}^2\text{с}$ (*I режим*). Разрешение по длине волны во время-пролетных режимах (*I* и *II*) $\Delta\lambda = 0.06 \text{ \AA}$. В режиме *II* в рабочем диапазоне длин волн $\lambda = (0.88 - 4.7) \text{ \AA}$ средняя величина поляризующей эффективности поляризатора составляет $0.97 - 0.99$ [1]. В начале 2021 года на ТНР в *I*-м режиме были произведены тестовые измерения зеркального образца Ni/Ti суперзеркала при мощности реактора порядка (60 — 80) кВт. Для тестовых измерений этот образец было установлен в держатель (поз. 11, Рис. 1). Предварительно был измерен спектр прямого пучка время-пролетным методом (кривая 1, Рис. 2). После юстировки были проведены измерения спектров отраженных от образца пучков при углах 10, 18 угл. мин. (кривые 2, 3, Рис. 2).

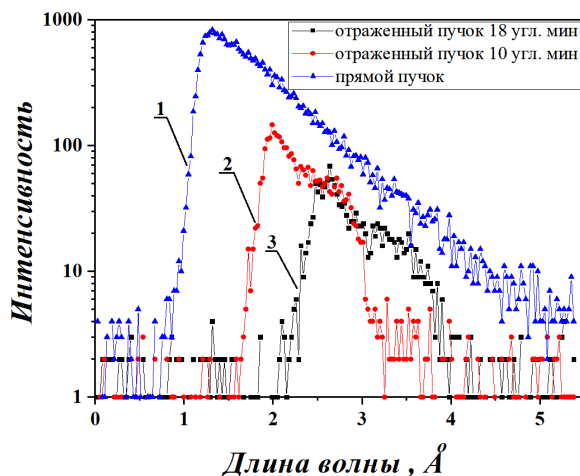


Рис. 2. Нейтронные спектры отраженных от образца пучков при 10 и 18 угл. мин. и прямого пучка.

Таким образом, впервые на РК ПИК были проведены рефлектометрические спектральные измерения зеркального образца. Получены спектры отражений нейтронного пучка от Ni/Ti суперзеркала на двух углах 10, 18 угл. мин. Предполагается продолжение измерений на ТНР в остальных режимах. В частности, во *II*-м режиме с целью определения поляризующей эффективности образца FeCo/TiZr суперзеркала. В будущем ТНР будет размещен в нейтроноводном зале РК ПИК.

1. V. G. Syromyatnikov, N. K. Pleshanov, V. M. Pusenkov, et al., Four-modes neutron reflectometer NR-4M. Preprint 2619. Gatchina: PNPI, (2005). 47 p.

НАРУШЕНИЕ ВРЕМЕННОЙ И ЗЕРКАЛЬНОЙ СИММЕТРИИ ПРИ МАГНИТНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ

А. В. Ковалев*

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

*E-mail: kovalev_av@pnpi.nrcki.ru

В настоящее время имеется много публикаций, в которых говорится о нарушении временной симметрии. Авторы статьи [1], в частности, считали появление малой спонтанной намагниченности в сверхпроводниках явным признаком нарушения временной и зеркальной симметрии. Ранее подобная идея предложена А. С. Компанейцем, который писал: «у ферромагнетика операция изменения знака времени непременно должна сопровождаться какой-либо операцией пространственной симметрии» [2]. Эта операция оказывается зеркальным отражением магнитного домена. Простые соображения Компанейца остались незамеченными, и вопрос о нарушении принципов инвариантности при магнитных фазовых переходах (МФП) остается дискуссионным. Предположение о симметрии магнитных кристаллов по отношению к операции обращения времени создало много проблем, содержание которых изложены в кратком обзоре [3].

Специфическая кристаллическая текстура ферромагнитных пленок, полученных методом магнетронного распыления, и нестандартный метод рентгеновской дифракции позволили выполнить проверку гипотезы Компанейца. Основные результаты этой сложной работы изложены в препринте [4], фрагменты которого приводятся далее.

Неоднозначность терминов, используемых при трактовке принципов симметрии, оказывается причиной многих недоразумений. Поэтому для МФП приведем простые определения некоторых понятий. В идеальном случае в ферромагнитном кристалле имеются области спонтанной намагниченности $\mathbf{J}_s$, которые оказываются и кристаллитами магнитной фазы G_m . Принцип диссимметрии Пьера Кюри [5] допускает только аксиальную симметрию фаз G_m . Поэтому для любого кристаллита этой фазы можно однозначным образом выбрать направление аксиального вектора $\mathbf{N} \parallel \mathbf{J}_s$. Преимущественное направление этих векторов назовем однонаправленной кристаллической текстурой. Операцией изменения знака времени будем считать обращение направлений $\mathbf{J}_s$ во всех кристаллитах. Магнитные домены могут иметь состояния $\mathbf{J}_s \uparrow \uparrow \mathbf{N}$ или $\mathbf{J}_s \uparrow \downarrow \mathbf{N}$, которые невозможно совместить поворотами и сдвигами в пространстве. При одинаковой вероятности реализации таких состояний можно говорить лишь о нарушении четности по отношению к операции обращения времени T . Отличие же указанных вероятностей и является нарушением инвариантности, что обнаружено при измерении межплоскостных расстояний на пленках сплава $\text{Co}_{67}\text{Fe}_{31}\text{V}_2$.

В исходном состоянии пленки намагничены, а при отжиге до 150°C без приложения магнитного поля в них обнаружен сильный рост остаточной намагниченности (Рис. 1). Детальные исследования механизма такого термомагнитного эффекта выполнялись методом малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов [3].

Межплоскостные расстояния d_{hkl} измерялись на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М. Величины погрешностей $\Delta(d_{hkl}) < 2 \cdot 10^5$ нм. На Рис. 2 показаны результаты измерений, где ϕ — углы между плоскостями (111) и (h h0). Индексами (hkl) здесь и далее обозначаются плоскости квазикубической структуры. Азимутальный угол $\psi = 0$ соответствует параллельности направлений оси легкого намагничивания и первичного рентгеновского пучка. Показанные на Рис. 2 результаты позволили определить симметрию $2/m$ магнитной фазы, а отличие кривых для ϕ_1 и ϕ_2 на Рис. 2б возможно только при нарушении T -инвариантности.

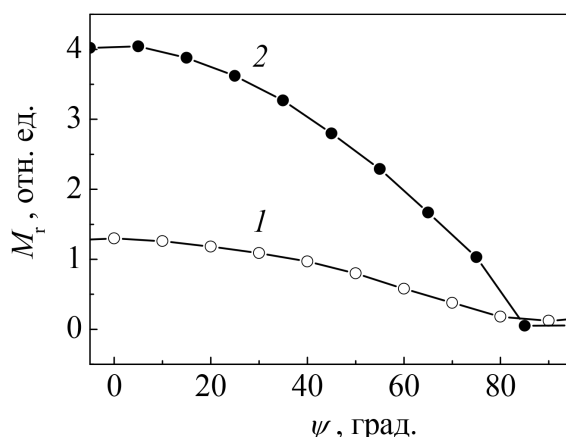


Рис. 1. Зависимости остаточной намагниченности от азимутального угла в плоскости пленки, измеренные до (1) и после (2) отжига образца при 150 °С.

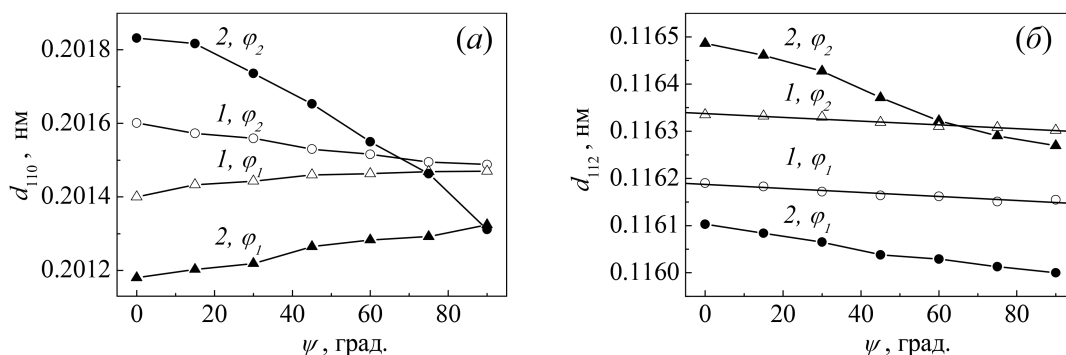


Рис. 2. Зависимости межплоскостных расстояний от азимутального угла в плоскости пленки толщиной 3 нм для плоскостей типа $(h\bar{h}0)$, измеренные до (1) и после (2) отжига образца.

При зеркальном отражении P или обращении времени T происходит изменение физического состояния магнитного домена, т. е. нарушение зеркальной и временной симметрии. Следовательно, в инвариантной группе магнитных кристаллов нет операций P и T , но имеется операция комбинированной PT симметрии [6], что соответствует и современным представлениям. Однако для МФП обнаружилась сложная проблема, аналогичная гомохиральности биологических структур [7].

1. R. Carmi, E. Polturak, G. Koren, and A. Auerbach, *Nature* **404** 853 (2000).
2. А.С. Компанец, Симметрия в микро- и макромире, Наука, Москва, (1978), С. 21.
3. А.В. Ковалев, Нарушение принципа Т-инвариантности при магнитных фазовых переходах // Современная наука в теории и практике, Часть IV, Перо, Москва, (2018), С. 4–40.
4. A.V. Kovalev, Conservation of combined PT symmetry at magnetic phase transitions, Preprint PNPI-3054, Gatchina, (2021).
5. А.В. Шубников, УФН **59** 591 (1956)
6. Е. Вигнер, Этюды о симметрии, Мир, Москва, (1971).
7. A.V. Kovalev, *J. Magn. Magn. Mater.* **300** e550 (2006).

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОСТОЯННОГО МАГНИТА

А. В. Ковалев*

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

*E-mail: kovalev_av@npni.nrcki.ru

Проблема постоянного магнита обозначена в лекциях Р. Фейнмана [1], а ее решение, как считал А. С. Компанеец [2], связано с особенностями кристаллических структур магнитных фаз G_m . Действительно, принцип диссимметрии Пьера Кюри [3] допускает только аксиальную симметрию кристаллов, в которых имеется спонтанная намагниченность J_s . В таком случае для магнитного домена (кристаллита фазы G_m) можно однозначным образом выбрать направление аксиального вектора $\mathbf{N} \parallel \mathbf{J}_s$. Операцией изменения знака времени считаем обращение направлений $\mathbf{J}_s$ во всех кристаллитах образца, а преимущественное направление векторов $\mathbf{N}$ назовем однонаправленной кристаллической текстурой. Магнитные домены могут иметь состояния $\mathbf{J}_s \uparrow \uparrow \mathbf{N}$ или $\mathbf{J}_s \uparrow \downarrow \mathbf{N}$, которые невозможно совместить поворотами и сдвигами в пространстве. При одинаковой вероятности реализации таких состояний говорим лишь о нарушении четности по отношению к операции обращения времени. Отличие же этих вероятностей является нарушением принципа Т-инвариантности при магнитных фазовых переходах (МФП). А. С. Компанеец предположил однозначную взаимосвязь направлений векторов $\mathbf{J}_s$ и $\mathbf{N}$, что означает полное нарушение -инвариантности.

В настоящее время имеется много публикаций, в которых говорится о нарушении принципов инвариантности. Авторы [4], в частности, считали появление малой спонтанной намагниченности в сверхпроводниках явным признаком нарушения временной (T) и зеркальной (P) симметрии. Подобные трактовки используются для сохранения CPT -теоремы, где C — операция зарядового сопряжения. Поэтому, учитывая работы Е. Вигнера [5], можно говорить, что в инвариантной группе магнитных кристаллов нет операций P и T , но имеется операция комбинированной PT симметрии. Таким образом, экспериментальная проверка гипотезы А. С. Компанейца оказалась связанной с решением фундаментальных задач современной физики, известным примером которых является и предполагаемый электрический дипольный момент (ЭДМ) нейтрона. Для МФП, однако, появилась более сложная проблема, аналогом которой является гомохиральность биологических структур [6].

Предположение о симметрии магнитных кристаллов по отношению к операции обращения времени [7] создало много проблем [8], а основной результат наших исследований [9] выглядит следующим образом. Изготовленные методом магнетронного распыления пленки сплава $\text{Co}_{67}\text{Fe}_{31}\text{V}_2$ оказались намагниченными, а после их отжига без приложения магнитного поля обнаружен сильный рост остаточной намагниченности. Специфическая кристаллическая текстура пленок толщиной 2 — 3 мкм, нестандартный метод рентгеновской дифракции и малоугловое рассеяние поляризованных нейтронов позволили обнаружить однозначную взаимосвязь степени упорядочения текстуры моноклинной фазы (точечная группа $2/m$) и величины намагниченности образцов. Таким образом, для получения постоянного магнита необходимо в исходной заготовке создать однонаправленную текстуру магнитной фазы.

Для изучения процессов самоорганизации магнитных текстур использовались разные методы рассеяния нейтронов [8]. Пример результатов, полученных методом рассеяния поляризованных нейтронов, показан на Рис. 1 и 2. Магнитное поле величиной 3 Э, перпендикулярное плоскости пленки, прикладывалось вдоль нейтронного пучка. При изменении температуры измерялись величины индукции в плоскости пленки и интенсивности нейтронов, рассеянных на малые углы. Трактовки полученных на пленках

и массивных образцах результаты приведены в обзоре [8], в котором можно найти и формулировки некоторых задач с использованием нейтронных пучков.

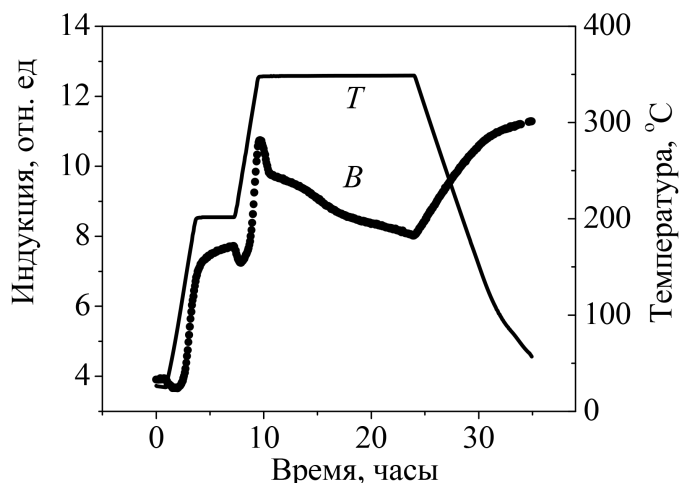


Рис. 1. Режим отжига и величины индукции пленки сплава $\text{Co}_{67}\text{Fe}_{31}\text{V}_2$ при нагреве образца до 350°C .

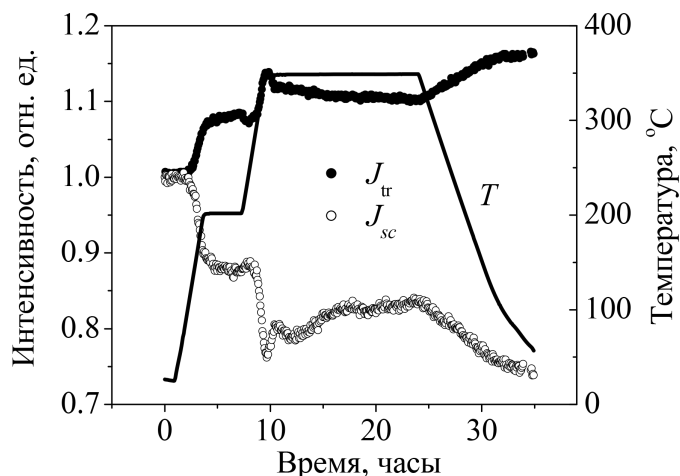


Рис. 2. Изменения интенсивностей нейтронов в прямом (J_{tr}) и рассеянном (J_{sc}) пучках.

1. Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс, Фейнмановские лекции по физике, Мир, Москва, Т. 7, (1966).
2. А. С. Компанеев, Симметрия в микро- и макромире, Наука, Москва, С. 21 (1978).
3. А. В. Шубников, УФН **59**, 591 (1956)
4. R. Carmi, E. Polturak, G. Koren, and A. Auerbach, Nature **404**, 853 (2000).
5. Е. Вигнер, Этюды о симметрии, Мир, Москва (1971).
6. A. V. Kovalev, J. Magn. Magn. Mater. **300**, e550 (2006).
7. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, Электродинамика сплошных сред, Наука, Москва, (1982).
8. А. В. Ковалев, Нарушение принципа T -инвариантности при магнитных фазовых переходах // Современная наука в теории и практике, Часть IV, Перо, Москва, С. 4 – 40 (2018).
9. A. V. Kovalev, Preprint PNPI-3054, Gatchina, (2021).

РЕФЛЕКТОМЕТР ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ NERO-2 НА РК ПИК

*В. А. Матвеев**, Н. К. Плешанов, Д. С. Головастов, А. В. Сизов

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

*E-mail: matveev_va@npi.nrcki.ru

Рефлектометр поляризованных нейтронов NERO-2 — многозадачный инструмент для исследования структуры тонких плёнок и многослойных систем магнитных и немагнитных материалов. Прибор был создан на базе прибора, переданного из GKSS (Геестхахт, Германия) в рамках договора о сотрудничестве между НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ (Россия) и HZG (Германия). При создании прибора в рамках реализации программы «Ввода в эксплуатацию первых 5-ти станций первой очереди РК ПИК» некоторые узлы были заменены новыми или адаптированы к новым условиям.

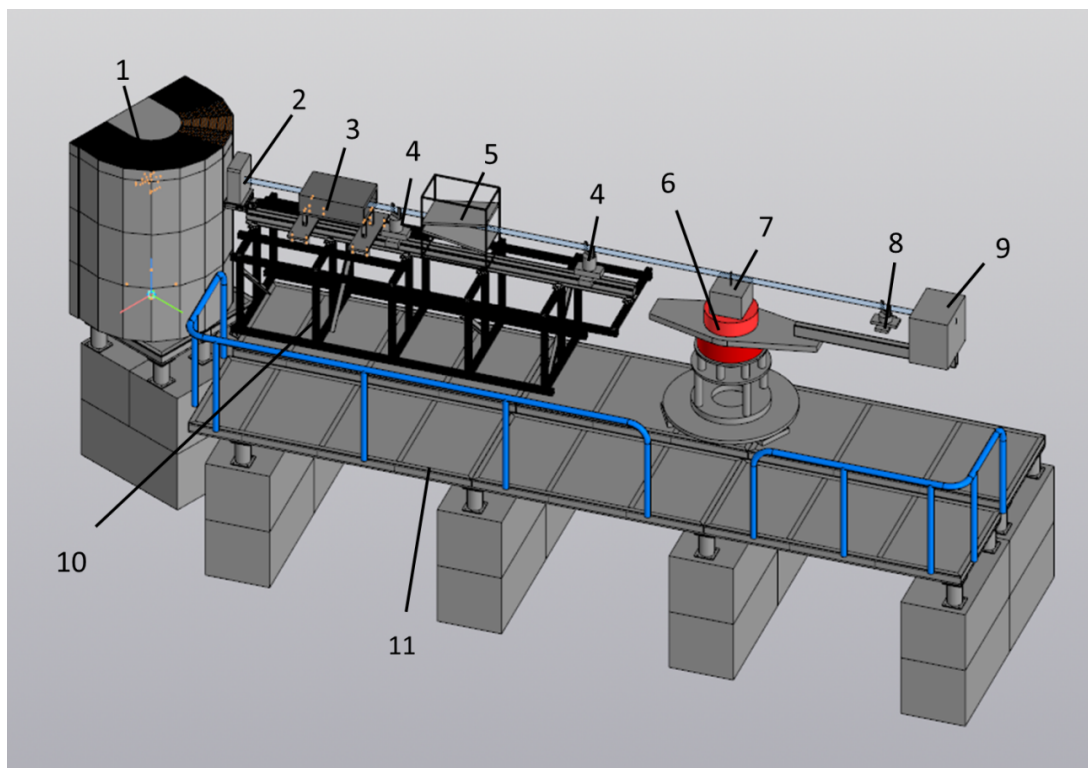
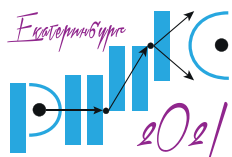


Рис. 1. Рефлектометр поляризованных нейтронов NERO-2: Цифрами обозначено: 1 – фокусирующий монохроматор в защите; 2 – коллимирующая диафрагма; 3 – нейтронно-оптический формирователь; 4 – диафрагмы; 5 – спин-флиппер; 6 – гониометр; 7 – держатель образца; 8 – диафрагма детектора; 9 – пальчиковый детектор в защите; 10 – рама рефлектометра; 11 – стапель рефлектометра.

На Рис. 1 представлена схема рефлектометра NERO-2. Рефлектометр временно размещен на 8-ом горизонтальном канале ПИК и работает в режиме съемок с постоян-



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

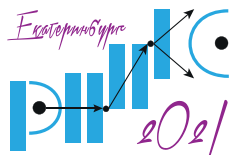
Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

ной длиной волны нейтронов ($\lambda = 1.5 \text{ \AA}$). Пучок нейтронов монохроматизируется с помощью фокусирующего монохроматора с установленными в нем кристаллами пиролитического графита PG (002). Отклоняемый монохроматором пучок пропускается через коллимирующую диафрагму и попадает в двухканальный нейтронно-оптический формирователь, который позволяет получать как неполяризованный, так и неполяризованный пучок нейтронов. Измеренная интенсивность пучка нейтронов на выходе из защиты монохроматора при мощности реактора 80 кВт составила $\sim 230 \text{ н/сек}$. Расчетная плотность потока нейтронов при мощности реактора 10 МВт, составит величину $\sim 3 \cdot 10^5 \text{ н/(см}^2 \cdot \text{сек)}$.

Для получения пучка с требуемой расходимостью используется пара диафрагм со шторками, изготовленными из карбида бора. Изменение направления поляризации нейтронного пучка осуществляется с помощью радиочастотного спин-флиппера. Образец закрепляется в держателе, оборудованном многоосевым столиком, позволяющем производить юстировку образца по 4-м осям.

Регистрация рассеиваемого образцом нейтронного излучения осуществляется детектором, расположенном на поворотной стреле гониметра. Перед детектором, для повышения его пространственного разрешения, устанавливается дополнительная диафрагма.

В дальнейшем рефлектометр NERO-2 планируется дополнительно модернизировать и разместить в нейтроноводном зале РК ПИК на нейтроноводе Н-2 канала ГЭК 3. Рабочая длина волны рефлектометра нейтронов после его модернизации составит $\lambda = 5.2 \text{ \AA}$, поэтому будет создана новая оптическая часть нейтронно-оптического формирователя. Формирователь будет модернизирован и станет четырехканальным, что позволит получать поляризованные и неполяризованные нейтронные пучки с высоким ($\Delta\lambda/\lambda \sim 0.01$) и средним ($\Delta\lambda/\lambda \sim 0.04$) разрешением. Плотность потока нейтронов на образце согласно расчетам составит $\sim 10^6 \text{ н/(см}^2 \cdot \text{сек)}$, поляризация не ниже 98%. Также планируется изготовление многоканального веерного анализатора для проведения экспериментов с анализом поляризации рассеянных нейтронов. Для регистрации рассеиваемого излучения будет использоваться ^3He позиционно-чувствительный детектор с рабочим окном $200 \times 200 \text{ мм}^2$.



КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ СТАНЦИИ НЕЙТРОННОЙ ТОМОГРАФИИ НА РЕАКТОРЕ ПИК

М. М. Мурашев, В. П. Глазков, В. Т. Эм*

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Москва, Россия

*E-mail: mihail.mmm@inbox.ru

На сегодняшний день большинство передовых нейтронных центров по всему миру имеют в своем распоряжении установки для нейтронной томографии. Данного рода установки позволяют решать широкий спектр задач, связанных с такими областями науки, как материаловедение (визуализация текстуры, внутренних напряжений, фазовых переходов и т.д.), неразрушающий контроль (изделия, полученные методом аддитивных технологий, материалы для авиакосмической промышленности, материалы для хранения водорода и т.д.), геология, палеонтология, археология и изучение объектов культурного наследия.

Одной из важных характеристик станции нейтронной томографии является пространственное разрешение. Улучшение пространственного разрешения достигается за счет потери в интенсивности нейтронного пучка и, следовательно, к увеличению времени измерения. Поэтому перспективной и актуальной задачей является создание станции нейтронной томографии на высокопоточном источнике нейтронов, каким будет исследовательский реактор ПИК. Это позволит создать установку, которая будет работать в режиме высокой светосилы или высокого пространственного разрешения. Первый режим позволит исследовать кинетические процессы. Второй режим позволит получить более детальное изображение внутренней структуры исследуемого объекта. На станции также будет предусмотрена возможность работы в энергодисперсионном режиме, за счет использования двухкристального монохроматора. В настоящем докладе представлен концептуальный проект станции нейтронной томографии на реакторе ПИК.

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ОТНОШЕНИЯ АКСИАЛЬНОЙ И ВЕКТОРНОЙ КОНСТАНТ СЛАБОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

А. П. Серебров*, О. М. Жеребцов, Г. Н. Ключников, А. О. Коптюхов, А. Р. Мороз,
А. Н. Мурашкин, А. К. Фомин

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

*E-mail: serebrov_ap@pnpi.nrcki.ru

Разрабатывается эксперимент по определению величины λ – отношения аксиальной константы слабых взаимодействий G_A к векторной G_V – путем одновременного измерения электронной (A) и нейтринной (B) асимметрии β -распада на одной установке.

Для измерения λ используется отношение $\lambda = (AB)/(A + B)$. Одновременное измерение A и B на одной установке предлагается провести с использованием ультрахолодных нейтронов (УХН), хранящихся в области магнитного поля сверхпроводящего соленоида. Установка будет работать в режиме постоянного наполнения от источника УХН. Основу корреляционного спектрометра составляет сверхпроводящий соленоид, расположенный внутри гелиевого криостата длиной 4.6 м. При токе в 1000 А соленоид создает в однородной области магнитное поле индукцией 0.35 Тл, в области магнитной «пробки» – 0.86 Тл. Отличительной особенностью предлагаемого эксперимента является вертикальное расположение криостата. В основе предлагаемого эксперимента лежит схема задержанных совпадений, при которой сигнал на электронном детекторе дает «старт», а сигнал на протонном – «стоп». Вдоль оси соленоида область распада выделяется электростатическим цилиндром, который представляет собой систему из кольцевых электродов, в нижней и верхней частях которой размещены плоские сетки. В нижней части область распада выделяется положением высоковольтной сетки. Сверху область распада ограничена высотой подъема УХН. Спектрометр имеет две отличительные особенности: первая – наличие магнитной коллимации электронов распада, вторая – использование времяпролетного метода для измерения импульса протонов. Эти особенности позволяют восстановить кинематику события β -распада и определить направление вылета антинейтрино.

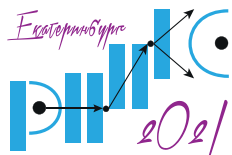
Способ определения λ , предложенный в данной работе, во-первых, позволяет пренебречь возможным вкладом фирцевского интерференционного члена, а во-вторых, исключает необходимость точного измерения поляризации нейтронов. Представленный метод позволяет измерить величину λ с точностью на уровне 10^{-4} .

Коллаборацией aSPECT недавно опубликован результат измерения коэффициента электрон-нейтринной асимметрии a [2], из которого получается значение λ , отличающееся на $\sim 3\sigma$ от последнего результата коллаборации PERKEO III [3], полученного при помощи измерения коэффициента электронной асимметрии A . Это указывает на возможность поиска физики за пределами Стандартной модели и необходимость дальнейшего улучшения точности в измерении λ .

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-02-00547-а «Разработка проекта эксперимента по измерению отношения аксиальной и векторной констант слабого взаимодействия».

1. A. P. Serebrov et al., Physics of Atomic Nuclei **82**, 98 (2019).
2. M. Beck et al., Phys. Rev. C **101**, 055506 (2020).
3. B. Märkisch et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 242501 (2019).

Секция 12. **Источники нейтронов**



КОМПЛЕКС НЕЙТРОННЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ РЕАКТОРА ИБР-2: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Д. П. Козленко*

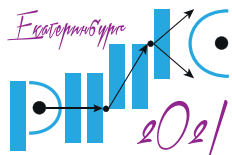
Лаборатория нейтронной физики им. И.М.Франка, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, РФ

*E-mail: denk@nf.jinr.ru

Представлен обзор текущего состояния комплекса спектрометров реактора ИБР-2, который в настоящее время включает в себя 15 установок, в том числе 8 дифрактометров, 3 рефлектометра, 1 спектрометр малоуглового рассеяния нейтронов, 2 спектрометра неупругого рассеяния нейтронов и 1 спектрометр нейтронной радиографии и томографии [1]. Рассмотрены важнейшие методические результаты развития комплекса спектрометров в последние годы и планы дальнейшей модернизации установок. Они включают в себя модернизацию общей головной части нейтронной системы 10 канала ИБР-2 для рефлектометра ГРЭИНС и нового спектрометра малоуглового рассеяния и имиджинга, замену Фурье-прерывателя на Фурье стресс дифрактометре (ФСД), разработку нового коллиматора для спектрометра малоуглового рассеяния ЮМО, создание элементов новой установки малоуглового рассеяния и нейтронного имиджинга на криогенном замедлителе реактора ИБР-2 и др.

Недавно в ЛНФ ОИЯИ был разработан план развития комплекса спектрометров на 2021 — 2025 гг. При этом учитывались такие факторы как наличие криогенного замедлителя реактора ИБР-2, текущие тенденции в развитии современных методик рассеяния нейтронов и комплементарных синхротронных методик, разработка проекта нового источника нейтронов в ЛНФ, растущая потребность использования методов рассеяния нейтронов для проведения междисциплинарных исследований. Подробная информация представлена в [2]. Его ключевыми задачами будут являться завершение работ по созданию основной конфигурации нового спектрометра малоуглового рассеяния и имиджинга, реализация первой стадии проекта создания нового спектрометра неупругого рассеяния в обратной геометрии на 2 канале ИБР-2, а также модернизация и реконструкция действующих установок ИБР-2, направленная на улучшение технических параметров и расширение экспериментальных возможностей.

1. <http://flnph.jinr.ru/ru/facilities/ibr-2/instruments>
2. <https://ibr-2.jinr.ru/api/v1/storage/download?path=instruments/BLUE BOOK 2021-2025 FINAL.pdf>



НЕЙТРОННЫЙ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС НА РЕАКТОРЕ ИВВ-2М. ИСТОРИЯ, ДОСТИЖЕНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ

В. И. Бобровский, А. Ф. Губкин, Ю. Н. Скрыбин*

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*E-mail: bobrovskii@imp.uran.ru

Нейтронный материаловедческий комплекс ИФМ УрО РАН на реакторе ИВВ-2М функционирует на площадях АО «Институт реакторных материалов». Этот реакторный центр сооружался в 60-х годах совместными усилиями Минсредмаша и АН СССР, причем для планировавшихся в ИФМ нейтронографических исследований в конструкции реактора были предусмотрены горизонтальные каналы для вывода пучков тепловых нейтронов. Для экспериментов в области радиационной физики нам также была обеспечена возможность проведения облучения образцов потоками быстрых нейтронов в вертикальных каналах реактора. Благодаря такому соседству, а также тому, что НМК ИФМ и АО «ИРМ» обладают комплементарными наборами уникального оборудования и опытом научного сотрудничества, наш материаловедческий комплекс располагает возможностями работ с высокоактивными промышленными материалами, в том числе, после их реальной эксплуатации в промышленных быстрых реакторах.

Основными направлениями исследований Нейтронного материаловедческого комплекса являются:

— **Радиационная физика** (изучение явлений, вызванных облучением материалов быстрыми нейтронами). В частности, в НМК ИФМ ведутся работы по систематическому изучению радиационно-стимулированных эффектов и механизмов их возникновения в различных модельных материалах, а также реальных реакторных конструкционных сталях. Значительную роль в этих работах играют нейтронно-дифракционные исследования, являющиеся основным инструментом изучения структурного и микроструктурного состояния материалов и их изменений в процессе нейтронного облучения.

— **Нейтроннография** (изучаются кристаллические и магнитные структуры различных материалов, фазовые переходы, диаграммы состояния, фазовый состав материалов, микроструктура, развиваются методы анализа данных нейтронных экспериментов). В последние годы исследовались твердые электролиты, различные полупроводники, мультиферроики, системы с конкурирующими магнитными взаимодействиями.

В настоящее время в НМК ИФМ функционируют три нейтронных дифрактометра, имеются также вибрационный магнитометр, рентгеновский дифрактометр и мессбауэровский спектрометр, приспособленные для исследования радиоактивных образцов. В течение всей своей деятельности НМК ИФМ успешно развивает сотрудничество со многими научными институтами, в частности, Уральского отделения РАН, высшими учебными заведениями и промышленными предприятиями, активно способствуя внедрению нейтронных методик в практику научных исследований.

Работы выполняются в рамках государственных заданий МИНОБРНАУКИ России (тема «Поток», № АААА-А18-118020190112-8 и тема «Нейтрон», № АААА-А19-119112590082-1).

О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ИСТОЧНИКА УХН НА ИМПУЛЬСНОМ РЕАКТОРЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Г. В. Кулин*, А. И. Франк, Н. В. Реброва, М. А. Захаров

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

* E-mail: kulin@nf.jinr.ru

Известно, что ультрахолодные нейтроны (УХН) являются уникальным объектом для исследования фундаментальных свойств нейтрона. Благодаря малой энергии и большой длине волны УХН они также очень удобны для осуществления широкого спектра квантовых экспериментов. За годы, прошедшие после их открытия Ф. Л. Шапиро с сотрудниками [1], в мире появился целый ряд источников УХН [2, 3] и ведется сооружение еще нескольких из них. Хотя УХН были впервые наблюдаемы в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ в Дубне, источника УХН до сих пор в Дубне нет.

Причины этого во многом обусловлены особенностями импульсного реактора ИБР-2 ОИЯИ. Его средняя мощность в 2 МВт относительно мала для создания непрерывного источника УХН, а частота повторения слишком велика для того, чтобы можно было аккумулировать нейтроны, рожденные в каждом отдельном импульсе. В то же время импульсный поток тепловых нейтронов очень велик, так как интервал между импульсами значительно превышает их длительность. При определенных условиях импульсный поток УХН от тонкого замедлителя также может быть довольно значительным. Проблема, таким образом, состоит в том, как воспользоваться этим обстоятельством.

Возможный подход к решению этой проблемы состоит в использовании идеи импульсного заполнения ловушки УХН [4] в сочетании с принципом временной фокусировки нейтронов [5]. В настоящем докладе представлена концепция интенсивного источника УХН, основанного на этом принципе.

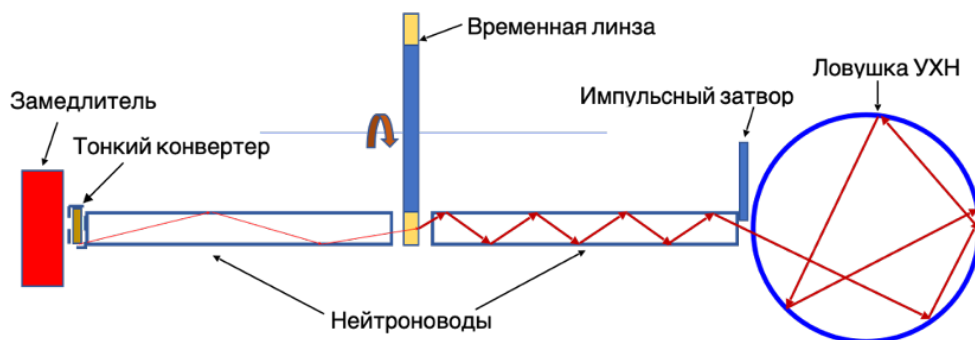


Рис. 1. Возможная схема источника УХН на импульсном реакторе периодического действия.

Возможная схема источника представлена на Рис. 1. Источник состоит из конвертора, двух секций зеркального нейтроновода, ловушки, снабженной импульсным затвором и временной линзы. В отсутствии линзы поток на входе в ловушку оказывается практически равномерным, поскольку значительная дисперсия скоростей УХН приводит к полной потере временной структуры пучка нейтронов в процессе их транспорта. Роль временной линзы, воздействующей по заданному временному закону на скорость нейтронов, и синхронизированной с источником, состоит в восстановлении импульсного характера пучка.

Принцип действия линзы поясняется на Рис. 2. На нем представлена временная диаграмма распространения нейтронов на участке, от «точечного» импульсного источника до линзы, и на участке b , от линзы до точки наблюдения. Предполагается, управляемое воздействие на скорость нейтронов будет осуществляться вследствие нестационарной дифракции нейтронов на движущихся решетках, расположенных на периферии вращающегося диска.

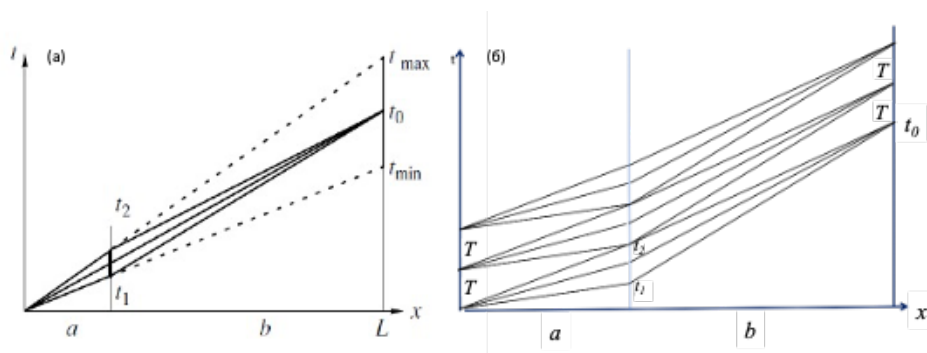


Рис. 2. Схемы действия временной линзы: линза, не меняющая средней энергии нейтронов (а) и линза, замедляющая нейтроны (б).

Проведенные Монте-Карло расчеты показали, что предложенная нами концепция позволяет создать достаточно интенсивный источник УХН на импульсном реакторе периодического действия при его достаточно умеренной мощности (см. Рис. 3). Это представляется особенно актуальным в связи с планами создания в ОИЯИ нового интенсивного источника нейтронов, реактора ИБР-3 «Нептун».

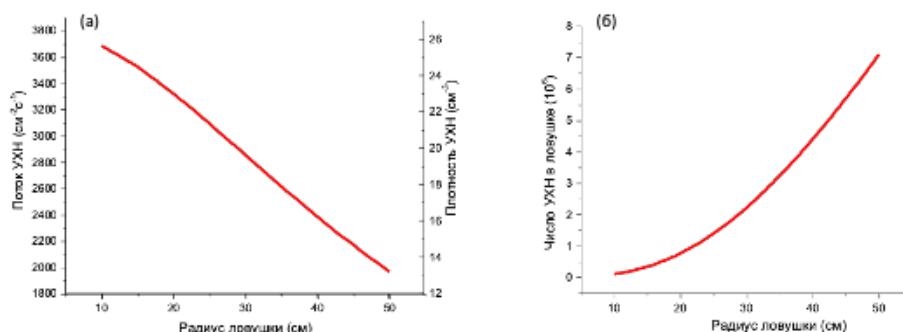
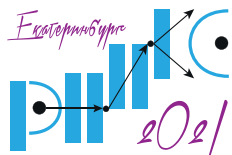


Рис. 3. Результаты расчета потока и плотности УХН (а), а также числа накопленных УХН (б) в ловушке.

Планируется, что предложенная концепция источника УХН должна стать предметом дальнейших более тщательных расчетов и тестовых экспериментов.

1. V. I. Luschnikov, Yu. N. Pokotilovsky, A. V. Strelkov, F. L. Shapiro, JETP Lett. **9**, 23 (1969).
2. G. Bison, M. Daum, K. Kirch et al., Phys. Rev. C. **95**, 045503 (2017).
3. A. Steyerl, World Scientific, 62 (2020).
4. Ф.Л. Шапиро, ЭЧАЯ **2**, 975 (1971).
5. A. I. Frank, R. Gähler, Phys. At. Nuc. **63**, 545 (2000).



ВЛИЯНИЕ ФОНА ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ НЕЙТРОНОВ НА КАЧЕСТВО ДАННЫХ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ИМПУЛЬСНОМ РЕАКТОРЕ ИБР-2

В. В. Садилов^{1}, В. И. Боднарчук¹, А. И. Иоффе^{1,2}*

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Юлихский исследовательский центр, Юлих, Германия

* E-mail: sadilov@jinr.ru

ИБР-2 импульсный исследовательский реактор на быстрых нейтронах, работающий в ЛНФ ОИЯИ в г. Дубне. Импульсная структура нейтронного пучка достигается за счет использования подвижных отражателей, формирующих импульсы мощности реактора с периодом 200 мс и длительностью (FWHM) около 0.3 мс. Между импульсами мощности поток нейтронов не падает до нуля, а находится на квази-постоянном уровне, составляющем примерно 10^{-4} от максимального уровня в импульсе мощности. Это является следствием непрерывного излучения запаздывающих нейтронов из активной зоны реактора, в процессе деления ядер топлива. Так как время испускания этих нейтронов не коррелировано с основными импульсами реактора, то они вносят искажения в определение длины волны нейтронов по методу времени пролета, который является основной методикой для всех инструментов нейтронного рассеяния на импульсном нейтронном источнике.

Данная работа посвящена изучению влияния квази-постоянного фона запаздывающих нейтронов между импульсами мощности реактора ИБР-2 на качество данных, получаемых на нейтронных рефлектометрах, расположенных в экспериментальном зале реактора ИБР-2.

1. G. Bauer, NIM A463, 505 (2001).
2. V. N. Shvetsov, Quantum Beam Sci. 2017, 1(1), 6 (2017).
3. В. Д. Ананьев и др, Препринт ОИЯИ P13-2004-156 (2012).

НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА РЕАКТОРЕ ИР-8

В. Т. Эм*

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Юлихский исследовательский центр, Юлих, Германия

* E-mail: Em_VT@nrcki.ru

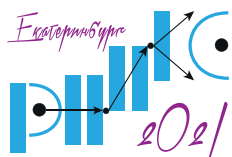
Реактор ИР-8 НИЦ «Курчатовский институт» (максимальная мощность 8 МВт) имеет 12 горизонтальных экспериментальных каналов (ГЭК) для нейтронных исследований, из которых 7 каналов используются для исследований по физике твердого тела и 5 — по ядерной физике. Реактор имеет поток нейтронов $\sim 2 \cdot 10^{14}$ нсм⁻²с⁻¹ в активной зоне и $\sim 10^{10}$ нсм⁻²с⁻¹ на выходе из горизонтальных радиальных каналов.

На горизонтальных радиальных каналах установлены шесть экспериментальных станций: дифрактометр для исследования внутренних напряжений СТРЕСС (ГЭК-3), монокристалльный дифрактометр МОНД (ГЭК-4), трехосный спектрометр АТОС (ГЭК-5), порошковый дифрактометр ДИСК (ГЭК-6), станция нейтронной интроскопии ДРАКОН (ГЭК-8) и двухкристалльный дифрактометр ультра-малоуглового рассеяния нейтронов СТОИК (ГЭК-9). На горизонтальном касательном канале ГЭК-7Б завершается создание станции нейтронной томографии высокого разрешения (~ 50 мкм) ПОНИ на «белом» пучке нейтронов. Будет дано краткое описание технических характеристик станций и приведены примеры исследований на них.

Для изменения длины волны нейтронов, на большинстве станций используется двойной монохроматор, что позволяет уменьшить уровень фона и габаритные размеры установок.

В 2022 году планируется установить в горизонтальном канале ГЭК-10 источник холодных нейтронов на основе жидкого водорода, а в нейтроноводном зале три нейтроновода. В 2023 году планируется установить на нейтроноводах три новые станции: установку малоуглового рассеяния нейтронов, порошковый дифрактометр и рефлектометр на поляризованных нейтронах.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ № 1886 от 22.08.2019).



ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЯПРОЛЕТНЫХ СПЕКТРОВ ПРОПУСКАНИЯ ТОКОВЫМ МЕТОДОМ НА РЕАКТОРЕ ИБР-2

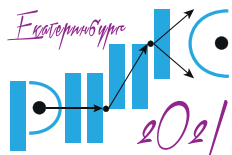
С. В. Алпатов³, Ю. Н. Конач¹, В. Л. Кузнецов^{1,2*}, Е. В. Кузнецова^{1,2}, П. В. Седышев¹

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Институт ядерных исследований, Российская Академия Наук, Москва, Россия

³Scientific Institute of Applied Acoustics, Dubna, Russia

Увеличение интенсивности импульсных источников нейтронов приводит к беспрецедентно большой импульсной плотности потока нейтронов до 10^{11} н/с и, как следствие, к невозможности использования систем сбора данных, работающих в режиме счета. С другой стороны, при работе в стационарных реакторах часто используются детекторы в токовом режиме. В данной статье представлены результаты измерения токовым методом времяпролетных спектров пропускания образцов тантала и индия с помощью счетчика нейтронов, работающего в токовом режиме.



STUDY OF THE DELAYED NEUTRON BACKGROUND AT THE IBR-2 REACTOR

S. V. Alpatov³, Yu. N. Kopach¹, V. L. Kuznetsov^{1,2*}, E. V. Kuznetsova^{1,2}, P. V. Sedyshev¹

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

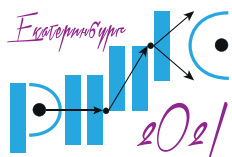
²Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Research Institute of Applied Acoustics, Dubna, Russia

* E-mail: evgenia@inr.ru

The new time-of-flight method for measuring the neutron lifetime Λ_n , proposed in [1], is sensitive to the background. The pulsed neutron source IBR-2 has an unavoidable background from delayed neutrons. The effect-to-background ratio was found to be of the order of 10^{-6} . Between the power pulses of the IBR-2 reactor, about 7% of the reactor power is allocated, according to [2]. Since the number of neutrons is proportional to the reactor power, the background from delayed neutrons will also be 7% in 200 milliseconds. In the time range of interest to us, the background from delayed neutrons will be on the order of 2%. Measurements of the background of delayed neutrons were carried out on the 1st channel of the IBR-2 and a complex dependence of the background on time was established.

Секция 13.
**Приборы и методики
нейтронного эксперимента**



НЕЙТРОННАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ С РЕГИСТРАЦИЕЙ ВТОРИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В. Д. Жакетов^{1*}, К. Храдко¹, А. В. Петренко¹, Ю. Н. Хайдуков^{2,3}, Ю. Н. Копац¹,
Ю. М. Гледенов¹, Н. А. Гундорин¹, Ю. В. Никитенко¹, В. Л. Аксёнов¹

¹Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²НИИЯФ МГУ, Москва, Россия

³Max-Planck Institute for Solid State Research, Stuttgart, Germany

*E-mail: zhaketov@nf.jinr.ru

В настоящее время актуальным является изучение явлений близости, возникающих на границе раздела двух сред. Это, в частности, относится к границе раздела сверхпроводника и ферромагнетика. Из-за взаимного влияния ферромагнетизма и сверхпроводимости, обусловленного конечными значениями длин когерентности, происходит существенная модификация магнитных и сверхпроводящих свойств. Проявляется это, в частности, в изменении пространственного распределения намагниченности. Важно установить соответствие магнитного пространственного профиля (пространственной зависимости намагниченности) ядерным пространственным профилям элементов контактирующих сред. Для определения пространственного магнитного профиля используют стандартный метод рефлектометрии поляризованных нейтронов, позволяющий определить энергию потенциального взаимодействия нейтрона со средой [1]. На границе раздела двух сред потенциал взаимодействия является суммой потенциалов взаимодействия проникающих друг в друга элементов. Стандартная рефлектометрия нейтронов не позволяет установить, с какими элементами связаны изменения потенциала взаимодействия и, в частности, магнитного профиля. Для определения профиля потенциала взаимодействия нейтрона с отдельными элементами необходимо регистрировать вторичное излучение элементов [2]. На данный момент на спектрометре РЕМУР реактора ИБР-2 в Дубне реализованы каналы регистрации заряженных частиц [3], гамма-квантов [4] и нейтронов с переворотом спина [4]. Для измерений доступны несколько десятков изотопов и магнитных элементов.

1. Ю. В. Никитенко, В. Г. Сыромятников, Рефлектометрия поляризованных нейтронов, Физматлит, Москва, (2014).
2. Yu. V. Nikitenko, A. V. Petrenko, N. A. Gundorin et al., Crystallogr. Rep. **60**, 4 (2015).
3. В. Д. Жакетов, А. В. Петренко, С.Н. Вдовичев и др., Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования **6**, 20 (2019).
4. В. Д. Жакетов, К. Храдко, А. В. Петренко и др., Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования **6**, 10 (2021).

НЕРАЗРУШАЮЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ УЗБЕКИСТАНА НА НОВОЙ УСТАНОВКЕ НЕЙТРОННОЙ РАДИОГРАФИИ И ТОМОГРАФИИ НА РЕАКТОРЕ ВВР-СМ

Б. А. Абдурахимов^{1,2*}, С. Е. Кичанов², М. Ю. Ташметов¹, Б. С. Юлдашев¹, Д. П. Козленко²,
Н. Б. Исматов¹, Е. В. Лукин²

¹Институт ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, Республика Узбекистан

²Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*E-mail: bekhzod@jinr.ru

Культура Узбекистана имеет богатейшую историю, которая неразрывно была связана многовековыми традициями и укладом жизни народов Центральной Азии. Расположенный на перекрестке Великого Шелкового пути, Узбекистан собрал на своей территории множество памятников архитектуры, древних крепостей и замков, загадочных и уникальных памятников природы, элементов фольклора, предметов нумизматики, многие из которых сегодня находятся под охраной Всемирного наследия ЮНЕСКО. Одно из важных направлений, которое развивается на новой станции нейтронной радиографии и томографии на реакторе ВВР-СМ (Ташкент, Узбекистан) – неразрушающая нейтронная диагностика объектов культурного наследия.

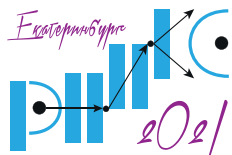
Исследовательский реактор ВВР-СМ Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан (ИЯФ АН РУз) представляет собой аналогичный реактор типа ВВР. Он возобновил работу в 2017 году. В настоящее время реактор ВВР-СМ используется в широком спектре научных областей, таких как ядерная физика, нейтронно-захватная терапия, нейтронно-активационный анализ и облучение минералов, а также производства радиоизотопов для ядерной медицины. Также работает нейтронный дифрактометр ДН-500. Принимая во внимание растущую тенденцию запросов со стороны научного сообщества в междисциплинарных прикладных исследованиях в области инженерии и растениеводства, геофизики, астрофизики, археологии и палеонтологии, новая экспериментальная установка нейтронной радиографии и томографии построена [1] и введена в эксплуатацию. Нейтронный пучок сечением 90×90 мм² формируется с помощью составной коллиматорной системы, состоящей из нескольких слоев. Длина коллиматора составляет 500 мм, внутренний диаметр расширяется с 10 мм на входе до 25 мм на выходе. Расстояние между входной апертурой коллиматорной системы и положением исследуемого образца составляет 6 м, что соответствует значению характеристического параметра установки $L/D = 600$. Интегральный поток тепловых нейтронов в позиции образца измерялся методом активации золотых фольг и составляет $\Phi \sim 9 \times 10^6$ н/см²·с. Двухзеркальная детекторная система базируется на сцинтилляционном экране ⁶LiF/Zn(Cd)S:Ag с регистрацией изображений высокочувствительной видеокамерой на основе CCD-матрицы ON Semi KAF-09000 высокого разрешения. Проведение томографических экспериментов обеспечивает система гониометров 8MR190-90-4247-Large Motorized Rotation (Standa Ltd., Вильнюс, Литва). Высокий поток нейтронов на исследуемом образце и высокая чувствительность детекторной системы определяют короткое время экспозиции от 3 с при регистрации одного изображения. Полученные экспериментальные данные корректируются на фоновые шумы детекторной системы и нормализуются на падающий пучок с помощью программного обеспечения ImageJ. Томографическая реконструкция осуществляется программами H-PITRE и

SYRMEP Tomo Project. Плагин 3D Viewer ImageJ используется для визуализации и анализа восстановленных трехмерных данных.

В данной работе были исследованы объекты культурного наследия методами нейтронной томографии и рентгеновской дифракции. Первым исследованным объектом культуры была курильница в виде бронзового оленя. Этот бронзовый предмет датируется III — IV веками нашей эры и найден на археологических раскопках вокруг поселения Далварзинтепа Сурхандарьинской области Узбекистана. Следующим исследованным объектом был медно-серебряный дирхам. Корродированная медно-серебряная монета, принадлежащая династии Караханидов X — XII веков нашей эры, была выбрана в качестве модельного объекта культурного наследия современного Узбекистана.

Пространственное распределение различных фаз в этих объектах исследовались на новой экспериментальной установке нейтронной радиографии и томографии на 5-м канале реактора ВВР-СМ. Томографические эксперименты проводились с углом поворота гониометра 0.45° , общее количество нейтронных радиографических изображений, составило 400. Время экспозиции 3 с при регистрации одного нейтронного изображения, а полное время одного эксперимента 34 минуты. Фазовый анализ монет и коррозионных материалов исследовался методом рентгеновской дифракции на дифрактометре EMPYREAN PANalytical. Получены трехмерные модели бронзового оленя. Восстановлена внутренняя организация пустого пространства внутри металлического корпуса курильницы. Получены фазовый состав и пространственное распределение различных фаз внутри монеты. Основной фазой исследуемого дирхама является сплав серебра с медью с преобладанием доли меди до 74 вес.%. Основными фазами коррозионной фракции являются куприт Cu_2O , тенорит CuO и халькоцит Cu_2S . Построено неравномерное распределение проникновения коррозии в объем монеты.

1. B. A. Abdurakhimov, M. Yu. Tashmetov, B. S. Yuldashev, et al., Nucl. Instr. and Methods in Phys. Res., A. **989**, 164959 (2021).



НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА РЕАКТОРЕ ИР-8

И. Д. Карпов, В. Т. Эм, С. А. Рылов*

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

*E-mail: Karpov_ID@nrcki.ru

Внутренние механические напряжения могут играть определяющую роль в поведении металлических изделий под нагрузкой. Более того, в зависимости от их знака, величины и области воздействия, влияние на прочностные характеристики материала может быть как деструктивным, так и, наоборот, упрочняющим. Поэтому, исследования закономерностей формирования внутренних напряжений в металлах представляют большой интерес для материаловедов, инженеров и физиков.

Нейтронно-дифракционный метод является мощным инструментом для исследования внутренних напряжений, т.к. это единственный неразрушающий метод, позволяющий измерять все три главные компоненты тензора деформации непосредственно в глубине объёмных поликристаллических объектов, что обеспечивает правильное вычисление тензора внутренних напряжений.

С 2016 года на исследовательском реакторе ИР-8, НИЦ «Курчатовский институт» успешно функционирует нейтронный дифрактометр СТРЕСС, специально разработанный для неразрушающих исследований внутренних механических напряжений в массивных металлических образцах. В эксперименте с помощью позиционного-чувствительного детектора регистрируется рассеяние нейтронов от выделенного в образце пробного объёма (от 0.125 до 125 мм³). Применяемая нейтронно-дифракционная методика измерений имеет международный стандарт ISO/TS 21432 [1] и позволяет получать информацию о трёхмерном распределении внутренних напряжений в исследуемом образце, недоступную для других современных неразрушающих исследовательских методов. Компактная активная зона реактора ИР-8 и удачная конструкция дифрактометра обеспечивают высокую плотность потока нейтронов на образце ($\sim 5 \times 10^6$ н/см²/с), что позволяет проводить измерения в образцах большой толщины (максимальная толщина стального образца – 50 мм, алюминиевого – 150 мм).

Несмотря на то, что первые исследования остаточных напряжений в сварных швах стали проводиться практически одновременно с появлением самой нейтронной методики, данное направление исследований до сих пор не теряет актуальности. Это связано в первую очередь с непрерывным совершенствованием сварочных технологий. На станции СТРЕСС были проведены исследования пространственного распределения остаточных напряжений в сварном шве с низкотемпературным фазовым переходом [2]. Сварка специальным сплавом, претерпевающим фазовый переход с увеличением объёма элементарной ячейки (аустенит → мартенсит) уже после кристаллизации расплава, должна была предотвратить формирование деструктивных растягивающих остаточных напряжений на поверхности шва. При помощи нейтронных исследований было обнаружено, что вблизи поверхности сварного шва действительно сформировались сжимающие остаточные напряжения, положительно влияющие на прочность шва и его коррозионную стойкость.

На дифрактометре СТРЕСС впервые нейтронным методом был исследован Х-образный сварной шов толщиной до 45 мм [3] из высокопрочной стали. По результатам измерений было установлено, что максимальные растягивающие продольные напряжения сконцентрированы в двух отдельных областях, расположенных вблизи поверхности шва с одной и с другой стороны пластины. При расчёте остаточных напряжений методом конечных элементов, картина распределения напряжений получается схожей, однако, максимальные амплитудные значения расчётных напряжений оказались завышены на величину до 300 МПа в ряде областей. Исследования внутренних напряжений в образцах, изготовленных по аддитивным технологиям, занимают значительную часть рабочего времени дифрактометра СТРЕСС. Технология изготовления таких образцов подразумевает послойное наплавление металла, поэтому, из-за высоких градиентов температур даже в небольших изделиях формируются высокие остаточные напряжения. На станции СТРЕСС были проведены исследования остаточных напряжений в тонких пластинках, выращенных на жёсткой подложке [4]. Данные модельные образцы имитировали производство реальных тонкостенных деталей больших линейных размеров. Перед нанесением каждого слоя выдерживалось заданное время, для того чтобы имитировать нанесение слоя на большой траектории. Продольные напряжения оказались растягивающими и достигали максимальных значений на верхнем ребре пластины, в то время как нормальная компонента напряжений оказалась сжимающей и достигала максимальных значений вблизи подложки. Картина распределения напряжений в изученных образцах кардинально отличалась от результатов, полученных для образцов, изготовленных на гибкой подложке.

На нейтронном дифрактометре СТРЕСС были исследованы напряжения в тонких (100 мкм) стальных лентах, применяющихся в качестве подложки при изготовлении высокотемпературных сверхпроводников 2-го поколения [5]. Обнаруженные растягивающие напряжения достигали ~60 МПа в поперечном направлении, а сжимающие – ~70 МПа в продольном направлении. Такие величины остаточных напряжений являются значительными для ленты толщиной 100 мкм и могут вызывать расслоение многослойной структуры сверхпроводника в процессе производства.

Дифрактометр СТРЕСС был аттестован на международном стандартном образце VAMAS [6], что подтверждает достоверность проводимых измерений.

1. Non-destructive testing – Standard test method for determining residual stress by neutron diffraction. Technical Specification, ISO/TS 21432.
2. H. Wang et al., Materials Characterization **144**, 345 (2018).
3. I. D. Karpov et al., Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques **14**, S35 (2020).
4. I. D. Karpov et al., Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques **14**, S79 (2020).
5. И. Д. Карпов и др., Журнал технической физики **90**, №. 7 (2020).
6. И. Д. Карпов, В. Т. Эм, В. В. Сумин, Дефектоскопия **4**, 61 (2019).

НЕЙТРОННАЯ РАДИОГРАФИЯ И ТОМОГРАФИЯ НА РЕАКТОРЕ ИБР-2: ТЕКУЩИЙ СТАТУС И ПОСЛЕДНИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

*С. Е. Кичанов**, Д. П. Козленко, Е. В. Лукин, Б. Н. Савенко, К. М. Назаров,
Б. А. Абдурахимов, М. Р. Кенессарин

Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Фанка, Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна, Россия

* E-mail: ekich@nf.jinr.ru

Значительная глубина проникновения нейтронов позволяет получать нейтронные изображения и объемные трехмерные реконструкции внутреннего строения объектов исследования с пространственным разрешением лучше 100 мкм. В докладе представлено описание экспериментальных возможностей метода нейтронной радиографии и томографии, реализуемого на специализированной экспериментальной станции [1] на импульсном высокопоточном реакторе ИБР-2 (ОИЯИ, Дубна). Параметры и техническое оснащение этой станции позволяют использовать различные методы вариации нейтронного радиографического контраста, в том числе визуализацию с дисперсией по энергиям нейтронов [2]. Конвертация нейтронных изображений в видимый свет, регистрируемый ПЗС-видеокамерой HAMAMATSU, происходит с помощью пластины сцинтиллятора 6LiF/ZnS(Ag) толщиной 0.2 мм производства фирмы RC TRITEC Ltd (Швейцария). Размер ПЗС-матрицы составляет 2048×2048 пикселей, каждый пиксель имеет размер 12×12 мкм. Импульсный характер работы реактора ИБР-2 позволяет реализовать времяпролетную схему эксперимента: в этом случае используются высокоскоростные видеокамеры или специальные детекторы с синхронизацией времени начала экспозиции с импульсами реактора.

В докладе показана высокая информативность методов нейтронной радиографии и томографии при исследовании сложных инженерных объектов, метеоритов, палеонтологических образцов, объектов культурного наследия и других. Представлены результаты по исследованию цементных материалов — специальных типов строительных материалов, применяющихся при постройке специальных хранилищ или объектов для захоронений радиоактивных отходов различного типа [3]. Интересным применением метода нейтронной радиографии является исследование кинетики плавления смеси льда и гранулированного кварца. Кроме этого, представлены результаты неразрушающих нейтронных исследований процессов в тепловых контурных трубках.

Необходимо особо отметить большой научный задел по неразрушающим исследованиям объектов культурного наследия методом нейтронной радиографии и томографии [2, 4]: уникальные исследования монет Древней Греции и Булгарии, объектов древнерусского культурного наследия. Полученная в ходе исследований углубленная информация о строении исследуемого объекта позволяет определить степень сохранности объекта, скрытые дефекты, уточнить технику работы мастера при создании артефакта, выработать оптимальные методы для реставрации.

1. D. P. Kozlenko, S. E. Kichanov, E. V. Lukin et al., Particles and Nuclei, Letters **13**, 346 (2016).
2. К. М. Подурец, С. Е. Кичанов, и др. Кристаллография **66**, 254 (2021).
3. I. Yu. Zel, M. Kenessarin, S. E. Kichanov, et al., Cement and Concrete Composites **119**, 103993 (2021).
4. B. A. Abdurakhimov, S. E. Kichanov, C. Talmatchi, et al., Journal of Archaeological Science: Reports **35**, 102755 (2021).

РАСХОДИМОСТЬ НЕЙТРОННОГО МИКРОПУЧКА ИЗ ПЛОСКОГО ВОЛНОВОДА

С. В. Кожевников^{1*}, В. Д. Жакетов¹, А. В. Петренко¹, Т. Келлер^{2,3}, Ф. Раду⁴

¹ЛНФ им. И.М. Франка, ОИЯИ, Дубна, Россия

²Max Planck Institut für Festkörperforschung, Stuttgart, Germany

³Max Planck Society Outstation at the Heinz Maier-Leibnitz Zentrum, Garching, Germany

⁴Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie, Berlin, Germany

*E-mail: kozhevn@nf.jinr.ru

Ширина нейтронного пучка в стандартном эксперименте составляет от 0.1 до 10 мм. Чтобы исследовать локальные микроструктуры с высоким пространственным разрешением, необходимо иметь узкие микропучки шириной менее 100 мкм. Для этого активно разрабатываются различные фокусирующие устройства (преломляющие линзы, изогнутые кристаллические монокроматоры, параболические нейтронотводы, капиллярные линзы и др.) [1]. Основным их недостатком является то, что они не могут выделить «чистый» микропучок с достаточно резкими границами. Например, преломляющие линзы Френеля преломляют лишь 20 – 30% падающего пучка, капиллярные линзы имеют большой фон, пучок от параболических нейтронотводов сильно структурирован в пространстве, а рассчитанный профиль нейтронного микропучка от обычной диафрагмы имеет широкие крылья [2].

В работе [2] предложен светосильный метод зеркального отражения нейтронов от кремниевой подложки при малом угле скольжения, в котором ширина микропучка составляет около 30 мкм. Метод обладает низким фоном и подходит для времяпролётного режима измерений, но практически достижимая ширина нейтронного микропучка всё ещё остаётся довольно большой. Плоские волноводы [3] позволяют получить на порядок более узкие микропучки нейтронов. Волноводы представляют собой трёхслойные наноструктуры (Рис. 1) с нейтроннооптическим потенциалом в виде ямы, преобразующие входной коллимированный нейтронный пучок расходимостью $\delta\alpha_i \sim 0.01^\circ$ и шириной около 0.1 мм в узкий микропучок с расходимостью $\delta\alpha_b \sim 0.1^\circ$ с начальной шириной d порядка 0.1 мкм. Ширина микропучка на расстоянии l от волновода равна $w = d + l \cdot \delta\alpha_b$ и составляет 2.6 мкм для $l = 1$ мм и $\delta\alpha_b = 0.15^\circ$. Начальный α_i и конечный α_f углы скольжения отсчитываются от поверхности волновода. Расходимость микропучка, регистрируемого позиционно-чувствительным детектором (ПЧД) с угловым разрешением $\delta\alpha_{det}$, равна $\delta\alpha_f \sim \sqrt{(\delta\alpha_b)^2 + (\delta\alpha_{det})^2}$. Экспериментальная схема на Рис. 1 была реализована и использована для исследования аморфной магнитной проволоочки диаметром 190 мкм [2,4].

Преимуществами плоских волноводов является рекордно малая ширина нейтронного микропучка и относительно простая возможность отделить микропучок от фона. Недостатками являются низкая интенсивность нейтронов порядка 1 н/с и сравнительно большая угловая расходимость микропучка. Основной вклад в расходимость микропучка из плоского волновода даёт дифракция Фраунгофера на выходе волноводного слоя $\delta\alpha_f \propto \frac{\lambda}{d}$, где λ – длина волны нейтронов. Расходимость микропучка нейтронов была определена экспериментально в зависимости от длины волны нейтронов [5] и ширины волноводного канала [6,7]. В работе [8] экспериментально получено, что спектральная ширина резонанса порядка $n = 0$ увеличивается с ростом расходимости начального пучка нейтронов.

В представляемой работе с помощью двумерного ПЧД с угловым разрешением $\delta\alpha_{det} = 0.0232^\circ$ регистрировалось распределение интенсивности микропучка нейтронов из плоского волновода по конечному углу α_f в зависимости от расходимости падающего пучка нейтронов $\delta\alpha_i$ (Рис. 1). На времяпролётном нейтронном рефлектометре РЕМУР импульсного реактора ИБР-2 (ЛНФ ОИЯИ, Дубна, Россия) был исследован

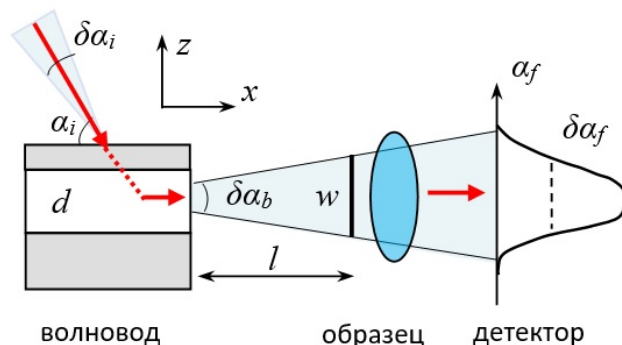


Рис. 1. Геометрия эксперимента с нейтронным микропучком из волновода.

волновод $\text{Ni}_{67}\text{Cu}_{33}$ (20 нм)/ Cu (150)/ $\text{Ni}_{67}\text{Cu}_{33}$ (50)// Si (подложка) с размерами подложки $1 \times 1 \times 25 \text{ мм}^3$. Сплав Ni (67 ат.%) Cu (33 ат.%) является немагнитным при комнатной температуре и обладает высоким ядерным нейтронооптическим потенциалом. При фиксированном угле скольжения падающего пучка $\alpha_i = 0.211^\circ$ длина волны нейтронов для резонанса $n = 0$ равна $2.5 \text{ \AA}$. На Рис. 2 показана расходимость микропучка нейтронов (полная ширина пика на половине высоты) в зависимости от расходимости начального пучка. Точки соответствуют экспериментальным данным, линия – подгонке по методу наименьших квадратов: $\delta\alpha_f = 0.096 + 4.4 \cdot \delta\alpha_i$. Видно, что расходимость микропучка линейно растёт с ростом расходимости падающего пучка нейтронов. Полученные экспериментальные результаты подтверждают расчёты, сделанные в работе [9].

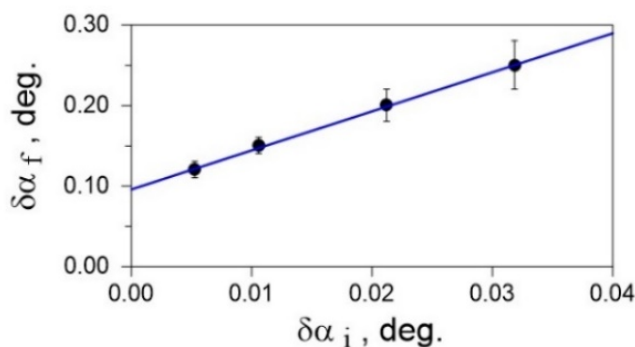


Рис. 2. Расходимость нейтронного микропучка в зависимости от расходимости падающего пучка (точки – эксперимент, линия – подгонка).

1. F. Ott, Modern Developments in X-Ray and Neutron Optics. Springer Series in Optical Sciences **137**, 113 (2008).
2. F. Ott, S. Kozhevnikov, A. Thiaville et al., NIM A **788**, 29 (2015).
3. F. Pfeiffer, V. Leiner, P. Høghøj, I. Anderson, Phys. Rev. Lett. **88**, 055507 (2002).
4. С.В. Кожевников, F. Ott, J. Torrejón и др., Физика твёрдого тела **56**, 63(2014).
5. S.V. Kozhevnikov, V.K. Ignatovich, Yu.V. Nikitenko et al., Pis'ma ZhETF **102**, 3 (2015).
6. С.В. Кожевников, В.Д. Жакетов, Ф. Раду, ЖЭТФ **154**, 698 (2018).
7. S.V. Kozhevnikov, V.D. Zhaketov, T. Keller et al., NIM A **915**, 54 (2019).
8. С.В. Кожевников, В.К. Игнатович, А.В. Петренко, Ф. Раду, ЖЭТФ **150**, 1094 (2016).
9. F. Pfeiffer, X-ray and neutron waveguides, PhD thesis, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2002.

ПРОВЕДЕНИЕ НЕЙТРОННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ ИВВ-2М. МЕТОДЫ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

А. А. Зырянова, Ю. В. Метелева, А. В. Козлов

АО «ИРМ», Заречный, Россия

За многолетний период эксплуатации исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М создана обширная научная база, которая позволяет решать следующие задачи:

- исследования в области материаловедения, биологии, ядерной физики и т.п.;
- исследования в области радиационной химии, радиационных, ядерных и реакторных технологий;
- исследования ядерных материалов и полномасштабных изделий с делящимися веществами;
- исследования влияния реакторных излучений на приборы, датчики, полупроводниковые материалы и различное оборудование.

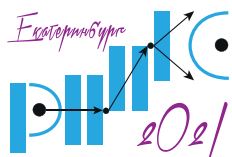
Зачастую при исследованиях в области материаловедения, например, для обоснования стойкости материала к различного рода воздействиям, в том числе радиационным, требуется его облучение в полях ионизирующего излучения.

Для планирования реакторного эксперимента анализируются исходные данные и условия проведения эксперимента – нейтронно-физические параметры (плотность потока нейтронов, тепловыделение, мощность дозы гамма-излучения и т.д.) и технические параметры (габаритный размер, масса, конструкционные особенности материала/экспериментального устройства). В случае удовлетворения параметров реактора ИВВ-2М необходимым условиям, начинается стадия подготовки к эксперименту.

На начальной стадии подготовки эксперимента производится предварительный нейтронно-физический расчет с использованием аттестованных прецизионных программных средств. Из ячеек активной зоны, удовлетворяющих нейтронно-физическим параметрам испытаний, выбираются оптимальные.

Для подтверждения корректности математических моделей проводится экспериментальное подтверждение полученных расчетных данных. Сравнивая расчетные значения с измерениями распределения невозмущенных (без загрузки экспериментального устройства) полей нейтронов и гамма-излучения в активной зоне реактора и в месте облучения, можно судить о работоспособности расчетной модели активной зоны без учета экспериментального устройства. Для подтверждения нейтронно-физической и теплофизической модели самого объекта испытания, необходимо изготавливать и испытывать нейтронно-физический и (или) теплофизический макеты. Макеты, должны повторять конструкцию устройства, но при этом позволять измерять основные нейтронно-физические и теплофизические параметры. В макет устанавливаются датчики плотности потока нейтронов и температуры, предусматривается возможность проведения нейтронно-активационного анализа непосредственно внутри макета или установления образцов-мониторов.

На основании полученных экспериментальных данных корректируются расчетные модели и конструкция экспериментального устройства и (или) место проведения эксперимента.



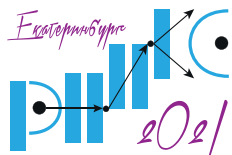
КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

● → ● → ● → Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

Для экспериментальной оценки нейтронно-физических параметров в ходе реакторного эксперимента применяются нейтронно-активационные детекторы, датчики потока нейтронов (КтВ-7, ДПЗ), калориметр, твердотельные стеклянные детекторы ионизирующих излучений ДТС-0,01/1,0, датчики мощности дозы гамма-излучения (КтВ-7).

Далее наступает следующий этап эксперимента – послереакторные исследования для подтверждения параметров облучения. Во время их проведения существует возможность уточнения флюенса нейтронов, набранного образцом. Флюенс определяется путем измерения активности продуктов активации образца. Гамма-сканирование экспериментального устройства позволяет получить аксиальное и азимутальное распределение плотности потоков в образце.

В докладе представлено описание существующих методов измерений, осуществляемых на комплексе с исследовательским ядерным реактором ИВВ-2М, а также их практическая реализация.



РАЗВИТИЕ МЕТОДА НЕЙТРОННОЙ ИНТРОСКОПИИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ НА РЕАКТОРЕ ИР-8

М. М. Мурашев, В. П. Глазков, В. Т. Эм*

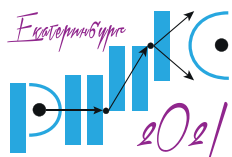
НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

* E-mail: mihail.mmm@inbox.ru

С начала XXI в. метод нейтронной интроскопии нашел широкое применение во многих областях науки: от материаловедения, геологии, исследования топливных элементов на основе лития и водорода, до палеонтологии, медицины и изучения объектов культурного наследия. Успехи в этих областях в большой степени связаны с развитием вычислительной техники и появлением высокоэффективных детекторных систем, а широта применения метода связана со свойствами нейтронов. Высокая чувствительность тепловых нейтронов к легким атомам, позволяет визуализировать, например, распределение водорода внутри металлических объектов, а монохроматическое нейтронное излучение с длиной волны λ от 2 до 5 Å позволяет визуализировать распределение фаз, внутренние напряжения и текстуру в кристаллических образцах, основываясь на дифракционных эффектах.

Начиная с 2016 года на базе исследовательского реактора ИР-8 были созданы 2 современные специализированные станции нейтронной интроскопии, как на монохроматическом нейтронном пучке с изменяемой длиной волны, так и на белом. В настоящей работе приведены результаты исследований из различных областей науки, полученные на станциях нейтронной интроскопии реактора ИР-8.

Работа выполнена на оборудовании УНУ НИК ИР-8, НИЦ «Курчатовский институт».



INELASTIC NEUTRON SCATTERING UNDER MULTI-EXTREME CONDITIONS

P. G. Naumov^{1*}, *M. Bartkowiak*¹, *J. Vonka*¹, *S. Nikitin*¹, *Ch. Rüegg*^{1,2,3,4}

¹Paul Scherrer Institute, Villigen-PSI, Switzerland

²Institute of Physics, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Switzerland

³Institute for Quantum Electronics, ETH Zürich, Hönggerberg, Switzerland

⁴Department of Quantum Matter Physics, University of Geneva, Geneva, Switzerland

*E-mail: pavel.naumov@psi.ch

Modern neutron scattering investigations require a wide range of sample environments. High-pressure techniques are particularly valuable for controlling the microscopic interactions within the system. Used in combination with magnetic fields and at low temperatures, they provide unique information about the magnetic states, transitions and excitations of materials under extreme conditions.

Developing a cryomagnetic system for high-pressure research is a complex engineering challenge with multiple contradictory requirements. A strong magnetic field is achieved most easily in a small volume, but a wide bore is needed to accommodate the pressure cell and cooling system. Effective cooling requires a small sample mass, while high pressures require thick cell walls. Our new cryomagnetic system is based on a superconducting magnet providing a vertical field of 11 T over a very large sample space (100 mm). We have combined this magnet with a large ³He/⁴He dilution refrigerator (base temperature 20 mK) and two types of pressure cell, a He gas cell (up to 0.5 GPa) and a double-wall clamp cell (up to 1 GPa).

For test measurements we used a high-quality single crystal of the spatially anisotropic triangular-lattice material Cs₂CuCl₄, which displays a cascade of phase transitions at $T = 0.05$ K and fields up to 11.5 T [1,2]. Working on the triple-axis spectrometer TASP (PSI), we exploited the high cold-neutron flux to explore the novel field-induced phases. In our first trials at the target temperature, pressure and field parameters, the measured signal-to-noise ratio was sufficient to resolve only structural but not magnetic features, and thus we are changing the pressure cell to increase the sample volume.

In developing this uniquely flexible facility for neutron scattering with wide-ranging coverage of the multi-extreme (P, H, T) parameter space, we aim to unveil and understand new physics in a broad spectrum of metallic and insulating quantum magnetic materials [3-5].

1. Y. Tokiwa et al., Phys. Rev. B **73**, 134414 (2006).
2. S. A. Zvyagin et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 077206 (2014).
3. W. Knafo et al., Nat. Commun. **7**, 13075 (2016).
4. T. Helm et al., Nat. Commun. **11**, 3482 (2020).
5. J. L. Jiménez et al., Nature **592**, 370 (2021).

О МЕТОДАХ ФАЗОМЕТРИИ В РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ МАГНЕТИЗМА СЛОИСТЫХ СТРУКТУР

*Н. К. Плешанов**

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт»,
Гатчина, Россия

*E-mail: pleshanov_nk@npi.nrcki.ru

Стандартная схема рефлектометрии поляризованных нейтронов, которая включает поляризатор, два флиппера и анализатор, позволяет измерять модули четырех элементов матрицы отражения r , определять проекцию вектора поляризации отраженных нейтронов на ведущее поле (1-мерный анализ поляризации). Нахождение фаз элементов матрицы r позволило бы получить более полную информацию о структуре и магнетизме слоев. Поскольку развитие нейтронных методов исследования является важной темой данной конференции, следует обсудить методы фазометрии в рефлектометрии поляризованных нейтронов и новые возможности для исследований магнетизма слоистых структур.

Ранее было показано [1], что непосредственно нейтронная рефлектометрия может дать информацию только о разностях фаз элементов матрицы отражения r . Таким образом, полная рефлектометрия поляризованных нейтронов сводится к измерению в общем случае 4 модулей и 3 разностей фаз элементов матрицы r , 3 модулей и 2 разностей фаз – для компланарных, 2 модулей и 1 разности фаз – для коллинеарных магнитных систем. Проведены демонстрационные расчеты коэффициентов отражения, абсолютных фаз и разностей фаз элементов матрицы отражения с модельными системами. Будут представлены соответствующие методы фазометрии и возможные экспериментальные схемы полной рефлектометрии поляризованных нейтронов.

В методе съемок с двумя осями квантования производится измерение модулей элементов матрицы отражения r в двух представлениях, из них находятся все разности фаз элементов матрицы r (в любом из этих представлений). В случае структур с компланарными полями стандартные измерения достаточно дополнить съемками с отражением нейтронов со спинами, неколлинеарными ведущему полю (метод перекрестной интерференции), в случае структур с коллинеарными полями – провести дополнительные съемки с образцом, повернутым вокруг нормали к поверхности (метод вращения образца), напр., на 90° .

Во всех случаях полный набор модулей и разностей фаз задает вектор поляризации отраженного пучка. И, наоборот, векторный (т.е. 3D-) анализ поляризации фактически дополняет стандартную схему измерений до полной рефлектометрии [1]. Поэтому прямое наблюдение поляризационных 3D-эффектов при отражении нейтронов от исследуемых слоистых структур методы можно считать одним из методов фазометрии в рефлектометрии поляризованных нейтронов. В работе [2] показывается, что 3D-анализ поляризации незеркального рассеяния также дает информацию, комплементарную к съемкам по стандартной схеме, в частности, о магнитном упорядочении в многодоменном состоянии магнитных многослойных структур. Опция векторного анализа поляризации отраженного пучка была протестирована [3] на рефлектометре НР-4М (реактор ВВР-М, Гатчина), далее включена в схему рефлектометра РПН (реактор ИР-8, Москва), проектируется на рефлектометре SONATA (реактор ПИК, Гатчина).

Метод прямого наблюдения поляризационных 3D-эффектов при отражении важен для развития нового направления в поляризационной нейтронной оптике – нейтронной спин-манипуляционной оптики [4]. В основе существующей поляризационной нейтронной оптики лежат поляризующие покрытия, отражающие нейтроны преимущественно с одним из противоположных спинов. Создание специальных покрытий, при отражении от которых спины определенным образом вращаются, означает переход от 1D (селекция спинов) к 3D (вращение спинов). Квантовые аспекты связи спиновых и пространственных степеней свободы при взаимодействии нейтронов с магнитными слоями приводят к необычным зависимостям угла вращения спинов от переданного импульса q . В частности, были найдены решения, при использовании которых спины нейтронов при отражении вращаются вокруг одной оси примерно на один и тот же угол независимо от q (т.е. и от длины волны нейтрона, и от угла скольжения), причем коэффициенты отражения близки к 1.

Рефлектометрия поляризованных нейтронов признана важнейшим методом исследования магнетизма поверхностей, тонких плёнок и многослойных структур. Метод является прямым, неразрушающим и чувствительным к глубинной зависимости плотности длины нейтронного рассеяния, величины и направления вектора намагниченности. Рассмотренные методы фазометрии и наблюдение поляризационных 3D-эффектов при отражении нейтронов от исследуемых слоистых структур могут дать дополнительную информацию, фундаментальную для понимания структурных и магнитных особенностей и корреляции между ними. В дальнейшей перспективе может идти речь об определении абсолютных фаз элементов матрицы отражения r и прямого (безмодельного) восстановления изменения величины и направления вектора намагниченности по глубине [5]. Может оказаться полезным опыт использования опорных слоев Gd с длиной рассеяния, зависимой от энергии нейтрона [6].

1. N. K. Pleshanov, Physica B **269**, 79 (1999).
2. B. Toperverg, O. Nikonov, V. Lauter-Pasyuk, H.J. Lauter, Physica B **297**, 169 (2001).
3. Н. К. Плешанов, Л. А. Аксельрод, В. Н. Забенкин, и др., Поверхность. Рентг., синхротр. нейтр. исслед. **11**, 3 (2008).
4. N. K. Pleshanov, Nucl. Instrum. Methods A **853**, 61 (2017).
5. H. Leeb, M. Simon, K. Nikolics, J. Kasper, Physica B **397**, 132 (2007)
6. Е. С. Никова, Ю. А. Саламатов, Е. А. Кравцов, и др., Физика металлов и металловедение **120**, 913 (2019).

КАМЕРЫ ВЫСОКОГО ФИКСИРОВАННОГО КВАЗИГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ НЕЙТРОНОГРАФИИ

Р. А. Садыков^{1,2*}

¹Институт ядерных исследований РАН, Москва, Троицк, Россия

²Институт физики высоких давлений РАН, Москва, Троицк, Россия

*E-mail: rsadykov@inr.ru

Применены ряд оригинальных камер фиксированного высокого квазигидростатического давления (КФВД) для нейтронографии. Камеры имеют конструкцию позволяющую помещать их в стандартные нейтронографические криостаты, включая криостаты растворения и криомагниты.

Давление такой же равноправный термодинамический параметр как температура или сильное магнитное поле. Для исследования конденсированных сред нужно начинать как правило с низких температур для достижения основного состояния, а далее, как возмущающие условия, производится изменение температуры или внешнего магнитного поля. Благодаря пионерским работам П.Л. Капицы задача создания различных низкотемпературных устройств-криостатов и криомагнитов с сильными магнитными полями для научных и практических целей решена и эти устройства производятся массово специализированными фирмами во всем мире и имеются ряд новых фирм и у нас в России.

Повышенный интерес к квантовым критическим явлениям, квантовой фрустрации и состоянию не ферми жидкостного поведения в ряде магнетиков, появления новых магнитных частиц-скирмионов, в том числе и под давлением, вызвало необходимость проведения прямых нейтронографических экспериментов как при низких температурах и в сильных магнитных полях так и при высоком давлении одновременно. В связи с этим нами были разработаны, изготовлены и применены ряд оригинальных камер фиксированного высокого давления для исследований методами рассеяния нейтронов. Камеры имеют конструкцию позволяющую помещать их в стандартные нейтронографические криостаты, включая криостаты растворения и криомагниты и использовались на наших и зарубежных источниках нейтронов: SINQ(Swiss) , ISIS(UK), HMI (Germany), ILL(France), SNS(USA) на приборах высокого разрешения, спектрометрах неупругого рассеяния, МУРН и дифракции поляризованных нейтронов. Исследования проводились вплоть до 40 кбар , $T = 100$ мК и $H = 9.5$ Т с использованием камер изготовленных из немагнитного сплава: TiZr(нулевая матрица), также различных немагнитных твердых Al-сплавов(B95T, B96T), БрБ2 и 40ХНЮ(NiCrAl). Ряд автономных нейтронографических камер фиксированного высокого давления ранее были проданы ИФВД РАН по контрактам за рубеж. В докладе будут приведены конструкции этих различных камер и результаты нейтронных исследований различных конденсированных сред. При этом необходим правильный выбор сочетания ядерно-физических свойств (сечения нейтроновых рассеяний и радиоактивная активация) и физикомеханических свойств (твердость, упругость и пределы разрушения) материалов для камер высокого давления. Приводятся первые опытные рекомендации по развитию и оптимизации устройств высокого давления, а также применению различных материалов для устройств высокого давления.

Ставится и обсуждается вопрос о необходимости расчетов для оптимизации многослойных конструкций КФВД для различных нейтронных экспериментов.

НЕЙТРОННЫЙ МУЛЬТИМОНОХРОМАТОР-БИПОЛЯРИЗАТОР И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

В. Г. Сыромятников^{1,2,3}, В. А. Никифоров³*

¹Петербургский Институт Ядерной Физики, Национальный Исследовательский Центр
«Курчатовский Институт», Гатчина, Россия

²Физический факультет, Санкт-Петербургский Государственный Университет, Петродворец,
Санкт-Петербург, Россия

³Институт информационных систем и геотехнологий, Российский государственный
гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

* E-mail: syromyatnikov_vg@pnpi.nrcki.ru

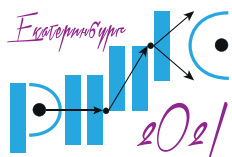
В работе [1] предложен новый нейтронно-оптический элемент — Нейтронный Мультимонохроматор-Биполяризатор (НМБ). Он состоит из многослойной структуры, состоящей из 12 периодических многослойных магнитных наноструктур Fe/Co, для которых период увеличивается при удалении с подложки от 50 до 146 Å.

Для НМБ, как показано в [1], на графике зависимости коэффициента отражения обеих спиновых компонент пучка от переданного импульса видна последовательность из 24-х чередующихся плотно расположенных, но не перекрывающихся брэгговских пиков с противоположной поляризацией и с коэффициентами отражения близкими к 1. В работе [1] предложена новая схема нейтронного поляризационного анализа для время-пролетного метода с применением НМБ в качестве поляризатора. В этой схеме спин-флиппер перед образцом не используется. Использование НМБ возможно в установках SESANS, для исследования малоуглового и неупругого рассеяния поляризованных нейтронов, рефлектометрах поляризованных нейтронов.

В [1] предлагалось также не использовать в схеме нейтронного поляризационного анализа спин-флипперы, если поляризатором и анализатором являются одинаковые НМБ.

В данном докладе, в рамках развития этой идеи, представлены расчеты зависимости коэффициента отражения обеих спиновых компонент пучка от переданного импульса для нескольких НМБ. Структура этих НМБ определена на основе предложенного алгоритма расчета. В докладе показано, что, используя, такие НМБ, в качестве поляризатора и анализатора, можно осуществить нейтронный поляризационный анализ для время-пролетного метода для нескольких длин волн нейтронов проводя измерения только на двух углах поляризатора и анализатора без использования спин-флипперов. При этом размеры установки могут быть значительно уменьшены. Появляется возможность создания компактной ячейки нейтронного поляризационного анализа с использованием только одной магнитной системы — магнитной системы образца.

1. V.G. Syromyatnikov, Kyaw Zaw Lin, J. Phys.: Conf. Ser. **862**, 012016 (2017).



NEW INELASTIC NEUTRON SCATTERING SPECTROMETER AT THE IBR-2 REACTOR

D. M. Chudoba^{1,2}, A. Belushkin¹, E. Goremychkin¹, M. Klepacka^{1,2}*

¹Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

²Faculty of Physics, Adam Mickiewicz University, Poznań, Poland

*E-mail: dmn@amu.edu.pl

The status of Inelastic Neutron Scattering Spectroscopy at FLNP has been under the concern of both the user community and the Laboratory Management, instigating discussions within both parties. It became clear that the two spectrometers available at the moment, once competitive to European class instruments, have lost the race years ago, and they no longer satisfy the needs of the user community. It is therefore of the utmost importance to advance INS Spectroscopy in the direction set historically and to support the maintaining the world renown scientific position of the JINR.

In order to regain competitiveness, or at least comparativeness, with the instrumentation of the best neutron scattering facilities, it is necessary to build new INS spectrometers that would make use of up to date neutron optics and design solutions in order to deliver high resolution results, the excellent signal-to-background ratio over a broad range of energy transfer, from as small samples as possible in a time-wise highly efficient way. The brightness of the IBR-2 source should be better made use of, and a high luminosity (large acceptance) instrument designed.

The details of the project of the new inelastic neutron scattering spectrometer will be presented.

РЕФРИЖЕРАТОР РАСТВОРЕНИЯ ^3He В ^4He С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЗАГРУЗКОЙ ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЙ ДЛЯ НЕЙТРОННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

А. Н. Черников*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

* E-mail: chern@nf.jinr.ru

Обсуждается рефрижератор растворения ^3He в ^4He (Рис. 1), который совмещен с рефрижератором ^4He . Испаритель рефрижератора ^4He и камера растворения рефрижератора растворения ^3He в ^4He соединены посредством теплообменника. Через вертикальную трубку откачки рефрижератора ^4He производится загрузка образца в испаритель. Образец находится в среде ^4He , а раствор ^3He в ^4He в камере растворения остается вне траектории движения нейтронов.

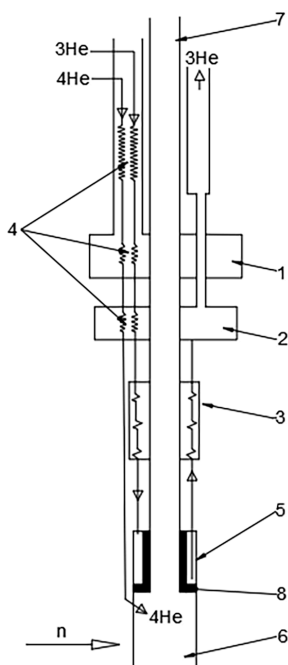


Рис. 1. Рефрижератор растворения ^3He в ^4He , совмещенный с рефрижератором ^4He . 1 – 1 К ванна, 2 – ванна испарения, 3 – теплообменники рефрижератора растворения, 4 – теплообменники системы циркуляции рефрижераторов, 5 – камера растворения, 6 – испаритель, 7 – трубка откачки испарителя, 8 – теплообменник.

Дается расчет скорости циркуляции ^3He рефрижератора растворения ^3He в ^4He в диапазоне достижимой температуры его камеры растворения (0.12 – 0.45) К при заполненном испарителе рефрижератора ^4He сверхтекучим ^4He в зависимости от диа-

метра трубки откачки испарителя. Результаты вычислений для различных диаметров, Φ , трубки откачки, представлены на Рис. 2.

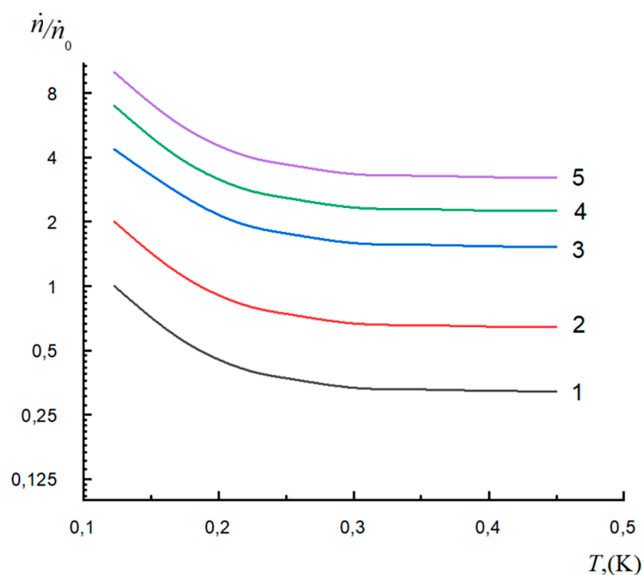
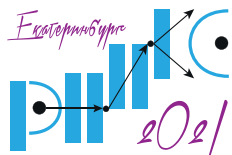


Рис. 2. Относительная скорость циркуляции ^3He , $\frac{\dot{n}}{\dot{n}_0}$, в зависимости от температуры камеры растворения, и диаметра трубки откачки испарителя; $\dot{n}_0 = 0.5 \cdot 10^{-3}$ моль/сек; 1 – $\Phi = 12$ мм; 2 – $\Phi = 24$ мм; 3 – $\Phi = 50$ мм; 4 – $\Phi = 80$ мм; 5 – $\Phi = 120$ мм.

Расчет сделан на основе экспериментальных данных работы [1].

1. A. Chernikov and Yu. Kiselev. Cryogenics **30**, 52 (1990).



ТЕКУЩИЙ СТАТУС СТРОИТЕЛЬСТВА УСТАНОВКИ SESANS НА РЕАКТОРЕ ПИК

Л. А. Аксельрод¹, В. Краан², А. А. Сумбатьян¹, В. В. Тарнавич¹, Ю. О. Четвериков¹

¹НИЦ КИ ПИЯФ, Гатчина, Россия

²ТУ, Дельфт, Нидерланды

Представляется современное состояние реализации проекта строительства установки спин-эхо малоуглового рассеяния нейтронов (СЭМУРН) на реакторе ПИК. Завершение, начатого в этом году проекта строительства запланировано на декабрь 2022 года. Проект проводится в рамках первой очереди строительства установок на реактор ПИК. В ходе выполнения проекта были проведены работы по математическому моделированию, конструированию и изготовлению узлов установки. По результатам моделирования произведена оптимизация как оптических элементов установки, так и конструкции магнитов прецессии. На основе оптимизированной модели магнитов разработана проектная и конструкторская документация на их изготовление. Выполнены работы по испытанию модели радиочастотного адиабатического флиппера. По результатам испытаний проведена его модернизация.

УЛЬТРАМАЛОУГЛОВОЕ РАССЕЯНИЕ НЕЙТРОНОВ НА РЕАКТОРЕ ИР-8: ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

М. Н. Шушунов, Е. В. Яковенко*

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

*E-mail: Yakovenko_EV@nrcki.ru

В докладе будет представлен единственный действующий в РФ ультрамалоугловой двухкристальный дифрактометр СТОИК, работающий на горизонтальном канале ГЭК-9 реактора ИР-8 в НИЦ КИ (Москва) [1]. В дифрактометре используется брэгговское отражение пучка от двух совершенных монокристаллов кремния (111) в бездисперсионной параллельной позиции (1,-1). Образец помещается между кристаллами. Первый кристалл (монокроматор) коллимирует падающий пучок в обратном пространстве, второй кристалл (анализатор) выделяет из рассеянного излучения полосу в узком интервале углов порядка дарвиновской ширины Si (111). При повороте анализатора на угол π от параллельной позиции он отражает в детектор излучение, рассеянное на угол π . Такая схема позволяет регистрировать существенно меньшие углы рассеяния, чем приборы с точечной коллимацией в прямом пространстве.

В дифрактометре СТОИК реализована оптическая схема с однократным отражением пучка от монокроматора и анализатора, что накладывает существенные ограничения на его чувствительность и Q-диапазон. Для сравнения, в современных зарубежных приборах используются прорезные кристаллы Бонзе-Харта-Агамаяна с трёх- и пятикратным отражением пучка, подавляющим крылья двухкристальной кривой качания без образца на три порядка. Характеристики СТОИКа в сравнении с прибором USANS BT-5 (NIST) приведены в Табл. 1.

Таблица 1. Характеристики ультрамалоугловых дифрактометров СТОИК и USANS BT-5.

Параметр	СТОИК (НИЦ КИ)	USANS BT-5 (NIST)
Кратность отражения от кристаллов монокроматора и анализатора	однократное	трёхкратное
Фокусирующий предмонокроматор	нет	PG(002)
Длина волны, Å	1.6	2.38
Монокроматор	Si (111)	Si (222)
Плотность потока на образце, $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$	14 000	17 300
Сигнал/фон	$6 \cdot 10^3$	$2.5 \cdot 10^6$
Q-разрешение, Å ⁻¹	0.00002	0.00002
Q-диапазон, Å ⁻¹	0.00003 ± 0.002	0.00003 ± 0.005
Размеры неоднородностей, мкм	0.3 ± 20	0.1 ± 20

Возможности дифрактометра СТОИК будут продемонстрированы на примере характеристики микропористых материалов по данным малоуглового рассеяния. На Рис. 1 представлены кривые рассеяния на двух образцах керамики Al_2O_3 , полученной методом плазменного напыления. Толщина образцов 3 мм и 6 мм. Кривые рассеяния были смоделированы в программном пакете SASProFit [2]. В качестве модели была выбрана модель разупорядоченных сферических пор в матрице Al_2O_3 . Фитирование модели проводилось одновременно по обоим наборам экспериментальных данных. Кратность рассеяния составила 1.94 (толщина 3 мм) и 3.88 (толщина 6 мм).

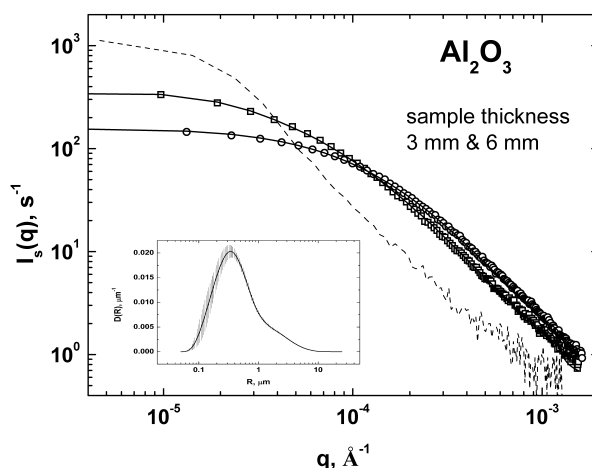


Рис. 1. Спектры ультрамалоуглового рассеяния на образцах пористой керамики Al_2O_3 толщиной 3 мм (квадраты) и 6 мм (кружки), полученной методом плазменного напыления. Штриховая линия – инструментальная кривая. Сплошные линии – модельные кривые, полученные в результате фитирования одновременно по обоим наборам экспериментальных данных в пакете SASProFit [2]. На вставке показано расчётное распределение пор по радиусам.

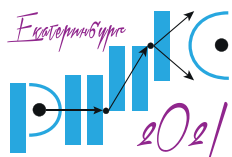
Параметры поровой структуры, рассчитанные по данным ультрамалоуглового рассеяния в пакете SASProFit [2], представлены в Табл. 2.

Таблица 2. Параметры поровой структуры керамики Al_2O_3 , рассчитанные по данным ультрамалоуглового рассеяния в пакете SASProFit [2].

Средний радиус, μ_m	Удельная поверхность, μ_m^{-1}	Удельный объём, %	Длина корреляции, μ_m
1.9 ± 0.1	0.12 ± 0.01	2.7 ± 0.1	2.83 ± 0.15

В докладе будет представлен проект новой станции УльтраМУРН, проектируемой на источнике холодных нейтронов на реакторе ИР-8.

1. I. V. Naumov et al. STOIK ideal-crystal three-axis neutron spectrometer. – Gosudarstvennyj Komitet po Ispol'zovaniyu Atomnoj Ehnergii SSSR, (1986). – №. IAE-4368/14.
2. J. Saroun, J. Appl. Cryst. **33**, 824 (2000).



GEOMETRY CALCULATION FOR THE NEW INELASTIC NEUTRON SCATTERING SPECTROMETER USING MONTE-CARLO SIMULATION

M. Klepacka^{1,2}, E. A. Goremychkin¹, A. V. Belushkin¹, D. M. Chudoba^{1,2}*

¹Physics Faculty, Adam Mickiewicz University, Poland

²Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Russia

*E-mail: marta.klepacka@amu.edu.pl

The inverse-geometry inelastic neutron spectrometer NERA has already been operating for more than two decades and during that time has proven to be a very successful machine for broadband chemical spectroscopy with neutrons.

However, to continue the research using the best modern technologies, the project of a new inverse-geometry inelastic neutron spectrometer has been started. New instrument will be located in the Frank Laboratory of Neutron Physics (JINR, Russia). Calculations of secondary spectrometer's geometry and performance were executed during the design phase of the project and they are presented in this work. The main concept is to place a set of HOPG analysers resembling a bell shape, on both sides of the sample position. Design and optimization of secondary spectrometer were accomplished using Monte-Carlo simulation software McStas and analytical methods.

MULTIPLE BRAGG REFLECTIONS ARE NOT ALWAYS NEGLIGIBLE AND SPURIOUS

P. Mikula^{1}, V. Ryukhtin¹, J. Šaroun¹, P. Strunz¹, V. T. Em²*

¹Nuclear Physics Institute CAS, Řež, Czech Republic

²National Research Centre "Kurchatov Institute Moscow, Russia

*E-mail: mikula@ujf.cas.cz

In our contribution we present some important results of an exhaustive experimental studies of multiple Bragg reflections (MBR) accompanying an allowed as well as forbidden reflection. The MBR-observations were carried out, namely, in the frame of Bragg diffraction optics experiments on cylindrically bent perfect single crystals. It has been found that depending on the thickness and curvature of the crystal slabs and the diffraction geometry (reflection, transmission) many strong multiple reflections can be excited which could be also used as a source of highly monochromatic and highly collimated beams for further high-resolution neutron scattering or radiography experiments.

The MBR effects occur when two or more lattice planes fulfil the Bragg condition for a chosen wavelength i.e. when two or more reciprocal lattice points defined by the vectors $\mathbf{g}_i$ appear on the Ewald sphere (see Fig. 1).

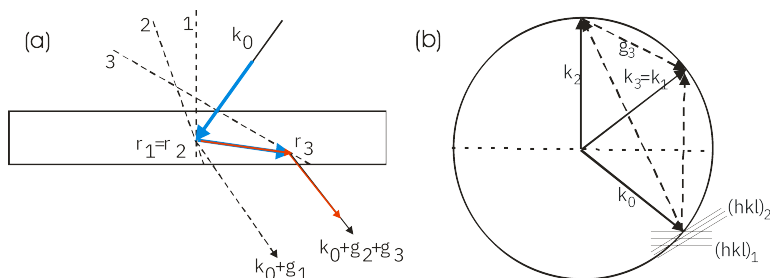


Рис. 1. Schematic diagram of a two-step multiple Bragg reflection in real — (a) and reciprocal space — (b). The numbers 1, 2 and 3 represent the primary, secondary and tertiary reflection planes, respectively. $\mathbf{k}_0$ is the incident wave vector and $\mathbf{r}$ means a position where the reflection occurs.

It follows from the crystal symmetry that when a secondary reflection (represented by $\mathbf{g}_2$) fulfils the Bragg condition simultaneously with the primary one (represented by $\mathbf{g}_1$), there exists automatically a tertiary reflection defined by $\mathbf{g}_3 = \mathbf{g}_1 - \mathbf{g}_2$. As $\mathbf{g}_1 = \mathbf{g}_2 + \mathbf{g}_3$, the doubly reflected beam has the same direction as the one reflected only by the primary set of lattice planes. MBR-effects can result either in reducing the intensity of the primary reflection or in its increasing and in the extreme case, in the effect of simulation of forbidden primary reflection. For X-rays, the positive MBR peaks were first observed by Renninger [1], and theoretically investigated by Ewald [2]. Since then many theoretical and experimental investigations of the generally n -beam cases, namely for the case of X-rays, have been published (see e.g. [3,4]; in these books many related references can be found). The situation in neutron diffraction is rather different because the neutron flux is much lower in comparison with the X-rays and therefore, it is usually carried out with relaxed collimation and $\Delta\lambda/\lambda$ wavelength interval. As the reflection planes participating in the MBR-process are mutually in dispersion diffraction mode, the neutron flux is not usually sufficient for the observation of such correspondingly small dynamical effects in perfect crystals. Therefore, in the case of neutron diffraction, the MBR-effects have been reported earlier only in a few papers e.g. [5 – 8]. In the search of the MBR effects two methods are usually used (see Fig. 2):

- a. The method of $\theta - 2\theta_D$ scan in the white beam for a fixed azimuthal angle.
b. The method of azimuthal rotation of the crystal lattice around the scattering vector $\mathbf{g}_1$ of the primary reflection for a fixed wavelength.

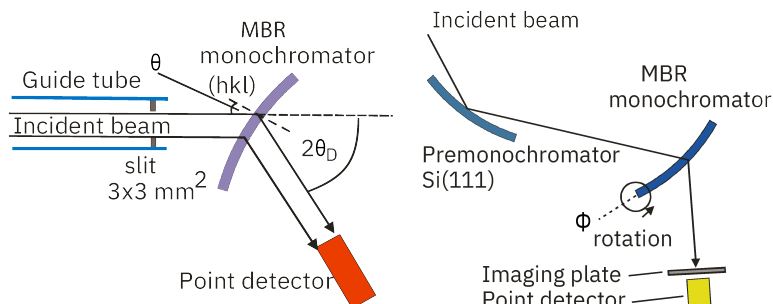


Рис. 2. Diagrams of the experimental settings used for the search of MBR-effects by the method of $\theta - 2\theta_D$ scan in the white beam for a fixed azimuthal angle φ – (a) and by φ rotation around the scattering vector $\mathbf{g}_1$ for the fixed Bragg angle θ – (b).

Fig. 3 shows an example of strong MBR effects simulating Si(002) reflection as observed by both mentioned methods [9] which documents their possible use as a unique neutron source for high-resolution diffraction and radiography experiments. Many other results related to studies of MBR reflections and their practical use will be introduced in the conference paper.

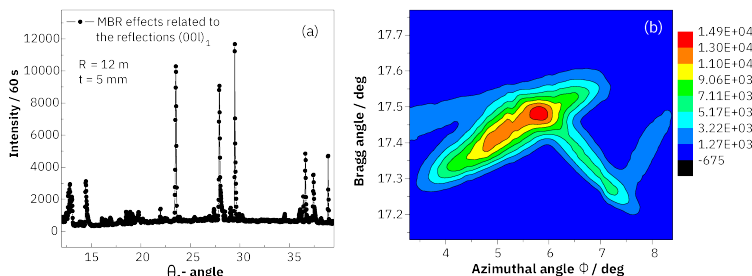


Рис. 3. Parts of $\theta_1 - 2\theta_D$ scan with the Si(002) crystal slab in the symmetric transmission geometry – (a) and the two dimensional map of the intensity vs φ in the vicinity of $\varphi = 6^\circ$ and the mean Bragg angle $\theta = 17.5^{\text{circ}}$ – (b) at $\lambda = 0.162$ nm.

Measurements were carried out at the CANAM infrastructure of the NPI CAS Řež. P. Mikula and J. Šaroun acknowledge support from ESS participation of the Czech Republic – OP (CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_013/0001794) and from the project ESS Scandinavia-CZ II (LM2018111), respectively. Furthermore P. Strunz and V. Ryukhtin acknowledge support from the Czech Academy of Sciences in the frame of the program «Strategie AV21, No. 23».

1. M. Renninger, Zeitschrift für Physik **106**, 141 (1937).
2. P.P. Ewald, Zeitschrift für Kristallographie A **97**, 1 (1937).
3. Shih-Lin Chang, X-ray Multiple-wave Diffraction: Theory and Application, series in Solid-State Science, 143, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo (2004).
4. Z.G. Pinsker, Dynamical Scattering of X-rays in Crystals. Berlin: Springer-Verlag (1978).
5. R. Moon and C.G. Shull, Acta Cryst. **17**, 805 (1964).
6. G. Kuich and H. Rauch, Acta Physica Austriaca **20**, 7 (1965).
7. P. Mikula, R.T. Michalec, M. Vrána and J. Vávra, Acta Cryst. A **35**, 962 (1979).
8. M. Vrána, P. Mikula, R.T. Michalec, J. Kulda and J. Vávra, Acta Cryst. A **37**, 459 (1981).
9. P. Mikula, J. Šaroun, P. Strunz and V. Ryukhtin, Journal of Neutron Research **1**, 1 (2021).

ON THE RESOLUTION IN STRAIN/STRESS MEASUREMENTS ON BULK POLY-CRYSTALLINE SAMPLES BY 3-AXIS NEUTRON DIFFRACTOMETER

P. Mikula^{1}, J. Šaroun¹, V. Ryukhtin¹, P. Strunz¹, A. Michalcová², V. T. Em³*

¹Nuclear Physics Institute CAS, Řež, Czech Republic

²University of Chemistry and Technology, Prague, Czech Republic

³National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

*E-mail: mikula@ujf.cas.cz

Important resolution properties of the high-resolution 3-axis neutron diffraction set-up were investigated in the frame of feasibility of its employment for strain/stress measurements on bulk polycrystalline samples. The strain analysis was carried out by rocking the BPC-analyzer and the neutron signal registered by a point detector. The so-called rocking curve then provided the sample diffraction profile and could reflect the lattice or structural changes. Then, in comparison with the conventional two axis set-ups [1], this instrument alternative could be successfully exploited, namely, in the strain/stress measurements on bulk samples exposed to an external load, e.g. in tension/compression rig, in aging machine etc. and provide average values over a large irradiated volume of the sample. Therefore, motivated by recent results, we have decided to study in more detail resolution properties of an unconventional high-resolution neutron-diffraction 3-axis setup for large bulk polycrystalline samples experimentally with the aim of a possible exploitation in material structure testing. Following the drawing shown in Fig. 1a (for small widths of the samples), the best resolution from this setting can be obtained when minimizing dispersion of the whole system. When solving the problem in momentum space, it means that the orientation of the Δ_k momentum elements related to the monochromator and analyzer should be matched to that of the sample, and this can be achieved by proper radii of curvatures of the bent perfect crystal monochromator and analyzer. Then, it results in a high-resolution with a minimum FWHM of the analyzer rocking curve and a maximum detector signal, simultaneously [2]. Fig. 2 shows the basic resolution characteristics as dependent on the curvature of the BPC analyzer for the virgin α -Fe samples of the diameters of 2 mm and 8 mm.

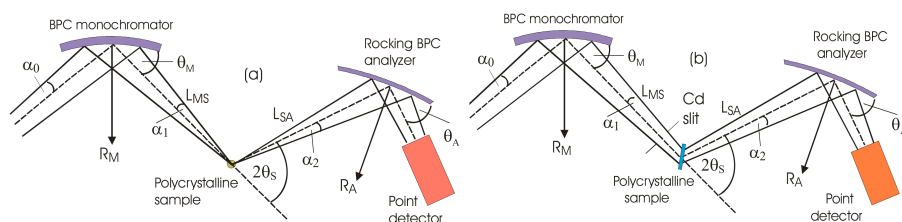


Рис. 1. 3-axis diffractometer settings employing BPC monochromator and analyzer as used in the studies (R_M , R_A – radii of curvature, θ_M , θ_A – Bragg angles) for vertical – (a) and horizontal – (b) positions of a polycrystalline sample with the rocking the BPC analyzer.

For the simulation of the large width samples, two virgin α -Fe standard polycrystalline samples of the cylindrical form of the diameters of 5 mm and 8 mm and situated on the diffractometer in the horizontal position were used for investigation of the resolution. As shown in Fig. 1b, the irradiated width of the sample was in this case determined by the Cd slit of the width of 10 mm or 20 mm put in front of it [3]. The corresponding results are shown in Figs. 3 and 4. Inspection of Figs. 3 and 4 reveals that though the resolution is mildly relaxed, it is still high. At least, the resolution in the case of the 10 mm slit is sufficiently high permitting also the microstrain studies in the plastic deformation region (root-mean-square microstrains

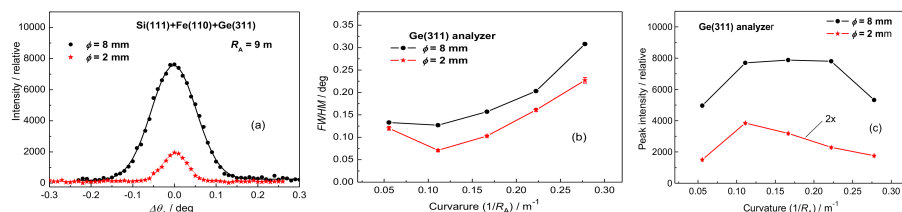


Рис. 2. Analyzer rocking curves for two α -Fe(110) virgin samples and the optimum radius of curvature of the analyzer – (a), their dependence of FWHM on the analyzer curvature – (b) and the dependence of the peak intensity of the rocking curve on the analyzer curvature – (c).

as well as the effective grain size) by applying shape analysis of neutron diffraction peak profiles [4] as will be demonstrated in the conference paper.

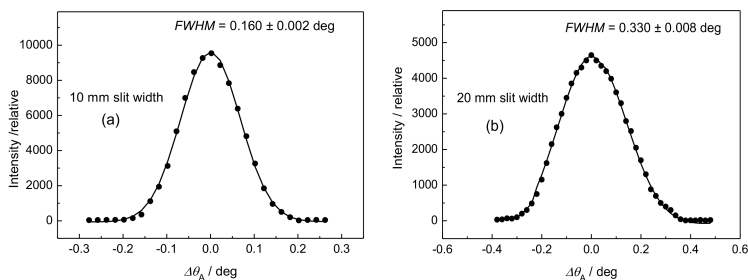


Рис. 3. Analyzer rocking curves for the virgin α -Fe(110) sample of $\phi=5$ mm in horizontal position: (a) – 10 mm and (b) – 20 mm Cd slits.

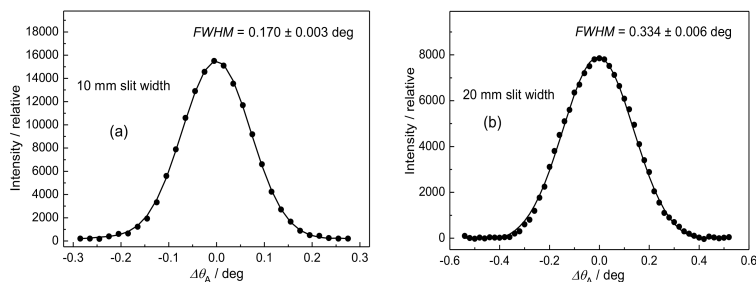


Рис. 4. Analyzer rocking curves for the virgin α -Fe(110) sample of $\phi=8$ mm in horizontal position: (a) – 10 mm and (b) – 20 mm Cd slits.

Measurements were carried out at the CANAM infrastructure of the NPI CAS Řež. P. Mikula and J. Šaroun acknowledge support from ESS participation of the Czech Republic – OP (CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_013/0001794) and from the project ESS Scandinavia-CZ II (LM2018111), respectively. Furthermore P. Strunz and V. Ryukhtin acknowledge support from the Czech Academy of Sciences in the frame of the program «Strategie AV21, No. 23».

1. M. Hutchings, P.J. Withers, T.M. Holden and T. Lorentzen (Eds.), Introduction to the Characterization of Residual Stress by Neutron Diffraction, Boca Raton CRP Press, (2005).
2. M. Vrána, P. Lukáš, P. Mikula and J. Kulda, Nucl. Instrum. Methods in Phys. Research, A **338**, 125 (1994).
3. P. Mikula, J. Šaroun, V. Ryukhtin and P. Strunz, Materials – MDPI **13**, 5449 (2020).
4. V. Davydov, P. Lukáš, P. Strunz and R. Kužel, Mat. Sc. Forum, **571–572**, 181 (2008).

РЕФЛЕКТОМЕТР ГРЭИНС: СТАТУС И ПЕРСПЕКТИВЫ

И. В. Гапон^{1,2}, М. О. Кузьменко¹, Т. В. Тропин¹, М. В. Авдеев¹*

¹Лаборатория нейтронной физики им. И.М.Франка ОИЯИ, Дубна, Россия

²Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль, Украина

*E-mail: gapon@jinr.ru

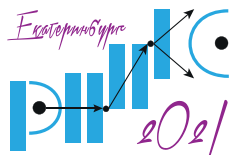
Нейтронный времяпролетный рефлектометр ГРЭИНС [1] один из трех рефлектометров размещенный на реакторе ИБР-2 Объединённого института ядерных исследований г. Дубна. Особенность данного рефлектометра заключается в горизонтальной плоскости образца (вертикальной плоскости рассеяния).

Данная геометрия рассеяния позволяет проводить комплексные исследования наноструктурированных границ раздела в конденсированном и жидком состояниях путем измерения зеркального коэффициента отражения и интенсивности диффузного рассеяния пучка тепловых нейтронов на открытых поверхностях и скрытых межслойных границах, включая интерфейсы «твердое тело – жидкость», в широком интервале переданных импульсов ($0.05 - 3 \text{ nm}^{-1}$). Начиная с сентября 2015 г. данная установка включена в Программу пользователей реактора ИБР-2 и выполняет внешние заявки на эксперимент [2].

В работе представлен опыт эксплуатации рефлектометра ГРЭИНС, представлены основные параметры и возможности нейтронной установки. Представленные варианты окружения образца для работы с различными границами разделов сред. Приведен краткий обзор результатов исследований, выполненных на данном спектрометре. Обсуждаются основные перспективы развития рефлектометра в дальнейшем.

1. М.В. Авдеев, В.И. Боднарчук, В.И. Петренко и др., Кристаллография **62**(6), 1014 (2017).

2. <https://ibr-2.jinr.ru/>



ПОЛИХРОМАТИЧЕСКИЙ НЕЙТРОННЫЙ ТОМОГРАФ ПОНИ НА РЕАКТОРЕ ИР-8

В. П. Глазков^{1*}, М. М. Мурашев¹, А. И. Гуреев¹, Ю. Н. Панин¹, Д. Н. Трунов^{1,2}, В. Т. Эм¹

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: vivadin@yandex.ru

В НИЦ «Курчатовский институт» на исследовательском реакторе ИР-8 создана станция нейтронной томографии на полихроматическом нейтронном пучке ПОНИ. Новый прибор расположен на касательном горизонтальном канале 76. Нейтроны в канале идут от бериллиевого отражателя, который расположен вблизи активной зоны реактора. Так как канал является касательным, фон γ -излучения и быстрых нейтронов намного ниже, чем на радиальном канале. Выбранная оптическая схема прибора позволяет получить нейтронный пучок на выходе с сечением 120×120 мм². Первый ограничитель, формирующий пучок, имеет входное отверстие $D = 10$ мм, расстояние от входного отверстия до места образца $L \approx 6$ м, так что параметр коллимации $L/D \approx 600$. По проведенным расчетам, для разработанной оптической схемы установки, пространственное разрешение будет достигать ≈ 40 мкм в случае небольших объектов, и ≈ 200 мкм в случае объектов диаметром ≈ 120 мм. В докладе будут представлены результаты первых экспериментов, проведенных на станции ПОНИ.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ МОНОКРИСТАЛЬНОГО ДИФРАКТОМЕТРА НА ИСТОЧНИКЕ ХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ РЕАКТОРА ИР-8

Н. Н. Исакова, А. И. Калюканов*

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

*E-mail: Isakova_NN@nrcki.ru

Одними из наиболее актуальных направлений исследований в области магнетизма являются исследования материалов спинтроники и нетрадиционных сверхпроводников. Эти материалы, как правило, имеют несоизмеримую (модулированную) структуру. Фундаментальный интерес к этим объектам обусловлен тем, что исследование несоизмеримых структур позволяет получить информацию об обменных взаимодействиях.

Для исследования таких материалов оптимальным является использование нейтронов с длиной волны в интервале $2 \div 4$ Å. Поэтому монокристалльный дифрактометр для исследования несоизмеримых структур целесообразно создавать на «холодном» нейтроноводе, в частности, на нейтроноводе источника холодных нейтронов (ИХН) реактора ИР-8, где максимуму нейтронного спектра соответствует длина волны ~ 4 Å, и нейтронов с необходимой длиной волны значительно больше чем на «тепловом» нейтроноводе. Кроме того, примесь нейтронов высших порядков отражений на «холодном» нейтроноводе будет значительно меньше чем на «тепловом».

В ходе выполнения концептуального проекта монокристалльной станции была выбрана эквинантная геометрия дифрактометра в связи с ограничениями по использованию эйлерова кольца в конструкции гониометра. Оптическая схема прибора включает в себя: первичный коллиматор; монохроматор; блок устройств, коллимирующих монохроматический пучок; блок устройств, контролирующих и управляющих монохроматическим пучком нейтронов; стол образца (гониометр); детектор. Определена конструкция узла монохроматора и гониометра, тип детекторной системы и определено необходимое оборудование окружения образца. Для работы с магнитными структурами в оптической схеме прибора было предусмотрено оборудование для поляризации нейтронов.

Проектируемая станция создается как специализированная станция исследования магнитных структур и материалов, в связи с чем на станции предусмотрена работа с различными методиками выделения вклада магнитного рассеяния из общей дифракционной картины, включая наложение температуры и магнитного поля на образец. Большим преимуществом станции будет являться работа с поляризованными нейтронами.

Метод нейтронной дифракции является уникальным для исследования магнитной структуры материалов и создание такой станции на ИХН ИР-8 представляется перспективным проектом.

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ДИЗАЙН-ПРОЕКТА НЕЙТРОННОГО СТРЕСС-ДИФРАКТОМЕТРА НА РЕАКТОРЕ ПИК

И. Д. Карпов, В. Т. Эм, С. А. Рылов*

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

*E-mail: Karpov_ID@nrcki.ru

В программе развития приборной базы реактора ПИК до 2024 года не предусмотрено создание стресс-дифрактометра. В то же время, существующие в настоящее время в России стресс-дифрактометры: ФСД (ОИЯИ, Дубна) и СТРЕСС (НИЦ КИ) не могут удовлетворить возрастающие потребности российских пользователей в нейтронных исследованиях внутренних напряжений, направленные на решение научных и прикладных задач. На данный момент все каналы в реакторном зале реактора ПИК заняты. Однако, на ГЭК №2 планируется создание биспектрального источника нейтронов с выводом нескольких тепловых нейтроноводов. Представляется целесообразным на одном из этих каналов реализовать разработанный концептуальный проект.

Анализ последних методических достижений в стресс-дифрактометрии показал, что проектируемая станция исследований внутренних напряжений на реакторе ПИК по своим возможностям будет значительно превосходить существующие в мире приборы. Достигнуто это будет не только за счёт высокого потока нейтронов реактора ПИК (потоки в горизонтальных каналах реакторов ПИК и HFR (ILL) сравнимы), а главным образом, за счёт использования фокусирующих монокроматоров из идеальных кристаллов кремния Si(220) и Si(111). Эксперименты с этими монокроматорами (в том числе опыт использования монокроматора Si(220) в дифрактометре СТРЕСС на ИР-8) показали, что они значительно увеличивают светосилу приборов и наиболее оптимальны для стресс-дифрактометров. Например, при исследовании сталей, эффект от их применения равен силе увеличению мощности реактора более чем на порядок [1]. В настоящее время такие монокроматоры используются только в стресс-дифрактометре RSI (KAERI), на котором были измерены напряжения в стальных пластинах рекордной толщины 80 мм (типичные значения – 40 – 50 мм на современных приборах), хотя прибор имеет не совсем оптимальную геометрию. Использование таких монокроматоров на действующих стресс-дифрактометрах в других ведущих нейтронных центрах не предусмотрено, так как они были запущены до 2011 года. Для установки монокроматоров Si(220) и Si(111) в стресс-дифрактометрах на реакторах HFR (ILL), HFIR (ORNL) и KOWARI(ANSTO), данные приборы необходимо капитально переделать. Маловероятно, что это сочтут целесообразным. Такие монокроматоры можно установить взамен действующих, без переделки приборов, на стресс-дифрактометрах STRESS-SPEC (FRM II) и RSI (NIST). Заметим, что такая замена является довольно непростым и дорогостоящим мероприятием.

1. W. Woo et al. Journal of Applied Crystallography, **44**, 747 (2011).

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НАНООБЪЕКТОВ МЕТОДОМ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ НА ИМПУЛЬСНОМ ИСТОЧНИКЕ ИБР-2

А. И. Куклин^{1,2}, О. И. Иванов^{1,2,3}, А. В. Рогачев^{1,2}, Д. В. Соловьев^{1,2,3}, А. Х. Исламов¹,
В. В. Ской^{1,2}, Ю. С. Ковалев^{1,2}, А. В. Власов^{1,2,4}, Ю. Л. Рижиков^{1,2}, А. Г. Соловьев¹,
Н. Кучерка¹, В. И. Горделий^{2,5,6}*

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

³Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль, Украина

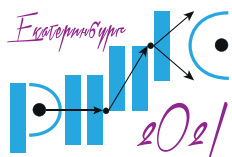
⁴Институт кристаллографии, Рейнско-Вестфальский технический университет Ахена, Ахен, Германия

⁵Центр структурной биологии, Юлихский исследовательский центр, Юлих, Германия

⁶Институт структурной биологии Жан-Пьера, Университет Гренобля в Альпах – комиссариат по атомной энергии и альтернативным источникам энергии "CNRS", Гренобль, Франция

* E-mail: kuklin@nf.jinr.ru

Сделан обзор нейтронографических исследований на малоугловом нейтронном спектрометре МУРН-ЮМО (ОИЯИ, Дубна), расположенном на импульсном реакторе ИБР-2. Рассмотрены основные параметры малоугловых спектрометров, использующих времяпролетную методику. Показано, что ключевым параметром спектрометра на импульсных источниках являются потоки на образце, позволяющие наряду с многодетекторной системой расширить динамический диапазон (и диапазон) по значению модуля вектора рассеяния. Показаны направления развития малоугловых спектрометров. Сделан краткий обзор реализованных на спектрометре ЮМО исследований в области полимеров, биологии, материаловедения, физической химии. Рассмотрены основные направления развития малоуглового рассеяния нейтронов на импульсных источниках. Сравниваются возможности малоугловых установок на синхротронном источнике и нейтронном на импульсном источнике. Приведены примеры методических находок и решений научных задач.



HIGH-PRESSURE NEUTRON DIFFRACTOMETER DN-6: CURRENT STATE

E. V. Lukin, D. P. Kozlenko, S. E. Kichanov, A. V. Rutkauskas, B. N. Savenko*

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

*E-mail: lukin@jinr.ru

The application of high pressure is a well-known direct method of manipulating the structure and properties. The possibility of diffraction provides a unique opportunity to observe these changes in the structure on a scale comparable to the dimensions of the atoms. Among the large variety of diffraction tools, neutrons additionally provide an opportunity for studies of the crystal structure of materials containing light atoms like hydrogen and oxygen and, especially, for studies of the magnetic structure of materials. However, the evolution of high-pressure neutron diffraction methods is seriously restricted by drastically low intensity of neutron sources (in many orders of magnitude) in comparison with synchrotron radiation ones.

A DN-6 diffractometer at the IBR-2 high flux reactor with a long pulse was specially constructed for studies of atomic and magnetic structure of materials under extreme conditions using diamond anvil cells (DAC). High neutron flux on the sample obtained by means of a new parabolic focusing neutron guide and the wide solid angle of the detector system allow studies of the samples with a volume of about $0.01 - 0.02 \text{ mm}^3$ and even less. The use of closed-cycle refrigerator allows to conduct the experiments with DAC in a wide range of temperatures $4 - 300 \text{ K}$. Some examples of recent studies at pressures up to 40 GPa are presented. The prospects for further development of high pressure neutron diffraction at the IBR-2 reactor are discussed.

ПОРОШКОВЫЙ ДИФРАКТОМЕТР MONOPOLY НА КОМПАКТНОМ ИСТОЧНИКЕ НЕЙТРОНОВ DARIA

А. Е. Павлова^{1,2}, К. А. Павлов^{1,2}, П. И. Коник³, С. В. Григорьев^{1,2}, В. В. Воронин^{1,2}*

¹Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Juelich Centre for Neutron Science, Garching, Germany

*E-mail: pavlovanastasia668@gmail.com

Целью данной работы является оценка возможностей установки порошкового дифрактометра MONOPOLY на компактном источнике нейтронов DARIA в условиях его низкой светосилы.

Впервые предлагается передать пользователю контроль над параметрами источника нейтронов: температура замедлителя, частота повторения и длительность нейтронных импульсов, вследствие чего повышается эффективность использования низкопоточного источника нейтронов.

Дифрактометр MONOPOLY является частью проекта DARIA. Этот проект направлен на создание сети компактных источников в федеральных университетах, что позволит сделать исследования с помощью нейтронного рассеяния доступнее. Так как компактный источник нейтронов имеет импульсную структуру пучка, то времяпролетный метод реализуется естественным образом. Дифрактометр MONOPOLY будет иметь возможность изменять рабочий диапазон длин волн в диапазоне от 1 до 5 Å. Дифрактометр MONOPOLY предназначен как для ядерных, так и для магнитных структурных задач, а также для исследований макромолекул. Для такого широкого диапазона по измеряемой величине необходимы как холодные, так и тепловые нейтроны, поэтому необходим тепловой и холодный замедлитель. Рассчитана длина пролетной базы таким образом, чтобы нейтронные импульсы не перекрывали друг друга. Дисковый прерыватель рассчитан так, чтобы подстраиваться под изменение частоты и длительности нейтронного импульса. Рассчитана частота вращения прерывателя и его основные параметры. Предложена схема дифрактометра MONOPOLY. Проведена оптимизация эллиптического нейтроновода. Получена первая оценка плотности потока на образце. Показана принципиальная возможность реализации нейтронной дифрактометрии в условиях низкой светосилы компактного источника нейтронов DARIA.

Работа поддержана грантом РНФ 19-12-00363 «Разработка и прототипирование нейтронных станций для компактных источников нейтронов».

Секция 14.

**Методы исследования вещества, компле-
ментарные нейтронному рассеянию**

ЯДЕРНЫЙ МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС, КВАЗИУПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ НЕЙТРОНОВ И НЕЙТРОННОЕ СПИНОВОЕ ЭХО КАК ВЗАИМНО ДОПОЛНЯЮЩИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ТУННЕЛИРОВАНИЯ В БОРОГИДРИДАХ

L. Guasco^{1,2}, A. B. Скрипов^{1}, A. B. Солонинин¹, O. A. Бабанова¹, P. B. Скорюнов¹,
F. Morelle², Y. Filinchuk², M. Dimitrievska³, A. Faraone³, T. J. Udovic³*

¹Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Universite Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium

³National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA

*E-mail: skripov@imp.uran.ru

На примере обнаружения низкотемпературного вращательного туннелирования групп BH_4 в бензимидазолате-борогидриде лития $\text{Li}_2(\text{bIm})\text{BH}_4$, где $\text{bIm} = \text{C}_7\text{N}_2\text{H}_5$, будет продемонстрирована роль взаимно дополняющих методов ядерного магнитного резонанса (ЯМР), квазиупругого рассеяния нейтронов и нейтронного спинового эха в исследованиях динамических свойств комплексных гидридов. Интересная особенность кристаллической структуры $\text{Li}_2(\text{bIm})\text{BH}_4$ состоит в том, что один из атомов H тетраэдрического комплексного аниона $[\text{BH}_4]^-$ плотно координирован четырьмя атомами Li, тогда как остальные три атома H этого аниона не имеют очень близких соседей (Рис. 1) [1].

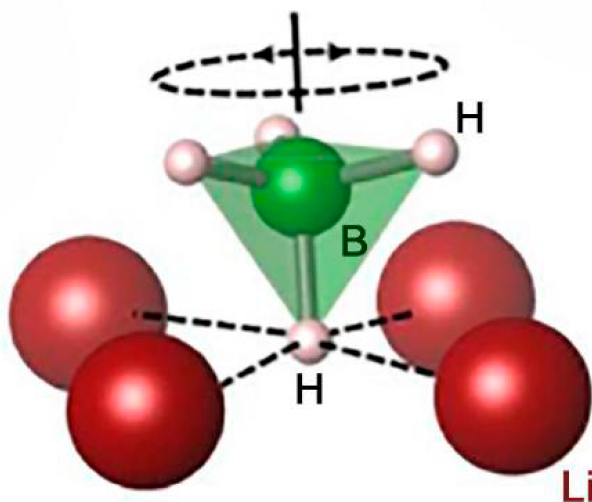


Рис. 1. Схематическое представление ближайшего окружения тетраэдрической группы BH_4 в структуре $\text{Li}_2(\text{bIm})\text{BH}_4$ и одноосного реориентационного (вращательного) движения.

Для такой структуры можно ожидать низкие энергетические барьеры для показанного на Рис. 1 одноосного реориентационного движения группы BH_4 . Наши ЯМР-эксперименты по измерению скоростей спин-решеточной релаксации ядер ^1H на различных резонансных частотах обнаружили быстрое реориентационное движение при очень

низких температурах. Интерпретация экспериментальных результатов в рамках классического термически активированного движения показывает, что частота перескоков атомов H достигает 10^8 с^{-1} уже при $T = 28 \text{ K}$. Однако, зависимость низкотемпературных релаксационных данных от резонансной частоты отклоняется от предсказаний классической теории, что позволяет предполагать возможность вращательного туннелирования групп BH_4 . Анализ низкотемпературных данных ЯМР-экспериментов в рамках модели [2] дает для величины туннельного расщепления основного колебательного состояния значение $0.49 \text{ } \mu\text{eV}$. Прямым доказательством существования вращательного туннелирования могло бы стать расщепление линий в низкотемпературных спектрах неупругого рассеяния нейтронов при очень высоком разрешении по переданной энергии. Проведенные нами измерения на нейтронном спектрометре обратного рассеяния HFBS в Национальном институте стандартов и технологии (NIST) согласуются с возможностью вращательного туннелирования; однако наблюдаемая величина туннельного расщепления находится на грани разрешения по энергии для данного спектрометра. Поэтому мы провели эксперименты на спектрометре нейтронного спинового эха NSE в NIST при трех температурах (3.6 K, 20 K и 30 K). Осциллирующий характер затухания промежуточной функции рассеяния $I(Q, t)$ при 3.6 K дает прямое доказательство низкотемпературного вращательного туннелирования, причем найденная из нейтронного спинового эха величина туннельного расщепления ($0.43 \text{ } \mu\text{eV}$) удовлетворительно согласуется с оценкой по данным ЯМР. Данный результат является первым наблюдением низкотемпературного вращательного туннелирования для групп BH_4 в борогидридах. При повышении температуры прослежен постепенный переход от квантовой динамики групп BH_4 (вращательного туннелирования) к классической (термически активированные реориентационные перескоки). Измерения на времяпролетном нейтронном спектрометре DCS в NIST при $T = 80 \text{ K}$ показали, что зависимость упругого некогерентного структурного фактора от Q соответствует одноосным реориентациям групп BH_4 вокруг оси симметрии третьего порядка, а частота реориентационных перескоков при этой температуре достигает $5 \times 10^{11} \text{ с}^{-1}$.

Данная работа поддержана грантом Российского научного фонда № 19-12-00009.

1. A. V. Skripov, M. Dimitrievska, O. A. Babanova, et al., J. Phys. Chem. C **123**, 20789 (2019).
2. W. Müller-Warmuth, R. Schüler, M. Prager, A. Kollmar, J. Chem. Phys. **69**, 2382 (1978).

МЕТОД ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ДЛЯ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ ВЕЗИКУЛЯРНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ФТНС

Е.И. Жабицкая^{1,2}, Е.В. Земляная^{1,2}, М.А. Киселев^{1,2}*

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

*E-mail: Evgeniya.Zhabitskaya@jinr.ru

Метод параллельной асинхронной дифференциальной эволюции (АДЭ) [1, 2] с адаптивной корреляционной матрицей (АКМ) [3] применен для анализа везикулярных структур в лекарственных суспензиях на базе фосфолипидной транспортной наносистемы (ФТНС), разработанной в Институте биомедицинской химии им. В.Н.Ореховича (Москва) для доставки лекарств в ткани человеческого организма. АДЭ подходит для решения многомерных задач глобальной минимизации, возникающих, в том числе, при анализе сложных биологических систем, и характеризуется возможностью эффективной параллельной компьютерной реализации [1].

Исследовались данные малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) на полидисперсных популяциях однослойных везикул на основе ФТНС, растворенных в тяжелой воде.

Спектры МУРН были измерены на малоугловом спектрометре ЮМО (ОИЯИ, Дубна). Численные результаты обсуждаются в сравнении с результатами анализа малоугловых синхротронных рентгеновских спектров от везикул ФТНС.

Численный анализ основан на методе разделенных форм-факторов (РФФ) [4, 5], известном как эффективный подход для восстановления структуры везикулярных систем по данным малоуглового рассеяния.

Средний радиус и полидисперсность везикул, а также параметры внутренней структуры бислоя везикул, были определены путем подгонки параметров модели отклика бислоя к экспериментальным спектрам МУРН. Решение задачи подгонки, требующей многомерной (7-8 параметров) глобальной минимизации, организовано с помощью АДЭ-АКМ алгоритма.

На этой основе получены основные параметры везикулярных систем индолипа в зависимости от концентрации мальтозы в водном растворе.

Продемонстрирована также эффективность параллельной реализации АДЭ-РФФ вычислительной процедуры на многопроцессорной гетерогенной платформе HybriLIT (ОИЯИ, Дубна).

1. E. I. Zhabitskaya, M. V. Zhabitsky, Lecture Notes in Computer Science **7125**, 328 (2012).

2. E. I. Zhabitskaya, M. V. Zhabitsky, Mathematical Modelling **24**, 33 (2012).

3. E. I. Zhabitskaya, M. V. Zhabitsky, Proceeding of the 15th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, USA, New York, 2013, pp. 455–462.

4. M. A. Kiselev, E. V. Zemlyanaya, V. K. Aswal, R. H. H. Neubert, European Biophysics Journal **35**, 477 (2006).

5. M. A. Kiselev, E. V. Zemlyanaya, E. I. Zhabitskaya, and V. L. Aksenov, Crystallography Reports **60**, 143 (2015).

ИССЛЕДОВАНИЕ СОХРАННОСТИ МЕТАЛЛА В ОБЪЕКТАХ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ С ПОМОЩЬЮ НЕЙТРОННО-СИНХРОТРОННОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ МЕТОДОВ

Е. С. Коваленко^{1,2}, К. М. Подурец¹, М. М. Мурашев¹, В. П. Глазков¹, П. А. Борисова¹,
Е. Ю. Терещенко^{1,2}, Е. Б. Яцишина¹*

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

*E-mail: kovalenko_es@nrcki.ru; kovalenko_es@mail.ru

При изучении объектов культурного наследия одной из важных задач является определение их сохранности. Это особенно важно для металлических артефактов, подвергавшихся воздействию огня и агрессивных факторов внешней среды, которые приводят к химическому превращению материалов. В работе описаны результаты экспериментов по нейтронно-синхротронной томографии бронзовых и железных артефактов из коллекций Государственного музея изобразительных искусств им. А.С. Пушкина, Государственного исторического музея и Института археологии РАН. Показано, что на теневых проекциях, полученных на монохроматическом пучке нейтронов, металл проявляется в дифракции на зернах, что позволяет определить области его сохранности. Рассмотрены также примеры неоднородной коррозии археологических объектов, обнаруженные с помощью нейтронно-синхротронной томографии.

Работа выполнена с использованием оборудования уникальных научных установок «Исследовательский реактор ИР-8» и «Курчатовский источник синхротронного излучения» в НИЦ «Курчатовский институт».

β_0/β PHASE TRANSFORMATION IN TiAl ALLOYS STUDIED BY SYNCHROTRON AND NEUTRON IN SITU DIFFRACTION METHODS

V. Kononikhina^{1,*}, *A. Stark*¹, *W. Gan*², *X. Li*², *A. Schreyer*³, *F. Pyczak*^{1,4}

¹Helmholtz-Zentrum Hereon, Geesthacht, Germany

²German Engineering Materials Centre at MLZ, Garching, Germany

³European Spallation Source ERIC, Lund, Sweden

⁴BTU Cottbus-Senftenberg, Cottbus, Germany

*E-mail: VictoriaKononikhina@gmail.com

TiAl alloys are currently applied for turbine blades production as for example the TNM quaternary alloy [1]. To obtain more balanced mechanical properties one research topic is to reduce the β_0/β phase content at service temperature. However, a minimal β_0 phase content is still desirable in order to avoid embrittlement at RT and deterioration of creep properties at elevated temperature [1]. Currently not too much is known about β_0/β phase transformation temperatures and the effect of alloy chemistry on them. Therefore, fundamental investigations play an important role in understanding of influence of single β stabilizing elements on the β_0/β phase transformation and the amount of the β_0 phase at room and service temperature. Thus ternary samples with different β stabilizing element additions (Ti-42Al-(1, 2, 3) Fe; Ti-42Al-(2, 4, 6) Mo; Ti-42Al-(2, 4, 6) Cr; Ti-42Al-(2, 8.5, 10) Nb; Ti-42Al-(2, 8.5, 10) Ta) were investigated by in situ synchrotron and partly by neutron diffraction. When comparing alloys with equal amounts (2 at.%) of β stabilizing elements, Mo was found to have the highest β_0 phase stabilizing effect, then Fe and then Cr [2]. Neutron diffraction has been used for unambiguous detection of the B2 state of β_0 phase. Synchrotron radiation gave not only superstructure, but also fundamental reflections, which were used for site occupancy and more precise lattice parameters and phase transformation temperatures determination.

1. S. Mayer, et al., Intermetallic β -Solidifying γ -TiAl Based Alloys – From Fundamental Research to Application Advanced Engineering Materials, 2017. 19(4): p. 1600735.
2. V. Kononikhina, A. Stark, W. Gan, et al., Ordering and disordering of β_0/β -phase in γ -TiAl based alloys investigated by neutron diffraction. 2016 MRS Fall Meeting, 2017.

IN SITU СИНХРОТРОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ АНИОННОГО ОБМЕНА В Zn-Al СЛОИСТЫХ ДВОЙНЫХ ГИДРОКСИДАХ, ВЫРАЩЕННЫХ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

М. Х. Юзвюк^{1*}, И. А. Зобкало¹, А. С. Bouali², Г. Довженко², М. Сердечнова²,
F. D. C. Wieland², K. A. Yasakau³, C. Blawert², М. Л. Желудкевич^{2,4}

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

²Helmholtz-Zentrum Hereon, Geesthacht, Germany

³University of Aveiro, Aveiro, Portugal

⁴University of Kiel, Kiel, Germany

*E-mail: yuzvyuk_mh@npfi.nrcki.ru

Изучение структуры и свойств слоистых двойных гидроксидов (СДГ) – область исследований, направленная на разработку новых нетоксичных антикоррозионных материалов. В первую очередь исследования касаются коррозионной защиты алюминиевых сплавов (например, AA2024), однако не ограничиваются ими. Потребность в данных исследованиях возникла из-за того, что использующиеся в настоящее время защитные покрытия на основе Cr(VI) оказывают негативное влияние на окружающую среду. СДГ проявляют активные защитные свойства, одновременно являясь экологически безопасными. В общем случае СДГ можно описать формулой $[M_{II}^{II} M_{III}^{III}(\text{OH})_2]^{x+} [A^{y-}]_{x/y} \cdot z\text{H}_2\text{O}$, где $M_{II}^{II}, M_{III}^{III}$ – катионы металлов, A^{y-} – межслоевой анион [1]. Данные соединения рассматриваются как новое поколение высокоэффективных антикоррозионных материалов из-за возможности хранить и обменивать анионы, если в качестве последних выступают ингибиторы коррозии [2]. При помещении такого СДГ в агрессивную среду происходит анионный обмен: выделяются ингибиторы коррозии, а из окружающей среды в СДГ поступают коррозионные частицы [3]. Понимание механизмов анионного обмена, а также его влияния на структуру слоистых двойных гидроксидов позволит разработать эффективное антикоррозионное покрытие на их основе.

В настоящей работе исследуется кинетика анионного обмена в СДГ, выращенных на Zn и алюминиевом сплаве AA2024. Во время *in situ* синхротронных экспериментов изучалось четыре анионообменных процесса: родительские анионы нитрата (NO_3^-) замещались на хлориды (Cl^-), сульфаты (SO_4^{2-}), ванадаты (VO_x) и глюконат ($\text{C}_6\text{H}_{11}\text{O}_7^-$). Для обоих типов подложек кристаллографический анализ показывает, что структуры СДГ- NO_3 и СДГ- Cl описываются ромбоэдрической пространственной группой $R\bar{3}m$, структура СДГ- SO_4 – пространственной группой P – 3. Качество рентгенограммы СДГ- VO_x не позволяет точно определить его кристаллическую структуру, однако из нее явно видно, что анионный обмен приводит к формированию двух кристаллических фаз с ванадат-анионами. Предположительно, ими являются $\text{V}_4\text{O}_{12}^{4-}$ и $\text{V}_2\text{O}_7^{4-}$ [4, 5]. В результате обмена на глюконат-анионы образуется только фаза СДГ-ОН, структура которой также описывается группой $R\bar{3}m$.

Анализ кинетики анионного обмена проводился с помощью универсальной модели Авраами-Ерофеева, которая часто используется при изучении процессов разложения, кристаллизации, интеркаляции [6-8]. Было показано, что анионообмены $\text{NO}_3^- - \text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-} / \text{OH}^-$ в СДГ на цинковой подложке представляют собой двухстадийные диффузионно-контролируемые реакции с уменьшающейся скоростью зародышеобразования. Для этих процессов первая стадия является двумерной, а вторая – одномерной, что

означает, соответственно, диффузию гостевых соединений вдоль плоскости ab и диффузию заполненных слоев вдоль оси c . В процессе анионных обменов возникает промежуточная кристаллическая фаза, которая представляется собой СДГ с родительскими и гостевыми анионами одновременно. Схематично описываемый процесс изображен на Рис. 1а на примере обмена нитрат-хлорид [4]. Анионный обмен $\text{NO}_3^- - \text{VO}_x$ представляет собой одностадийный двумерный процесс с мгновенным зародышеобразованием, т.е. насыщение активных центров зародышеобразования происходит мгновенно, как только начинается реакция [4].

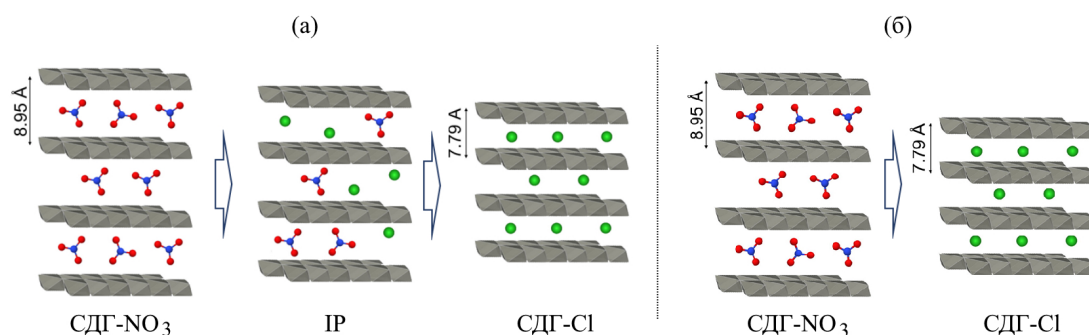


Рис. 1. Схематичное изображение процесса анионного обмена $\text{NO}_3^- - \text{Cl}^-$ в СДГ на (а) цинке, IP – промежуточная кристаллическая фаза, (б) на сплаве AA2024.

Анионные обмены на AA2024 обладают другими характеристиками. Во-первых, обмены $\text{NO}_3^- - \text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$ протекают в одну стадию (Рис. 1б), а во-вторых, отличается механизм реакции – в данных случаях имеют место трехмерные полностью диффузионно-контролируемые реакции. Процесс анионного обмена $\text{NO}_3^- - \text{OH}^-$ – двухстадийная реакция, вторая стадия которой характеризуется трёхмерной полностью диффузионно-контролируемой реакцией (большая скорость первой стадии реакции не позволяет провести анализ).

Работа выполнена в рамках и при частичной финансовой поддержке проекта FUNCOAT (№ 823942 в рамках программы Horizon 2020 Marie Skłodowska-Curie actions).

1. D.G. Evans and R.C.T. Slade, Structural Aspects of Layered Double Hydroxides, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, (2006).
2. A. C. Bouali et al., Appl. Mater. Today. **21**, 100857 (2020).
3. J. Tedim et al., ACS Appl. Mater. Interfaces. **2**, 1528 (2010).
4. A. C. Bouali et al., Appl. Surf. Sci. **501**, 144027 (2020).
5. M. H. Iuzviuk et al., Phys. Chem. Chem. Phys. **22**, 17574 (2020).
6. J. D. Hancock and J. H. Sharp, J. Am. Ceram. Soc. **55**, 74 (1972).
7. S. J. Price et al., Adv Mater. **8**, 582 (1996).
8. A. P. Wilkinson et al., Chem. Mater. **6**, 750 (1994).

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОвого РАСШИРЕНИЯ NaNO_3 , ВНЕДРЕННОГО В НАНОПОРИСТОЕ СТЕКЛО

А. А. Набережнов¹, О. А. Алексеева^{2*}, А. В. Кудрявцева², Д. Ю. Чернышев³,
Т. Ю. Вергеньев⁴

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

³European Synchrotron Radiation Facility, Гренобль, Франция

⁴ОАО «Морион», Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: blackhole2010@yandex.ru

В работе приводятся результаты исследования температурной эволюции кристаллической структуры нитрата натрия NaNO_3 , внедренного в пористое стекло со средним диаметром пор 7 нм.

Массивный нитрат натрия NaNO_3 претерпевает ориентационный фазовый переход порядок – беспорядок при температуре $T_C \sim 552$ К и плавится при ~ 580 К. При низкой температуре он кристаллизуется в структуре кальцита (пр. группа $R\bar{3}c$) с двумя формульными единицами на элементарную ячейку. При нагреве выше происходит ориентационное разупорядочение нитратных молекулярных групп NO_3 вокруг оси третьего порядка параллельной кристаллографической оси и происходит понижение симметрии $R\bar{3}c \rightarrow R\bar{3}m$. Этот переход сопровождается исчезновением сверхструктурных отражений в точках Z обратного пространства, то есть в точке $(0\ 0\ 1.5)$, индексированной с использованием гексагональной настройки $R\bar{3}m$. Интенсивность сверхструктурных пиков подчиняется степенному закону $I = I_0 t^{2\beta}$, где t — приведенная температура $t = (T_C T)/T_C$, β — критический индекс.

В качестве матрицы для нанокомпозита (НКМ) использовалось нанопористое стекло, полученное травлением щелочно-боросиликатного стекла с фазовым расслоением. В таких стеклах поры образуют трехмерную случайную (дендритную) систему взаимосвязанных каналов с малым разбросом диаметров относительно среднего значения. Средний диаметр пор был определен с помощью адсорбционной пороскопии и ртутной порометрии и составил 7(1) нм. Пористость, определенная по уменьшению массы после выщелачивания, составила 23%.

Заполнение пор стекла внедряемым материалом производилось из расплава NaNO_3 . После заполнения поверхности пластин механически шлифовали для удаления остатков массивного NaNO_3 . Температурную эволюцию кристаллической структуры исследовали методом дифракции синхротронного излучения на дифрактометре BM01 линии SNBL (ESRF, Франция) на длине волны 0.69 Å в температурном диапазоне 293 — 595 К при нагреве.

Полученные дифрактограммы были обработаны с помощью метода полного профильного анализа Ритвельда в программной среде FullProf и получены следующие результаты:

1. Построены температурные зависимости параметров ячейки и вычислены соответствующие линейные коэффициенты теплового расширения (КТР) вдоль этих направлений (a_a и a_c) (Рис. 1). Сравнение полученных значений для нашего НКМ и данных полученных ранее для массивного NaNO_3 показало, что в широком температурном

диапазоне 360 — 570 К КТР для наноструктурированного NaNO_3 существенно меньше, чем для массивного материала, особенно это проявляется для КТР α_a .

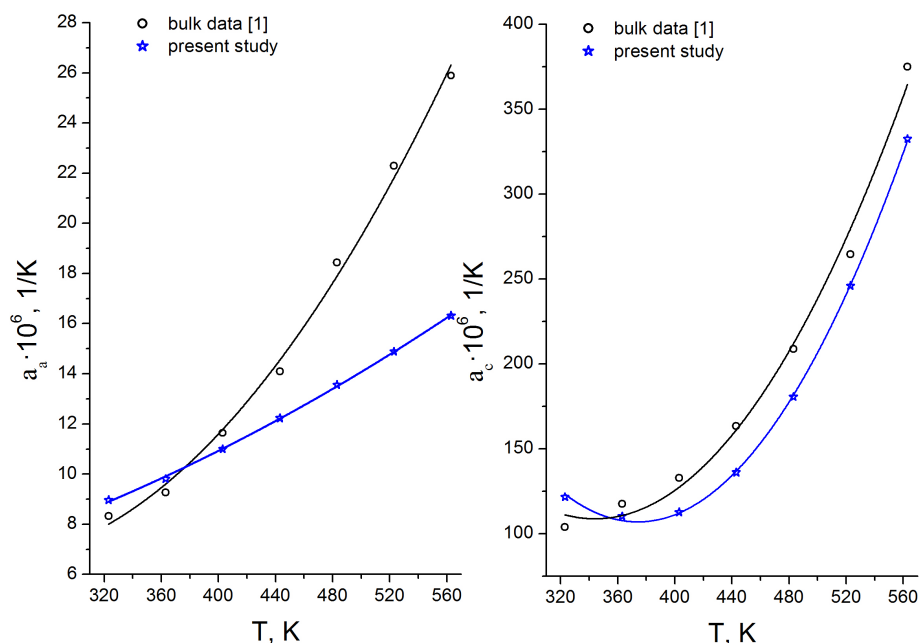


Рис. 1. Температурные зависимости линейных коэффициентов теплового расширения вдоль направлений [100] и [001] для НКМ NaNO_3 +пористое стекло (синий цвет) и для массивного NaNO_3 [1] (черный цвет).

2. Из аппроксимации температурной зависимости интенсивности сверхструктурного пика (113) степенной функцией вида $I = I_0 t^{2\beta}$ были вычислены значения температуры структурного фазового перехода $t_c = 548(1)$ К и критического индекса $\beta = 0.21(5)$. Для сравнения в массивном NaNO_3 значения составляют $t_c = 552$ К, а критический индекс β демонстрирует сложное поведение, в температурном диапазоне 280 — 543 К его значение меняется от 0.25 до 0.22, а затем возрастает вблизи фазового перехода до 0.41 [2,3].

3. Из анализа уширения брэгговских рефлексов вследствие размерного эффекта оценен средний размер наночастиц NaNO_3 в каналах пористой матрицы. При комнатной температуре он составляет величину 40(5) нм, и остается неизменным до температур порядка 500 К, выше которых начинается рост размера наночастиц по мере нагрева.

В ФТИ им. А.Ф. Иоффе работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 19-02-00760).

1. K. V. Krishna Rao and K. Satyanarayana Murthy, Journal of Physics and Chemistry of Solids **31**, 887 (1970).
2. W. C.-K. Poon, E. Salje, J. Phys. C. Solid State Phys. **21**, 715 (1988).
3. S. J. Payne, M. J. Harris, M. E. Hagen, M. T. Dove, J. Phys. Condens. Matter. **9**, 2423 (1997).

МЕССБАУЭРОВСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА В СТРУКТУРЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ХРИЗОТИЛ-АСБЕСТОВЫХ ГИДРОСИЛИКАТНЫХ НАНОТРУБОК

В. С. Козлов^{1}, Т. П. Масленникова², Э. Н. Корыткова², С. В. Кононова³*

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

²Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург, Россия

³Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург, Россия

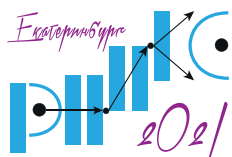
* E-mail: kozlov_vs1@pnpi.nrcki.ru

Исследование нанокompозитных материалов, сочетающих в себе органическую матрицу и неорганические нанонаполнители, представляет значительный интерес вследствие потенциальной возможности получения композита (материала) с улучшенными свойствами. Ранее нами было показано, что на основе ароматических полиамидоимидов и слоистых гидросиликатов магнезия $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ и никеля $Ni_3Si_2O_5(OH)_4$, имеющих трубчатое строение, получены новые композиционные материалы, обладающие преимущественной проницаемостью в процессе первапорации по отношению к полярным жидкостям, таким как вода и алифатические спирты в большей степени, чем исходные полимеры. Анализ данных предшествующих работ привел к выводу о существенном влиянии химического строения нанотрубок на морфологические особенности полимера – неорганических нанокompозитов, характер распределения нанотрубок в полимерной матрице. При этом катионы *d*-элементов (Ni, Co, Fe), частично замещающие магний в октаэдрическом слое структуры хризотила, могут изменять диаметр и длину синтетических нанотрубок и влиять на термостабильность, электрические и магнитные характеристики синтетических замещенных гидросиликатов. Для изучения структурных особенностей неорганических нанонаполнителей, погруженных в полимерную матрицу в малых количествах (менее 2 мас.% от массы полимера), необходимо привлечение специальных методов анализа. Мессбауэровская спектроскопия является высокочувствительным инструментом для изучения кристаллических и рентгеноаморфных материалов, обладает абсолютной селективностью по мессбауэровскому изотопу ^{57}Fe и позволяет, проследив за изменением локального окружения атомов железа, получить данные о фазовом составе железосодержащих фаз.

С целью разработки модельных композитных систем был проведен синтез железосодержащих хризотил-асбестовых гидросиликатных нанотрубок из Mg, Fe – энстатита с разным количеством введенного в энстатит FeO . Методом мессбауэровской спектроскопии проведено исследование степени окисления и локализации ионов железа по структурным позициям, степени магнитного упорядочения.

Показано, что Fe во всех образцах находится преимущественно в парамагнитной фазе структуры хризотила, а также в магнитной фазе магнетита, которая убывает с уменьшением введенного в энстатит железа. Установлено, что в парамагнитной фазе хризотила ионы Fe^{3+} замещают Si в тетраэдрической позиции, а ионы Fe^{2+} изоморфно замещают Mg в октаэдре. При этом соотношение $Fe_{тетр}^{3+}/Fe_{окт}^{2+}$ (фактически, степень окисленности) меняется от 1.95 до 6.46 и коррелируется с уменьшением количества доли закисного железа в исходной шихте. Следует отметить, что, в отличие от мессбауэровских спектров природных хризотил-асбестов, ни в одном из четырех изученных нами синтетических образцов не зафиксировано вхождение Fe^{3+} в октаэдрическую позицию. Полученные данные позволяют предположить, что применение метода мессбауэровской спектроскопии может способствовать не только направленному выбору хризотил-асбестовых наночастиц в качестве наполнителей полимерной матрицы, но и использоваться для уточнения их структурных особенностей в составе композиционного материала.

Авторы признательны В.Т. Лебедеву за поддержку данной работы.



SYNTHESIS AND INVESTIGATION ON STRUCTURAL AND SORPTION PROPERTIES OF NOVEL MAGNETITE/SILICA/MWCNT COMPOSITE MATERIALS

I. Malinowska¹, M. Studziński¹, T. Nagorna^{2}*

¹Institute of Chemistry, Faculty of Chemistry, Physical Chemistry Department, Maria Curie-Skłodowska University, Lublin, Poland

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

*E-mail: nagorna@jinr.ru

Magnetic field is a one of the basic interactions present into the known universe. It is also one of the important factors, shaping Earth's biosphere, and influencing many processes of animated and unanimated nature.

The consequence of that fact that it is often used as a tool in various human activities. Magnetic field is broadly used in communication, transport, medicinal therapy, electronics optics and gains more and more attention in area of chemical sciences [1 – 3].

Incorporating a ferro- and superparamagnetic iron oxide nanoparticles (SPIONs) into the structure of silica and carbon composite nanomaterials may greatly broaden their spectrum of applications in area of sorption, catalysis, inorganic synthesis, and many others.

One of the key roles play the possibility of placing those materials in demanded area and alternating their surface properties using external magnetic field [4], as it can be observed during magnetic drug targeting process [5,6]. Another possibility is application of those materials for precise heat transfer using microwaves [6].

In our study, we have concentrated on two main aspects. The first one was to investigate the importance of synthesis conditions (temperature, order and method of reagent addition, etc.) on magnetic iron oxide crystallite sizes. The second one regarded possible methods of implementation of obtained magneto sensitive particles into structures of silica and carbon nanotubes. All procedures were also verified under the criteria of simplicity and low cost of preparation of desired materials.,

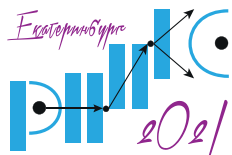
The second part of our investigation was focused on investigation of their sorption properties, from gaseous phase - ASAP measurements and liquid phase – dyes and small molecule drugs in context of potential environmental and medical applications.

Financial support for the grant of Research Group at JINR and Research Centers in Poland No. 04-4-1121-2015/2020 is gratefully acknowledged.

1. P. Poizot, S. Laruelle, S. Grugeon, et al., *Nature* **407**, 496 (2000).
2. A. Tari, R.W. Chantrell, S.W. Charles, J. Popplewell, *Physica B & C* **97**(1), 57 (1979).
3. M. Mahmoudi, A. Simchi, M. Imani, et al., *Thin Solid Films* **518**(15), 4281 (2010).
4. I. Malinowska, M. Studziński H. Malinowski, *Int. J. Magnetism Electromagnetism* **6**:032 (2020).
5. M. W. Freeman, A. Arrott, J. H. L. Watson, *J. Appl. Phys.* **31**(5), S404 (1960).
6. A. K. Hauser, R. J. Wydra, N. A. Stocke, et al., *J. Contr. Rel.* **219**, 76 (2015).

Секция 15.

Компактные источники нейтронов



ПРОЕКТ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ DARIA ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДАМИ НЕЙТРОННОГО РАССЕЯНИЯ

К. А. Павлов^{1,2}, Н. А. Коваленко¹, А. Е. Павлова^{1,2}, В. В. Субботина^{1,2}, П. И. Коник³,
В. А. Скалыга⁴, И. В. Изотов⁴, С. С. Выбин⁴, А. Ф. Боханов⁴, Г. Н. Кропачев⁵,
А. Л. Ситников⁵, Т. В. Кулевой⁵, В. В. Воронин^{1,2}, С. В. Григорьев^{1,2}*

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

³Юлихский центр нейтронных исследований (JCNS), Гархинг, Германия

⁴Институт Прикладной Физики РАН, Нижний Новгород, Россия

⁵НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ, Москва, Россия

*E-mail: grigoryev_sv@npfi.nrcki.ru

Ведущие мировые центры нейтронных исследований в настоящее время разрабатывают источники нейтронов нового поколения для нужд физики конденсированных сред. Компактные источники призваны заменить морально устаревшие реакторы малой и средней мощности и открыть возможности для создания лабораторий рассеяния нейтронов в научных и образовательных организациях. Такой источник изначально уступает несколько порядков нейтронного потока большому источнику ускорительного типа; однако значительная часть этих потерь может быть компенсирована увеличением апертуры захвата и глубокой оптимизацией инструмента, включая адаптацию параметров ускорителя, мишени и замедлителя к потребностям каждой конкретной установки, использующей источник, индивидуально [1]. На волне всемирного интереса к компактным источникам нейтронов мы представляем российскую инициативу создания подобного источника – проект DARIA (compact neutron source Dedicated to Academic Research and Industrial Applications). Целью проекта является разработка и создание сначала прототипа, а затем сети компактных источников нейтронов для нужд нейтронного рассеяния. Основные элементы источника:

1. Протонный ускоритель, состоящий из ЭЦР источника и ускоряющих структур до 13 МэВ, обеспечивающих формирование импульсной структуры пучка на бериллиевой мишени с высоким пиковым током до 100 мА и частотой до 200 Гц [2,3]. Энергия протонов будет ограничена сверху 13 МэВ, так как ее дальнейшее увеличение приведет к генерации трития в мишени, что нежелательно для источника, размещаемого в образовательных учреждениях.

2. Мишенная сборка. Для создания нейтронов будет использоваться реакция столкновения протонов с ядрами бериллия, обеспечивающая выход нейтронов, достаточный для исследований в физике конденсированного состояния, при умеренном выделении тепла [4]. Компактные размеры мишени (около 5 см в диаметре и 1.2 мм в толщину) обеспечат относительно высокую плотность потока нейтронов. Низкие размеры мишени и теплового замедлителя, размещаемого внутри мишенной сборки, позволяют использовать компактную биологическую защиту. Разрабатывается система охлаждения, позволяющая отводить около 65 кВт среднего тепловыделения с мишени и ее окружения.

3. Инструменты нейтронного рассеяния. При указанных выше параметрах ускорителя и мишени возможно добиться плотности потока нейтронов в импульсе до 2×10^{14}

н/с/см², что приравнивает компактный источник нейтронов по своим научным возможностям к исследовательским реакторам средней мощности типа ВВР. Нейтронные установки оптимизируются совместно с соответствующими им замедлителями нейтронов. Конкретный перечень нейтронных станций может варьироваться в зависимости от потребностей центра.

Сформулирован общий подход к созданию установки нейтронного рассеяния на компактном источнике, на его основе описан схема ускорителя и мишени. На примере нескольких методов – дифракции, спектроскопии, малоуглового рассеяния нейтронов – предложены экспериментальные схемы реализации методов нейтронного рассеяния, рассчитан ряд оптических устройств, использование которых позволит наиболее эффективно использовать генерируемый источником нейтронный поток.

Для порошкового дифрактометра предлагается использование биспектрального замедлителя либо замедлителя с регулируемой температурой. Это позволит прибору иметь два режима работы с оптимальным потоком при заданном разрешении, отличающиеся выбором рабочего диапазона длин волн и обеспечивающие высококачественные измерения для исследования как кристаллических, так и магнитных структур.

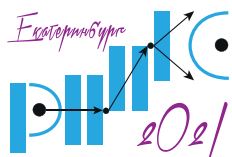
Для реализации метода нейтронной спектроскопии на компактном источнике был выбран метод времени пролета в обратной геометрии. Его использование позволяет создать так называемый сканер возбуждений в (q, E) -пространстве – эффективный инструмент для анализа неупругого, квазиупругого и упругого рассеяния, обеспечивающий быстрое и всестороннее исследование динамики [5].

Малоугловое рассеяние наиболее требовательно к светимости источника, поскольку оно предъявляет самые строгие требования к коллимации используемого пучка. Рассмотрена возможность реализации метода в классической и в фокусирующей геометрии.

Спин-эхо малоугловое рассеяние нейтронов (СЭМУРН) является методом исследования вещества на масштабах от 10 нм до 10⁴ нм, не требующим больших нейтронных потоков, а следовательно, идеально подходящим для размещения на компактных источниках нейтронов. Класс задач, решаемых на установке СЭМУРН, и моделирование ее магнитной системы рассмотрены в работах [6,7].

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках проекта № 19-12-00363.

1. LENS Report Low Energy Accelerator-driven Neutron Sources, www.lens-initiative.org (2021).
2. G. Kropachev, T. Kulevoy, and A. Sitnikov, Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, **13**, 1126 (2019).
3. С. В. Барабин, Г. Н. Кропачев, А. Ю. Лукашин, и др., Письма в журнал технической физики, **47**, 7 (2021).
4. V. V. Subbotina, K. A. Pavlov, N. A. Kovalenko, et al., Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A **1008**, 165462 (2021).
5. А. Е. Павлова, А. О. Петрова, П. И. Коник, и др., Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования **14**, 1 (2021).
6. S. Grigoriev, E. Iashina and K. Pavlov, Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques **13**, 1132 (2019).
7. W. H. Kraan, L. A. Akselrod, E. G. Yashina, et al., Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, **14**, S108 (2020).



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

→ → → Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА ПРОИЗВОДСТВА ФГУП «ВНИИА»

В. И. Зверев*

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

*E-mail: vizverev@vniia.ru

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова» (ФГУП «ВНИИА») создано в 1954 г. и является одной из ведущих научно-исследовательских организаций ядерно-оружейного комплекса Российской Федерации. На основе научных, конструкторских, технологических достижений, полученных при создании оборонных систем нейтронного инициирования, с 80-х годов прошлого века на ФГУП «ВНИИА» ведется разработка нового класса электрофизической и ядерно-физической аппаратуры — портативных нейтронных генераторов и аппаратуры на их основе. ВНИИА является единственным в России разработчиком и производителем вакуумных и газонаполненных нейтронных трубок и нейтронных генераторов, а также аппаратурных комплексов на их основе для исследования нефтяных и газовых скважин.

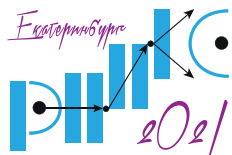
ВНИИА разрабатывает и производит:

- нейтронные генераторы для аппаратуры импульсного нейтронного каротажа нефтегазовых и рудных скважин;
- нейтронные генераторы для активационного анализа и нейтронной радиографии;
- нейтронные генераторы для научных исследований, в том числе по физике реакторов и активных зон;
- аппаратуру импульсного нейтронного каротажа нефтегазовых и рудных скважин;
- аппаратуру активационного анализа элементного состава веществ и материалов для металлургии, поиска токсических и взрывчатых веществ, делящихся материалов и наркотиков;
- аппаратуру радиографии в полях быстрых и тепловых нейтронов для неразрушающего контроля различных объектов.

Все типы нейтронных генераторов могут создавать нейтроны с энергией 2.5 МэВ или 14 МэВ. Для обеспечения безопасности при эксплуатации все генераторы выполнены на запаянных нейтронных трубках, без внешней системы откачки.

Отличительными особенностями нейтронных генераторов производства ВНИИА являются: широкий спектр параметров нейтронного излучения, отсутствие излучения в выключенном состоянии, малые габаритные размеры и вес, возможность регулировки параметров нейтронного потока в широком диапазоне и простота управления.

Таким образом, в настоящей работе представлен обзор нейтронных технологий и современной аппаратуры на их основе.



КРИОГЕННЫЙ ЗАМЕДЛИТЕЛЬ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ DARIA

М. В. Булавин^{1,2}, К. А. Мухин^{1,2}*

¹Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка,
Дубна, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт» – Петербургский Институт Ядерной Физики, Гатчина, Россия

*E-mail: bulavin85@inbox.ru

Концептуальный проект криогенного замедлителя на основе ароматического углеводорода – мезитилена, разрабатывается в Лаборатории нейтронной физики им. Франка, Объединенного института ядерных исследований с 2019 г. в рамках гранта Российского научного фонда. Замедлитель представляет собой камеру объемом до 100 мл, расположенную в непосредственной близости от бериллиевой мишени. Объем камеры с мезитиленом отделен от окружающей среды вакуумно-изолирующим объемом и контуром охлаждения, связанным с криогенной гелиевой установкой.

В настоящее время лабораторный прототип замедлителя изготовлен и проходит прочностные и теплофизические испытания, а также испытания по заполнению камеры облученным мезитиленом, его охлаждению (до 80 – 100 K) и удалению из камеры. Также проводится изучение изменения свойств мезитилена под действием ионизирующего излучения при различной температуре на реакторе ИБР-2 в ЛНФ ОИЯИ.

Успешные испытания прототипа позволяют создать в ЛНФ полномасштабный испытательный стенд криогенного замедлителя с охлаждением до 20 – 30 K, отработать методику его работы и, по результатам НИОКР, подготовить техническое предложение криогенного замедлителя на основе твердого мезитилена для мишенной сборки компактного источника нейтронов на базе протонного ускорителя DARIA.

Работа выполнена при поддержке РНФ в рамках проекта № 19-12-00363.

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НЕЙТРОННО-РАДИАЦИОННОГО АНАЛИЗА
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
В ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД**

Р. Р. Гумаев*

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия

*E-mail: vizverev@vniia.ru

В последние несколько лет резко вырос интерес к редкоземельным металлам. Это связано с развитием технологий, определяющих спрос на металлы и сплавы, обладающие уникальными технологическими свойствами.

Одной из проблем, влияющих на перспективы освоения новых месторождений редкоземельных металлов, является сложность обеспечения оперативных и качественных лабораторных исследований образцов горных пород на содержание в них редкоземельных элементов (РЗЭ). Это связано с такими факторами как низкие концентрации РЗЭ в горных породах, сложность выполнения исследований по комплексным образцам горных пород, содержащим широкий спектр РЗЭ. Таким образом, проблема увеличения добычи редкоземельных металлов связана с развитием существующих технологий элементного анализа, а также применением новых методик исследований.

Наиболее развитым и эффективным методом оперативного контроля элементного состава в настоящее время являются нейтронные методы анализа, а именно метод нейтронно-радиационного анализа. Метод заключается в облучении исследуемого образца нейтронами и регистрации гамма-излучения, которое возникает в результате взаимодействия (неупругого рассеяния, захвата или поглощения) нейтрона с ядром атома вещества. Анализ спектра гамма-излучения позволяет определить наличие атомов определенных элементов и их концентрацию в исследуемом образце. Таким образом, метод нейтронно-радиационного анализа может применяться для определения содержания РЗЭ в образцах горных пород. Данный метод реализован во ВНИИА им. Н. Л. Духова в виде экспериментальной установки импульсного нейтронного анализа горных пород. Поток тепловых нейтронов создается нейтронным генератором ИНГ-07 совместно с замедлителем нейтронов. Детектирование вторичного гамма-излучения осуществляется сцинтилляционным детектором $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$.

Проведенные эксперименты показали возможность определения, как основных порообразующих элементов, так и РЗЭ в образцах горных пород.

ПРОТОННЫЙ ИНЖЕКТОР ДЛЯ КИН DARIA

И. В. Изотов^{1}, В. А. Скалыга¹, С. С. Выбин¹, Т. В. Кулевой², Г. Н. Кропачов²,
А. Л. Ситников^{2,3}, С. В. Григорьев^{3,4}*

¹ФИЦ «Институт прикладной физики Российской академии наук», Нижний Новгород, Россия

²Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия

³Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова

Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

⁴Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: ivizot@ipfran.ru

Проект ускорительного компактного нейтронного источника DARIA (Dedicated for Academic Research and Industrial Application) нацелен на замещение старых реакторных источников средней и малой мощности. Отличительной особенностью комплекса DARIA является уникально высокое соотношение эффективности к стоимости. Такой результат достигается благодаря глубокой оптимизации каждого ключевого элемента системы с использованием уникальных отечественных разработок. В качестве инжектора протонного пучка прилагается использовать уникальный электронно-циклотронный резонансный ионный источник, разработанный в ИПФ РАН. Нагрев плазмы в нем осуществляется мощным излучением гиротрона на частоте 28 ГГц, обеспечивая рекордный для таких систем уровень удельного энерговклада свыше 100 Вт/см³. Высокая плотность плазмы 10¹³ см⁻³ и температура электронной компоненты 50 – 100 эВ обеспечивают возможность формирования чистых протонных пучков с током до нескольких сотен миллиампер и эмиттансом, удовлетворяющим требованиям современных ускорителей. В работе обсуждаются преимущества применения такого ионного источника, его принципиальная схема и проектные характеристики.

ОПТИМИЗАЦИЯ МИШЕННОЙ СБОРКИ В СОСТАВЕ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ DARIA

Н. А. Коваленко^{1,*}, К. А. Павлов^{1,2}, В. В. Субботина^{1,2}, В. В. Воронин^{1,2}, С. В. Григорьев^{1,2}

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

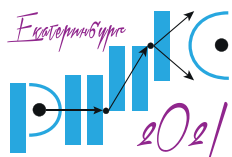
* E-mail: kovnik-15@yandex.ru

Компактный источник нейтронов DARIA проектируется на основе ускорителя протонов с энергией до 13 МэВ и бериллиевой мишени. Выбор бериллия в качестве мишени по реакции $^9\text{Be}(p,n)$ обеспечивает 3.1 нейтрон на 1000 протонов, попавших в мишень [1]. Согласно проведенным расчетам, средняя энергия нейтронов в спектре, испускаемом бериллиевой мишенью, составляет ~ 3 МэВ, что согласуется с данными представленными в работе [2]. Для детального изучения конденсированных сред необходимо предварительно замедлить нейтроны до энергий эВ-диапазона, что соответствует длинам волн 2 – 20 ангстрем. Выбор материалов, формы и комбинации замедлителей выполняется под конкретную задачу. В работе изучены особенности использования полиэтиленового и водяного замедлителя для получения «тепловых» и «холодных» нейтронов.

Расчеты проводились с помощью кодов, использующих метод Монте-Карло. Приведены сравнительные физические характеристики для замедлителей из следующих материалов: вода, полиэтилен, параводород, мезитилен. Были получены спектры нейтронов на выходе из водяного, полиэтиленового, пароводородного и мезитиленового замедлителей. В соответствии с расчетами, оптимальным является использование полиэтилена или воды для получения теплового источника нейтронов. Выбраны оптимальные геометрические характеристика таких замедлителей и их размещение относительно Ве-мишени. Предложены варианты конструкции мишенной сборки [3].

Работа поддержана грантом РФФИ 19-12-00363 «Разработка и прототипирование нейтронных станций для компактных источников нейтронов».

1. U. Rücker, T. Cronert, J. Voigt, J. P. Dabrucek, P.-E. Doege, J. Ulrich, R. Nabbi, Y. Bessler, M. Butzek, M. Büscher, C. Lange, M. Klaus, T. Gutberlet, T. Brückel, The Jülich High Brilliance Neutron Source Project. (2013).
2. W. B. Howard, S.M. Grimes, J. C. Yanch. Measurement of the Thick Target Be(p,n) Neutron Energy Spectra (2009).
3. V. V. Subbotina, K. A. Pavlov, N. A. Kovalenko, et al., Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A **1008**, 165462 (2021).



РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ НА КОМПАКТНОМ НЕЙТРОННОМ ИСТОЧНИКЕ

К. А. Павлов^{1,2*}, Н. А. Коваленко¹, В. В. Субботина^{1,2}, В. В. Воронин^{1,2}, С. В. Григорьев^{1,2}

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: fairy.neutrons@yandex.ru

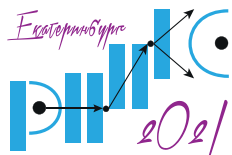
Малоугловое рассеяние нейтронов (МУРН) на сегодняшний день является одним из самых востребованных методов исследования в физике конденсированного состояния вещества. Метод может быть применён для определения механических и проводящих свойств метаматериалов, поиска новых магнитных фаз и экзотических спиновых структур, исследований вихревых структур в сверхпроводниках, в разработке возобновляемых источников энергии, при синтезе супрамолекулярных полимеров и поверхностно-активных веществ с управляемыми функциями.

Компактные источники нейтронов (КИН) сегодня во всём мире являются одним из основных направлений развития инструментария для реализации методов нейтронного рассеяния. В условиях повсеместного сокращения доступного пучкового времени и усиления ограничений на использование ядерных технологий важной задачей является создание нейтронного источника ускорительного типа, имеющего масштаб университетской или институтской лаборатории и обеспечивающего нейтронные потоки порядка 10^6 н/с/см² на малом (2 – 6) количестве установок, реализующих различные исследовательские методы. На некоторых уже существующих источниках нейтронов (LENS, США и CPNS, Китай) уже созданы прототипы установок малоуглового рассеяния. Целью настоящей работы является разработка схемы реализации МУРН на КИН, обеспечивающей достаточную светосилу для поддержки большого числа востребованных сегодня экспериментов, т.е. для работы установки в пользовательском режиме.

В данной работе рассмотрена модель установки малоуглового рассеяния нейтронов в точечной геометрии для КИН DARIA. Параметры протонный инжектора и ускорителя обеспечивают формирование импульсной структуры пучка 13 МэВ-ных протонов с высоким пиковым током до 100 мА и частотой до 200 Гц [1]. Расчётные параметры мишенной сборки с бериллиевой миншенью, замедлителем нейтронов, отражателем и холодным замедлителем дают обнадеживающую оценку нейтронного потока в позиции образца [2]. Рассчитаны параметры каскада прерывателей и оптических элементов, обеспечивающие измерения сечения рассеяния с разрешением 10% в диапазоне переданных импульсов q от 0.5 до $5 \cdot 10^{-4}$ Å⁻¹. Расчёты демонстрируют, что плотность потока на образце в трех режимах измерений - для коллимационных баз 1 м, 5 м и 10 м составила, соответственно, 2.9×10^4 н/с/см², 2500 н/с/см² и 630 н/с/см². Можно сделать вывод о принципиальной возможности реализации метода МУРН на компактном источнике нейтронов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-12-00363. Авторы благодарят сотрудника Юлихского Центра Нейтронной Науки Коники П.И. за консультативное участие и поддержку.

1. С. В. Барабин, Г. Н. Кропачев, А. Ю. Лукашин, и др., Письма в журнал технической физики, **47**, 7 (2021).



ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ДЛЯ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ DARIA

А.Л. Ситников^{1,3*}, Г. Н. Кропачев^{1,2}, Т.В. Кулевой¹, С. В. Григорьев^{3,4}

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ, Москва, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

³НИЦ «Курчатовский Институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

⁴Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: aleksey.sitnikov@itep.ru

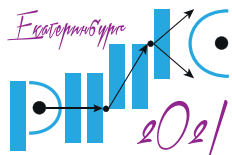
В рамках проекта российского проекта компактного источника нейтронов DARIA (Dedicated for Academic Research and Industrial Applications) [1] в Институте теоретической и экспериментальной физики (НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ) разрабатывается линейный ускоритель протонов на частоте 162.5 МГц импульсного типа на энергию 13 МэВ с пиковым током 100 мА, длительностью импульса 100 мкс и частотой повторения 100 имп/с, предназначенный для создания компактного источника нейтронов. При реализации данного ускорителя использованы наработки, полученные при создании проекта BELA, также разрабатываемого в ИТЭФ [2].

В данной работе представлены: функциональная схема импульсного ускорителя, результаты измерений эмиттанса ионного источника на основе гиротрона, разработанного в Институте Прикладной Физики Российской Академии Наук (ИПФ РАН, Нижний Новгород) [3], и дано сравнение с линейным ускорителем протонов непрерывного типа [4].

Наиболее перспективной является схема, когда ускоритель состоит из двух секций: RFQ и DTL, между которыми осуществляется 4-мерное согласование пучка. Секция DTL построена по модульному принципу и состоит из цепочки отдельных, индивидуально фазированных ИР-резонаторов, с фокусировкой магнитными квадрупольями, размещаемыми между ними. Такое построение DTL обеспечивает компактность ускорителя, допускает посекционную настройку и последовательный ввод в действие.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-12-00363.

1. V. V. Subbotina, K. A. Pavlov, N. A. Kovalenko, et al., Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A **1008** 165462 (2021).
2. T. Kulevoy et al., «Compact Multipurpose Facility – BELA», in ProcLINAC, Beijing, China, pp.349-351 (2018).
3. С. В. Барабин, Г. Н. Кропачев, А. Ю. Лукашин, и др., Письма в журнал технической физики **47**, 7 (2021).
4. G. Kropachev, T. Kulevoy, and A. Sitnikov, Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques **13**, 1126 (2019).



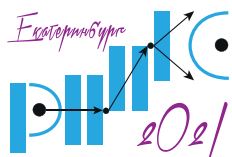
D-D НЕЙТРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР НА ОСНОВЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ЭЦР ИОННОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ

В. А. Скалыга, И. В. Изотов, С. С. Выбин, С. В. Голубев, С. В. Разин, Р. А. Шапошников*

ФИЦ «Институт прикладной физики Российской академии наук», Нижний Новгород, Россия

*E-mail: skalyga@ipfran.ru

В Институте прикладной физики РАН был разработан новый тип устройств, позволяющих генерировать сильнооточные ионные пучки высокого качества – газодинамический ЭЦР ионный источник. Отличительной особенностью таких систем является применение для нагрева плазмы мощного излучения гиротронов миллиметрового диапазона длин волн, что позволяет получать ионные пучки с рекордной плотностью тока. Было предложено использовать такой ионный источник в схеме D-D нейтронного генератора для достижения высоких плотностей потока нейтронов (по меркам компактных систем), удовлетворяющих требованиям таких приложений, как нейтронная томография и бор-нейтронозахватная терапия онкологических заболеваний. В докладе будут представлены последние результаты данных разработок и экспериментальные данные с установок SMIS 37 и GISMO.



ЭПИТЕПЛОВОЙ ДИФРАКТОМЕТР ДЛЯ КОМПАКТНОГО ИМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА: НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ, КОНЦЕПЦИЯ И РАСЧЕТЫ

Д. А. Серебренников^{1*}, Е. С. Клементьев¹, К. А. Павлов²

¹Балтийский Федеральный Университет им. И. Канта, Калининград, Россия

²Петербургский Институт Ядерной Физики, Гатчина, Россия

*E-mail: Dimaiania@mail.ru

Среди методов исследования в области физики конденсированного состояния дифракция нейтронов традиционно считается одной из наиболее полезных и информативных. По сравнению с рентгеновской дифракцией, нейтронная дифракция имеет ряд известных преимуществ, связанных с нелинейной зависимостью коэффициента поглощения от порядкового номера элемента в Периодической таблице, а также возможностью проводить измерения магнитных систем за счет наличия магнитного момента у нейтрона. Большинство современных дифрактометров работает в диапазоне холодных и тепловых нейтронов с энергиями 3 – 80 мэВ (длина волны примерно 1 – 5 Å), что позволяет решать типичные для физики конденсированного состояния задачи. Однако переход в область эпитепловых нейтронов предоставляет ряд дополнительных уникальных возможностей, а именно измерения в высоких магнитных полях (от 30 до 50+ Тесла) и измерения образцов с сильным поглощением тепловых нейтронов (вплоть до «непрозрачных» объектов на основе В, Cd, Gd, Eu, Sm).

В данной работе развивается концепция времяпролетного эпитеплового дифрактометра для компактного импульсного источника нейтронов. Приводится обзор существующих аналогов, расчет основных параметров дифрактометра, таких как: диапазон углов, энергий/длин волн, доступных межплоскостных расстояний, характерного временного окна измерения. Сделаны оценки разрешения и корреляции между длительностью импульса магнитного поля и оптимальным энергетическим окном. Проведено моделирование прибора методом Монте-Карло.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-12-00363 «Разработка и прототипирование нейтронных станций для компактных источников нейтронов».

Секция 16.
Детекторы нейтронов

ДЕТЕКТОРЫ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРНОГО КОМПЛЕКСА ПИК

Е. В. Алтынбаев^{1}, В. А. Соловей¹, А. Г. Крившич¹, Р. А. Садыков²*

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

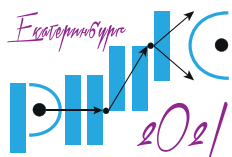
²ИЯИ РАН, Москва, Троицк, Россия

*E-mail: altynbaev_ev@npfi.nrcki.ru

Ввод в эксплуатацию исследовательского реакторного комплекса ПИК на территории Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» и начало работ по созданию соответствующей исследовательской инфраструктуры открывает широкие возможности для развития не только научных исследований, но и разработок в области научного приборостроения. В частности, с 2017 года силами НИЦ КИ – ПИЯФ при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации реализованы проекты по совершенствованию технологического развития в области создания компонент нейтронных исследовательских установок, в том числе детекторов нейтронов. В частности, были доведены до состояния эксплуатационной готовности:

1. Электронное и программное обеспечение на основе ATLAS-SoC для многопроволочных пропорциональных камер на основе He-3 с регистрацией координаты конверсии нейтрона по принципу задержки сигнала.
2. Линейные позиционно-чувствительные газоразрядные детекторы нейтронов с регистрацией координаты конверсии нейтрона по принципу деления заряда.
3. Линейные позиционно-чувствительные сцинтилляционные детекторы нейтронов на основе ZnS:Li⁶ и кремниевых фотоумножителей (SiPM).

Полученные технические решения позволяют в полной мере удовлетворить запрос исследовательских нейтронных установок, предполагаемых к установке на исследовательском реакторном комплексе ПИК для исследований в области физики конденсированного состояния, в системах регистрации нейтронного излучения. Несмотря на то, что разработанные детекторы нейтронов отвечают современным требованиям, в настоящее время ведутся дополнительные исследования для их дальнейшего развития.



ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ НЕЙТРОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ УСТАНОВОК НА РЕАКТОРЕ ИБР-2

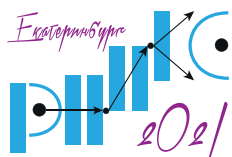
В. И. Боднарчук^{1}, В. М. Милков¹, А. В. Чураков^{1,2}, А. Г. Колесников^{1,2}*

¹Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна, Россия

²Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

* E-mail: bodnarch@nf.jinr.ru

В Научно-экспериментальном отделе комплекса спектрометров реактора ИБР-2 Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований (НЭОКС ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ) накоплен значительный опыт создания нейтронных детекторов использующих в качестве конвертера нейтронов газ ^3He . Счетчики и позиционно-чувствительные детекторы (ПЧД) с ^3He составляют основу всего парка детекторов на действующих установках реактора ИБР-2. Однако дефицит предложения ^3He на мировом рынке привел к значительному росту цен на изотоп, что делает обслуживание действующих и создание новых приборов весьма дорогостоящим. В связи с этим ведущие нейтронные центры мира осваивают и внедряют детекторы нейтронов с альтернативными конвертерами. Например, большую часть нейтронных установок European Spallation Source (ESS) планируется оснастить детекторами с конвертером нейтронов на основе изотопа бора ^{10}B . В ЛНФ ОИЯИ также ведутся работы по созданию детекторов нейтронов с конвертерами альтернативными изотопу ^3He . Два сцинтилляционных детектора на основе $\text{ZnS}(^6\text{Li})$ создаются в настоящее время. Один из них АСТРА-М должен быть запущен в эксплуатацию в 2021 г. Второй – детектор обратного рассеяния (ДОР) для установки ФДВР планируется запустить в 2024 г. Не остаются без внимания технологии создания детекторов на основе конвертеров, содержащих изотоп ^{10}B . На установке магнетронного напыления, созданной, благодаря сотрудничеству ЛНФ ОИЯИ и Университета «Дубна» получены пленки карбида бора B_4C на алюминиевых подложках, которые использованы при создании прототипа монитора пучка нейтронов. В дальнейшем в ЛНФ планируется создание опытно-экспериментального участка с установкой по напылению пленок соединений бора, обогащенного изотопом ^{10}B на различные подложки. Эти подложки будут служить в качестве нейтронных конвертеров при создании новых типов нейтронных счетчиков и ПЧД.



МОДУЛЬ СБОРА И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ С СЕТЕВЫМ ИНТЕРФЕЙСОМ ДЛЯ ДВУМЕРНЫХ ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ

М. А. Голубев, Т. В. Савельева, В. А. Соловей, О. Гапон, А. О. Полюшкин*

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

*E-mail: golubev_ma@npi.nrcki.ru

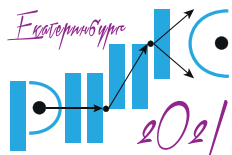
Сотрудниками НИЦ КИ – ПИЯФ был разработан и испытан прототип модуля сбора и предварительной обработки данных с сетевым интерфейсом для позиционно-чувствительных детекторов на основе линии задержки.

Устройство состоит из электронной схемы производства НИЦ КИ – ПИЯФ, совмещённой со встраиваемым компьютером ATLAS-SOC от ALTERA INTEL с ARM-процессором и ПЛИС на одном кристалле. Входы устройства предназначены для усиленных сигналов с двумерного детектора на основе линии задержки.

Устройство способно обрабатывать поток $1E5$ условных частиц в секунду. Время обработки одного события порядка $1E-6$ секунды. Точность развёртки линий задержки двумерного детектора порядка одной сотни пикосекунд. Есть вход для чопера для время-пролётного счётчика, способного обеспечить минимальную ширину временного канала в 20 наносекунд. Алгоритмы прошивки ПЛИС и программы встраиваемого компьютера устройства модульные (их отдельные подсистемы независимы).

Устройство подключается к персональному компьютеру по Ethernet и имеет протокол управления на основе HTTP и отладочный веб-интерфейс. Отладочный веб-интерфейс представляет собой HTML-страницу с JavaScript-приложением и позволяет визуализировать и скачивать предварительно обработанные данные в виде CSV. Программа-сервер встраиваемого компьютера выполняется в операционной системе Debian GNU/ Linux для архитектуры armhf со специфичными изменениями.

Программная часть разработана с использованием языков программирования Bash (для скриптов установки операционной системы и сборки прошивки и программы-сервера), Verilog (язык прошивки ПЛИС), C (многопоточная программа-сервер для linux), JavaScript (отладочный веб-интерфейс), C++ (программа-клиент для операционной системы Windows).



РАЗРАБОТКА КООРДИНАТНЫХ ДЕТЕКТОРОВ НА БАЗЕ ТОНКОСТЕННЫХ ДРЕЙФОВЫХ ТРУБОК (STRAW TRACKER)

Т.В. Еник*

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*E-mail: temuren@mail.ru

Координатные газонаполненные детекторы на основе тонкостенных дрейфовых трубок или строу (straw) можно рассматривать как модификацию пропорциональных камер, появившихся в семидесятые годы прошлого века. В отличие от пропорциональных камер, строу-камеры обладают рядом преимуществ, что определяет достаточно интенсивное внедрение их в практику физических экспериментов. Цилиндричность обеспечивает высокую угловую однородность электрического поля и высокую эксплуатационную надежность многоканального детектора, так как неисправность одного детектирующего канала не влияет на функционирование остальных. Кроме того, детекторы этого типа содержат минимальное количество вещества на пути регистрируемых заряженных частиц.

Так как интерес к данному типу детекторов достаточно велик, то в ОИЯИ на сегодняшний день несколько научно-методических групп, на счету у которых участие в масштабных проектах мирового уровня (ATLAS, COMPASS, NA62, NA64, COMET) Созданные уникальные технологические линии как по производству строу-трубок, так и по изготовлению самих детекторов являются хорошей базой для достижения значимых научных результатов.

Уникальные технологии низкотемпературного напыления ^{10}B на пленки открывает перспективы для использования строу-детекторов в качестве детекторов нейтронов.

W

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ НАНЕСЕНИЕ КАРБИДА БОРА НА ТОНКИЕ ПОДЛОЖКИ БОЛЬШОЙ ПЛОЩАДИ

А. Г. Колесников^{1,2}, Ю. А. Крюков¹, С. А. Куликов², А. В. Чураков^{1,2}, П. Ю. Апель²,
О. Л. Орелович², Н. В. Горбунов², А. Х. Абдуев³, А. Ш. Асваров³, А. К. Ахмедов³,
А. В. Шадрин⁴*

¹Государственный университет «Дубна», Дубна, Московская область, Россия

²Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

³Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра РАН, Махачкала,
Республика Дагестан, Россия

⁴Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Россия

*E-mail: torgcentr2004@mail.ru

Тонкоплёночные покрытия карбида бора B_4C , обогащённого изотопом ^{10}B , наносимые на подложки большой площади, являются перспективным материалом для использования в качестве конвертера медленных нейтронов при создании детекторов большой площади.

Совместно с Лабораторией нейтронной физики ОИЯИ в государственном университете «Дубна» собрана вакуумная установка и разработана методика магнетронного напыления $^{10}B_4C$ при температуре $200 - 50^\circ C$ на подложки 280×400 мм с зоной однородной толщины 200×280 мм. Получены плёнки толщиной от 50 нм до 2 мкм на подложках из алюминия толщиной 0.5 мм и алюминиевой фольги. Проведено пробное напыление карбида бора на полимерные подложки – лавсановую (майлар) 20 мкм и полиимидную (каптон) 30 мкм. Исследования плёнки карбида бора, выполненные с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) по снимкам поперечного сечения и по характеристическому рентгеновскому излучению, показали плотную нанокристаллическую структуру карбида бора с небольшим включением аргона. Излом плёнки в месте поперечного скола кремниевой подложки показывает высокую гибкость и прочность сформированной плёнки карбида бора.

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ЭКРАНЫ НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ СО СТРУКТУРОЙ ГРАНАТА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРОНОВ

И. Комендо^{1,2}, В. Шукин¹, В. Мечинский^{2,3}, Е. Гордиенко^{1,2}, М. Мурашов², П. Глазков²,
В. Смыслова¹, А. Федоров^{2,3}, Г. Досовицкий^{1,2}, М. Коржик^{2,3}*

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ИРЕА, Москва, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³Институт ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь

* E-mail: ilia.komendo@cern.ch

Разработаны сцинтилляционные экраны на основе пигментов из РЗЭ-допированных гранатов с общей формулой $(\text{Gd,Y})_3(\text{Al,Ga})_5\text{O}_{12}:\text{RE}$ (GYAGG), где RE – Ce, Tb. Пространственное разрешение, измеренное с пучком тепловых нейтронов, оказалось на уровне широко используемых экранов на основе пигмента $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$. При использовании пигментов на основе гранатов, активированных ионами церия, становится возможна работа экрана в счетном режиме с потоками нейтронов на 4 порядка выше, что существенно увеличит производительность измерений.

Смешанные оксиды со структурой граната были выбраны в качестве сцинтилляционных пигментов благодаря возможности вариации их состава для достижения определенных потребительских характеристик. Например, церий-активированные соединения обладают быстрой кинетикой затухания сцинтилляций (~ 50 нс), что потенциально позволит использовать экраны на их основе для времяпролетного детектирования под пучком нейтронов, работающим в импульсном режиме. Тербий-активированные гранаты с оптимизированным соотношением катионов продемонстрировали рекордный световыход $\sim 200\,000$ фот/МэВ, что выше, чем у традиционно используемого в нейтронной радиографии сцинтиллятора на основе ZnS:Ag [1]. Наличие гадолиния, природная смесь изотопов которого обладает наивысшим сечением поглощения тепловых нейтронов, позволит сделать слой сцинтиллятора тонким при сохранении эффективности поглощения нейтронов, что положительно скажется на пространственном разрешении экрана.

Для усиления эффекта светоотдачи при поглощении нейтронов нами также использован дополнительный поглотитель на основе ^6LiF . Взаимодействие ^6Li с нейтроном протекает с образованием альфа-частицы и ядра атома трития (тритона) с суммарным энерговыделением 4.8 МэВ, что позволяет рассчитывать на высокий световой отклик при взаимодействии альфа-частиц и тритонов со сцинтиллятором.

Для оценки оптимальной дисперсности сцинтиллятора и поглотителя использован программный пакет GEANT4. На основе полученных результатов изготовлены сцинтилляционные композиции с дисперсностью поглотителя не более 2 – 3 мкм и сцинтиллятора около 20 мкм. Отклик сцинтилляционных экранов к источнику β -частиц ^{241}Am (10^5 Бк), сравнивали с образцом сравнения коммерческого экрана ND (Scintacor) на основе $^6\text{LiF/ZnS:Ag}$. Образцы экранов были изготовлены с использованием силикатного связующего, имели толщину слоя 225 ± 25 мкм, нагрузку по сцинтиллятору ~ 50 мг/см² и объемное наполнение композиции 90%. На Рис. 1. приведены амплитудные спектры, измеренные с временем накопления 600 с. Сравнение количества отсчетов под пиками полного поглощения показывает практически одинаковую счётную эффективность экранов при регистрации альфа частиц.

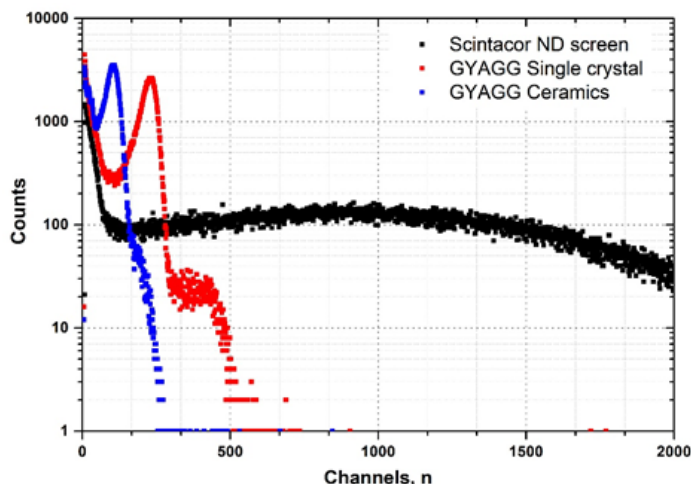


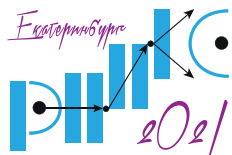
Рис. 1. Амплитудные спектры ^{241}Am α -частиц образцов сцинтилляционных экранов, изготовленных с использованием керамики и монокристалла при приготовлении пигментов.

Испытания с нейтронами проводили на реакторе ИР-8 (НИЦ «Курчатовский институт»), станция ДРАКОН. Использовали пучок 1.7 – 4.5 Å, а также моноэнергетический 2.4 Å, в качестве образца сравнения использовали коммерческий экран на основе $^6\text{LiF}/\text{ZnS}$ толщиной 100 – 200 мкм. Испытывали сцинтилляционные пигменты составов: $(\text{Gd,Y})_3(\text{Al,Ga})_5\text{O}_{12}:\text{Tb}$, $(\text{Gd,Y})_3(\text{Al,Ga})_{4.97}\text{O}_{12}:\text{Ce}$, толщину слоя варьировали от 50 до 200 мкм, композициями сцинтиллятор/поглотитель/связующее были выбраны соотношения 30/30/40 и 23/73/4 об.%

Наилучшее пространственное разрешение было достигнуто на составах $\text{Gd}_{1.2}\text{Y}_{1.8}\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Tb}$ и $\text{Gd}_{1.2}\text{Y}_{1.8}\text{Al}_2\text{Ga}_{2.97}\text{O}_{12}:\text{Ce}$ с толщиной слоя, не превышающей 130 мкм и составило 210 – 215 мкм, что сопоставимо с коммерческим экраном. Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование композиций экранов, а также на уменьшение среднего размера частиц сцинтиллятора в слое для достижения лучшего пространственного разрешения.

Работа выполнена в рамках исследований по Гранту Правительства Российской Федерации № 14.W03.31.0004.

1. M. Korzhik, A. Borisevich, A. Fedorov, et al., Journal of Luminescence **234**, 117933 (2021).



ВРЕМЯПРОЛЕТНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ НЕЙТРОНОВ ДЕТЕКТОРОМ НА ОСНОВЕ GAGG:Ce

В. Мечинский^{1,2,4}, А. Бондарев², К. -Т. Бринкманн³, А. Федоров^{1,2}, Г. Досовицкий^{1,4},
В. Дорменев³, А. Т. Фальк³, Д. Козлов², М. Коржик^{1,2,4}, П. Карпюк^{1,4}, Д. Кузнецова^{1,4},
М. Мориц³, Р. -В. Новотный³, П. Орсич^{2,3}, М. Сакс³, Е. Талочка², Х. -Г. Зауник³*

¹Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Институт Ядерных Проблем Белорусского Государственного Университета, Минск, Беларусь

³Университет им. Юстуса Либиха, Гисен, Германия

⁴НИЦ «Курчатовский институт» – ИРЕА, Москва, Россия

*E-mail: Vitaly.Mechinsky@cern.ch

Времяпролётный метод (Time-of-Flight, ToF) широко применяется для спектроскопии импульсных пучков нейтронов в диапазоне энергий от тепловых до нескольких сотен МэВ. При использовании метода ToF импульсный нейтронный пучок широкого диапазона энергий проходит заданное расстояние L (база) между стартовым и стоповым детекторами. В этом методе кинетическая энергия нейтронов E_n определяется по времени t , затраченному на преодоление частицей базы L . Получено выражение для разрешения быстрых нейтронов по энергиям в релятивистском приближении при измерении методом ToF, из которого следует существенное влияние временного разрешения детектора на получаемые результаты. Нами установлена перспективность использования сцинтилляционного материала $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}:Ce$ (ГАГГ:Ce) для регистрации нейтронов в широком диапазоне энергий. Путем подбора комбинации со-активаторов было улучшено собственное временное разрешение ГАГГ:Ce в режиме совпадений аннигиляционных гамма-квантов до 165 пс, а также подавлена собственная фосфоресценция кристалла при сохранении высокого световыхода, что сделало материал перспективным для времяпролётных измерений. Выполнена оценка среднего числа частиц различного типа, испускаемых при попадании в сцинтилляционный элемент ГАГГ:Ce нейтронов с энергией в диапазоне 1 – 200 МэВ. Выполнены измерения с нейтронами, полученными при взаимодействии пучка протонов с энергией 200 МэВ со свинцовой мишенью. Установлена способность прототипа детектора на основе ГАГГ:Ce/SiPM к времяпролётной дискриминации быстрых нейтронов от сопутствующих π -квантов и эпитептермальных нейтронов.

Работа выполнена в рамках исследований по Гранту Правительства Российской Федерации № 14.W03.31.0004.

МНОГОСЛОЙНЫЙ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ СЧЕТЧИК НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ SiPM И ОРГАНИЧЕСКОГО СВЕТОВОДА

Д. Н. Трунов^{1,2*}, В. Н. Марин^{1,2}, Р. А. Садыков², С. Н. Аксенов², Е. В. Алтынбаев¹

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

²ИЯИ РАН, Москва, Троицк, Россия

*E-mail: dtrunov@inr.ru

Основная особенность счетчиков нейтронов на основе ZnS:Li⁶ и кремниевых фотомножителей (SiPM) в том, что вместо спектросмещающих волокон (WLS) и ФЭУ используется световод из органического стекла и ФЭУ [1]. Отказ от спектросмещающих волокон позволил увеличить эффективность сбора света, т. к. в WLS собирают всего до 12% фотонов, а использование SiPM позволило упростить электронику и сделать компактные детекторы [2]. Развитием этих работ является создание 2х различных типов детекторов, первые это детекторы с возможностью определения координаты [3], а вторые это многослойные высокоэффективные сцинтилляционные детекторы нейтронов.

В счетчиках в качестве сцинтиллятора используется ZnS(Ag)/⁶LiF с эффективностью 42%. Свет транспортируется световодом из оргстекла и регистрируется двумя SiPM фирмы SENSLE тип C [4]. В качестве тестовых образцов были созданы ряд детекторов с различным количеством слоев сцинтиллятора и различной толщиной световода и проведены измерения основных параметров.

Измерения параметров производились от источника нейтронного излучения ²⁵⁷Cf. Во время проведения измерений, чтобы обеспечить радиационную защиту сцинтилляционного счетчика, был построен каземат из свинцовых кирпичей. Он полностью покрывал объем, в котором находился счетчик и имел толщину не менее 10 см. Для термализации нейтронного потока от источника нейтронного излучения использовались 20 см блоков NEUTROSTOP C0. Детекторы размещались на расстоянии 100 см от источника. В качестве анализатора амплитуды использовался CAEN DT5720. Для подсчета количества импульсов использовался счетчик импульсов на основе ПЛИС Xilinx spartan-3. Было произведено сравнение с образцовым счетчиком.

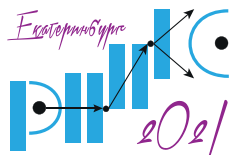
Были получены основные параметры счетчиков, зависимость эффективности от количества слоев, отработана технология производства подобного типа счетчиков.

1. V. N. Marin, R. A. Sadykov, D.N. Trunov, et al. Tech. Phys. Lett. **41**, 912 (2015).

2. В. Н. Марин, Р. А. Садыков, Д. Н. Трунов и др., Приборы и техника эксперимента **1**, 5 (2018).

3. Т. И. Глушкова, Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, Р. А. Садыков, Тезисы конференции РНИКС – 2021.

4. <http://sensl.com/products/silicon-photomultipliers/>



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СЧЕТЧИКОВ НЕЙТРОНОВ С РЕЗИСТИВНОЙ НИТЬЮ В РЕЖИМЕ ВРЕМЕНИ-ПРОЛЕТА

А. В. Чураков^{1,2*}, А. А. Богдзель¹, Е. И. Литвиненко¹, О. Даулбаев^{1,3}

¹Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия

²Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

³Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

* E-mail: churakov@nf.jinr.ru

В статье описывается опыт измерения пространственного и временного спектра нейтронов на высокопоточном импульсном реакторе ИБР-2 с помощью гелиевых позиционно-чувствительных пропорциональных счетчиков с резистивной нитью. По соотношению сигналов, снимаемых с разных концов резистивной линии можно определить координату места регистрации с точностью порядка 0.5 — 1% от общей длины. Удобно использовать этот метод в цилиндрических пропорциональных счетчиках, так как при соответствующем выборе материала анодной нити она может быть использована в качестве резистивной линии.

Промышленностью производятся позиционно-чувствительные счетчики с резистивной нитью (ПЧС), используемые для регистрации нейтронов на стационарных исследовательских реакторах. Требования к детекторным системам на импульсных нейтронных установках имеют свои особенности, обусловленные резко неоднородным по времени характером нейтронного импульса. Для проверки возможности использования промышленных ПЧС при работе в режиме времени пролета на высокопоточном импульсном реакторе ИБР-2 сотрудниками Лаборатории Нейтронной Физики Объединенного Института Ядерных Исследований (ЛНФ ОИЯИ) был изготовлен модуль из двух счетчиков фирмы TOSHIBA. Съем сигнала с обоих концов модуля проводился с помощью сдвоенных предусилителей разработки ЛНФ ОИЯИ, для оцифровки использовался диджитайзер CAEN N6730. Было написано специализированное программное обеспечение, позволяющее определить позицию из измеренных «сырых» данных. По результатам проведенных измерений с лабораторным источником нейтронов, и на 9 экспериментальном канале ИБР-2 проведена оценка величины пространственного разрешения модуля. Полученные экспериментальные результаты показали возможности использования систем ПЧС в режиме времени-пролета при умеренных нагрузках.

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ДЕТЕКТОР НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ SiPM И ZnS:Li⁶

Т. И. Глушкова^{1,*}, Д. Н. Трунов^{1,2,*}, В. Н. Марин^{1,2}, Р. А. Садыков²

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

²ИЯИ РАН, Москва, Троицк, Россия

* E-mail: dtrunov@inr.ru

С 2012 г. группа специалистов разрабатывает сцинтилляционные детекторы нейтронов на основе ZnS:Li⁶ и кремниевых фотоумножителей (SiPM). Первые результаты были опубликованы в 2015 г. [1] – проведены тесты сцинтилляционного счетчика для регистрации нейтронов и получены амплитудные спектры.

В счетчиках в качестве сцинтиллятора используется ZnS(Ag)/LiF. Свет транспортируется световодом из оргстекла и регистрируется двумя кремниевыми фотоумножителями (SiPM) фирмы SENSLE тип C [2]. На торцах световода размещены фокусирующие линзы «рыбий глаз» для увеличения сбора света. На основе таких сцинтилляционных счетчиков был разработан кольцевой детектор нейтронов [3].

Во время проведения измерений, чтобы обеспечить радиационную защиту сцинтилляционного счетчика, был построен каземат из свинцовых кирпичей. Он полностью покрывал объем, в котором находился счетчик и имел толщину не менее 10 см. Для термализации нейтронного потока от источника нейтронного излучения ИБН-8 (²³⁸Pu) использовался полиэтилен толщиной 10 см, кроме того, источник находился в полиэтиленовом цилиндре диаметром 15 см. Для коллимации нейтронов использовались листы кадмия толщиной 2 мм между счетчиком в свинцовой защите и замедлителем из полиэтилена. Для измерения нейтронов, в свинце и кадмии была сделана щель шириной менее 1 мм на пути от источника до счетчика.

Амплитудные спектры определялись с помощью двухканального амплитудно-цифрового спектрометрического преобразователя АЦП-USB-8К-П2 АСПЕКТ в режиме амплитудного анализа импульсов. В этом режиме производится измерение амплитуд входных импульсных сигналов путем аналого-цифрового преобразования, а также накопление измеренных кодов в виде спектра, где в каждом канале накапливается число, соответствующее количеству зарегистрированных импульсов соответствующей амплитуды. В результате получены амплитудные спектры с «быстрого» и «медленного» каналов съема сигнала SiPM, соответствующие двум позициям источника относительно фотоэлектронного умножителя внутри счетчика: на расстоянии 1 см до щели и 10 см до щели. Различия в полученных спектрах позволяют предположить о возможности определения пространственной координаты регистрации нейтронов вдоль счетчика.

В 2021 г. был изготовлен тестовый позиционно-чувствительный сцинтилляционный детектор на основе метода разделения и анализа светового потока и проведены измерения. Тестовый детектор по конструкции аналогичен предыдущему, но имеет всего 1 чувствительный слой ZnS(Ag)/LiF. У каждого SiPM есть индивидуальный усилитель, а на выходе 2х предусилителей использована схема совпадения для формирования строка на анализатор. В качестве анализатора использовался CAEN DT5720. В качестве источника нейтронного излучения был выбран ²⁵⁷Cf. Проведены измерения амплитуд на SiPM в зависимости от положения счетчика относительно щели для

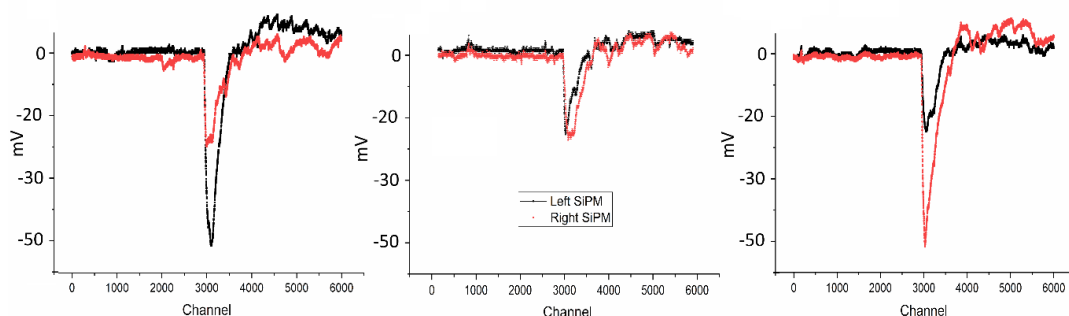


Рис. 1. Сравнение амплитуды SiPM в зависимости от расстояния: (а) максимально близко к левому SiPM; (б) равномерно удалено от обоих SiPM (около 25 мм); (в) максимально близко к правому SiPM.

нейтронов около 1 мм. На Рис. 1 представлены графики, отображающие амплитуду в зависимости от того, где был зарегистрирован нейтрон.

1. V. N. Marin, R. A. Sadykov, D.N. Trunov, et al. Tech. Phys. Lett. **41**, 912 (2015).
2. <http://sensl.com/products/silicon-photomultipliers/>
3. V. N. Marin, R. A. Sadykov, D. N. Trunov, et al., Instruments and Experimental Techniques **61**, № 1 (2018).

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Abdurakhimov B. A., 168
 Abramova G., 101
 Aksenov V. L., 25
 Aliouane N., 101
 Alpatov S. V., 262
 Alsafi H. M., 75
 Avdeev M., 167

Balakumar S., 170
 Baranchikov A. E., 116
 Belozerova N. M., 170
 Belushkin A., 280
 Belushkin A. V., 286
 Beskrovnyi A. I., 204, 207
 Blawert C., 304
 Bocharova S., 167
 Boehm M., 54, 101
 Borisova P. A., 75
 Bouali A. C., 304
 Burlyaev D., 167
 Bykov A. A., 95

Chiriac H., 38
 Chubova N., 95
 Chudoba D. M., 280, 286
 Conder K., 71

Dang N. T., 77
 Demir E., 204, 207
 Dimitrievska M., 299
 Donkov A. A., 204, 207
 Doroshkevich A., 207
 Doroshkevich A. S., 119, 125, 204, 206
 Dragolici A. C., 178
 Dragolici F., 178

Ehlers G., 71
 Em V. T., 287, 289

Faraone A., 299
 Filinchuk Y., 299
 Fina I., 38

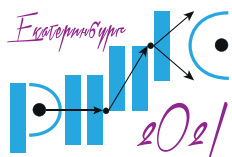
Gan W., 303
 Genov I. G., 204, 207
 Gerasimov E. G., 75
 Glazkov V. P., 75
 Goremychkin E., 280
 Goremychkin E. A., 286
 Gorshkova Yu. E., 116
 Grigoriev S. V., 95
 Guasco L., 118

Hutanu V., 46

Ionascu L., 178
 Isayev R., 207
 Isayev R. Sh., 206
 Ivankov O., 167

Jasinska B., 125

Keimer B., 118
 Keller T., 118
 Khaydukov Y. N., 118
 Khien L. H., 125
 Kichanov S. E., 77, 168, 170, 296
 Kishine J., 95
 Klepacka M., 280, 286
 Kononikhina V., 303
 Kopach Yu. N., 262
 Kopitsa G. P., 116
 Korneeva E., 204
 Kousaka Yu., 95
 Kozlenko D. P., 77, 168, 170, 296
 Kołodyńska D., 119
 Krezhov K., 204
 Krivchenko V., 167



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

→ → → Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

Kulik M., 119, 125, 206
Kuznetsova E. V., 262
Kuznetsov V. L., 262

Lermontov S. A., 116
Lis O. N., 170
Li X., 303
Lukin E. V., 170, 296

Madadzada A. I., 119, 125, 206
Malinowska I., 309
Malkova A. N., 116
Mamedov F., 204
Martin N., 70
Michalcová A., 289
Mikula P., 287, 289
Mironovich K., 167
Mirzayev M. N., 204, 207
Morelle F., 299
Mukhin A. A., 54

Nagorna T., 309
Napolsky P., 167
Neov D., 204
Nesvizhevsky V. V., 31
Nicu M., 178
Nikitin S. E., 32

Olejniczak A., 204
Ovchinnikov A. S., 95

Pütter S., 118
Paulin M. A., 118
Pavlova A. A., 116
Phuc T. V., 119, 125, 206
Piovano A., 101
Pipich V., 148
Podlesnyak A., 32, 71
Polosan S., 38
Pomjakushina E. V., 71
Popov E., 207
Popov E. P., 204
Pyczak F., 303
Pysznik K., 119

Radulescu A., 148
Regnault L-P., 54
Rutkauskas A. V., 77
Rutkauskas A. V., 296

Ryukhtin V., 287, 289
Ryzhenkova S., 167
Rüegg C., 32

Sala G., 71
Savenko B. N., 77, 170, 296
Schefer J., 101
Schmidt W., 54
Schreyer A., 303
Sedyshev P. V., 262
Sharipov Z. A., 204
Siemek K., 204
Silvi L., 118
Skumryev V., 54
Skuratov V. A., 204
Stanculescu A., 125
Stark A., 303
Strunz P., 287, 289
Studziński M., 309

Tatarskiy D. A., 93
Thao L. T. P., 77
Tuan P. L., 119, 125, 206
Turek M., 119, 125
Тсутаока Т., 67

Udovic T. J., 299

Valizade A. H., 204, 207
Vershina T., 204
Vural Ö., 204

Wegierek P., 119
Wieland F. D. C., 304

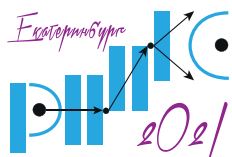
Xie T., 32

Yasakau K. A., 304
Yerdauletov M., 167

Zelenyak T. Yu., 119, 125, 206
Zel I. Yu., 77, 168

Šaroun J., 287, 289
Žuk J., 125

Абдуев А. Х., 327
Абдурахимов Б. А., 160, 265, 269
Авдеев М. В., 24, 134, 291

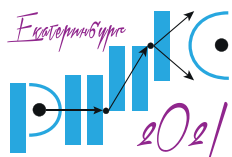


КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

→ → → → Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

- Аверин С. А., 188, 202
Азарова Л. А., 86, 227
Айткулов М. Т., 195
Аксельрод Л. А., 227, 283
Аксенов В. Л., 105
Аксенов С. Н., 331
Аксёнов В. Л., 264
Алексеев П. А., 98
Алексеева О. А., 306
Аллаяров Р. С., 180
Алпатов С. В., 261
Алтынбаев Е. В., 70, 227, 323, 331
Антропов Н. О., 84, 126
Апель П. Ю., 327
Асваров А. Ш., 327
Астафьев С. Б., 128
Ахмедов А. К., 327
Бабанова О. А., 299
Бабкин К. Д., 197
Базуев Г. В., 82
Байрамуков В. Ю., 148
Бакиров Б. А., 160, 177
Бакланова Н. И., 171
Балагуров А. М., 35
Балаев А. Д., 71
Балашою М., 178
Баранов Н. В., 52, 67, 158
Баранчиков А. Е., 106, 112, 179, 184
Барзах А. Е., 237
Бахметьев М. В., 162
Башашин М. В., 142
Безверхний А. И., 61
Белик А. А., 100
Белозерова Н. М., 81, 173
Бескровный А. И., 69, 171
Бессонов С. А., 103
Блантер М. С., 166
Бобриков И. А., 35, 42
Бобровский В. И., 256
Богданов С. Г., 174
Богдзель А. А., 332
Боднарчук В. И., 137, 259, 324
Боймурадова А. К., 63
Бокучава Г. Д., 164
Большакова О. И., 169
Бондарев А., 330
Борисова П. А., 166, 302
Боханов А. Ф., 311
Бражкин В. В., 166
Бринкманн К. -Т., 330
Бугров А. Н., 110
Булавин М. В., 314
Булкин А. А., 240
Валиев Э. З., 65
Варфоломеева Е. Я., 148
Васильева О. В., 156
Васьковский В. О., 63, 130, 135
Ваулин А. А., 55, 67, 78
Вельмогин Д. Н., 188
Вергентьев Т. Ю., 306
Верлов Н. А., 147, 150
Вершинина Т. Н., 35, 100
Власов А. В., 151, 295
Власова А. Д., 151
Волков А. Г., 103
Волков В. В., 110, 184
Воронин В. В., 28, 220, 297, 311, 317, 318
Воронин В. И., 48, 189
Вуль А. Я., 169
Выбин С. С., 311, 316, 320
Гапон И. В., 105, 120, 134, 291
Гапон О., 325
Герасимов Е. Г., 42, 82
Геращенко О. В., 179
Гизатулин Ш. Х., 195
Гимаев Р. Р., 78, 315
Глазков В. П., 252, 274, 292, 302
Глазков П., 328
Гледенов Ю. М., 264
Глушкова Н. В., 174
Глушкова Т. И., 333
Головастов Д. С., 240, 250
Головин И. С., 35
Голосов О. А., 174
Голосова Н. О., 80
Голосовский И. В., 41, 54, 242
Голубев М. А., 325
Голубев С. В., 320
Горбунов Н. В., 327
Горделий В. И., 151, 295
Гордиенко Е., 328
Горемычкин Е. А., 26
Горшкова Ю. Е., 105, 106, 110, 112, 134, 143, 147, 150, 184

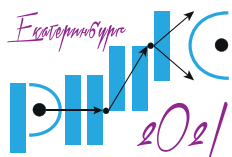
- Горьковенко А. Н., 130
Григорьев С. В., 70, 85, 86, 148, 227, 297, 311, 316–319
Губанова Н. Н., 132
Губкин А. Ф., 52, 55, 67, 78, 158, 256
Гудим И. А., 54
Гундорин Н. А., 264
Гуреев А. И., 292
Гурьянов А. М., 175
Гурьянов С. А., 175
Дариенко К. А., 147, 150
Даулбаев О., 332
Девятериков Д. И., 88
Довженко Г., 304
Дорменев В., 330
Досовицкий Г., 328, 330
Дрожжов К. А., 242
Дьячков М. В., 238, 240, 244
Дюсамбаев Д. С., 195
Евлампијева Н. П., 169
Еник Т. В., 326
Ермакова Е. В., 144
Еров Х. Э., 184
Ефимов В. В., 100
Жабицкая Е. И., 301
Жакетов В. Д., 88, 264, 270
Желудкевич Д. В., 100
Желудкевич М. Л., 304
Жеребцов О. М., 253
Жомартова А. Ж., 177
Жуматаев Р. С., 177
Забельский Д. В., 151
Заматовский А. Е., 191
Зауник Х. -Г., 330
Захаров М. А., 211, 213, 257
Зверев В. И., 78, 313
Зель И. Ю., 81, 178
Земляков Е. В., 197
Земляная Е. В., 139, 142, 301
Зобкало И. А., 46, 229, 304
Зырянова А. А., 272
Иванов В. К., 112
Иванов И. И., 222
Иванов С. Ю., 197
Иванова Л. А., 147, 150, 184
Иванова Л. В., 106
Иваньков А. И., 144, 153
Иваньков О. И., 295
Изотов И. В., 311, 316, 320
Иоффе А. И., 259
Исакова Н. Н., 293
Исинбаев А. Р., 188, 190, 193
Исламов А. Х., 208, 295
Исмаев Н. Б., 265
Кабанова Н. А., 48
Калинин С. И., 240, 244
Калюканов А. И., 293
Карпец М. Л., 105
Карпинский Д. В., 100
Карпов И. Д., 197, 267, 294
Карпюк П., 330
Келлер Л., 55
Келлер Т., 270
Кенесарин М. Р., 178
Кенесарин М. Р., 269
Киреев Ю. М., 240
Киселев М. А., 301
Киселев М. А., 120, 139, 140, 142
Кичанов С. Е., 80, 81, 160, 173, 177, 178, 183, 265, 269
Клементьев Е. С., 321
Клюшников Г. Н., 253
Ковалев А. В., 246, 248
Ковалев Ю. С., 295
Коваленко Е. С., 33, 166, 302
Коваленко Н. А., 240, 311, 317, 318
Ковальчук М. В., 33
Кожевников С. В., 270
Козленко Д. П., 57, 80, 81, 173, 177, 178, 183, 255, 265, 269
Козлов А. В., 29, 190, 198, 272
Козлов В. С., 308
Козлов Д., 330
Козлов К. А., 29, 191, 200
Колесников А. Г., 324, 327
Колхидашвили М. Р., 240, 244
Комендо И., 328
Коник П. И., 297, 311
Кононова С. В., 308
Копач Ю. Н., 261, 264
Копица Г. П., 106, 110, 112, 179, 184, 227
Коплак О. В., 180
Коптюхов А. О., 253
Коржик М., 328, 330



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

→ → → Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

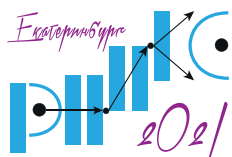
- Королев А. В., 82
Коршунов А. Н., 59
Корыткова Э. Н., 308
Косячкин Е., 105
Котцов С. Ю., 112
Краан В., 283
Кравцов Е. А., 84, 88, 91, 122, 123, 126
Крившич А. Г., 323
Кропачев Г. Н., 311, 319
Кропачов Г. Н., 316
Круглов А. А., 164
Крюков Ю. А., 327
Кудрявцева А. В., 306
Кудюков Е. В., 135
Кузнецов В. Л., 261
Кузнецов П. А., 156, 181
Кузнецова Д., 330
Кузнецова Е. В., 261
Кузьменко М. О., 120, 134, 291
Куклин А. И., 108, 109, 151, 153, 295
Кукуева Е. В., 166
Кулевой Т. В., 311, 316, 319
Кулеш Н. А., 63
Куликов С. А., 327
Кулин Г. В., 211, 213, 215, 257
Кульвелис Ю. В., 108, 169
Кульминская А. А., 106, 184
Куницына Е. И., 180
Куракин С. А., 144
Курбаков А. И., 59, 73, 231, 240
Кучерка Н., 144, 295
Лазуков В. Н., 98
Латушко С. И., 100
Лебедев В. Т., 108, 169
Лебедев Д. В., 147, 150
Лепаловский В. Н., 130, 135
Литвиненко Е. И., 332
Лобанов М. Л., 193, 202
Лозанов В. В., 171
Лукин Е. В., 80, 173, 265, 269
Лукьянов К. В., 142
Лютикова М. С., 174
Лямкин В. А., 218
Ляпин С. Г., 166
Мазеева А. К., 181
Макарова М. В., 84, 91
Маннинен С. А., 156
Марин В. Н., 331, 333
Мартюшов А. Л., 195
Масленникова Т. П., 308
Маслова В. А., 120, 134
Матвеев В. А., 132, 238, 250
Метелева Ю. В., 272
Мечинский В., 328, 330
Милков В. М., 324
Мимоход Р. А., 183
Митропольский И. А., 233, 235
Михайлов М. С., 208
Молканов П. Л., 237
Молчанов В. С., 109, 114
Моргунов Р. Б., 61, 162, 180
Мориц М., 330
Мороз А. Р., 253
Москалев М. Е., 135
Мохамед А. К., 35
Мурашев М. М., 33, 252, 274, 292, 302
Мурашкин А. Н., 253
Мурашов М., 328
Муругова Т. Н., 141, 151
Мухин К. А., 314
Мушников Н. В., 42
Набережнов А. А., 306
Назаров К. М., 178, 269
Накипов Д. А., 195
Некрасов Е. С., 181
Нигматуллина Е. К., 41
Никитенко Ю. В., 88, 264
Никитин С. Е., 71
Никифоров В. А., 279
Никова Е. С., 122
Николаев К. В., 137
Новотный Р. -В., 330
Ноговицына Т. А., 103
Овсянников А. К., 46
Онегин М. С., 218
Орелович О. Л., 327
Орехов Ф. С., 151
Орсич П., 330
Остапенко Е. П., 184
Павлов К. А., 297, 311, 317, 318, 321
Павлова А. А., 110
Павлова А. Е., 297, 311
Панин Ю. Н., 292
Пантелеев А. А., 147, 150



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

- Пантелеев В. Н., 237
Пантина Р. А., 148
Панченко В. Л., 193, 198
Папушкин И. В., 164
Пастухов В. И., 188, 193, 198, 202
Петренко А. В., 264, 270
Петров П. П., 222
Петров С. Н., 208
Пирогов А. Н., 42, 44, 69, 137, 174
Плешанов Н. К., 238, 250, 276
Повзнер А. А., 103
Подурец К. М., 33, 302
Полевой Л. А., 112
Полюшкин А. О., 325
Помякушин В. Ю., 42, 73
Попов Е. П., 69
Портных И. А., 29, 190, 193
Прекул А. Ф., 67
Примаченко О. Н., 108
Проглядо В. В., 84, 91, 126
Проскурнина Н. В., 48
Пшеничный К. А., 86
Раду Ф., 270
Разин С. В., 320
Реброва Н. В., 257
Рижиков Ю. Л., 151, 295
Римский Г. С., 81
Рогачев А. В., 295
Рогачёв А. В., 151
Рогожкин С. В., 187
Романова Н. К., 195
Рулёв М. И., 151
Руткаускас А. В., 81
Рылов С. А., 197, 267, 294
Савельева Т. В., 325
Савенко Б. Н., 80, 173, 269
Савченков П. С., 98, 137
Садиллов В. В., 259
Садыков Р. А., 70, 278, 323, 331, 333
Сайранбаев Д. С., 195
Сакс М., 330
Саламатов Ю. А., 122, 123
Сантос А. М., 78
Сапрыкина И. А., 160, 183
Светогоров Р. Д., 33
Седышев П. В., 261
Селезнева Н. В., 52, 158
Селиверстов М. Д., 237
Семенкин В. А., 191
Семкин М. А., 44, 69
Сердечнова М., 304
Серебренников Д. А., 321
Серебров А. П., 218, 219, 225, 253
Сидоров С. С., 222
Сизов А. В., 250
Сиколенко В. В., 100
Ситников А. Л., 311, 316, 319
Скалыга В. А., 311, 316, 320
Сканченко Д. О., 70, 227
Ской В. В., 151, 153, 295
Скоробогатов С. А., 71
Скорюнов Р. В., 299
Скрипов А. В., 299
Скрябин Ю. Н., 256
Скулкина Н. А., 181
Смирнова В. С., 183
Смыслов Р. Ю., 110, 184
Смыслова В., 328
Соловей В. А., 240, 244, 323, 325
Соловьёв А. Г., 295
Соловьёв Д. В., 153, 295
Солонинин А. В., 299
Субботина В. В., 311, 317, 318
Сумбаев С. О., 240
Сумбатьян А. А., 283
Сумников С. В., 35
Суслопарова А. Е., 73
Сыромятников В. Г., 238, 244, 279
Талочка Е., 330
Тарнавич В. В., 238, 239, 283
Ташметов М. Ю., 265
Теплых А. Е., 82, 174
Терентьев К. Ю., 71
Терентьев П. Б., 42
Терентьев П. В., 82
Терещенко Е. Ю., 33, 302
Тропин Т. В., 105, 291
Трунов Д. Н., 292, 331, 333
Труханов А. В., 38
Труханов С. В., 38
Турченко В. А., 38
Угрикова Д., 144
Ульянов В. А., 238, 240, 244
Урусова Н. В., 44, 69



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)

→ → → Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

- Усманов О. В., 46
Устинов А. Е., 198, 202
Устинов В. В., 84, 91, 122
Устинович К. Б., 106, 184
Утесов О. И., 85
Фальк А. Т., 330
Федоров А., 328, 330
Федоров Д. В., 237
Федосеев М. Л., 208
Филиппова О. Е., 109, 114
Филоненко В. П., 166
Фомин А. К., 218, 219, 253
Фомин Э. В., 169
Франк А. И., 211, 213, 215, 257
Фролов К. В., 179
Хайдуков Ю. Н., 84, 126, 264
Хайнеманн А., 86
Хамова Т. В., 106, 179, 184
Хосер А., 44, 69
Храмко К., 264
Храмченкова Р. И., 160
Хрипунов А. К., 184
Цвигун Н. В., 106, 110, 112, 179, 184
Цвященко А. В., 70
Цыгвинцев В. А., 188
Чернецов М. В., 188
Черников А. Н., 281
Чернышев Д. Ю., 306
Четвериков Ю. О., 227, 283
Чубова Н. М., 85
Чураков А. В., 324, 327, 332
Шабашов В. А., 191, 200
Шадрин А. В., 327
Шаймерденов А. А., 195
Шайхутдинов К. А., 71
Шапиро Д. Д., 220
Шапошников Р. А., 320
Швидченко А. В., 108
Шептяков Д. В., 42
Шерокалова Е. М., 52
Шехтман Г. Ш., 48
Шилова О. А., 132, 179
Шушунов М. Н., 284
Щукин В., 328
Эм В. Т., 197, 252, 260, 267, 274, 292, 294
Энейская Е. В., 106
Юдина Е. Б., 169
Юзвюк М. Х., 304
Юлдашев Б. С., 265
Яковенко Е. В., 284
Якунина Е. М., 126
Янусова Л. Г., 128
Ярков В. Ю., 198, 202
Яцишина Е. Б., 33, 302
Яшина Е. Г., 148, 227

ISBN 978-5-9500855-7-4



**КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЙНИЯ НЕЙТРОНОВ
В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2021)**

Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Тексты тезисов приведены в авторской редакции.

Обложка и верстка — П. А. Агзамова

Ответственные за выпуск — Е. А. Кравцов, Е. В. Мостовщикова