

КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ
В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД
(РНИКС-2023)

Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.



ТЕЗИСЫ
ДОКЛАДОВ

КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ
В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.



Памяти Ю. А. Изюмова

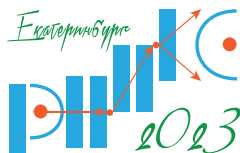
ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

УДК 539.125
ББК 22.386я431
К65

К65 Конференция по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных сред (РНИКС-2023), Тезисы докладов, г. Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г. г. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2023, 295 с. (РНИКС-2023) –Текст: электронный.

В сборнике тезисов докладов включены материалы Конференции по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных сред (РНИКС-2023). Место проведения – г. Екатеринбург, ИФМ УрО РАН. Время проведения 25 – 28 сентября 2023 г.

Ответственные за выпуск – *Е. В. Мостовщикова, Е. А. Кравцов*
Технический редактор – *П. А. Заяц*



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

• → • → • → Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

Организаторы:



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
"КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ"



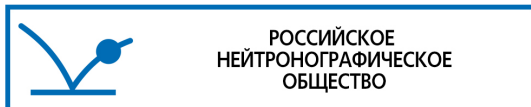
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ
имени М.Н. Михеева УрО РАН



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

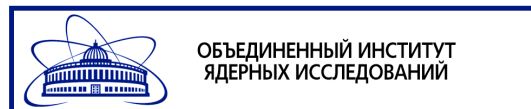


РОССИЙСКОЕ
НЕЙТРОНОГРАФИЧЕСКОЕ
ОБЩЕСТВО



АО «ИНСТИТУТ РЕАКТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ»
РОСАТОМ

Спонсоры:



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оглавление

КОМИТЕТЫ	18
ТЕМАТИКИ	21
Пленарные доклады	23
Нейтронная стресс-дифрактометрия, <i>Г. Д. Бокучава, В. Т. Эм</i>	24
Малоугловое рассеяние нейтронов и комплементарный анализ нано- структуры дисперсно-упрочненных оксидами сталей, <i>С. В. Рогожкин, А. В. Клауз, А. А. Хомич, А. А. Богачев, А. А. Нику- тин, Ю. Е. Горшкова, Г. Д. Бокучава, László Almásy, Yubin Ke</i>	25
Результат эксперимента Нейтрино–4, стерильные нейтрино, тёмная ма- терия и стандартная модель, <i>А. П. Серебров, О. М. Жеребцов, Р. М. Самойлов</i>	27
Neutron science at the Dhruva facility with an emphases on recent work on advanced magnetic materials, <i>S. M. Yusuf</i>	28
Секция 1. Источники нейтронов, приборы и методы нейтронного экспе- римента. Техника нейтронного эксперимента	29
Small-angle neutron scattering for condensed matter research at China spallation neutron source, <i>Yubin Ke</i>	30
Проект порошкового дифрактометра для исследовательского реакто- ра ИРТ–Т, <i>Е. В. Москвин, С. В. Григорьев, Н. А. Коваленко, И. А. Бедретдинов</i>	31
Нейтронная рефлектометрия в России: текущее состояние и перспек- тивы, <i>Н. К. Плешанов</i>	32
Разработка компонент научно-исследовательских станций на базе ис- следовательских установок мега-класса силами «Курчатовский институт» — ПИЯФ, <i>Е. В. Алтынбаев, О. И. Москвина, В. А. Соловей, В. В. Воронин</i>	33
Развитие техники модуляции нейтронного пучка для корреляционной фурье-дифрактометрии, <i>Г. Д. Бокучава, И. В. Папушкин, В. В. Журавлев, А. А. Круглов, Т. Б. Пе- тухова, С. М. Мурашкевич</i>	34
Нейтронный исследовательский комплекс на базе реактора ИР–8: экс- периментальные возможности и перспективы развития, <i>Н. А. Демьянова, П. А. Борисова, Д. С. Куняев</i>	36

Порошковый дифрактометр высокой светосилы D3, <i>К. А. Дрожзов, И. В. Голосовский</i>	37
Концепция источника УХН на импульсном реакторе, <i>А. И. Франк, Г. В. Кулин, В. А. Курылев, А. А. Попов, М. А. Захаров</i>	39
Нейтронный дифрактометр ДН–6 для исследований при высоких да- влениях, <i>С. Е. Кичанов, Д. П. Козленко, Е. В. Лукин, Б. Н. Савенко</i>	41
Источник ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия для РК ПИК, <i>А. П. Серебров, В. А. Лямкин</i>	42
Метод опорного слоя Gd для случая двух рефлектометрических экспе- риментов, <i>Е. С. Никова, Ю. А. Саламатов, Е. А. Кравцов</i>	43
Высокие давления в нейтронографии, <i>Р. А. Садыков</i>	46
Нейтронные источники на основе сильноточных ускорителей прото- нов для исследований в области физики конденсированных сред, <i>С. Ф. Сидоркин, А. А. Алексеев, Э. А. Коптелов, А. В. Фещенко, Л. В. Крав- чук</i>	47
Нейтронный рефлектометр HARMONY, <i>В. Г. Сыромятников, В. А. Матвеев</i>	48
Состояние работ по созданию нейтронных установок для физики кон- денсированного состояния на реакторном комплексе ПИК, <i>В. В. Тарнавич</i>	50
Спин-эхо спектрометр SEM приборной базу РК ПИК, <i>К. Ю. Терентьев</i>	51
Времяпролетный многосекционный дифрактометр «Сфера», <i>Р. А. Садыков, Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, В. С. Литвин, С. Н. Аксенов, Д. А. Бучный</i>	53
Расчет кривой качания двухкристального нейтронного спектрометра на кристаллах Ge и CdS в геометрии Брэгг-Брэгг и Брэгг-Лауэ, <i>Й. Шмайсер, А. Н. Тюлюсов</i>	55
Секция 1. Источники нейтронов, приборы и методы нейтронного экспе- римента. Детекторы нейтронов	56
Разработка детекторов тепловых и холодных нейтронов с конверте- ром из карбида бора в ЛНФ ОИЯИ, <i>В. И. Боднарчук, А. Г. Колесников</i>	57
Позиционно-чувствительный нейтронный детектор на основе пласти- кового световода и кремниевых фотоумножителей, <i>Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, Т. И. Глушкова, Е. В. Алтынбаев, Р. А. Са- дыков, С. Н. Аксенов</i>	58
Новые материалы для люминесцентной дозиметрии, <i>Д. А. Акулов, М. О. Калинин, Р. М. Абашев, А. И. Сюрдо, Д. Г. Кел- лерман</i>	60
Детектор нейтронов с применением Straw-трубок и конвертера из $^{10}\text{B}_4\text{C}$, <i>Т. Л. Еник, А. О. Колесников, А. Г. Колесников, В. И. Боднарчук, Н. В. Горбунов</i>	62

Детектор нейтронов на основе высокоскоростной проволочной камеры с конвертером из $^{10}\text{B}_4\text{C}$, <i>Б. Ж. Залиханов, А. Г. Колесников, В. Ю. Егоров, В. В. Терещенко, С. В. Терещенко, В. И. Пунтус</i>	63
Скоростной высокоэффективный детектор нейтронов «Multy-foil» на основе конвертера $^{10}\text{B}_4\text{C}$, <i>Б. Ж. Залиханов, А. Г. Колесников, В. И. Боднарчук, А. К. Курилкин, Н. В. Горбунов</i>	64
Разработка и исследование магнитных экранов для фотоэлектронных умножителей нейтринных детекторов, <i>П. А. Кузнецов, А. А. Можайко, С. А. Маннинен, А. П. Серебров, С. С. Сидоров</i>	67
Моделирование детектора нейтронов «Multi-foil» в Geant4, <i>А. К. Курилкин, А. Г. Колесников, В. Милков, А. А. Богдзель, М. М. Подлесный</i>	70
Электроника для детекторов нейтронов на основе сцинтиллятора sZnS(Ag)/LiF , кремниевых фотоумножителей и органического светодиода, <i>В. Н. Марин, Д. Н. Трунов, В. С. Литвин, Р. А. Садыков</i>	71
Опыт, разработки и создания детекторов тепловых нейтронов в НЭОКС ИБР–2, <i>А. В. Белушкин, А. А. Богдзель, В. И. Боднарчук, О. Даулбаев, В. А. Дроздов, В. В. Журавлев, А. Г. Колесников, А. О. Колесников, А. К. Курилкин, С. А. Куликов, Е. И. Литвиненко, В. М. Милков, М. О. Петрова, М. М. Подлесный, В. И. Приходько, К. В. Хай, А. В. Чураков, В. В. Швецов</i>	73
ПЧД тепловых и холодных нейтронов на основе ППРК с конвертером из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$, <i>М. О. Петрова</i>	75
Сравнение двух методов обработки сигналов с нейтронных счётчиков на основе сцинтиллятора $^6\text{LiF/ZnS(Ag)}$ и оптических волокон с переизлучателем спектра, <i>М. М. Подлесный, А. А. Богдзель, В. М. Милков</i>	76
Векторный магнит на основе ВТСП для работы с поляризованными нейтронами, <i>А. В. Алтынов, А. П. Буздавин, В. И. Боднарчук, В. Д. Жакетов, А. В. Петренко, М. Д. Проявин, А. Н. Черников</i>	77
Секция 1. Источники нейтронов, приборы и методы нейтронного эксперимента. Компактный источник нейтронов DARIA	78
Компактный источник нейтронов DARIA, <i>Т. В. Кулевой</i>	79
Нейтронные установки компактного источника нейтронов DARIA: параметры и особенности, <i>С. В. Григорьев</i>	80
Оптимизация холодного источника на основе параводорода для компактного источника нейтронов DARIA, <i>Н. А. Коваленко</i>	81

Численное моделирование времяпролетных установок малоуглового рассеяния нейтронов на нейтронных источниках компактного и мега-класса, <i>К. А. Павлов, А. И. Иванов, А. И. Куклин, С. В. Григорьев</i> . . .	82
Секция 2. Структурные исследования. Кристаллические структуры и эле- ментарные возбуждения	83
The effects of high-pressure on the crystal structure and vibration spectra of layered perovskite-like $\text{Nd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$, <i>A. G. Asadov, A. Mammadov, D. P. Kozlenko, R. Mehdiyeva, S. E. Kichanov, E. V. Lukin, O. N. Lis</i>	84
Структурные исследования кристаллов-суперпротонов методом ней- тронной монокристаллической дифракции, <i>Н. Н. Исакова, А. И. Каляканов, И. П. Макарова</i>	88
Влияние высокого давления на кристаллическую, магнитную структу- ру и колебательные спектры ван-дер-ваальсовых соединений, <i>О. Н. Лис, Д. П. Козленко, С. Е. Кичанов, Е. В. Лукин, И. Ю. Зель</i>	89
О дестабилизации атомной структуры разбавленных магнитных полу- проводников II-VI в зависимости от матрицы и магнитоактив- ной 3d-примеси, <i>В. И. Максимов, Е. Н. Максимова, Т. П. Суркова, В. Д. Пархоменко</i>	90
Катодный материал Prussian white для натрий-ионных аккумуляторов: операндо дифракционные исследования фазовых переходов, <i>Н. Ю. Самойлова, С. В. Сумников, М. Е. Донец, Р. Н. Васин, И. А. Боб- риков, О. Ю. Иваньшина, Е. А. Корнеева</i>	91
Топологический анализ путей миграции катионов Li^+ в литий-ванадиевой бронзе $\text{Li}_{1+x}\text{V}_3\text{O}_8$ ($x = 0.1, 0.2$ и 0.3), <i>Е. А. Шерстобитова, Н. В. Проскурнина, М. А. Сёмкин, В. И. Воро- нин, М. С. Щелканова, Г. Ш. Шехтман</i>	92
Секция 2. Структурные исследования. Функциональные и конструкци- онные материалы, радиационное материаловедение	93
Наводороживание сплава $\text{Zr-2.5\%Nb}$ в процессе длительного низко- температурного облучения, <i>С. А. Аверин, В. А. Цыгвинцев</i>	94
Инициирование эффекта памяти формы с помощью облучения быст- рыми нейтронами, <i>В. И. Бобровский, С. В. Афанасьев, В. И. Воронин, В. А. Казанцев, Н. В. Катаева, В. Д. Пархоменко, Н. В. Проскурнина, В. В. Сагарад- зе</i>	95
Эволюция фазового состава неравновесных сплавов Fe-(31-40)Ga в процессе нагрева и охлаждения, <i>Т. Н. Вершинина, Н. Ю. Самойлова, С. В. Сумников, А. М. Балагу- ров, В. В. Палачева, И. С. Головин</i>	96
Структуры и фазовые переходы в тройных сплавах на основе Fe, <i>Б. Ержанов, С. В. Сумников, А. М. Балагуров, И. С. Головин</i>	98
Нейтронные исследования остаточных напряжений вблизи поверхно- сти Si^{27}P методом, <i>И. Д. Карпов, В. Т. Эм, P. Mikula</i>	100

Количественное определение цемента в сталях методом дифракции нейтронов, <i>Т. А. Лычагина, Д. И. Николаев, А. А. Зисман</i>	101
Учет влияния пространственных корреляций на малоугловое рассеяние нейтронов в дисперсно-упрочненных оксидами сталей, <i>Ф. С. Дженаров, Д. В. Львов, С. В. Рогожкин, А. Н. Тюлюсов, Й. Шмайсер, А. С. Шутов</i>	103
Исследования металлических изделий аддитивных производств методами нейтронной визуализации, <i>М. М. Мурашев, В. Т. Эм, В. П. Глазков, И. В. Шишковский, К. И. Макаренко</i>	104
Влияние условий нейтронного облучения на структурно-фазовое состояние стали 07X15N19M2G2BTP, <i>В. Л. Панченко, И. А. Портных, А. Е. Устинов</i>	105
Эволюция радиационной пористости стали 07X15N19M2G2BTP при нейтронном облучении в зоне малого обогащения реактора БН-600 до повреждающих доз от 0.3 до ~106 сна в диапазоне температур облучения от 370 до 630 °С, <i>И. А. Портных, В. Л. Панченко, А. Е. Устинов, А. В. Козлов</i>	106
Влияние радиационного излучения на композитные материалы на базе пластика с внедрением борсодержащих наполнителей, <i>Ю. О. Четвериков, А. А. Быков, Н. А. Коваленко, А. В. Кротов, А. А. Мистонов, М. М. Мурашев, И. В. Смирнов, В. В. Тарнавич</i>	107
Первопринципное моделирование фоновых спектров кристаллических систем, содержащих примеси и дефекты, <i>П. В. Чирков, Г. С. Ельцов, А. В. Караваев, В. В. Дремов, А. А. Мирзоев</i>	108
Секция 3. Магнетизм. Магнитные структуры и взаимодействия	110
Иерархия магнитных взаимодействий в гелимагнетиках и скирмионная решетка, <i>С. В. Григорьев</i>	111
Несоизмеримая магнитная структура, ближний магнитный порядок и физические свойства бинарного интерметаллида Ho_7Rh_3 , <i>А. Ф. Губкин, А. А. Ваулин, А. Ф. Прекул, Н. В. Баранов</i>	112
Магнетизм слоистых теллуридов A_2MnTeO_6 ($\text{A} = \text{Li}, \text{Na}, \text{Ag}, \text{Tl}$) с сотовой кристаллической и треугольной магнитной решетками, <i>А. И. Курбаков, А. Е. Сулопарова</i>	114
Нейтроннографическое исследование магнитных состояний в слоистых халькогенидах Fe_xTiS_2 , <i>Н. В. Селезнева, А. Ф. Губкин, Н. В. Баранов</i>	116
Magnetic structures of $\text{La}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Mn}_2\text{S}_2$ compounds ($x = 0.6$ and 0.8), <i>Н. М. Alsafi, E. G. Gerasimov, P. B. Terentev, P. A. Borisova, V. P. Glazkov, E. V. Dujeva, N. V. Mushnikov, A. N. Pirogov</i>	118
Несоизмеримая магнитная структура и магнитные свойства Ho_3Co , <i>А. А. Ваулин, А. Ф. Прекул, Н. В. Баранов, А. Ф. Губкин</i>	119



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

Моделирование многоподрешеточных магнитных структур в зарядово-упорядоченных перовскитных манганитах с высокой концентрацией неизовалентной примеси, <i>Л. Э. Гончарь</i>	121
Измерения магнитотепловых свойств и нейтронографические исследования высокочистых монокристаллов гольмия, <i>В. И. Зверев, Р. Р. Гимаев, А. Ф. Губкин, А. А. Ваулин</i>	123
Магнитная структура и обменные взаимодействия в мультиферроике магнитокалорике HoFeO_3 , <i>А. К. Овсяников, И. А. Зобкало, W. Schmidt, S. N. Barilo, V. Hutanu</i>	124
Магнитные структуры в системе соединений $\text{Tb}(\text{Ni}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{Si}_2$, <i>Е. Г. Герасимов, П. Б. Терентьев, Х. Альсафи, П. А. Борисова, В. П. Глазков, Е. В. Дюжева, Н. В. Мушников, А. Е. Теплых, М. А. Сёмкин, А. Н. Пирогов</i>	126
Металл-органические каркасные структуры: синтез и анализ магнитных свойств, <i>Т. Н. Вершинина, И. И. Виноградов, Н. А. Дрожжин, В. Д. Жакетов, Е. И. Куницына, Ю. В. Никитенко, А. Павлюкойч, О. Ю. Пономарева</i>	128
Модель Бака-Йенсена для гелимагнетиков с взаимодействием Дзялошинского-Мория, <i>С. В. Григорьев, К. А. Пшеничный</i>	129
Эволюция магнитной структуры в системе $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{PO}_4$, <i>П. Е. Ромашко, Е. В. Дюжева-Мальцева, Д. С. Незнахин, В. П. Глазков, М. А. Сёмкин</i>	130
Структурное состояние и магнитное упорядочение систем шпинель/сегнетоэлектрик, <i>М. А. Сёмкин, А. Е. Теплых, С. Г. Богданов, А. Н. Пирогов</i>	132
Расщепление магнитного и кристаллографического состояний в $\text{Fe}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Ge}$, <i>Д. О. Сканченко, Е. В. Алтынбаев, В. А. Сидоров, G. Chaboussant, N. Martin, Д. А. Саламатин, С. В. Григорьев, Н. М. Щелкачев, М. В. Магнитская, А. В. Цвященко</i>	134
Управление температурой спин-ориентационного перехода в монокристаллах $\text{HoFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$, <i>С. А. Скоробогатов, К. А. Шайхутдинов, Ю. В. Князев, Т. Н. Камкова, А. Д. Васильев, С. В. Семенов, М. С. Павловский, А. А. Красиков</i>	135
Особенности кристаллического строения и магнитные свойства $\text{LiMn}^{2+}\text{Mn}^{3+}\text{TeO}_6$, <i>А. Е. Суслопарова, А. И. Курбаков</i>	137
Магнитные свойства системы Co_xTiS_2 , <i>А. И. Меренцов, Е. А. Степанова, Н. В. Урусова</i>	139
Исследование особенностей магнитного упорядочения квазидвумерного оксида $\text{Li}_2\text{Ni}_2\text{TeO}_6$, <i>Н. С. Фокин, А. Е. Суслопарова, А. И. Курбаков</i>	141
Секция 3. Магнетизм. Нейтронная спектроскопия в физике магнитных явлений	143

Нейтронные исследования эффектов кристаллического электрического поля в низкосимметричных системах, <i>Е. С. Клементьев, П. А. Алексеев</i>	144
Китаевское взаимодействие в цепочках кобальта в пироксене $\text{SrCoGe}_2\text{O}_6$, <i>П. А. Максимов, А. В. Ушаков, А. Ф. Губкин, Г. Редхаммер, А. И. Колесников, А. Сантос, Ч. Гай, М. А. Макгуайр, А. Подлесняк, С. В. Стрельцов</i>	145
Необычный магнетизм в редкоземельных интерметаллических соединениях с сильными электронными корреляциями, <i>П. С. Савченков, П. А. Алексеев</i>	146
Влияние давления на ширину спин-ориентационного перехода в редкоземельном ортоферрите YbFeO_3 , <i>С. А. Скоробогатов, L. S. Wu, T. Xie, К. А. Шайхутдинов, Е. В. Помякушина, А. А. Подлесняк, С. Е. Никитин</i>	148
Особенности расчета параметров кристаллического поля в редкоземельных ортоферритах RFeO_3 ($\text{R} = \text{Ho, Tb, Tm}$), <i>И. А. Зобкало, А. К. Овсяников, О. В. Усманов</i>	149
Секция 3. Магнетизм. Поляризованные нейтроны	150
Симметричные и антисимметричные взаимодействия в мультиферроиках-манганитах, <i>И. А. Зобкало</i>	151
Дисперсионное соотношение в аморфных ферромагнетиках, <i>С. В. Григорьев, Л. А. Азарова, К. А. Пшеничный, О. И. Утесов</i>	153
Структура и магнитные свойства нанопорошков оксида железа $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и Fe_3O_4 , синтезированных методами «мягкой» химии, <i>Т. В. Хамова, А. М. Николаев, А. С. Коваленко, Г. П. Копица, Н. В. Цви-гун, К. В. Фролов, Ю. Е. Горшкова, О. В. Геращенко, А. Е. Баранчиков, О. А. Шилова</i>	154
Ориентация магнитных моментов Dy и Co в сверхрешетках Dy/Co, <i>М. В. Макарова, Н. О. Антропов, В. В. Пролядо, Е. А. Кравцов, Ю. Н. Хайдуков</i>	155
Изучение слабоманитных корреляций в малоугловом рассеянии поляризованных нейтронов, <i>В. В. Рунов</i>	157
Секция 4. Методы исследования вещества, комплементарные нейтронному рассеянию	159
Реориентации анионов и диффузия катионов в наноструктурированных клосо-боратах: исследование методами ЯМР и квазиупругого рассеяния нейтронов, <i>А. В. Скрипов, О. А. Бабанова, Р. В. Скорюнов, А. В. Солонинин, M. S. Andersson, V. Stavila, M. Dimitrievska, T. J. Udovic</i>	160
Использование методов на основе глубоких нейронных сетей для идентификации и декомпозиции гамма-излучающих нуклидов в сложносоставных спектрах, <i>А. В. Арбузов</i>	162

Влияние карбидообразующих добавок на фазовые превращения в фуллеренах при спекании, <i>П. А. Борисова, М. С. Блантер</i>	164
Российские высокоскоростные (500 — 1000 мс/с) многоканальные джитайзеры, <i>И. С. Бредихин</i>	165
Особенности самопроизвольной объёмной магнитострикции в антиферромагнетиках и гигантская объёмная магнитострикция в сплаве FeRh, <i>Э. З. Валиев</i>	167
Применение метода нейтронно-радиационного анализа для определения содержания редкоземельных элементов в образцах горных пород, <i>Р. Р. Гумаев, В. И. Зверев</i>	168
Потенциал малоугловой рентгеновской станции Xeuss 3.0 для биомедицины, <i>Ю. Е. Горшкова</i>	169
Исследование влияния облучения ионами Fe на наноструктуру дисперсно-упрочнённых оксидами сталей методами атомно-зондовой томографии и просвечивающей электронной микроскопии, <i>А. В. Клауз, С. В. Рогожкин, А. А. Хомич, А. А. Богачев, А. Г. Залужный</i>	171
Использование метода МУРР для характеристики нефтяных асфальтенов, <i>Ю. В. Ларичев</i>	172
Секция 5. Некристаллические материалы, полимеры, жидкости и биологические системы	173
Пространственная модель организации хроматина в ядре биологической клетки по результатам малоуглового рассеяния, <i>Е. Яшина, Е. Варфоломеева, Р. Пантина, В. Байрамуков, Р. Ковалев, Н. Федорова, К. Пшеничный, Ю. Е. Горшкова, С. Григорьев</i>	174
Investigation of barium hexaferrite nanoparticles by small-angle neutron and x-ray scattering for preparing new ferrofluids, <i>M. Balasoiu, S. Lysenko, S. Astaf'eva, O. Ivankov, A. Kuklin, V. Turchenko, S. Kichanov, O. M. Bunoiiu</i>	177
Механизмы структурной реорганизации липидной мембраны в присутствии амилоидного бета-пептида, <i>Т. Н. Муругова, А. И. Иванов, Е. В. Ермакова, Д. Р. Бадреева, А. И. Куклин, Н. Кучерка</i>	178
Малоугловое рассеяние как метод исследования структуры липидного бислоя, <i>М. А. Киселев</i>	179
Мезоструктура высокопористого кремнезема, полученного путем пиролиза силикатно-полимерных композитов, <i>С. Ю. Котцов, Х. Е. Еров, Г. П. Копица, Ю. Е. Горшкова, К. Б. Устинович, Н. П. Симоненко, А. Е. Баранчиков, В. К. Иванов</i>	180

Структура проводящих каналов и динамика протонов в ионообменных мембранах из перфторированных сополимеров, <i>В. Т. Лебедев, Ю. В. Кульвеллис, О. Н. Примаченко, А. В. Швидченко, А. И. Куклин</i>	182
Структурные характеристики внутренне-непорядоченного белка Dsup (damage suppressure protein) и его комплекса с ДНК, <i>М. П. Зарубин, Т. Н. Муругова, Ю. Л. Рижиков, О. И. Иванов, И. С. Охрименко, Ю. А. Загрядская, Е. В. Кравченко</i>	183
Морфология и структура шихты детонационного наноалмаза, допированной бором, фосфором и литием, <i>О. А. Шилова, Г. П. Копица, Н. В. Цвигун, Т. В. Хамова, Ю. Е. Горшкова, А. Е. Баранчиков, В. Ю. Долматов</i>	184
Секция 6. Поверхности, тонкие пленки и многослойные структуры	186
Исследование сверхпроводимости и магнетизма в двумерных низкоразмерных структурах методом рефлектометрии поляризованных нейтронов, <i>В. Д. Жакетов, Д. И. Девятериков, М. М. Авдеев, Н. Г. Пугач, Е. А. Кравцов, Ю. В. Никитенко, В. Л. Аксёнов</i>	187
Мезоструктура и магнитные свойства гранулированной пленки SiO ₂ -Co на кремниевой подложке, <i>Н. А. Григорьева, А. А. Воробьев, В. Уклеев, С. В. Григорьев</i>	188
Возможности нейтронной рефлектометрии в структурных исследованиях тонкопленочных гибридных перовскитов для солнечных элементов, <i>М. В. Авдеев, Т. В. Тропин, М. Ердаулетов, В. В. Садилов, Т. Ю. Зеленьяк, В. В. Кригер</i>	190
Закономерности и механизмы модификации магнитных свойств пленок типа FeMn/FM при термообработке, <i>А. А. Быкова, А. Н. Горьковенко, Н. А. Кулеш, В. Н. Лепаловский, М. Е. Москалев, В. О. Васьковский</i>	191
Реализация антиферромагнитного состояния в плёнках ряда сплавов на основе Mn и перспективы их использования в средах с обменным смещением, <i>В. О. Васьковский, В. Н. Лепаловский, А. Н. Горьковенко, М. Е. Москалёв, А. А. Фещенко, А. А. Быкова</i>	193
Каналирование нейтронов в магнитном плоском волноводе, <i>С. В. Кожевников</i>	195
Влияние комплекса физических факторов на гистерезисные свойства плёнок типа Cr-Mn/Fe-N, <i>А. А. Фещенко, М. Е. Москалев, С. В. Северова, А. Н. Горьковенко, В. Н. Лепаловский, Н. В. Селезнева, В. О. Васьковский</i>	197
Исследование структурных, магнитных и электронных свойств систем Fe/MgO/Gd, <i>Е. А. Кравцов, Д. И. Девятериков, В. В. Проглядо, Е. М. Якунина, А. И. Кухаренко, С. О. Чолах, Э. З. Курмаев</i>	199
Секция 7. Прикладные исследования (энергетика, окружающая среда, геофизика, культурное наследие)	201



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

Измерение кристаллографической текстуры раковин двустворчатых моллюсков, <i>Т. А. Лычагина, Д. И. Николаев, А. В. Пахневич</i>	202
Комплексное исследование артефактов с раскопок некрополя Волна 1, <i>Б. А. Бакиров, И. А. Сапрыкина, С. Е. Кичанов, В. С. Смирнова</i>	204
Нейтронно-дифракционные и ультразвуковые исследования гранитов рапакиви: как сохранить памятники архитектуры? <i>Т. И. Иванкина, И. Ю. Зель, М. Петрузалек, Т. Локаичек</i>	205
Частные случаи применения метода нейтронной радиографии и томографии, <i>С. Е. Кичанов, И. Ю. Зель, Д. П. Козленко</i>	207
Исследование конструкции и декора основания навершия меча из Суздальского Ополя, <i>Е. С. Коваленко, М. М. Мурашев, К. М. Подурец, П. В. Гурьева, О. А. Кондратьев, С. Ю. Каинов, Е. Ю. Терещенко, И. Е. Зайцева, Н. А. Макаров, Е. Б. Яцишина</i>	209
Композитные протонопроводящие мембраны с нанокремнеземными добавками, <i>Ю. В. Кульвеллис, В. Т. Лебедев, О. Н. Примаченко, А. С. Одинокоев, Е. А. Мариненко, А. В. Швидченко, Б. Б. Тудупова, В. И. Куулар, А. И. Куклин</i>	210
Неразрушающий анализ конструкции древнерусских ювелирных изделий с помощью нейтронно-синхротронных методов, <i>К. М. Подурец, Е. С. Коваленко, М. М. Мурашев, И. Е. Зайцева, Е. Ю. Терещенко, Е. Б. Яцишина</i>	212
Исследование находок из раскопок могильника Волна-1 методом нейтронной томографии и дополнительными методиками, <i>И. А. Сапрыкина, В. С. Смирнова, С. Е. Кичанов, Б. А. Бакиров</i>	213
Секция 8. Фундаментальные исследования с нейтронами	214
Групповое время задержки и глубина формирования отраженной нейтронной волны, <i>А. И. Франк, В. А. Бушуев</i>	215
Надбарьерное прохождение нейтронов через осциллирующий вдоль пучка образец. Квазиклассический анализ, <i>Ф. С. Джепаров, Д. В. Львов, А. И. Франк</i>	216
Нестандартные квазиаддитивные интегралы движения и зависимость фононных заселенностей от давления, <i>Ф. С. Джепаров</i>	218
Установка «Нейтрино» для РК ПИК, <i>А. П. Серебров, Р. М. Самойлов</i>	220
Установка «Бета-распад нейтрона» для РК ПИК, <i>А. П. Серебров, А. К. Фомин</i>	221
Круглый стол	222
Перспективы нейтронных исследований конденсированных сред на реакторе ИРТ-Т ТПУ (Томск, Россия), <i>М. Н. Аникин, А. М. Лидер</i>	223

Установки малоуглового рассеяния нейтронов на реакторе ПИК, Л. А. Азарова, Е. В. Алтынбаев, Е. Г. Яшина, Д. О. Сканченко, С. В. Григорьев	225
Нейтронные исследования остаточных напряжений вблизи поверхности $\text{Sin}^2\Psi$ методом, И. Д. Карпов, В. Т. Эм, Р. Mikula	226
Исследования металлических изделий аддитивных производств методами нейтронной визуализации, М. М. Мурашев, В. Т. Эм, В. П. Глазков, И. В. Шишковский, К. И. Макаренко	227
Нейтроннографический комплекс ИЯИ РАН для исследования конденсированных сред и нанодиагностики на базе импульсных источников нейтронов ИНО6 и РАДЭКС: современное состояние 2023 г., Р. А. Садыков, В. С. Литвин, Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, С. Н. Аксенов, А. А. Алексеев, Ю. Б. Лебедь, И. В. Мешков, Ю. А. Лапушкин	228
Нейтронные исследования в области материаловедения на реакторе ИР-8, В. Т. Эм, И. Д. Карпов, М. М. Мурашев	229
Стендовые доклады	230
In-situ small angle neutron scattering under thermal-mechanical coupled field loading, Xie Zhenhua, Ke Yubin	231
Дифрактометр для исследования веществ при высоком давлении «Геркулес», С. Н. Аксенов, В. Н. Марин, В. С. Литвин, Д. Н. Трунов, Р. А. Садыков	232
Синтез, электронные и магнитные свойства фаз железа и полигидридов железа при высоких давлениях мегабарного диапазона, И. С. Любутич, В. В. Стружкин, С. Н. Аксёнов, А. Г. Иванова, А. А. Миронович, И. А. Троян, М. В. Любутина, Ю. А. Никифорова, А. Г. Гаврилюк	233
Mechanical properties investigation by uniaxial load conditions on sandstone sample using neutron TOF diffraction method, A. Badmaarag, D. Sangaa, V. V. Sikolenko, L. Enkhtur	235
Эффективное токоиндуцированное перемагничивание металлических наноструктур с перпендикулярной магнитной анизотропией, А. В. Телегин, В. Д. Бессонов, Е. А. Суржилов, В. А. Бессонова	237
Особенности укладки хроматина клеток аденокарцинома Эрлиха дикого типа и с радиорезистентным фенотипом, И. А. Кулаков, В. С. Бурдаков, Л. А. Иванова, Ю. Е. Горшкова, Г. П. Капица, Д. В. Лебедев, Н. А. Верлов	239
Влияние условий получения на фотокатализаторы из BiOBrO_3 , И. Г. Генев, О. Н. Лис, Т. Н. Вершинина, Д. П. Козленко, С. Е. Кичанов, Е. В. Лукин	240
Универсальная газовая установка с функцией выделения и очистки гелия-3, Т. И. Глушкова, П. А. Кравцов, Л. М. Коченда, А. А. Фетисов	242



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

Нейтроннографическая диагностика фазового состава продуктов электрохимического восстановления модельного ядерного топлива, А. Ф. Губкин, А. А. Рубаха, М. А. Семкин, А. Н. Пирогов, И. Ф. Бергер, С. С. Хвостов, Н. В. Глушкова, П. Н. Мушников, А. В. Шишкин, В. Ю. Шишкин, Ю. П. Зайков, Ю. С. Мочалов	244
Сравнительное исследование монокристаллов LiInSe_2 для регистрации тепловых нейтронов, О. Даулбаев, Л. И. Исаенко, А. А. Богдзель, С. И. Лобанов, П. Г. Криницын, В. М. Милков, А. В. Белушкин	246
Фурье модальный метод расчёта дифракции нейтронов на бегущей поверхностной акустической волне, М. А. Захаров, Г. В. Кулин, А. И. Франк	247
Структурная эволюция карбоната кальция, осажденного в процессе бактериальной биоминерализации, индуцированной планктонной культурой <i>bacillus cereus</i> , Л. А. Иванова, Д. А. Головкина, Е. В. Журишкина, Ю. Е. Горшкова, А. Е. Баранчиков, А. Д. Япрынцев, Н. В. Цвигун, Г. П. Копица, А. А. Кульминская, Д. В. Лебедев	250
Реализация методики исследования структуры монокристаллов на нейтронном дифрактометре МОНД с Image Plate детектором MAR345, А. И. Калюканов, Н. Н. Исакова	251
Современное состояние Sonix+ и перспективные направления его развития, А. С. Кирилов, И. А. Морковников, С. М. Мурашкевич, Т. Б. Петухова, Л. А. Трунтова	252
Разработка системы сбора данных с одномерного позиционно-чувствительного детектора на основе гелиевой резистивной трубки, А. А. Козляковская, А. А. Богдзель, В. М. Милков, Л. И. Литвиненко, В. И. Боднарчук	253
Нейтронная рефлектометрия и МУРН на импульсном источнике нейтронов ИН–06. Исследования жаропрочных немагнитных сплавов и тестирование суперзеркал, В. С. Литвин, В. А. Ульянов, В. Г. Сыромятников, Д. А. Бучный, Д. Н. Трунов, С. Н. Аксенов, И. В. Мешков, А. А. Чураков, В. И. Боднарчук, Р. А. Садыков	254
Различия в формировании липидных бислоев из соевых фосфолипидов и ДМФХ на кремниевой подложке, В. А. Маслова, М. А. Киселев	256
Стратегия эффективной коммерциализации передовых научных разработок, О. И. Москвина, Е. В. Алтынбаев	258
Станция для томографических и радиографических исследований NT1, А. А. Павельева, Е. В. Алтынбаев, Д. Н. Трунов	260

Структурные особенности перовскита $\text{Ba}_{1.8}\text{Dy}_{1.2}\text{Fe}_{2.1}\text{Co}_{0.9}\text{O}_{9-\delta}$, В. А. Черепанов, Н. Е. Волкова, Н. В. Проскурнина, А. Ф. Губкин, В. Л. Панченко, В. И. Пастухов, А. А. Ваулин, Д. А. Шишкин, В. И. Во- ронин, Е. А. Шерстобитова, В. П. Глазков, Е. В. Дюжева-Мальцева, М. А. Сёмкин	263
Влияние допирования переходными элементами на кристаллическую и магнитную структуру полугейслеровских сплавов $\text{MnNi}_{0.9}\text{M}_{0.1}\text{Sb}$ ($\text{M} = \text{Ti, V, Cr, Fe, Co, Zn}$), А. В. Руткаускас, Г. С. Римский, И. Ю. Зель, Н. М. Белозерова, Д. П. Коз- ленко, С. И. Кичанов	265
«Сжатие» простой магнитной спирали в шпинелях ZnCr_2Se_4 и $^{114}\text{Cd}_{0.3}\text{Zn}_{0.7}\text{Cr}_2\text{Se}_4$ под давлением, Р. А. Садыков, В. П. Глазков, Е. В. Дюжева-Мальцева, И. Н. Гонча- ренко	266
Micromagnetic modeling of Co/Tb ferrimagnetic structures, V. S. Teplov, V. D. Bessonov, A. V. Telegin	269
Программа для визуализации результатов измерения SpectraViewer, Л. А. Трунтова	270
Разработка проекта универсальной ловушки для хранения ультрахо- лодных нейтронов, А. П. Серебров, А. К. Фомин, Г. Н. Ключников, А. О. Коптюхов, А. Н. Мурашкин	271
Интенсивный источник нейтронов IV поколения: реактор «Нептун», А. А. Хассан, Е. П. Шабалин	272
Модуль из 8 позиционно-чувствительных счетчиков тепловых нейтро- нов с резистивным анодом, А. В. Чураков, А. А. Богдзель, Е. И. Литвиненко	273
Структура и магнитные свойства шпинелей $\text{Fe}_{3-x}\text{Co}_x\text{O}_4$ ($x = 0, 0.5, 1$), полученных методом высокоэнергетического измельчения для биомедицинских применений, А. Д. Ковалев, И. Г. Бордюжин, Т. Р. Низамов, П. А. Борисова, М. А. Сем- кин, И. В. Щетинин	275
Трехосный спектрометр тепловых нейтронов на реакторе ПИК, М. Х. Юзвюк, Ю. М. Киреенко, И. А. Зобкало	277
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	279

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ КОНФЕРЕНЦИИ

М. В. КОВАЛЬЧУК (НИЦ «Курчатовский институт»)

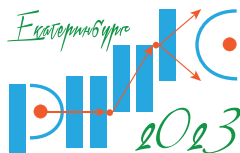
ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Н. В. МУШНИКОВ (ИФМ УрО РАН)	<i>председатель</i>
А. Ф. ГУБКИН (ИФМ УрО РАН)	<i>председатель локального комитета</i>
Е. Г. ГЕРАСИМОВ (ИФМ УрО РАН)	<i>председатель публикационного комитета</i>
Е. В. МОСТОВЩИКОВА (ИФМ УрО РАН)	<i>ученый секретарь</i>
А. В. GERMANENKO (УрФУ)	
Е. Н. СЕЛЕЗНЕВ (АО ИРМ)	

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

А. Е. БЛАГОВ (НИЦ «Курчатовский институт»)	<i>сопредседатель</i>
В. В. УСТИНОВ (ИФМ УрО РАН)	<i>сопредседатель</i>
Е. А. КРАВЦОВ (ИФМ УрО РАН)	<i>заместитель председателя</i>

М. В. АВДЕЕВ (ОИЯИ)
 В. Л. АКСЕНОВ (ОИЯИ)
 П. А. АЛЕКСЕЕВ (НИЦ «Курчатовский институт»)
 А. М. БАЛАГУРОВ (ОИЯИ)
 Н. В. БАРАНОВ (ИФМ УрО РАН)
 А. В. БЕЛУШКИН (НИЦ «Курчатовский институт», ОИЯИ)
 В. И. БОДНАРЧУК (ОИЯИ)
 В. В. ВОРОНИН (НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ)
 С. В. ГРИГОРЬЕВ (НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ)
 В. В. ДРЕМОВ (РФЯЦ–ВНИИТФ)
 А. С. ИВАНОВ (ILL, Гренобль, Франция)
 М. А. КИСЕЛЕВ (ОИЯИ)
 Д. П. КОЗЛЕНКО (ОИЯИ)
 Т. В. КУЛЕВОЙ (НИЦ «Курчатовский институт» — ККТЭФ)
 А. И. КУРБАКОВ (НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ)
 А. М. ЛИДЕР (ТПУ)
 А. В. МИРМЕЛЬШТЕЙН (РФЯЦ–ВНИИТФ)
 А. Н. ПИРОГОВ (ИФМ УрО РАН)
 Н. К. ПЛЕШАНОВ (НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ)
 С. В. РОГОЖКИН (НИЦ «Курчатовский институт»)



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

Р. А. САДЫКОВ (ИЯИ РАН)
А. И. ФРАНК (ОИЯИ)
В. Т. ЭМ (НИЦ «Курчатовский институт»)

ПУБЛИКАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Н. А. ГРИГОРЬЕВА (ИФМ УрО РАН)

ЛОКАЛЬНЫЙ КОМИТЕТ

Д. Н. АБДУЛЛИНА (ИФМ УрО РАН)
Д. Ф. АКРАМОВ (УрФУ)
Е. А. БАРМИНА (УрФУ)
В. О. ВАСЬКОВСКИЙ (УрФУ)
А. А. ВАУЛИН (ИФМ УрО РАН)
Д. И. ДЕВЯТЕРИКОВ (ИФМ УрО РАН)
П. А. ЗАЯЦ (ИФМ УрО РАН)
А. А. ИНИШЕВ (ИФМ УрО РАН)
Е. КИСЛОВ (УрФУ)
В. Е. КОМОРОВА (УрФУ)
М. КОРНИЯСЕВА (УрФУ)
В. Е. МАЛЬЦЕВА (УрФУ)
Г. Ю. МЕЛЬНИКОВ (УрФУ)
С. Н. МОЗГОВЫХ (УрФУ)
С. Н. НОСОВА (УрФУ)
А. Н. ПИРОГОВ (УрФУ)
Н. В. ПРОСКУРНИНА (ИФМ УрО РАН)
П. Е. РОМАШКО (УрФУ)
А. С. РУСАЛИНА (УрФУ)
Ю. А. САЛАМАТОВ (ИФМ УрО РАН)
О. Р. СЕВЕРЮХИНА (ИФМ УрО РАН)
Н. В. СЕЛЕЗНЕВА (УрФУ)
М. А. СЕМКИН (ИФМ УрО РАН)
К. А. СТЕПАНОВА (УрФУ)
Н. В. УРУСОВА (УрФУ)
А. А. ФЕЩЕНКО (УрФУ)
С. Г. ШАЙМУРАТОВ (УрФУ)
Е. М. ЯКУНИНА (ИФМ УрО РАН)



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

• → • → • → Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ

Д. Я. ПОСТНИКОВ (ИФМ УрО РАН)
А. В. ЕФРЕМОВ (ИФМ УрО РАН)
С. Б. БОБИН (ИФМ УрО РАН)
А. С. ШКВАРИН (ИФМ УрО РАН)
И. Ю. КАМЕНСКИЙ (ИФМ УрО РАН)
Л. В. МИХАЙЛОВ (ИФМ УрО РАН)
Д. Г. КСЕНОФОНТОВ (ИФМ УрО РАН)
Е. Д. СЕРБИН (ИФМ УрО РАН)



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

ТЕМАТИКИ

Пленарные доклады

25.09 Актальный зал, 26.09 Актальный зал, 27.09 Актальный зал,
28.09 Актальный зал

Секция 1.

Источники нейтронов, приборы и методы нейтронного эксперимента.

Техника нейтронного эксперимента

25.09 Актальный зал, 26.09 Актальный зал

Источники нейтронов, приборы и методы нейтронного эксперимента.

Детекторы нейтронов

25.09 Малый зал

Источники нейтронов, приборы и методы нейтронного эксперимента.

Компактный источник нейтронов DARIA

28.09 Конференц-зал

Секция 2.

**Структурные исследования. Кристаллические структуры и элементарные воз-
буждения**

27.09 Конференц-зал

**Структурные исследования. Функциональные и конструкционные материалы,
радиационное материаловедение**

27.09 Симпозиум-холл

Секция 3.

Магнетизм. Магнитные структуры и взаимодействия

25.09 Конференц-зал, 27.09 Актальный зал

Магнетизм. Нейтронная спектроскопия в физике магнитных явлений

26.09 Конференц-зал

Магнетизм. Поляризованные нейтроны

28.09 Актальный зал

**Секция 4. Методы исследования вещества, комплементарные нейтронному рас-
сеянию**

27.09 Конференц-зал

**Секция 5. Некристаллические материалы, полимеры, жидкости и биологические
системы**

27.09 Малый зал



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

• → • → • → Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

Секция 6. Поверхности, тонкие пленки и многослойные структуры

25.09 Конференц-зал

Секция 7. Прикладные исследования (энергетика, окружающая среда, геофизика, культурное наследие)

27.09 Малый зал, 28.09 Малый зал

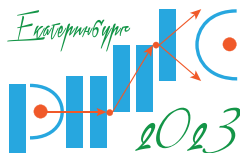
Секция 8. Фундаментальные исследования с нейтронами

26.09 Малый зал

Круглый стол

26.09 Актальный зал

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

НЕЙТРОННАЯ СТРЕСС-ДИФРАКТОМЕТРИЯ

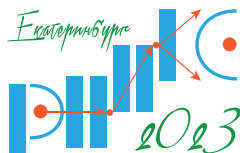
Г. Д. Бокучава¹, В. Т. Эм²

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

E-mail: aGizo.Bokuchava@jinr.ru, Em_VT@nrcki.ru,

В докладе представлены развитие и современное состояние приборной базы для исследований внутренних напряжений в конструкционных материалах и промышленных изделиях методом дифракции нейтронов. Для выполнения подобных экспериментов практически во всех нейтронных центрах созданы и успешно функционируют специализированные стресс-дифрактометры, которые позволяют решать широкий круг инженерных и материаловедческих задач. За последние 15 лет достигнут значительный прогресс в методике эксперимента как на стационарных, так и на импульсных источниках нейтронов, что позволяет решать широкий круг задач в современном материаловедении. Также рассмотрены действующие в России два нейтронных стресс-дифрактометра: ФСД на импульсном реакторе ИБР-2 в ОИЯИ (Дубна) и СТРЕСС на реакторе ИР-8 в НИЦ «Курчатовский институт» (Москва). Приведены примеры актуальных научных исследований на этих приборах.



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

1. S. Ukai, M. Fujiwara, Perspective of ODS alloys application in nuclear environments. Journal of Nuclear Materials 307–311 (2002) 749–757.
2. Lindau R., Möslang A., Rieth M., et al. Present development status of EUROFER and ODS-EUROFER for application in blanket concepts. Fusion Engineering and Design 75–79 (2005) 989–996.
3. M. Klimiankou, R. Lindau, A. Möslang, TEM characterization of structure and composition of nanosized ODS particles in reduced activation ferritic–martensitic steels. Journal of Nuclear Materials 329–333 (2004) 347–351.
4. A.A. Aleev, N.A. Iskandarov, M. Klimenkov et al, Investigation of oxide particles in unirradiated ODS Eurofer by tomographic atom probe, Journal of Nuclear Materials 409 (2011) 65–71.
5. S. V. Rogozhkin, A. A. Khomich, A. V. Klauz et al, Comprehensive analysis of nanostructure of oxide dispersion-strengthened steels by ultramicroscopy methods. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques 16 (2022) 1189–1200.
6. L. Almásy, New Measurement Control Software on the Yellow Submarine SANS Instrument at the Budapest Neutron Centre. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques 15 (2021) 527–531.
7. X. Zhou, J. Zhou, H. Teng et al, Small Angle Neutron Scattering Spectrometer Detector of China Spallation Neutron Source. Nuclear Physics Review 36 (2019) 204–210.

РЕЗУЛЬТАТ ЭКСПЕРИМЕНТА НЕЙТРИНО-4, СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО, ТЁМНАЯ МАТЕРИЯ И СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ

А. П. Серебров, О. М. Жеребцов, Р. М. Самойлов*

НИЦ «Курчатовский институт»–ПИЯФ, Гатчина, Россия

Е-mail: serebrov_ap@pnpi.nrcki.ru

Совместный анализ результатов эксперимента Нейтрино-4 и данных экспериментов GALLEX, SAGE и BEST подтверждает параметры нейтринных осцилляций, заявленные экспериментом Нейтрино-4 ($\Delta m_{14}^2 = 7.3 \text{ эВ}^2$ и $\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.36$) и увеличивает достоверность до 5.8σ . Такое стерильное нейтрино термализуется в космической плазме, даёт вклад в плотность энергии Вселенной 5% и может объяснить 15-20% тёмной материи. Обсуждается, что расширение нейтринной модели введением ещё двух тяжёлых стерильных нейтрино в соответствии с числом типов активных нейтрино, но с очень малыми углами смешивания, чтобы избежать термализации позволяет довести вклад стерильных нейтрино в тёмную материю Вселенной до уровня 27% и объяснить крупномасштабную структуру Вселенной. Такой подход к проблеме тёмной материи означает, что тёмная материя может быть объяснена в рамках расширенной Стандартной Модели с правыми нейтрино. Анализ астрофизических данных показывает, что правые нейтрино с массой меньше 7 кэВ пока не закрыты прямыми экспериментами. Показано, что, опираясь на современные астрофизические данные нельзя сделать определённого заключения в пользу модели трёх или четырёх термализованных нейтрино. Рассмотрено влияние лептонной асимметрии на сравнение моделей трёх или четырёх нейтрино. Сделана оценка на нейтринную асимметрию. В частности, для $N_\nu = 3$ $-0.04 < \xi_e < 0.04$, а для $N_\nu = 4$ $0.02 < \xi_e < 0.10$. Обсуждается возможность возникновения лептонной асимметрии из-за CP-нарушения при осцилляциях в стерильные нейтрино.



NEUTRON SCIENCE AT THE DHRUVA FACILITY WITH AN EMPHASIS ON RECENT WORK ON ADVANCED MAGNETIC MATERIALS

S. M. Yusuf

Physics Group, Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai 400 085, India

E-mail: smyusuf@barc.gov.in

Dhruva reactor at Bhabha Atomic Research Centre (BARC), Mumbai, India is a 100 MW thermal medium flux (1.8×10^{14} neutrons/cm²/sec) research reactor catering to the needs of the Indian neutron scattering community. It has been utilized by various national institutions and universities under the National Facility for Neutron Beam Research (NFNBR) program. We have used neutron beams to carry out research in the area of condensed matter physics and materials science. In particular, the technique of neutron scattering has been fruitfully exploited by us in the subject domain of advanced magnetic materials, functional materials, quantum materials, nano structures, etc.

In my talk, I shall first briefly give an overview of the neutron science program at the Dhruva facility, and then present recent results on the advanced magnetic materials.

Dr. S M Yusuf currently serves as Director, Physics Group of BARC, Mumbai. He is a fellow of all three major science academies of India, viz. Indian National Science Academy, Indian Academy of Sciences, and National Academy of Sciences, India. He was a post-doctoral fellow at Argonne National Laboratory, USA, and a visiting scientist at the Institute of Materials Science, Spain. He has made noteworthy contributions in the area of 1-D and 2-D magnetism driven by quantum fluctuations, phenomenon of magnetization reversal, magnetic proximity effect, high magnetocaloric effect, colossal magnetoresistance effect, coexistence of magnetic phases, etc. His H-index is 52 with total number of journal publications around 300. Prof. Yusuf serves/served as (i) President, Indian Physics Association (IPA), (ii) Vice Chair, Division of Condensed Matter Physics, Association of Asia Pacific Physical Society, (iii) Vice-President and Board member of Asia-Oceania Neutron Scattering Association, (iv) Vice-President, Materials Research Society of India (MRSI), (v) President, Neutron Scattering Society of India, (vi) Vice President, Indian Crystallographic Association, (vii) Member of Neutron Science Review Committee, Oak Ridge National Laboratory, USA for eight years during 2013 – 2021. Dr. Yusuf is the recipient of several prestigious awards in India.

Секция 1.

Источники нейтронов, приборы и методы нейтронного эксперимента.

Техника нейтронного эксперимента



SMALL-ANGLE NEUTRON SCATTERING FOR CONDENSED MATTER RESEARCH AT CHINA SPALLATION NEUTRON SOURCE

Yubin Ke^{1,2*}

¹Institute of high energy physics, Chinese academy of science, Beijing, China, 100091

²Spallation neutron source science center, Dongguan, China, 528303

*E-mail: keyb@ihep.ac.cn

Microstructure at atomic- to nano- scale is one of the key factors that determining the mechanical and functional properties of matter. Therefore, accurate design and characterization of these microstructure are significant for properties' manipulation in materials science. One of the novel nanostructure probe method is small-angle neutron scattering (SANS), which can unravel the fluctuation of composition, density and magnetism at 1 100 nm length-scale. Due to the high penetration, nondestructive and sensitivity to spin and light elements of neutrons, SANS finds a broad application in multidiscipline fields.

The SANS instrument at China Spallation Neutron Source (CSNS, located in Dongguan) has started to operate and open to international users from 2018. By using this instrument, we have conducted a series of off-site and in-situ SANS experiments under elevated temperature, cryogenic condition, mechanical stress and magnetic field loading [1]. These observations enable us a deep insight into the size, morphology and kinetic evolution of nanoheterogeneity in matters, including particles, precipitates, pores, and domains within hard matters as well as the macromolecule chain, aggregation, and self-assembly structure of soft matters.

A large amount of valuable users' research has been completed and result in more and more publication in high impact journals. Based on its characteristics, the basic principal and research scope of SANS technique will be presented. Moreover, typical case study on SANS@CSNS will be demonstrated in the introduction of SANS application in condensed matter research.

1. Yubin Ke, Chunyong He, Haibiao Zheng, et al. "The time-of-flight Small-Angle Neutron Spectrometer at China Spallation Neutron Source." Neutron News 2018, 29:14-17.

ПРОЕКТ ПОРОШКОВОГО ДИФРАКТОМЕТРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ИРТ–Т

Е. В. Москвин, С. В. Григорьев, Н. А. Коваленко, И. А. Бедретдинов*

НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Гатчина, Россия

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

В докладе рассматривается проект нейтронного порошкового дифрактометра, который планируется построить и разместить на 8 канале исследовательского реактора ИРТ-Т Томского политехнического университета (ТПУ).

Выбрана конструкция с открытой геометрией, проведены расчеты методом Монте-Карло зоны реактора и нейтронных потоков в каналах, которые находятся в хорошем согласии с имеющимися данными для этого реактора.

На основе этих данных, в программной среде McStas проведена оптимизация всех узлов и расчет производительности планируемого порошкового дифрактометра.

Особенностями дифрактометра является высокий угол отклонения монохроматора ($\theta_M = 150^\circ$), отказ от использования коллиматоров, вертикально фокусирующий монохроматор, предложение использовать высокоразрешающий позиционно-чувствительный сцинтилляционный детектор с отказом от сканирования по углу. Все эти меры позволяют добиться высокой производительности при сохранении высокой разрешающей способности в диапазоне рассеянных углов $10^\circ \leq 2\theta_S \leq 160^\circ$. На рисунке 1 представлена дифрактограмма от $\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{F}_{14}$ при экспозиции 1 час. Прибор является аналогом недавно введенного в эксплуатацию порошкового дифрактометра PEARL в Техническом университете Дельфта, Голландия с похожими характеристиками [1].

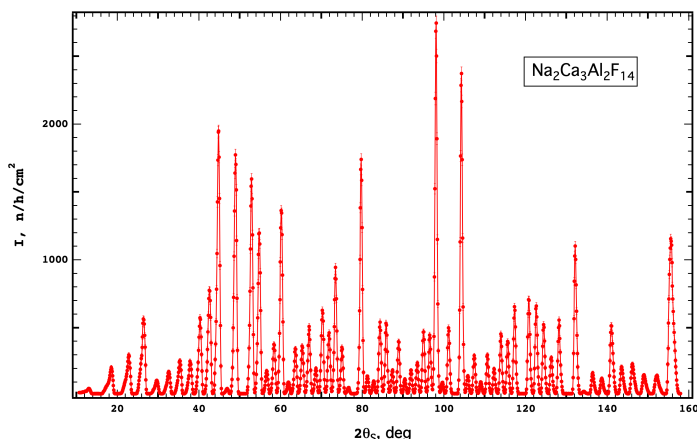


Рис. 1. Дифрактограмма от $\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{F}_{14}$ при экспозиции 1 час

Авторы выражают благодарность сотрудникам ТПУ М. Сыртанову, А. Лидеру и М. Аникину за плодотворные дискуссии и техническую поддержку. Работы выполнены в рамках договора № 18693/66-200-1/2022 от 13.12.2022.

1. L. van Eijck, et al, J. Appl. Cryst., 49, 1398 (2016).

НЕЙТРОННАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ В РОССИИ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Н. К. Плешанов*

Петербургский институт ядерной физики, НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина, Ленинградская обл.,
188300 Россия

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

Нейтронная рефлектометрия на сегодняшний день зарекомендовала себя важнейшим методом исследования поверхностей, тонких плёнок и многослойных структур. Уникальные возможности нейтронной рефлектометрии оказываются весьма востребованными в связи с большим интересом к наномасштабным структурам и явлениям при решении фундаментальных и технологических задач, актуальных для физики, химии, биологии и в областях, лежащих на стыке этих наук. Актуализация многих задач связана с переходом к широкому использованию нано-объектов и нано-масштабных явлений. Чем меньше объекты, тем большую роль играют приповерхностные области, в более общем смысле – межфазовые границы. Отсюда – стремительный рост интереса к границам и явлениям на границах фаз, которые играют все более существенную роль в формировании физических свойств новых материалов, протекании химических реакций и управлении биологическими процессами.

Как и в общем случае, в исследованиях методом нейтронной рефлектометрии большое значение имеют особенности взаимодействия нейтронов с веществом, которые определяют уникальность метода, с одной стороны, и его комплементарность к светосильному методу рентгеновской рефлектометрии, с другой стороны. Длина рассеяния нейтронов меняется немонотонно с атомным номером и может существенно отличаться для изотопов одного и того же элемента. Отсюда преимущества при исследовании слоев из элементов с близкими или, наоборот, с очень далекими номерами, а также возможность изотопного контрастирования и замещения.

Благодаря уникальной возможности восстановления глубинных профилей намагниченности и послойной векторной магнитометрии, рефлектометрия поляризованных нейтронов нередко играет решающую роль при исследовании магнетизма приповерхностных областей, тонких пленок, многослойных наноструктур и латерально структурированных объектов, особенностей их перемангничивания, корреляции структурных и магнитных особенностей. Перспективы развития метода связаны с реализацией измерительных схем, обеспечивающих фазометрию и 3D-поляриметрию.

Будут рассмотрены особенности метода нейтронной рефлектометрии и тенденции его развития, текущее состояние приборной базы и перспективы на действующих и будущих нейтронных источниках России. В докладе во многом будут использованы материалы публикации [1].

Работа выполнена с поддержкой гранта Российского научного фонда № 23-22-00279.

1. В. И. Боднарчук, А. П. Булкин, Е. А. Кравцов, Н. К. Плешанов, В. Г. Сыромятников, В. А. Ульянов, Кристаллография 67, 57 (2022); V. I. Bodnarchuk, A. P. Boulkin, E. A. Kravtsov, N. K. Pleshanov, V. G. Syromyatnikov, V. A. Ul'yanov, Crystallography Reports 67, 50 (2022).

РАЗРАБОТКА КОМПОНЕНТ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ СТАНЦИЙ НА БАЗЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ УСТАНОВОК МЕГА-КЛАССА СИЛАМИ НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» - ПИЯФ

Е. В. Алтынбаев^{1,2}, О. И. Москвина¹, В. А. Соловей¹, В. В. Воронин¹*

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

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

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

Согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 16 марта 2020 г. № 287 «Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019 - 2027 годы» (далее - ФНТП) и Распоряжению Правительства Российской Федерации от 24 декабря 2021 года №3834-р на период до 2032 года на развитие современной исследовательской инфраструктуры класса “мегасайенс” на территории Российской Федерации выделено более 250 миллиардов рублей. Под современной исследовательской инфраструктурой подразумевается ввод в эксплуатацию ряда нейтронных и синхротронных источников и исследовательского оборудования:

- Исследовательский реакторный комплекс ПИК, г. Гатчина
- Импульсный нейтронный источник нейтронов “Омега”, г. Протвино
- Синхротрон “СИЛА”, г. Протвино
- Сибирский кольцевой источник фотонов “СКИФ”, г. Новосибирск
- Синхротрон “РИФ”, г. Владивосток
- Синхротрон “КИСИ-Курчатов-2”, г. Москва

Помимо новых потребителей научного оборудования, программа обновления приборных комплексов реализуется также и на базе существующих исследовательских центров. Подобный взрывной рост спроса на высокотехнологичную и наукоемкую продукцию открывает возможности для эффективного импортозамещения критических компонент исследовательских установок. В частности, благодаря целевым механизмам поддержки реализации НИОКТР в области научного приборостроения, таким как Постановление Правительства Российской Федерации от 18.02.2022 № 208 «О предоставлении субсидии из федерального бюджета автономной некоммерческой организации «Агентство по технологическому развитию» на поддержку проектов, предусматривающих разработку конструкторской документации на комплектующие изделия, необходимые для отраслей промышленности» (ППРФ 208), НИОКР в рамках ФНТП, силами НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ активно реализуются проекты в области создания комплектующих нейтронной оптики, монохроматоров, детекторов и других компонент научного оборудования.

В докладе будет представлен реализованный в НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ механизм реализации НИОКТР и последующего внедрения результатов с целью эффективного решения, стоящих перед отраслью научного приборостроения вызовов.

**РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ МОДУЛЯЦИИ НЕЙТРОННОГО ПУЧКА ДЛЯ
КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУРЬЕ-ДИФРАКТОМЕТРИИ**

Г. Д. Бокучава*, И. В. Папушкин, В. В. Журавлев, А. А. Круглов, Т. Б. Петухова,
С. М. Мурашкевич

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*E-mail: Gizo.Bokuchava@jinr.ru

Для дальнейшего развития RTOF-метода на дифрактометре ФСД [1] на реакторе ИБР-2 создан и введен в эксплуатацию фурье-прерыватель принципиально новой улучшенной конструкции и с расширенными техническими характеристиками (Рис. 1). Прерыватель представляет собой многощелевую систему ротор-статор в специальном вакуумном кожухе, которая установлена на платформу прецизионного перемещения, что позволяет при необходимости дистанционно вводить прерыватель в нейтронный пучок и выводить из пучка, и, таким образом, оперативно переключаться между режимами работы TOF (высокая светосила) и RTOF (высокое разрешение).

В новом прерывателе заложены потенциальные возможности, которые могут быть весьма полезны для дальнейшего развития RTOF-метода [2]. В частности, реализован набор из 5 различных частотных окон $g(\omega)$, который позволяет изучать особенности профиля дифракционного пика и уровень остаточных осцилляций интенсивности [3], возникающих из-за конечного значения максимальной частоты модуляции нейтронного пучка $\omega_{\max}$. Также имеется возможность измерять отдельные фурье-гармоники, из которых состоит дифракционный пик, при различных постоянных скоростях прерывателя для всего доступного диапазона TOF-шкалы [4].

Оригинальной особенностью прерывателя является наличие 1024 реальных радиальных щелей шириной около 0.7 мм, вырезанных в пластине статора и диске ротора, что позволяет избежать поглощения и рассеяния нейтронов материалом диска прерывателя. Также впервые показана принципиальная возможность генерации пикап-сигналов при использовании инфракрасного лазерного луча с длиной волны 1550 нм, проходящего через щели в роторе и статоре (система LPS - Laser Pickup System), что обеспечивает прямое измерение реальной функции пропускания прерывателя, в точности соответствующей модуляции нейтронного пучка (Рис. 2). Дублирующим источником пикап-сигнала служит стандартный инкрементальный оптический энкодер HEIDENHAIN ERO 1225, который крепится на оси двигателя прерывателя. Дифракционные RTOF-спектры высокого разрешения, измеренные с помощью лазерной системы LPS, демонстрируют хорошее соотношение сигнал/шум и аналогичны спектрам, измеренным с помощью оптического энкодера.

Результаты проведенных экспериментов показали, что конструкция нового фурье-прерывателя ФСД и организация системы управления обеспечивают существенно лучшее ПИД-регулирование и стабильность работы в широком диапазоне скоростей, что позволяет добиться более точного выполнения заданного распределения частот вращения. Расширенный в 300 раз диапазон пределов ускорения ($0.1 \div 300$ об/мин/сек) позволяет формировать циклы измерений (свипы) в широком диапазоне рабочих параметров (максимальная скорость, длительность свипа и число ступеней). Кроме того, система управления статором обеспечивает высокую стабильность фазы пикап-сигнала,

что позволяет получать дифракционные пики симметричной гауссовской формы во всем диапазоне по d_{hkl} .

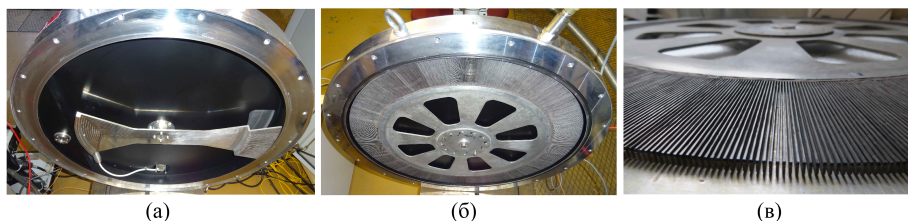


Рис. 1. Новый фурье-прерыватель ФСД: (а) часть прерывателя со статором; (б) ответная часть с диском и двигателем; (в) диск ротора с радиальными прорезями в материале

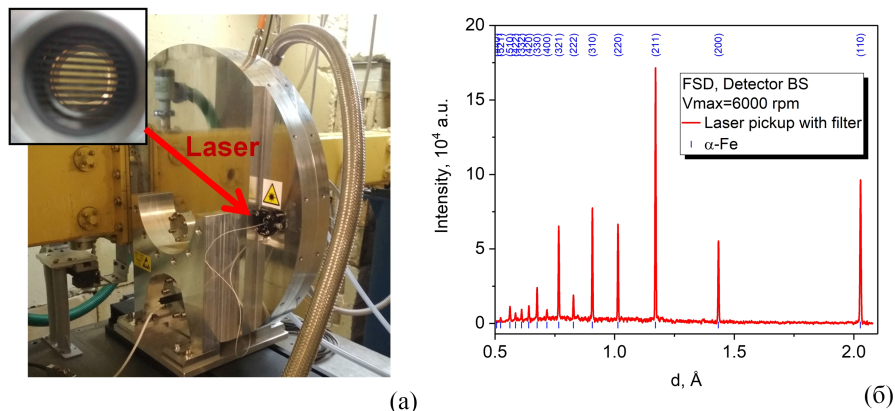


Рис. 2. (а) Новый фурье-прерыватель ФСД, установленный на платформе перемещения в разрыве зеркального нейтроновода. Стрелкой указано оптическое окно в кожухе прерывателя для прохождения луча лазера. (б) Дифракционный спектр высокого разрешения, измеренный с помощью лазерной системы пикапа LPS

1. G. Bokuchava, Crystals 8, 318 (2018), <http://doi.org/10.3390/cryst8080318>.
2. G. Bokuchava, NIM A 964, 163770 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.163770>
3. G. Bokuchava, NIM A 983, 164612 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164612>
4. G. Bokuchava, NIM A 1037, 166917 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166917>



НЕЙТРОННЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ РЕАКТОРА ИР-8: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Н. А. Демьянова, П. А. Борисова, Д. С. Куняев

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

*E-mail: Demyanova_NAI@nrcki.ru

Реактор ИР-8 – самый «долгоживущий» эксплуатирующийся на мощности исследовательский реактор в России и по состоянию оборудования один из самых современных [1]. Исследовательский реактор ИР-8 является источником нейтронов для созданного на его базе нейтронного исследовательского комплекса (НИК ИР-8). В НИК ИР-8 проводят экспериментальные исследования с применением рассеяния нейтронов для различных областей науки, в том числе для решения следующих фундаментальных и прикладных задач:

- исследование кристаллической и магнитной структуры твердых тел;
- исследование твердого тела в экстремальных условиях;
- исследование напряженно-деформированного состояния материалов;
- исследование внутреннего строения объектов, в том числе их микроструктуры.

Сотрудники НИК ИР-8 в течение последних лет учувствуют в реализации мероприятий, направленных на совершенствование системы работы с пользователями и расширение экспериментальных возможностей исследовательского оборудования, включающие в себя:

- обеспечение информационной доступности и оптимизации пользовательского интерфейса на портале заявок по предоставлению пучкового времени;
- развитие исследовательской инфраструктуры НИК ИР-8, в том числе, создание новых нейтронных станций на источнике холодных нейтронов.

Проведение перечисленных выше мероприятий, в первую очередь ввод в эксплуатацию новых нейтронных станций (спектрометра малоуглового рассеяния, дифрактометра, рефлектометра на поляризованных нейтронах), повысит экспериментальные возможности НИК ИР-8, что позволит расширить научную программу нейтронных исследований в НИЦ «Курчатовский институт».

1. М.В. Ковальчук, В.И. Ильгисонис, Я.И. Штрэмбах и др. ВАНТ сер. Физика ядерных реакторов 3, 41 (2017).

ПОРОШКОВЫЙ ДИФРАКТОМЕТР ВЫСОКОЙ СВЕТОСИЛЫ D3

К. А. Дрожзов*, И. В. Голосовский

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

*E-mail: drozhzhov_ka@pnpi.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.

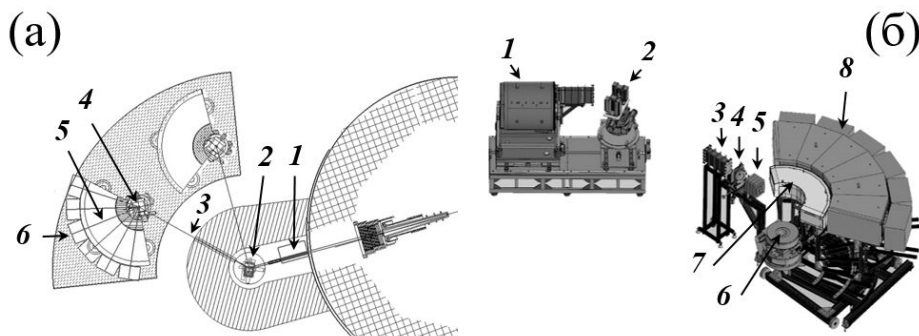


Рис. 1. Схема порошкового дифрактометра D3 на реакторе ПИК (а): 1 – “in-pile” коллиматор с расходимостью α_1 , 2 – КМ с мозаичностью η , 3 – угловая расходимость после КМ α_2 , 4 – образец, 5 – угловая расходимость перед детектором α_3 , 6 – регистрирующий элемент. 3D-изображение (б). Защита КМ не показана. 1 – “in-pile” коллиматор, 2 – сменный монохроматор (НОРG₀₀₂) и Ge₃₁₁), 3 – вакуумный кожух, 4 – диафрагма и монитор пучка, 5 – PG-фильтр, 6 – узел образца, 7 – радиальный осциллирующий коллиматор, 8 – позиционно-чувствительный детектор

Монохроматизация первичного пучка обеспечивается фокусирующим в вертикальной плоскости кристаллом-монохроматором, который размещается в блоке защиты (Рисунок 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 движутся как единое целое относительно оси поворота кристалла-монохроматора. Таким образом, дифрактометр может занимать две позиции относительно кристалла-монохроматора.

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-монохроматора HOPG (002) и Ge (115/113), при этом получаем рабочие длины волн (таблица 1).

Таблица 1. Рабочие длины волн

Угол Монохроматора $2\Theta_M$	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

— Четыре входных соллеровских коллиматора с разной расходимостью ($20'$ 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 126 (6 по горизонтали и 21 по вертикали) гелиевых, линейных позиционно-чувствительных счетчиков. Предполагаемое разрешение данного ПЧД в горизонтальной плоскости 2.5 мм, в вертикальной плоскости 8 мм.

КОНЦЕПЦИЯ ИСТОЧНИКА УХН НА ИМПУЛЬСНОМ РЕАКТОРЕ

А. И. Франк¹, Г. В. Кулин^{1*}, В. А. Курылев², А. А. Попов¹, М. А. Захаров¹

¹Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия

²Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

*E-mail: kulin@jinr.ru

С момента открытия УХН в [1] в мире появился целый ряд интенсивных источников УХН и ведется сооружение еще нескольких из них. В Дубне источник УХН отсутствует, что в значительной степени связано с особенностями реактора ИБР-2М. Его средняя мощность 2 МВт относительно мала для создания источника УХН непрерывного действия. Однако импульсный поток тепловых нейтронов этого реактора очень велик, поскольку интервал между импульсами в сотни раз превышает их длительность.

По-видимому, единственной возможностью создания достаточно интенсивного источника УХН на пульсирующем реакторе умеренной мощности является осуществление идеи Шапиро об импульсном наполнении ловушки для УХН [2], в сочетании с принципом временной фокусировки нейтронов [3]. О первом опыте практической реализации этой идеи сообщалось в [4].

В последнее время идея импульсного наполнения ловушки УХН является предметом интенсивного обсуждения в литературе. В недавних работах [5,6] анализировались некоторые подходы к временной фокусировке нейтронов и методы замедления более быстрых, так называемых очень холодных нейтронов (ОХН) до энергий, характерных для УХН. В работе [7] было показано, что при использовании флиппера-замедлителя с достаточно сильным магнитным полем, результирующий поток УХН должен иметь выраженную импульсную структуру даже в отсутствии временной линзы.

В работе рассмотрена концепция источника ультрахолодных нейтронов (УХН), на пульсирующем реакторе основанная на сочетании магнитной временной линзы и магниторезонансного устройства, замедляющего нейтроны. Возможная схема источника представлена на рисунке 1.

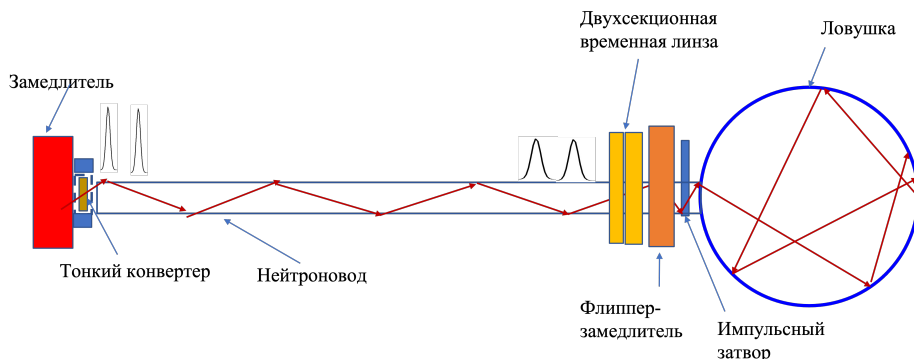


Рис. 1. Возможная схема источника УХН на импульсном реакторе периодического действия

Предлагается использовать изначально нейтроны со скоростями порядка 20 м/с с последующим их замедлением флиппером-замедлителем до скоростей УХН, способ-

ных удерживаться в ловушке. Извлечение нейтронов с большими, чем у УХН скоростями из замедлителя - конвертора, обеспечивает лучшие условия транспортировки нейтронов и позволяет применять более эффективный конвертор. Роль временной линзы, воздействующей по заданному временному закону на скорость нейтронов, и синхронизированной с источником, состоит в частичной компенсации дисперсии времени, возникающей после замедления нейтронов во флиппере-замедлителе. Последнее позволяет сформировать достаточно узкий временной импульс на входе в ловушку. Принцип действия временной линзы основан на изменении энергии нейтронов при их прохождении через область с однородным, меняющимся во времени магнитным полем [8].

Приводятся оценки ожидаемой плотности нейтронов в ловушке для фактора выигрыша конвертера $G=1$. При этом при использовании современного конвертера, например, на основе твердого дейтерия sD_2 вполне можно ожидать величину G порядка 100-1000.

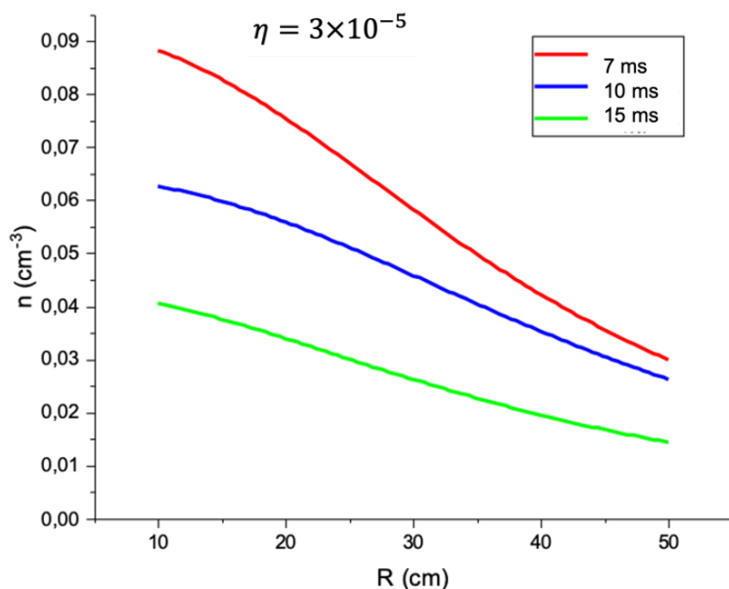


Рис. 2. Результаты расчета потока и плотности УХН в сферической ловушке в зависимости от ее радиуса при $G=1$. Кривые приведены для разных величин длительности импульса на входе в ловушку

Предложенная концепция открывает возможность к созданию в ОИЯИ источника УХН с параметрами, соответствующими современному мировому уровню.

1. В.И. Луциков, Ю.Н. Покотиловский, А.В. Стрелков, Ф.Л. Шапиро, Письма в ЖЭТФ 9 (1), 40 (1969).
2. Ф.Л. Шапиро, ЭЧАЯ 2 (4), 975 (1971).
3. A.I. Frank, R. Gähler. Phys. At. Nuclei 63, 545 (2000).
4. Y. Arimoto, P. Gertenbort, S. Imajo et al. Phys. Rev. A 86, 023843 (2012).
5. А.И. Франк, Г.В. Кулин, Н.В. Реброва, М.А. Захаров. ЭЧАЯ 53, 33 (2022).
6. В.В. Несвижевский, А.О. Сидорин. Письма в ЭЧАЯ 19, 162 (2022).
7. А.И. Франк, Г.В. Кулин, М.А. Захаров. Препринт ОИЯИ РЗ-2022-66, Дубна (2022).
8. L. Niel, H. Rauch, Z. Phys. B – Condensed Matter 74, 133 (1989).

НЕЙТРОННЫЙ ДИФРАКТОМЕТР ДН-6 ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

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

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

* E-mail: lukin@jinr.ru

Немалое внимание в области физики твердого тела уделяется исследованиям влияния высокого давления на кристаллическую и магнитную структуру материалов, поскольку давление является мощным инструментом непосредственно управляющим структурой и физическими свойствами исследуемых веществ. На текущий момент в мире существует всего несколько нейтронных центров с установками, позволяющими проводить исследования кристаллической и магнитной структуры материалов при высоких давлениях. Достижимые давления на этих установках ограничены значением в 20 ГПа, в то время как источники синхротронного излучения уже позволяют исследовать структуру соединений при давлениях свыше 10 МБар. Это обстоятельство связано с малой яркостью нейтронных источников по сравнению с источниками синхротронного излучения. При этом нейтронные исследования имеют ряд преимуществ, таких как возможность прямого изучения магнитной структуры, определения позиций легких атомов.

С целью расширить возможности нейтронной дифракции при высоком давлении был спроектирован и создан нейтронный дифрактометр ДН-6, расположенный на 6 канале импульсного реактора ИБР-2 ОИЯИ. Благодаря высокой светосиле канала, современному нейтронному каналу, оканчивающемуся фокусирующей секцией, удалось получить интегральный поток $3 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ на образце. Широкий телесный угол детекторов позволил уменьшить время эксперимента, а совместно с высоким потоком дал возможность исследовать малые объемы образца (до 0.01 мм^3), что в свою очередь сделало доступным использование камер с алмазными наковальнями, позволяющими получать давления до 50 ГПа.

Описаны технические узлы, главные параметры и особенности данного дифрактометра. Представлен краткий обзор полученных результатов.

**ИСТОЧНИК УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ
СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ ДЛЯ РК ПИК***А. П. Серебров, В. А. Лямкин**

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

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

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ создается высокоинтенсивный источник ультрахолодных нейтронов (УХН) на основе сверхтекучего гелия для научных исследований в области фундаментальной физики. 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 $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. За фланцем канала будет расположена носовая часть источника УХН, в состав которой входят: графитовый замедлитель, низкотемпературный предзамедлитель и конвертор нейтронов из сверхтекучего гелия.

Новый источник УХН на РК ПИК будет достигать плотности $2.2 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ на выходе из каземата реактора ПИК [1]. Разработанная система ультрахолодных нейтроноводов сможет обслуживать пять экспериментальных установок. На начальном этапе, источник УХН планируется оснастить уже имеющимися в ПИЯФ экспериментальными установками: спектрометром ЭДМ и установками по измерению времени жизни нейтронов (с гравитационной и магнитной ловушкой).

Для данного источника УХН была спроектирован и реализован уникальный технологический криогенный комплекс для работы со сверхтекучим гелием в условиях реакторной установки. Комплекс включает в себя оборудование для получения температур вплоть до 1 К и отвод теплопритоков от сверхтекучего гелия в количестве до 60 Вт. В процессе предварительных испытаний на данном оборудовании были получен изотопно-чистый гелий-4, очищенный от компоненты, поглощающей нейтроны – изотоп гелий-3. В текущий момент проходят полномасштабные испытания всего технологического комплекса для отработки режимов работы источника УХН и получения эксплуатационного опыта.

МЕТОД ОПОРНОГО СЛОЯ Gd ДЛЯ СЛУЧАЯ ДВУХ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Е. С. Ницова^{1}, Ю. А. Саламатов¹, Е. А. Кравцов^{1,2}*

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

²Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

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

С самых первых применений нейтронной рефлектометрии для исследования структуры конденсированных сред возникла существенная проблема – отсутствие информации о фазе комплексной амплитуды отражения, что приводит к неоднозначности в интерпретации рефлектометрического эксперимента. С тех пор было предложено несколько способов решения данной проблемы. Это и математические методы [1], основанные на особых соотношениях модуля и фазы, и методы, подразумевающие специальную постановку эксперимента: изменение отдельных частей профиля [2] применение аномального рассеяния [3] и поглощения [4], использование опорного слоя [5-6].

Метод опорного слоя был успешно модернизирован посредством использования гадолиния (длина рассеяния Gd зависит от длины волны нейтронов) и применен для исследования магнитных металлических структур [7] на времяпролетных рефлектометрах. На поверхности исследуемого образца формируется опорный слой с известными характеристиками, содержащий гадолиний. При измерении интенсивности отражения при трех различных углах падения от такой комбинированной структуры можно однозначно определить амплитуду отражения исследуемой части образца [6].

Знание комплексной амплитуды отражения даёт возможность модельно-независимого расчёта потенциалов взаимодействия, как ядерного, так и магнитного.

Не всегда имеется возможность проведения трёх экспериментов, особенно в случае монохроматических инструментов – конфигурация монохроматоров и фильтров может допускать использование только двух длин волн без существенной перенастройки прибора. Кроме того, времени, выделенного на эксперимент, может не хватить на три полноценных измерения. В этом случае можно обойтись получением двух рефлектометрических кривых, математический аппарат их обработки станет иным [5]. В результате будут получены две комплексных амплитуды отражения, у одной из которых нет физического смысла. Выбор правильного решения осуществляется на основе априорной информации об образце.

Используя формализм оптических матриц, можно показать, что амплитуда отражения некоторой системы лежит на окружности в комплексной плоскости, центр и радиус которой могут быть выражены через элементы полной оптической матрицы для этой системы [6]. Тогда алгоритм определения амплитуды отражения по трём измерениям сводится к поиску точки пересечения трёх окружностей. Такая точка, если существует, может быть только одна, поэтому три измерения позволяют определить искомую комплексную функцию однозначно. В случае двух измерений необходимо найти точки пересечения двух окружностей. Таких точек, в общем случае, две, отсюда и неоднозначность решения.

Определение амплитуды отражения для каждого значения волнового числа q происходит независимо. Поэтому решения – зависимости модуля и фазы от q – оказываются «перемешанными». Для их разделения используется алгоритм сортировки точек,

требующий гладкости искомых функций. Определить «правильное» решение проще всего путём моделирования модуля амплитуды отражения по номинальным параметрам – модельная кривая будет близка по форме и частоте осцилляций к «правильной». В случае сомнений можно рассчитать потенциалы взаимодействия для обоих случаев и определить «правильное» решение уже из их анализа.

Предлагаемый подход к реализации метода опорного слоя Gd по двум рефлектометрическим экспериментам апробирован на модельных численных расчётах, на примере простой системы Ti(90 Å)/V(20 Å)/Gd(50 Å)/V(20 Å). На рисунке 1 представлены два полученных решения (а – модули амплитуд отражения, б – фазы). «Правильным» здесь является решение 1, поскольку форма и частота осцилляций соответствуют однослойной системе и номинальной толщине Ti(90 Å). Это же можно установить и при помощи моделирования. «Неправильное» решение 2, по грубой оценке, соответствует многослойной системе с большей общей толщиной.

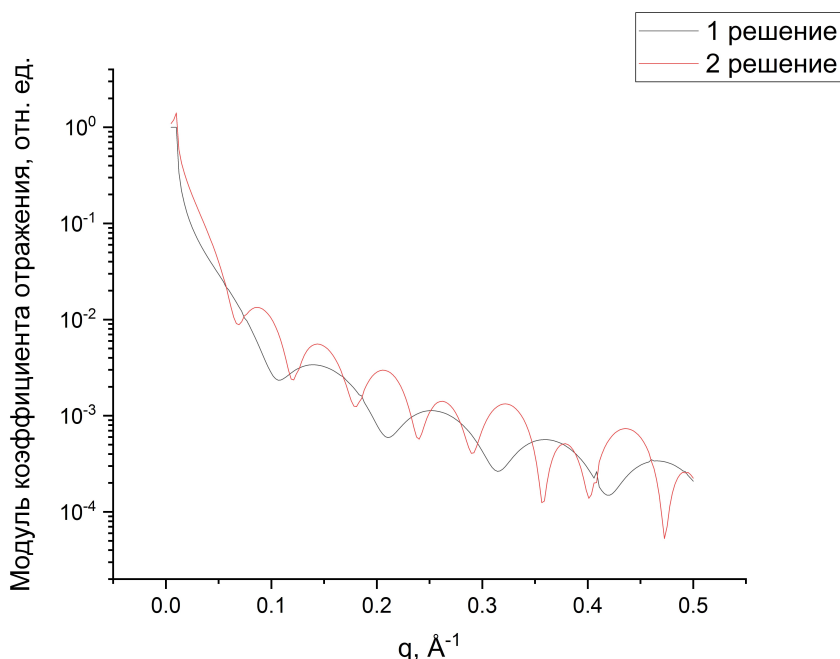
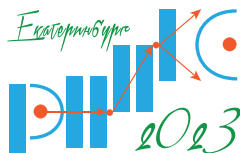


Рис. 1. Два возможных решения при определении комплексной амплитуды отражения методом опорного слоя Gd по двум экспериментам (а – модули, б – фазы)

Показано, что в случае невозможности провести три рефлектометрических измерения для реализации метода опорного слоя Gd, достаточно будет и двух измерений. Модуль и фаза комплексной амплитуды отражения будут в этом случае определены неоднозначно – получим два математически равноценных решения, но одно не будет иметь физического смысла. Решение, соответствующее реальным характеристикам исследуемого образца должно быть выбрано исходя из априорной информации или на основе результатов других экспериментов.



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема “Спин” 122021000036-3) и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2022-830 от 27 мая 2022 г. (продолжение Соглашения № 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021 г.).

1. M.V. Klibanov, P.E. Sacks, J. Math. Phys. 33, 3813 (1992).
2. P Poloucek., U. Pietsch, T. Geue, C. Symietz, G. Brezesinski, J. Phys. D: Appl. Phys. 34, 450 (2001).
3. M.K.Sanyal, S.K. Sinha, A. Gibaud, K.G. Huang, B.L.Cavalho, M. Rafailovich, M. Sokolov, X. Zhao, W. Zhao, Europhys. Lett. 21, 691(1993).
4. A.Y. Nikulin, A.W. Stevenson, H. Hashizume, Phys. Rev. B. 53, 8277(1996).
5. C.F. Majkrzak, N.F. Berk, U.A. Perez-Salas, Langmuir. 19, 7796 – 7810 (2003).
6. V.O.de Haan, A.A. van Well, P.E. Sacks, S. Adenwalla, G.P. Felcher, Phys. B 221, 524 (1996).
7. Е.С. Никова, Ю.А. Саламатов, Е.А. Кравцов, В.В. Устинов, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 9, 9–12 (2021).

ВЫСОКИЕ ДАВЛЕНИЯ В НЕЙТРОНОГРАФИИ

Р. А. Садыков^{1,2}

¹Институт ядерных исследований РАН, Москва, Троицк, Россия

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

*E-mail: rsadvkov@inr.ru

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. В настоящее время ряд нейтронных центров исследования конденсированных сред имеют в своей структуре подразделения обеспечивающие нейтронографические установки данного центра криостатами (LT), криомагнитами (LT,H) устройствами высокого давления (HP) и их эксплуатацию.

Важным моментом в экспериментах и расчетах при использовании давления представляется определения самого давления, его гидростатичности или квазигидростатичности и их пределов при использовании жидкой среды давления [1].

В докладе будут приведены конструкции различных наших камер поршень-цилиндр и результаты исследований некоторых конденсированных сред одновременно при LT, H и HPressure методами дифракции, неупругого и малоуглового рассеяния нейтронов [2,3]. При этом необходим правильный выбор сочетания ядерно-физических свойств (сечения нейтронных рассеяний и радиоактивная активация) и физико-механических свойств (немагнитн., твердость, упругость и пределы разрушения) материалов для камер высокого давления. Приводятся первые опытные рекомендации по развитию и оптимизации устройств высокого давления, а также выбор и применение различных материалов для устройств высокого давления.

Это позволило, в частности, создать 3-х слойную композитную КВД: Д16Т-В95Т-кален. Сталь 45ХМНФА и значительно увеличить предел давления до 16 кбар для неупругого рассеяния нейтронов [4].

В настоящее время проведены и ряд экспериментов исследования геликоидальных магнитных структур с использованием наковален Тороид и сапфировых наковален.

1. V.A. Sidorov and R.A. Sadykov, J. Phys.: Condens. Matter 17 (2005).
2. R.A. Sadykov, Th. Strassle, A. Podlesnyak, L. Keller, B. Fak, J. Mesot IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 941 (2017).
3. Ravil Sadykov, Catherine Pappas, Lars J. Bannenberg, Robert M. Dalgliesh, Peter Falus, Christopher Goodway and Eddy Lelièvre-Berna, Journal of Neutron Research 20 (2018).
4. M.E. Zayed, Ch. Rüegg, J. Larrea, R. A. Sadykov, Nature Physics volume 13, pages 962–966 (2017).



НЕЙТРОННЫЕ ИСТОЧНИКИ НА ОСНОВЕ СИЛЬНОТОЧНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ПРОТОНОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

С. Ф. Сидоркин, А. А. Алексеев, Э. А. Коптелов, А. В. Фещенко, Л. В. Кравчук

Институт ядерных исследований РАН, г. Троицк, Россия

* E-mail: sidorkin@inr.ru

Приводится информация об основных физико-технических особенностях нейтронных источников на основе сильноточных протонных ускорителей, в том числе в сравнении с источниками нейтронов других типов.

Излагаются основные проектные и конструктивные решения, анализируются особенности мишеней, замедлителей, физической защиты и нейтроноводов, приводятся оценки параметров пучков нейтронов на поверхности замедлителей и предложены возможные меры по повышению плотности потока нейтронов.

Представлено описание импульсных источников нейтронов и сопутствующей инфраструктуры нейтронного комплекса ИЯИ РАН: импульсного источника тепловых нейтронов ИН-06, источника эпитепловых и промежуточных нейтронов РАДЭКС и 100 т спектрометра по времени замедления в свинце – СВЗ-100.

НЕЙТРОННЫЙ РЕФЛЕКТОМЕТР HARMONY

В. Г. Сыромятников^{1,2*}, В. А. Матвеев¹

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

²СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

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

В последнее время нейтронная рефлектометрия получила широкое распространение в качестве неразрушающего метода исследования одиночных слоев, многослойных систем, поверхностей и межслойных границ при решении задач широкого спектра на стыке различных наук (химии поверхности полимеров, физики тонких пленок и многослойных наноструктур и других наук) [1]. Рефлектометрия поляризованных нейтронов используется для исследований не только ядерной, но и магнитной структуры образца [2].

В докладе представлен нейтронный рефлектометр HARMONY, создаваемый для реактора ПИК. Данный рефлектометр предназначен, как для исследования объектов физики мягкой материи (в т. ч. жидкостей, жидких кристаллов, мембран, полимеров, сложных растворов и т.д.), так и для исследования магнитных и немагнитных твердотельных наноструктур. Основным методом работы рефлектометра HARMONY - времяпролетный. В данном приборе используется вертикальная плоскость рассеяния. Для данного рефлектометра основными направлениями исследования являются: границы раздела воздух/жидкость, жидкость/твердое тело и твердое тело/воздух, динамические системы, диффузное (незеркальное) рассеяние, магнитные тонкие пленки.

Схема нейтронного рефлектометра HARMONY представлена на Рисунке 1. Для проведения данных исследований на рефлектометре предусмотрено два вида измерений образца: а) отражение от поверхности образца сверху; б) отражение от поверхности образца снизу. В докладе приведены основные физические параметры нейтронного рефлектометра HARMONY.

Для решения поставленных задач требуются следующие режимы работы прибора:

- 1) Рефлектометрия поляризованных нейтронов в режиме зеркального и незеркального рассеяния с поляризационным анализом;
- 2) Рефлектометрия неполяризованных нейтронов в режиме зеркального и незеркального рассеяния;
- 3) Малоугловое рассеяние в скользящей геометрии (GISANS) возможно использовать как опцию;
- 4) Использование пучков, имеющих спектральные интервалы разной ширины, включая узкие линии со степенью монохроматизации $\Delta\lambda/\lambda \sim 0.01 - 0.03$, как с поляризованными, так и с неполяризованными нейтронами с регистрацией зеркального и диффузно рассеянных пучков.

Аналогом рефлектометра HARMONY является известный высокопоточный времяпролетный нейтронный рефлектометр FIGARO (ILL, Grenoble, France).

Уникальность HARMONY состоит в том, что в отличие от FIGARO в нем будет использован полный поляризационный нейтронный анализ с использованием в качестве анализатора всеерного многоканального анализатора поляризации [3] и в качестве поляризатора, расположенный в узле формирователя пучка, набор из двойных многослойных поляризующих суперзеркал и монохроматоров.

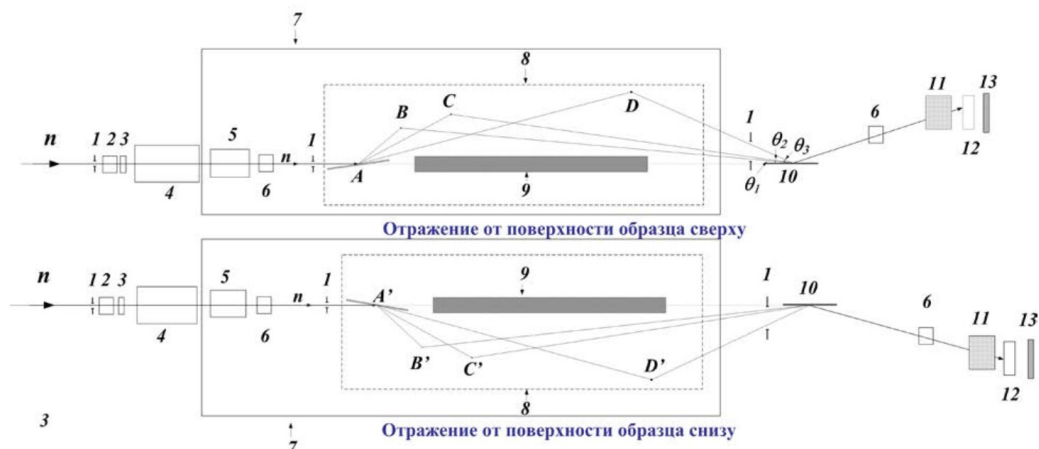
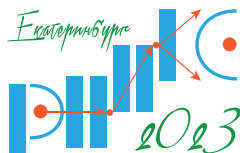


Рис. 1. Схема нейтронного рефлектометра HARMONY для двух видов измерения образца: отражение от поверхности образца сверху и отражение от поверхности образца снизу. А, В, В', С, С', D, D' – отклоняющие немагнитные суперзеркала. 1 – диафрагма; 2 – заслонка пучка; 3 – монитор; 4 – прерыватель нейтронного пучка; 5 – формирователь пучка; 6 – спин-флиппер; 7 – фокусирующий нейтронотвод; 8 – суперзеркальный отклонитель пучка; 9 – ловушка прямого пучка; 10 – узел образца; 11 – широкоапертурный веерный анализатор поляризации, рассеянного на образце пучка; 12 – позиционно-чувствительный двухкоординатный детектор; 13 – ловушка пучка после детектора

1. В.И. Боднарчук, А.П., Булкин, Е.А., Кравцов, Н.К. Плешанов, В.Г. Сыромятников, В.А. Ульянов, Кристаллография, 2022, т. 67, № 1, с. 57.
2. Ю.В. Никитенко, В.Г. Сыромятников, Рефлектометрия поляризованных нейтронов, М.: Физматлит, 2013. 224 с.
3. V.G. Syromyatnikov, V.A. Ulyanov, V. Lauter, V.M. Pusenkov, H. Ambaye, R. Goyette, M. Hoffmann, A.P. Bulkin, I.N. Kuznetsov and E.N. Medvedev, Journal of Physics: Conference Series, 2014, 528, p. 012021.



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

→ → → → Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ НЕЙТРОННЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА РЕАКТОРНОМ КОМПЛЕКСЕ ПИК

*В. В. Тарнавич**

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

*E-mail: tarnavich_vv@pnpi.nrcli.ru

Один из ключевых элементов программы по развитию синхротронных и нейтронных исследований и инфраструктуры в Российской Федерации, высокопоточный реактор ПИК станет уникальной базой научных исследований, проводимых с использованием нейтронов (фундаментальные свойства нейтрона, материаловедение, физика и техника реакторов, ядерная физика, нейтронная физика, физика конденсированного состояния).

Работы по оснащению реактора ПИК комплексом современного оборудования осуществляются в рамках проекта: «Создание приборной базы реакторного комплекса ПИК» (сроки выполнения 2019-2024 г.г.). В рамках проекта, в том числе, создается тридцать современных нейтронных установок для решения задач по физике конденсированного состояния. В комплекс установок по физике конденсированного состояния также войдут пять исследовательских нейтронных установок, введенных в эксплуатацию в декабре 2020 г. Экспериментальные работы на данных установках проводились на этапе перехода реактора ПИК на энергетический режим работы, предполагающий выход на тепловую мощность 10 МВт.

СПИН-ЭХО СПЕКТРОМЕТР SEM ПРИБОРНОЙ БАЗЫ РК ПИК

К. Ю. Терентьев*

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

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

Ограничением традиционной нейтронной спектроскопии является компромисс между интенсивностью и разрешением: чем лучше требуется разрешение по энергии, тем больше нейтронов, не удовлетворяющих высоким требованиям монохроматизации ($\Delta\lambda/\lambda \leq 0.03$), приходится выкидывать, тем ниже становится общая интенсивность пучка, и наоборот, чем выше интенсивность, тем хуже монохроматизация пучка, тем хуже становится разрешение по энергии.

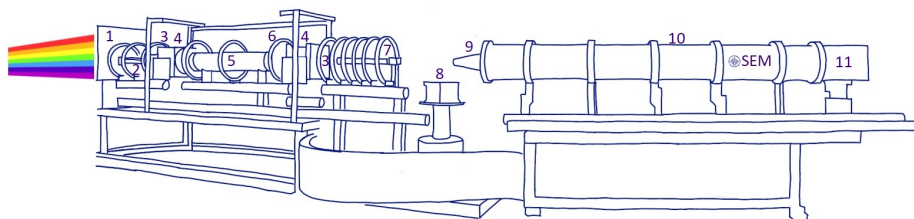


Рис. 1. Эскиз установки SEM. 1 — диафрагма, 2 — поляризатор, 3 — $\pi/2$ вращатель, 4 — резонансная катушка, 5 — фазовая катушка, 6 — катушки ведущего поля, 7 — анализатор, 8 — узел образца, 9 — вакуумный алюминиевый конус, 10 — вакуумная камера, 11 — двумерный позиционно-чувствительный детектор

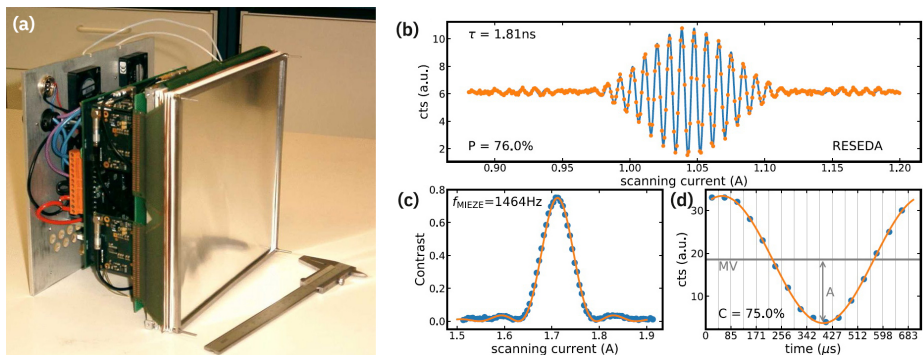


Рис. 2. (a) —Общий вид детектора CASCADE CDT CASCADE Detector Technologies GmbH, реализованный на установке REZEDA [3]. (b) —(d) — Сигнал при модуляции интенсивности. 1 (b) Синусоидальные колебания интенсивности в MIEZE происходят в режиме реального времени 1(c) огибающая группы спинового эха MIEZE в реальном пространстве для частоты модуляции $\Delta f = 1464$ Гц. Огибающая определяется через диапазон длин волн селектора. Боковые группы функции sinc2 хорошо воспроизведены. 1(d) колебания проявляются во временной области в отличие от NRSE [2]

Этого недостатка лишен метод спин-эхо спектроскопии, поскольку разрешение по энергии определяется главным образом величиной интеграла магнитного поля прецессии на его пути, а монохроматизация пучка может быть сколь угодно плохой (традиционно $0.1 \leq \Delta\lambda/\lambda \leq 0.25$), давая прирост в интенсивности на порядок и более.

В отличие от классической НСЭ методики методика MIEZE (Modulation of Intensity Emerging Zero Effort) [1], реализуемая на установке SEM, работает с модуляцией интенсивности вместо фазовой осцилляции, поскольку анализатор располагается по ходу нейтронного тракта перед образцом между вторым спин-флиппером и детектором.

Модуляция интенсивности записывается с помощью время-разрешающего детектора, использующего контраст в качестве сигнала.

В случае взаимодействия пучка нейтронов с образцом, время-зависимая интенсивность будет изменяться в соответствии с динамикой этого взаимодействия. Установка позволит исследовать образцы с сильной деполяризацией и материалы с магнитными свойствами.

Таблица 1. Основные параметры установки SEM

Характеристика	Значения
Диапазон используемых длин волн нейтронов	2.4 Å – 15 Å
Расходимость пучка	$\alpha \leq 15$ мрад
Сечение пучка	30 × 30 мм ²
Монохроматизация	$\Delta\lambda/\lambda = 10 - - - 17\%$
Энергетическое разрешение	$\Delta E = 1$ мэВ (для $\lambda_i = 12$ Å)
Диапазон времен релаксации	0.001 пс – 10 нс
Диапазон переданных импульсов	0.01-1.5 Å ⁻¹
Максимальное поле прецессии	0.15 Тл
Диапазон резонансных частот флипперов	1 Гц – 3.6 МГц
Максимальный интеграл по полю прецессии	0.5 Тл×м

1. J. Kindervater, N. Martin, W. Haufßler, M. Krautloher, C. Fuchs, S. Muhlbaue, J.A. Lim, E. Blackburn, P. Boni and C. Pfeleiderer, EPJ Web of Conferences 83, 03008 (2015).
2. M Köhli et al J. Phys.: Conf. Ser. 746 012003 (2015).
3. C. Franz, O. Soltwedel, C. Fuchs, S. Sdubert, F. Haslbeck, A. Wendl, J.K. Jochum, P. Вцni, C. Pfeleiderer Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 939 22–29 (2019).

ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ МНОГОСЕКЦИОННЫЙ ДИФРАКТОМЕТР «СФЕРА»

Р. А. Садыков, Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, В. С. Литвин, С. Н. Аксенов, Д. А. Бучный*

Институт ядерных исследований РАН, Москва, Троицк, 108840 Россия

*E-mail: dtrunov@inr.ru

Рассеяние нейтронов является ценным инструментом для изучения атомной и молекулярной структуры материалов. Нейтроны обладают уникальными свойствами, такими как отсутствие заряда и сильное сечение рассеяния, что делает их идеальными для изучения положения и движения атомов в материалах. Эксперименты по рассеянию нейтронов могут предоставить информацию о структуре решетки материала, магнитных и электронных свойствах и динамике. Возможность изучать материалы в атомном масштабе с помощью нейтронов имеет широкое применение в таких областях, как физика, химия, материаловедение и инженерия. Исследователи используют нейтроны для изучения всего, от новых сверхпроводников до биологических систем. Разработка мощных источников нейтронов и достижения в технологии детекторов позволили исследовать ранее недоступные режимы, что привело к новым открытиям и более глубокому пониманию поведения материи.

В рамках этой работы стояла цель создания современного времяпролетного многосекционного дифрактометра «СФЕРА», который будет использовать на источнике РА-ДЭКС ММФ ИЯИ РАН, а также перспективное его использование в составе установок расположенный на проектируемых компактных источниках нейтронов. Дифрактометр «СФЕРА» должен быть многофункциональным, иметь высокое разрешения и высокую эффективность регистрации нейтронов.

На первом этапе стояла задача смоделировать параметры детектора и определить оптимальную конфигурацию проектируемого дифрактометра[1].

На рисунке 1 изображена схема дифрактометра «СФЕРА». Дифрактометр сфера состоит из двух направляющих (5), закрепленных на общем основании, параллельных оси пучка нейтронов (1). По направляющим перемещаются кольцевые детекторы (2) с помощью независимых шаговых двигателей. Каждое кольцо содержит защиту от фоновых нейтронов из борсодержащего материала (2) и прямоугольные сцинтилляционные счетчики нейтронов (7) на внутренней стороне кольца, которые образуют правильный многогранник. Кольца имеют различный радиус для того, чтобы образец всегда оставался в прямой видимости, и имеют крепление (6) различной длины для крепления колец на двух направляющих. Также на оси пучка с помощью держателя (3) закреплен образец (4).

В качестве детекторов используются сцинтилляционные детекторы на основе кремниевого фотоумножителя и органического световода [2, 3]. Дифрактометр состоит из 156 детекторов, расположенных на 7 независимых кольцах. Каждый детектор имеет размер 5×50мм и содержит 3 слоя сцинтиллятора ZnS (Ag):LiF.

В работе описан процесс моделирования, проектирования и тестирования дифрактометра "СФЕРА".

Результаты получены при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования, соглашение №075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г. (внутренний номер 15. СИН.21.0021).

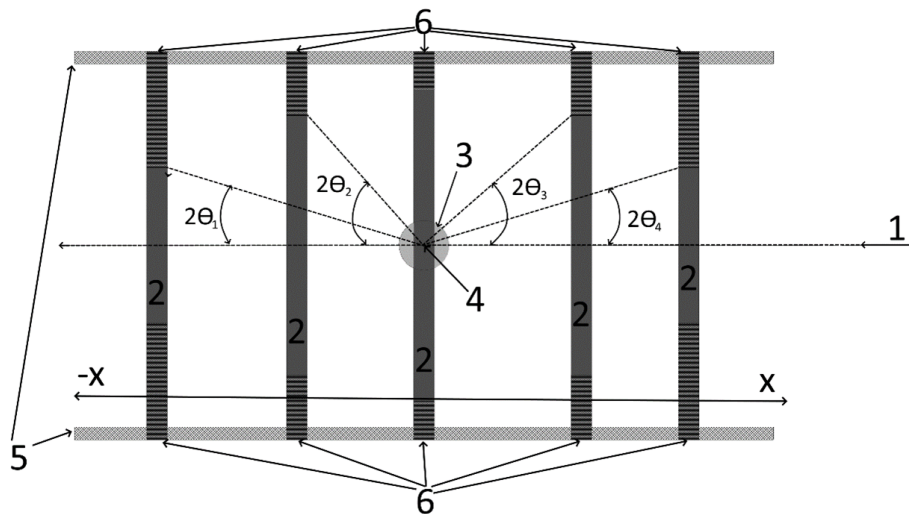


Рис. 1. Принцип работы сфера

1. Д. А. Бучный, В. С. Литвин, Д. Н. Трунов [и др.], Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2022. – № 12. – С. 38-47.
2. В. Н. Марин, Р. А. Садыков, Д. Н. Трунов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2018. – № 1. – С. 5-12.
3. Патент № 2782417 С1 Российская Федерация, МПК G01T 1/208. Устройство для регистрации излучения: № 2022105038: заявл. 25.11.2021; опубл. 26.10.2022 / Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, Е. В. Алтынбаев; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

**РАСЧЕТ КРИВОЙ КАЧАНИЯ ДВУХКРИСТАЛЬНОГО НЕЙТРОННОГО
СПЕКТРОМЕТРА НА КРИСТАЛЛАХ Ge И CdS В ГЕОМЕТРИИ
БРЭГГ-БРЭГГ И БРЭГГ-ЛАУЭ**

Й. Шмайссер^{1,2}, А. Н. Тюлюсов^{1,2}*

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

* E-mail: yokhan.schmeissner@itep.ru

Интересным интерференционным эффектом при дифракции нейтронных волн на сильнопоглощающих совершенных кристаллах является эффект аномального пропускания [1], характеризующийся в заметном пропускании нейтронной волны сквозь кристалл при углах падения, близких к брэгговскому. Для исследования данного эффекта используется схема двухкристального спектрометра, обладающая достаточной степенью монохроматичности волны и угловой дисперсией.

Важной характеристикой схемы двухкристального спектрометра в экспериментах по дифракции нейтронов является снятие инструментальной линии (кривой качания спектрометра без образца), в которой содержится информация о начальной и конечной расходимости пучка и его спектральной ширины. При отражении как рентгеновских, так и нейтронных волн от пары совершенных кристаллов используется аналитическое выражение для инструментальной линии, приведенное в монографии Комптона-Алиссона [2], которое имеет приближение, связанное с симметричной линейной зависимостью отражательной способности кристалла от энергии и угловой расходимости падающих нейтронов. Однако при энергии падающих нейтронов, близких к резонансному уровню поглощения ядра, требуется поправка к выражению, учитывающее нелинейный характер этой зависимости. Так для ядра Cd изменение длины волны от 1 до 2 ангстрем приводит к изменению сечения поглощения примерно в 1.7 раза, а от 0.2 до 0.4 ангстрем — в 245 раз.

С помощью решения системы волновых уравнений из теории динамической дифракции нейтронов [3] было получено аналитическое выражение, не требующее ограничений на характер зависимости сечения поглощения нейтронов от их длины волны.

В работе представлены расчетные кривые качания для спектрометрической схемы двухкристального дифрактометра из кристаллов Ge и CdS в геометрии Брэгг-Брэгг и Брэгг-Лауэ для диапазонов длин волн нейтронов, соответствующих слабому потенциальному и сильному резонансному поглощению. Приведено сравнение вида и формы кривых, рассчитанных по расширенному выражению, с экспериментальными кривыми, полученными на аналогичной кристаллической схеме [4].

Приведенная методика моделирования инструментальной линии поможет при планировании экспериментов на двухкристальных спектрометрах, когда материал кристаллов спектрографической схемы будет содержать ядра с резонансным уровнем вблизи используемой энергии нейтронов.

1. Ю. М. Каган, А. М. Афанасьев, ЖЭТФ, Т. 49, В. 5, 1504, (1966).

2. A. Compton, S. Allison, X-rays in theory and experiment. New York, D. Van Nostrand Company. Inc., (1935).

3. Ю. Г. Абов, Н. О. Елютин, А. Н. Тюлюсов, ЯФ, 65, 1989, (2002).

4. С. Ш. Шильштейн, В. А., Кристаллография, Т. 20, Вып. 5, 1096, (1975).

Секция 1.

Источники нейтронов, приборы и методы нейтронного эксперимента.

Детекторы нейтронов

**РАЗРАБОТКА ДЕТЕКТОРОВ ТЕПЛОВЫХ И ХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ
С КОНВЕРТЕРОМ ИЗ КАРБИДА БОРА В ЛНФ ОИЯИ**

В. И. Боднарчук^{1,2,3}, А. Г. Колесников^{1,2}*

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

²Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

³НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

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

В ЛНФ ОИЯИ создается центр разработки и изготовления детекторов тепловых нейтронов с конвертером из $^{10}\text{B}_4\text{C}$, для обеспечения станций нейтронного рассеяния в исследовательских центрах России, стран СНГ и других стран. Из-за ограниченного доступа к газообразному изотопу ^3He , который является наиболее удобным конвертером для детекторов тепловых и холодных нейтронов, цена на него очень высока и имеет тенденцию к дальнейшему росту, поэтому переход к детекторам, основанным на конвертере из $^{10}\text{B}_4\text{C}$ является вполне оправданным. Сечение захвата тепловых нейтронов ^{10}B составляет 0.7 от сечения ^3He (3840 барн / 5400 барн), что позволяет рассматривать его как подходящий конвертер для разработки детекторов нейтронов. Существенным фактором является то, что детекторы на основе ^{10}B имеют более высокое пространственное и временное разрешение. Но у детекторов с конвертером из карбида бора существует недостаток - низкая эффективность регистрации нейтронов, которая заметно уступает эффективности регистрации детекторов на основе ^3He . Техническим решением повышения эффективности является применение многослойной конструкции детектора. В этом случае при количестве слоёв более 30 можно добиться эффективности до 60 %. При этом оптимальная толщина каждого слоя составляет около 1 мкм. Другим техническим решением является установка конвертерного слоя под скользящим углом к падающим нейтронам, не превышающим 5° . В этом случае нейтрон движется в приповерхностном слое и совершает путь более, чем в 10 раз длиннее толщины слоя. Вероятность захвата увеличивается при сохранении возможности регистрации частиц распада. Расчёты и практический опыт зарубежных научных центров показывают, что чувствительность детекторов может быть доведена до 90 % от эффективности ^3He -детекторов. С 2017 года сотрудниками НЭОКС ИБР-2 совместно с Университетом «Дубна» ведутся работы по разработке технологии нанесения тонких пленок карбида бора, обогащённого по изотопу ^{10}B , на различные основания площадью до 400×1200 мм. В настоящее время в 119 корпусе ЛНФ ОИЯИ завершаются работы по созданию опытно-экспериментального участка (ОЭУ) изготовления современных детекторов нейтронов на основе конвертера из $^{10}\text{B}_4\text{C}$, выполняемые в рамках гранта Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-10-2021-115 от 13.10.2021).

ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ НЕЙТРОННЫЙ ДЕТЕКТОР НА ОСНОВЕ ПЛАСТИКОВОГО СВЕТОВОДА И КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ

Д. Н. Трунов^{1,2*}, В. Н. Марин^{1,2}, Т. И. Глушкова², Е. В. Алтынбаев², Р. А. Садыков¹,
С. Н. Аксенов¹

¹Институт ядерных исследований РАН, Москва, Троицк, 108840 Россия

²НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Гатчина, 188300 Россия

* E-mail: dtrunov@inr.ru

В работе описан новый метод определения координаты в позиционно-чувствительных детекторах с органическим световодом и кремниевыми фотоумножителями. Метод отличается от использовавшихся ранее спектросмещающих волокон или использования матрицы из светочувствительных элементов. Данный метод основан на поглощении фотонов в объеме световода и уменьшении количества фотонов. В зависимости от длины пробега меняется количество фотонов, падающих на поверхность кремниевого фотоумножителя. Произведено моделирование оптических параметров [1] одномерного и двухмерного позиционно-чувствительного детектора и показано влияние покрытия световода на количество света. Сделано описание реализации метода определения координаты. Описана методика получения карт соотношений интенсивностей и особенности их использования для определения координаты. Описаны основные особенности изготовления данного типа детекторов и их влияние на разрешение итогового детектора [2].

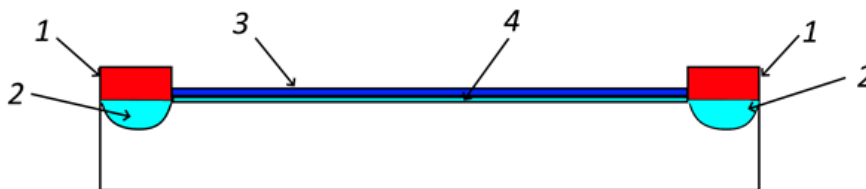
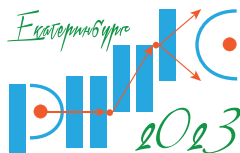


Рис. 1. Блок-схема детектора. 1 — SiPM, 2 — линза типа рыбий глаз, заполненная клеем, 3 — сцинтиллятор ZnS: LiF, 4 — клеевая прослойка

На рисунке 1 показана блок-схема детектора, используемого для тестирования параметров. В тесте координаты измерялись по всей длине сцинтиллятора с шагом 1 мм, с использованием коллимированного источника ^{252}Cf с щелью размером 1 мм×20 мм непосредственно перед детектором. Расстояние источник – детектор около 30 см. Между щелью и источником нейтронов был установлен замедлитель толщиной 10 см из D_2O . Приведены измерения 2-х типов детекторов: на основе SiPM Sensl C с количеством микроячеек 4774 и диффузионным отражателем, и на основе Hamamatsu s12572-015p с количеством ячеек 40000 и с/без диффузионным отражателем.



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

● → ● → ● → Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

Сигналы SiPM записываются цифровым диджитайзером Caen DT5720 с частотой дискретизации 250 М_{выб}/с. Анализ координаты производится с использованием только амплитудной характеристики. Получена зависимость амплитуды от расстояния регистрирования нейтрона. Произведен анализ полученных данных и зависимость амплитуды от типа кремниевого фотоумножителя.

Результаты получены при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования, соглашение №075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г. (внутренний номер 15. СИИ.21.0021).

1. Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, Р. А. Садыков [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2023. – № 4. – С. 71-76. – DOI 10.31857/S1028096023040209.
2. T. I. Glushkova, D. N. Trunov, V. N. Marin et. Al., Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2023, Vol. 17, No. 1, pp. 130–134.

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ДОЗИМЕТРИИ

Д. А. Акулов^{1*}, М. О. Калинин^{1*}, Р. М. Абашев^{1,2*}, А. И. Сюрдо^{2*}, Д. Г. Келлерман^{1*}

¹Институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

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

*E-mail: kellerman@ihim.uran.ru

Активное использование радиоактивных материалов и ионизирующих излучений в медицине, энергетике, научных исследованиях делают необходимым дозиметрический контроль окружающей среды, населения и технического персонала. В то время как сцинтилляционные детекторы, люминесцируют непосредственно под действием ионизирующего излучения, люминесцентный отклик дозиметрических материалов требует дополнительной термической или оптической стимуляции и имеет кумулятивный характер. Эффективность работы дозиметрического устройства в первую очередь определяется свойствами люминофора.

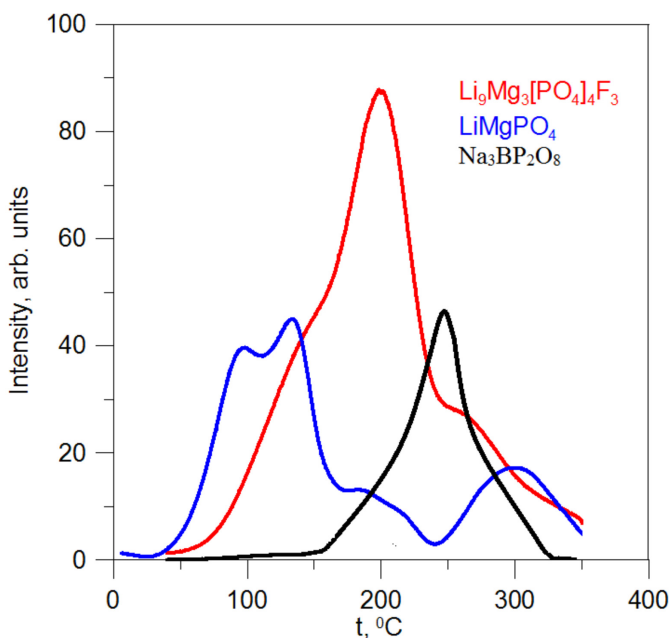
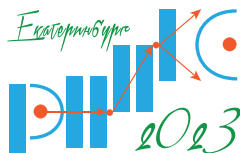


Рис. 1. Кривые ТЛ после рентгеновского облучения (3 Гр).

В данной работе в качестве оптических матриц для термолюминесцентных (ТЛ) дозиметрических устройств, чувствительных к рентгеновскому, нейтронному и другим видам ионизирующего излучения, рассматриваются кристаллические фосфаты, фторфосфаты, бораты и борофосфаты, такие как LiMgPO₄, Li₉Mg₃[PO₄]₄F₃, Na₃BP₂O₈. Обогащение матриц изотопами ⁶Li и ¹⁰B фазы являются перспективным подходом при создании нейтронных запоминающих люминофоров.



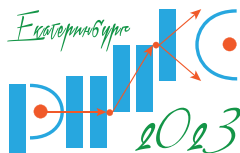
КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

Для рассматриваемого круга сложных соединений характерен собственный значительный термолюминесцентный отклик (Рис. 1), который связан, как это установлено в работе, с присутствием структурных дефектов, энергетические уровни которых расположены в запрещенной зоне.

Показано, что дозиметрический отклик может быть многократно усилен за счет оптимизации морфологии и допирования, в первую очередь редкоземельными элементами. Обнаружено, что все РЗ можно разделить на две группы: входящие в первую группу высвечиваются сами, и их спектры состоят из узких линий, отражающих $4f - 4f$ переходы, а входящие во вторую усиливают люминесценцию матрицы, при этом эффективность механизмов сопоставима.

Настоящая работа поддержана Российским Научным Фондом (№ 20-13-00121-П).



ДЕТЕКТОР НЕЙТРОНОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ STRAW-ТРУБОК И КОНВЕРТЕРА ИЗ $^{10}\text{B}_4\text{C}$

Т. Л. Еник^{2,3}, А. О. Колесников^{1*}, А. Г. Колесников^{2,4}, В. И. Боднарчук^{2,4}, Н. В. Горбунов^{3,4}

¹Лаборатория ядерных проблем, Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

²Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

³Лаборатория высоких энергий, Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

⁴Федеральный государственный университет «Дубна», г. Дубна, Россия

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

Изготовление Straw трубок для детекторов является сложным технологическим процессом, требующим высокой точности и специального оборудования. Для изготовления Straw трубок используются специальные материалы и оборудование. Процесс изготовления Straw трубок включает в себя ряд этапов: формирование материала в виде трубки, монтаж электродов и заполнение газом. Применение материала с тонким слоем конвертера нейтронов из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ обеспечивает регистрацию нейтронов. Диаметр трубки задаёт пространственное разрешение. Приведена последовательность сборки, конструкция и результаты испытаний Straw детекторов нейтронов. и требует постоянного совершенствования и развития технологий. Разработка Straw детекторов нейтронов является перспективным направлением развития современных детекторных технологий

ДЕТЕКТОР НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПРОВОЛОЧНОЙ КАМЕРЫ С КОНВЕРТЕРОМ ИЗ $^{10}\text{B}_4\text{C}$

Б. Ж. Залиханов¹, А. Г. Колесников^{2,3*}, В. Ю. Егоров^{2,3}, В. В. Терещенко¹,
С. В. Терещенко¹, В. И. Пунтус¹

¹Лаборатория ядерных проблем, Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия
²Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединённый институт ядерных исследований,
г. Дубна, Россия

³Федеральный государственный университет «Дубна», г. Дубна, Россия

*E-mail: torgcentr2004@mail.ru

В настоящее время газовые проволочные координатные детекторы стали неотъемлемой частью экспериментальных установок, на которых проводятся исследования по физике элементарных частиц. В Лаборатории ядерных проблем Объединённого Института Ядерных Исследований разработаны принципиально новые методы изготовления детекторов с чувствительной областью более $500 \times 500 \text{ мм}^2$, содержащих малое количество вещества на пути прохождения регистрируемых частиц. Конструкция детекторов основана на симметричных узкозазорных камерах (расстояние анод-катод 1.3 – 2.5 мм) с малым шагом между анодными проволочками (от 0.8 мм). Малое количество вещества обеспечивается применением входного окна и катодов из тонкой полимерной радиационно-стойкой плёнки. Однородность регистрационных характеристик такой камеры определяется в основном точностью расположения катодов и точностью расположения анодных проволок, которые решаются натяжением катодной плёнки и позиционированием с точностью 1 мкм. Узкозазорные камеры обладают особенностями в распределении электрического поля, которое сдвигает область лавинообразования на значительное удаление от анодной проволоки. Это позволяет исключить старение анода детектора за счёт уменьшения количества осаждаемых на анодную проволоку радикалов, которые удаляются продувом рабочего газа. Это важно, так как при узком зазоре необходимо применение рабочего газа на основе CF_4 с добавлением C_4H_{10} . Процессы в лавине отражают динамику её развития: разделение электронов по скоростям; электростатические колебания лавины в целом; укорочение длительности анодного сигнала; рост времени задержки индукции заряда на катоде в течение времени развития лавины; высокая скорость счёта в режиме большого газового усиления; наличие разной формы амплитудных распределений сигналов на аноде и катоде. Применение разработанных методов сборки узкозазорной камеры позволяет создавать высокоскоростные координатные детекторы, способные работать в интенсивных потоках регистрируемых частиц плотностью до 10^8 частиц/(с·см²) при временном разрешении $< 5 \text{ нс}$ с газовым усилением $\leq 10^5$. При газовом усилении $\geq 10^7$ скорость счёта достигает $5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$. Изготовлены опытные образцы детекторов нейтронов, собранные по описанной методике. Для регистрации нейтронов применён конвертер нейтронов из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$, нанесённый на алюминиевую фольгу толщиной 50 мкм. Тестовые испытания опытных образцов детекторов с чувствительной площадью $200 \times 200 \text{ мм}^2$ и различной толщины слоя конвертера показали хорошие характеристики как детекторов нейтронов, способных работать с временным разрешением $< 9 \text{ нс}$ при высоких потоках нейтронов. Применение электроники по канальной регистрации позволяет осуществлять координатную регистрацию $< 1 \text{ мм}$.

СКОРОСТНОЙ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ДЕТЕКТОР НЕЙТРОНОВ «MULTY-FOIL» НА ОСНОВЕ КОНВЕРТЕРА $^{10}\text{B}_4\text{C}$

Б. Ж. Залиханов¹, А. Г. Колесников^{2,3*}, В. И. Боднарчук^{2,3}, А. К. Курилкин²,
Н. В. Горбунов^{3,4}

¹Лаборатория ядерных проблем, Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

²Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

³Федеральный государственный университет «Дубна», г. Дубна, Россия

⁴Лаборатория высоких энергий, Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

*E-mail: torgcentr2004@mail.ru

В настоящее время многие научные исследовательские центры мира занимаются разработками новых детекторов нейтронов с применением в качестве конвертера медленных нейтронов материалов, альтернативных ^3He . Одним из немногих изотопов, которые можно использовать для этих целей является изотоп ^{10}B . Многие ведущие научные центры проводят интенсивные разработки новых детекторов на основе твердотельного конвертера $^{10}\text{B}_4\text{C}$. Продуктами реакции захвата нейтрона являются частицы ^4He и ^7Li , разлетающиеся практически в противоположные стороны. Чем толще слой конвертера, тем большее количество нейтронов с ним провзаимодействует. При этом, частицы ^4He и ^7Li , образуемые глубоко в толщине конвертера, могут поглотиться материалом конвертера, либо, испытав большие потери, выйти из слоя с энергиями, близкими к порогу регистрации. Длина пробега частицы ^4He в материале конвертера $^{10}\text{B}_4\text{C}$ составляет примерно 3.4 мкм, а ^7Li – 1,7 мкм. Оптимальная толщина одного слоя, обеспечивающая максимальную эффективность регистрации, для длины волны 1.8 - 10 Å, находится в пределах 2.5 мкм. В этом случае эффективность слоя для тепловых нейтронов достигает не более 5 - 8 %, в то время, как эффективность ^3He детекторов может достигать 60 – 95 %.

Одним из решений повышения эффективности является наклон слоя конвертера относительно направления движения нейтронов так, чтобы плоскость слоя конвертера находилась под малым углом α к направлению падения нейтронов. За счёт наклона увеличивается длина пути нейтронов в слое конвертера, что приводит к увеличению захвата нейтронов ядрами ^{10}B в конвертере, а значит, к большему выходу частиц расхода из слоя конвертера, в сравнении с перпендикулярным падением нейтронов. Эффективная длина пробега нейтронов в конвертере (эффективная толщина) $d_{\text{эф}}$ определяется выражением $d_{\text{эф}} = d / \sin \alpha$, где d – толщина конвертера. Для угла $\alpha = 5^\circ$ и 2° эффективная толщина $d_{\text{эф}}$ становится больше толщины конвертера d в 11.47 и 28.65 раз соответственно. Детектор “Multy-foil” представляет собой одинаковые многопроволочные узкоазорные газовые камеры, заключённые между плоскими параллельно стоящими подложками, размещёнными с шагом, задающим их ширину. В качестве подложки используется алюминиевая фольга или полимерная плёнка из радиационно-стойкого материала, которая прикрепляется с двух противоположных сторон к держателям подложек, натягивающим её в плоскость. На одной стороне подложки сформирован катод из слоя карбида бора, обогащённого изотопом ^{10}B . На обратной стороне сформирована стриповая система, представляющая собой электрически изолированные от катода и подложки токопроводящие полосы одинаковой ширины, установлен-

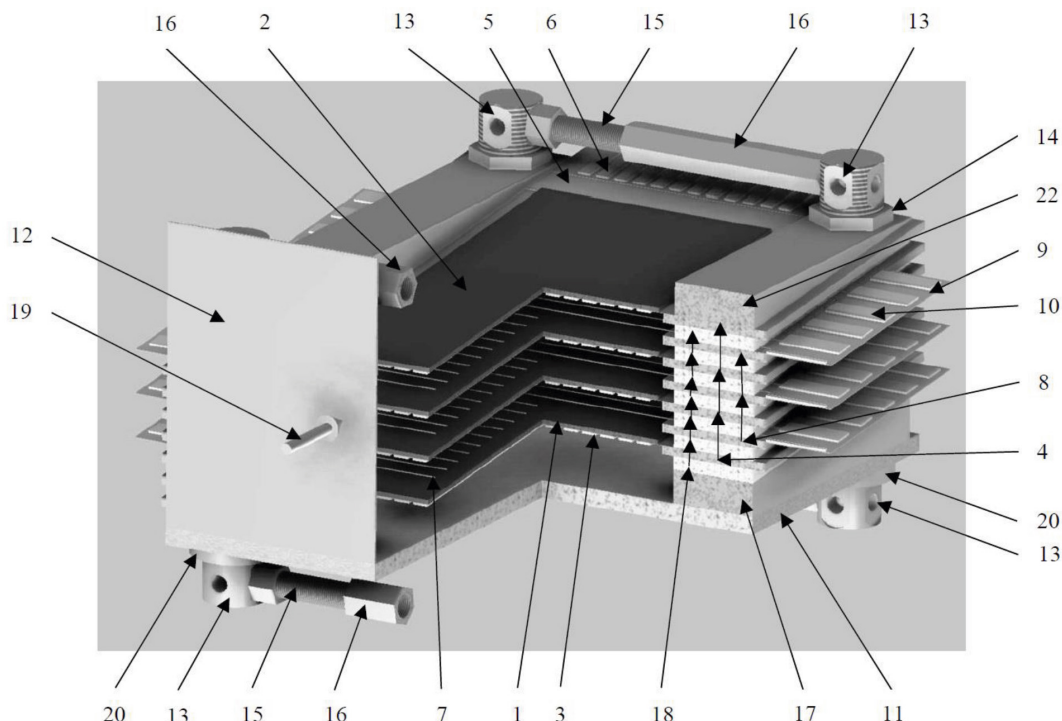


Рис. 1. Конструкция детектора (вырез $\frac{1}{4}$ спереди). 1 – подложка, 2 – катод, 3 – стрипы, 4 – держатель подложки, 5 – гибкая панелька, 6 – ламели стрипов, 7 – анодные проволоочки, 8 – анодный держатель, 9 – анодная панелька, 10 – анодные ламели, 11 – основание детектора, 12 – входное окно детектора, 13 – стержень, 14 – гайка стержня, 15 – винт растяжки, 16 – удлиненная гайка растяжки, 17 – нижняя клиновидная вставка, 18 – дистанционная вставка, 19 – направление падающего пучка нейтронов, 20 – упорный фланец стержня, 13, 22 – верхняя клиновидная вставка

ные в ряд с определённым шагом и направленные вдоль падающего потока нейтронов. Посередине между подложками в каждой камере натянуты перпендикулярно падающему потоку нейтронов анодные проволоочки, расположенные в ряд с шагом 0.8 - 2 мм. Ширина камер (2.6 - 5.0 мм) задаётся дистанционными вставками, размещёнными между держателями подложек. Собранные камеры стягиваются между собой. Камеры наклонены относительно падающего потока нейтронов так, что нейтроны падают на катод под скользящим углом от 1° до 5° . Угол падения задаётся клиновидными вставками между основанием детектора и подложками. Применение натянутой в плоскость тонкой подложки из фольги или из полимерной радиационно-стойкой плёнки обеспечивает однородность регистрационных характеристик, которые в основном определяются точностью расположения катодов и точностью расположения анодных проволок, которые решаются натяжением подложки и позиционированием анодных проволок с точностью 1 мкм. Узкоазорные камеры обладают особенностями в распределении электрического поля, которое сдвигает область лавинообразования на значительное удаление от анодной проволоки. Это позволяет исключить старение анода детектора за счёт уменьшения количества осаждаемых на анодную проволоку ради-

калов, которые удаляются продувом рабочего газа на основе CF_4 с добавлением C_4H_{10} . Процессы в лавине отражают динамику её развития: разделение электронов по скоростям; электростатические колебания лавины в целом; укорочение длительности анодного сигнала; рост времени задержки индукции заряда на катоде в течение времени развития лавины; высокая скорость счёта в режиме большого газового усиления; наличие разной формы амплитудных распределений сигналов на аноде и катоде. Применение разработанных в ОИЯИ методов сборки узкоазимутной камеры позволяет получить детекторы, способные работать в интенсивных потоках регистрируемых частиц плотностью до 10^8 частиц/(с·см²) при временном разрешении < 5 нс с газовым усилением $\leq 10^5$. При газовом усилении $\geq 10^7$ скорость счёта будет достигать $5 \cdot 10^5$ с⁻¹ см⁻². Для оценки эффективности детектора выполнено моделирование при использовании программного пакета Geant4, реализующего метод Монте-Карло. Моделирование показало, что при уменьшении угла падения от 5° до 1° повышается выход в газовый промежуток количества частиц ^7Li и ^4He , то есть повышается эффективность детектора. Также уменьшается количество нейтронов, пролетевших все слои детектора и, соответственно, попадающих в соседнюю камеру детектора. Эти нейтроны могут вызывать ложную регистрацию в другой камере. Оптимальная толщина слоя карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ $d = 2.5$ мкм, а при толщине $d = 3.5$ мкм нейтроны проходят только в диапазоне длин волн $1 \div 2$ Å, составляя для 1 Å не более 10 %. Эффективность детектора на длине волны 1.8 Å при угле падения 2° составляет более 65 % с толщиной слоя $^{10}\text{B}_4\text{C}$ более 2.5 мкм, а на длине волны 4 Å эффективность более 85 %.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ ДЛЯ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ НЕЙТРИННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

П. А. Кузнецов^{1*}, А. А. Можайко¹, С. А. Маннинен¹, А. П. Серебров², С. С. Сидоров¹

¹НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Гатчина, Россия

*E-mail: kspavel@mail.ru

В НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ проводятся работы по созданию нового нейтринного детектора для эксперимента НЕЙТРИНО-4М по изучению нейтринных осцилляций. Эксперимент НЕЙТРИНО-4М проводится на реакторах СМ-3 (Росатом) и проектируется для реактора ПИК (НИЦ КИ – ПИЯФ). Регистрация оптического излучения сцинтиллятора в данном детекторе осуществляется с помощью двух матриц, состоящих из 100 фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). Каждый ФЭУ располагается внутри цилиндрического защитного кожуха. Слабое магнитное поле Земли (МПЗ) ухудшает характеристики ФЭУ. Для ослабления МПЗ применяется магнитное экранирование. Наиболее простым, дешевым и надежным, а в ряде случаев единственно возможным способом ослабления внешних магнитных полей является пассивное экранирование с применением специальных магнитомягких материалов - аморфных сплавов на основе кобальта, которые зарекомендовали себя как исходный материал для создания эффективных защитных экранов от постоянных и переменных магнитных полей промышленной частоты благодаря повышенным магнитным свойствам по сравнению с кристаллическими аналогами, а также их технологическим преимуществам: гибкости и возможности придания любой формы без потери магнитных свойств. Также, аморфные сплавы, в отличие от кристаллических аналогов, не требуют проведения дорогостоящей высокотемпературной вакуумной термообработки, что значительно сокращает расходы на изготовление экрана.

Специалистами НИЦ «Курчатовский институт» — «ЦНИИ КМ «Прометей» предлагается экранировать ФЭУ от геомагнитного поля с помощью рулонного магнитного материала МАР-1К на основе аморфного сплава. Для этого необходимо разработать экранирующие конструкции из материала МАР-1К и исследовать их магнитные характеристики, что являлось задачами данной работы. С целью обеспечения эффективного экранирования исследуется зависимость коэффициента экранирования (КЭ) от количества слоев рулонного магнитного материала МАР-1К. Следует отметить, что исследование КЭ разрабатываемых конструкций является многокомпонентной задачей, для решения которой применялись как расчетные, так и экспериментальные методы.

Проведено исследование магнитных характеристик единичного экрана и сборки из 25 экранов (рис. 1) сделанных из магнитного материала МАР-1К, расчетным и экспериментальными методами. По результатам исследований КЭ в сборке из 25 каркасов, экранированных трехслойным рулонным магнитным материалом МАР-1К установлено, что в случае ориентации оси конструкции поперек горизонтальной составляющей МПЗ КЭ уменьшается в угловых экранах по направлению поля, в случае ориентации оси конструкции вдоль горизонтальной составляющей МПЗ – в нижнем ряду сборки (рис. 2). Эффективность экранирования ФЭУ максимальна при расположении оси конструкции поперек горизонтальной составляющей МПЗ. Однако, в реальных условиях



Рис. 1. Макет сборки из 25 экранов для сцинтилляторного детектора спектров нейтрино НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ (слева) и результат расчета магнитного поля внутри экранов сборки (справа)

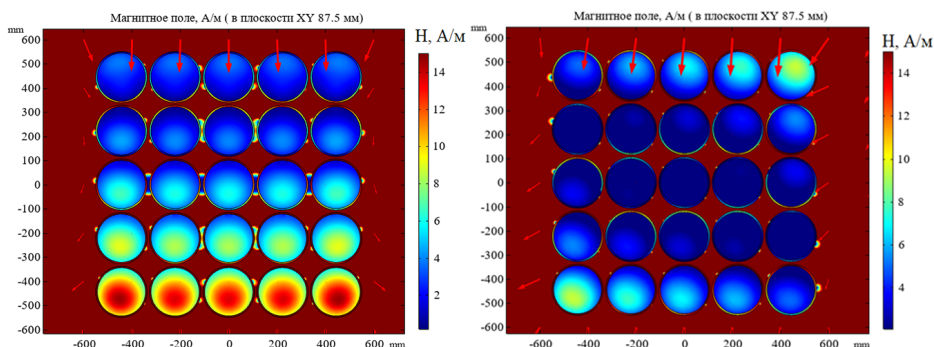
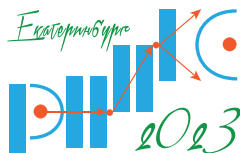


Рис. 2. Влияние ориентации магнитных экранов относительно МПЗ

положение и ориентация ФЭУ определяется техническими особенностями сцинтилляционного детектора.

КЗ МПЗ, измеренный на расстоянии 65 мм от края малого экрана, для всех изготовленных экранов составляет не менее 4.5 (при ориентации оси экрана вдоль горизонтальной составляющей МПЗ) и не менее 10 (при ориентации оси экрана поперек горизонтальной составляющей МПЗ).



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

→ → → → Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

Проверена зависимость отклика детектора с ФЭУ, экранированным обсуждаемым экраном, от положения ФЭУ относительно МПЗ, относительное изменение отклика составляет менее 1%.

Таким образом, разработанная система экранирования обеспечивает необходимый уровень защиты ФЭУ нового сцинтилляционного детектора нейтрино и может быть рекомендована для применения в установках подобного типа.

1. M.V. Kovalchuk, V.V. Voronin, S.V. Grigoriev, A.P. Serebrov. Crystallography Reports, 66(2), 195–215 (2021). DOI: 10.1134/S1063774521020061.
2. М.В. Ковальчук, С.Л. Смольский, К.А. Коноплев. Кристаллография. 66(2), 184-190 (2021). DOI: 10.31857/S0023476121020053.
3. А.П. Серебров, В.Г. Ивочкин, Р.М. Самойлов, А.К. Фомин, В.Г. Зиновьев, С.С. Волков, В.Л. Головцов, Н.В. Грузинский, П.В. Неустроев, В.В. Федоров, И.В. Паршин, А.А. Герасимов, М.Е. Зайцев, М.Е. Чайковский, А.М. Галгарский, А.Л. Петелин, А.Л. Ижутов, М.О. Громов, С.А. Сазонтов, А.А. Тузов, В.И. Рыкалин, Д.А. Макаренков, А.М. Немерюк, Т.Е. Кузьмина. Журнал технической физики, 93(1), 175-186 (2023).
4. П.А. Кузнецов, А.С. Жуков, С.А. Маннинен и др., патент на изобретение RU2636269 C1, 21.11.2017.



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ «MULTI-FOIL» В GEANT4

А. К. Курилкин^{1*}, А. Г. Колесников^{1,2*}, В. Милков^{1*}, А. А. Богдзель^{1*}, М. М. Подлесный¹

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

²Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

* E-mail: akurilkin@jinr.ru

В данной работе представлены результаты по оценке теоретической эффективности многослойного детектора тепловых нейтронов с твердотельным конвертером, в зависимости от толщины напыления $^{10}\text{B}_4\text{C}$. В качестве инструмента для численного моделирования методом Монте-Карло использовался программный пакет Geant4. Моделирование показало, что эффективность 30-ти слойного детектора составляет $\sim 57\%$ для нейтронов с длиной волны $1.8 \text{ \AA}$.

ЭЛЕКТРОНИКА ДЛЯ ДЕТЕКТОРОВ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯТОРА ZnS(Ag)/LiF, КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ И ОРГАНИЧЕСКОГО СВЕТОВОДА

В. Н. Марин^{1,2*}, Д. Н. Трунов^{1,2}, В. С. Литвин¹, Р. А. Садыков¹

¹Институт ядерных исследований РАН, Москва, Троицк, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

*E-mail: marin@inr.ru

Описан высокоэффективный сцинтилляционный детектор тепловых нейтронов на основе сцинтиллятора ZnS(Ag)/LiF. В детекторе применен новый способ считывания света на основе световода и лавинных фотодиодов, позволяющий отказаться от оптических волокон и фотоумножителей.

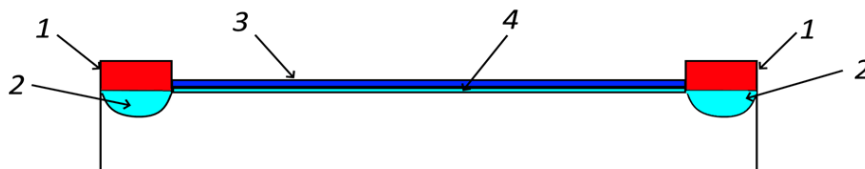


Рис. 1. Блок схема детектора: 1 — SiPM, 2 — Линза типа рыбий глаз, заполненная клеем, 3 — Сцинтиллятор ZnS:LiF, 4 — клеевая прослойка

Описан метод увеличения нагрузочной способности сцинтилляционного детектора в 8 раз и на его основе сделать предварительный усилитель формирователь. На этот метод получен патент изобретение № 2782417.

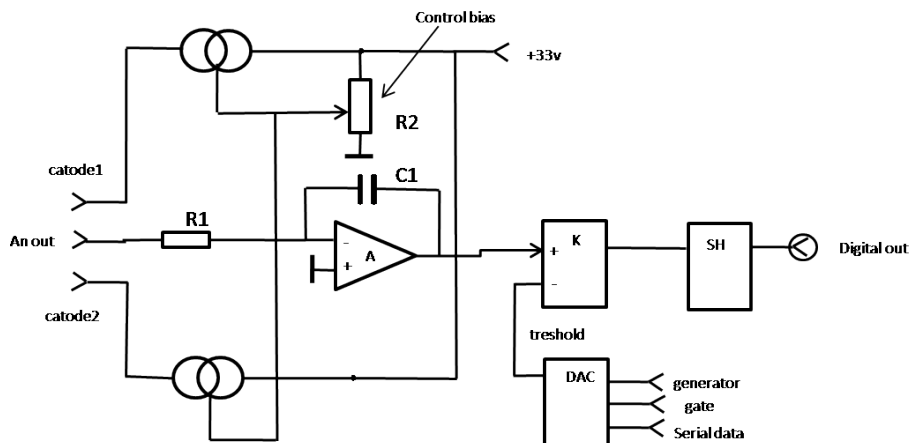


Рис. 2. Структурная схема усилителя формирователя

Схема формирователя включает в себя два управляемых генератора тока для питания кремниевых фотоумножителей, усилителя интегратора, аналогового компаратора, выходного формирователя и цифроаналогового конвертера для задания порога

компаратора. Задание рабочей точки кремниевых фотоумножителей осуществляется резистором R2. Во время формирования импульсного сигнала со сцинтилляционного счетчика напряжение на катодах счетчиков сравнивается с напряжением, заданным на резисторе R2 и дозаряжается до напряжения рабочей точки и генераторы тока закрываются. Счетчики готовы к приему очередного сигнала от нейтрона. Аналоговый сигнал с анодов кремниевых фотоумножителей поступает на усилитель интегратор. С выхода которого приходит на положительный вход аналогового компаратора. На отрицательный вход компаратора подается напряжение порога, сформированного цифроаналоговым конвертером. Напряжение формируется цифровым кодом. Превышение сигнала над порогом запускает выходной формирователь.

Описана многоканальная система считывания информации с детектора. Структурная схема приведена на Рисунке 3.

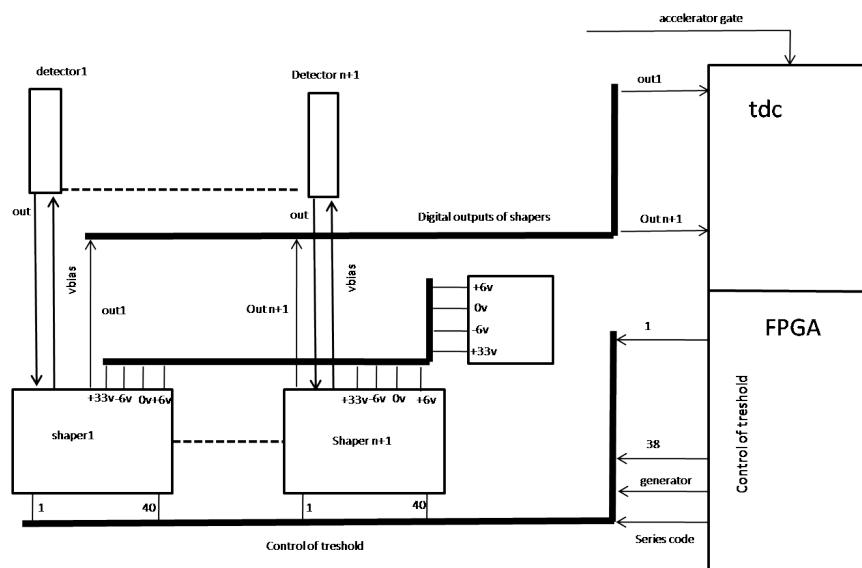


Рис. 3. Система считывания входной информации и управления порогами. Схема позволяет осуществлять регистрацию до 38 счетчиков, размещенных на одном кольце. Усилители – формирователи связаны общим шлейфом управления порогами посредством 40 канальными разъемами и другим шлейфом питания. Выходные сигналы выведены отдельными коаксиальными кабелями. Аналогичная схема применяется для остальных колец сферического детектора

1. Kuzmin E. S. A Raster Thermal-Neutron Scintillation Multidetector of Modular Type// Instruments and Experimental Techniques. 2008. Vol. 51. No. 5.P. 639-646.
2. Марин В.Н.Новый тип сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов на основе ZnS(Ag)/LiF и лавинных фотодиодов // Письма в журнал технической физики. 2015. Т. 41.№. 18. С. 96-101.
3. Патент № 2782417 С1 Российская Федерация, МПК G01T 1/208. Устройство для регистрации излучения: № 2022105038:заявл. 25.11.2021:опубл. 26.10.2022 / Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, Е. В. Алтынбаев; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение "Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт".

ОПЫТ, РАЗРАБОТКИ И СОЗДАНИЯ ДЕТЕКТОРОВ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ В НЭОКС ИБР-2

А. В. Белушкин^{1,3,4}, А. А. Богдзель¹, В. И. Боднарчук¹, О. Даулбаев^{1,5}, В. А. Дроздов¹,
В. В. Журавлев¹, А. Г. Колесников¹, А. О. Колесников², А. К. Курилкин¹, С. А. Куликов¹,
Е. И. Литвиненко¹, В. М. Милков¹, М. О. Петрова¹, М. М. Подлесный¹, В. И. Приходько¹,
К. В. Хай^{1,6}, А. В. Чураков¹, В. В. Швецов¹

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

²Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Джелепова, Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна, Россия

³Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

⁴Институт физики, Казанский федеральный университет, Казань, Россия

⁵Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

⁶Dalat University, Dalat, Lamdong province, Vietnam

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

Объединенный Институт Ядерных Исследований (ОИЯИ) является одним из главнейших научных центров в России и мире благодаря существующим экспериментальным установкам, распределенных по всем лабораториям института.

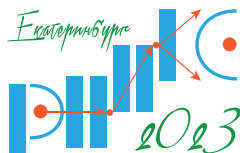
Для Лаборатории Нейтронной Физики им. И.М. Франка (ЛНФ) реактор ИБР-2 является основной исследовательской установкой. Номинальная мощность реактора составляет 2 МВт, а длительность импульса (ПШПВ) составляет 320 мкс. Плотность потока тепловых нейтронов с поверхности теплового замедлителя составляет 10^{13} н/(см²·с).

Реактор ИБР-2 имеет 14 исследовательских каналов для вывода нейтронных пучков, предназначенных для проведения исследований конденсированных сред и биологических систем методами рассеяния нейтронов. В каналах вывода формируются пучки нейтронов, которые направляются на специализированные установки, каждая из которых оборудована системой детектирования нейтронного излучения, адаптированной к методике измерений, применяемой на установке.

Важную роль в поддержании работоспособности и развитии экспериментальных установок выполняет Научно-экспериментальный отдел комплекса спектрометров (НЭОКС) ИБР-2. Одним из важнейших направлений деятельности НЭОКС ИБР-2 является развитие и создание детекторных технологий, на основе которых создаются детекторы для экспериментальных установок.

В данном докладе будут представлены существующие разработки Сектора №1 НЭОКС ИБР-2 в области детекторов для регистрации нейтронов и электроники сбора и накопления данных, а также возможные направления развития в будущем.

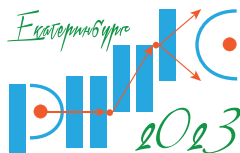
1. Levchanovski F.V., Gebauer B., Litvinenko E.I., Nikiforov A.S. [и др.] / A PCI DAQ board for MWPC detectors with high-rate 2D-delay line position readout // NIM Section A. 2004. Vol. 529. P. 413-416.
2. Kuzmin E.S., Balagurov A.M., Bokuchava G.D., Kudryashev V.A. et al., Detector for the FSD Fourier Diffractometer based on ZnS(Ag)/6LiF Scintillation Screen and Wavelength shifting Fibers Readout. Pre-print of JINR of E13-2001-204.
3. Белушкин А.В., Богдзель А.А., Журавлёв В.В. Пантелеев Ц.Ц [и др.] / Двухкоординатный мониторинг позиционно-чувствительный детектор тепловых нейтронов // Журнал технической физики. 2008. Том 78, вып. 1.
4. Milkov V. M., Panteleev Ts. Ts., Bogdzel A. A., Shvetsov V. N., Kutuzov S. A., Borzakov S. B., Sedyshev P. V., “ Neutron Spectrometer Based on a Proton Telescope with Electronic Collimation of Recoil Protons ”, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2012, Vol. 9, No. 6–7, pp. 508–516.



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

→ → → → Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

5. Белушкин А.В., Богдзель А.А. и др. / Многосекционный кольцевой детектор тепловых нейтронов для исследования дифракции на микрообразцах в аксиальной геометрии // Письма в ЭЧАЯ. 2013. Т.10, №5(182). С.713-721.
6. Litvinenko E.I., Ryukhtin V., Bogdzel A.A., Churakov A.V. and oth / Upgrade of detectors of neutron instruments at Neutron Physics Laboratory in Rež // NIM Section A. 2017. Vol. 841. P. 5-11.
7. Bogdzel A.A., Kruglov V.V., Milkov V.M., Panteleev Ts.Ts. and Churakov A.V., "Thermal Neutron Detectors for IBR-2 Spectrometers", Journal of Physics of Atomic Nuclei 81(10):1465-1470, December 2018.
8. Bogdzel A., Drozdov V., Kruglov V., Murashkevich S., Prikhodko V. Shvetsov V., "The new data acquisition system MPD-32 for the high-resolution Fourier diffractometer at the IBR-2 pulsed reactor". Proceedings of the 27th International Symposium Nuclear Electronics and Computing (NEC'2019) Budva, Becici, Montenegro, September 30–October 4, 2019, CEUR-WS Vol-2507 (ISSN 1613-0073), pp.142-146.
9. Богдзель А.А., Милков В.М., Пантелеев Ц.Ц. Патент на изобретение №2715898 – "Газонаполненный детектор для измерения малоуглового рассеяния тепловых нейтронов" - от Федеральная служба по интеллектуальной собственности - 04.03.2020.
10. Kruglov V.V., Balagurov A.M., Belova M.O., Bobrikov I.A., Bogdzel A.A., Bodnarchuk V.I. and others / Wide-aperture back-scattering detector (BSD) for the High-Resolution Fourier Diffractometer (HRFD) at the IBR-2 reactor // Journal of Neutron Research (2021) pp.1–8.
11. Belushkina A. V., Bogdzel A. A., Goloshumova A. A. and others / Study of LiInSe2 Single Crystals for the Thermal Neutron Detection // ISSN 1027-4510, Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2020, Vol. 14, Suppl. 1, pp. S15–S18.
12. Даулбаев О., Исаенко Л.И., Богдзель А.А., Лобанов С.И., Криницын П.Г., Милков В.М., Белушкин А.В. / Сравнительное исследование монокристаллов LiInSe2 для регистрации тепловых нейтронов // Журнал Кристаллография, 2022, том 67, № 3, с. 497–502.
13. Белушкин А.В., Богдзель А.А., Боднарчук В.И., Даулбаев О., Журавлев В.В., Курилкин А.К., Куликов С.А., Литвиненко Е.И., Милков В.М., Петрова М.О., Приходько В.И., Подлесный М.М., Чураков А.В., Швецов В.В. / Опыт разработки и создания детекторов тепловых нейтронов в НЭОКС ИБР-2 // ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2022, No 4, с. 5–17.



ПЧД ТЕПЛОВЫХ И ХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ ППРК С КОНВЕРТЕРОМ ИЗ КАРБИДА БОРА $^{10}\text{B}_4\text{C}$

М. О. Петрова

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

* E-mail: mbelova@jinr.ru

В настоящее время на отечественных станциях нейтронного рассеяния наиболее распространёнными позиционно-чувствительными детекторами являются газовые многопроволочные детекторы с конвертером из газа ^3He и сцинтилляционные на основе порошка ^6Li . Длительность формируемого сигнала в силу особенностей работы таких детекторов составляет от единиц до нескольких десятков микросекунд из-за чего загрузочная способность ограничена долями МГц/см². Нейтронографические методы исследования конденсированных сред стоят на пороге принципиально новых возможностей из-за создания новых высокопоточных источников нейтронов. Увеличение плотности потока тепловых или холодных нейтронов на образце на порядок и более приведут к превышению загрузочной способности используемых гелиевых или сцинтилляционных позиционно-чувствительных детекторов. В работе будут представлены первые результаты по созданию и определению характеристик ПЧД тепловых и холодных нейтронов на основе плоскопараллельной резистивной камеры (ППРК) с конвертером в виде тонкой пленки карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ с обогащением по изотопу ^{10}B более 95%. Однородное поле ППРК обеспечивает мгновенное усиление первичной ионизации, а узкие газовые зазоры ограничивают длительность сигнала на уровне сотни наносекунд. Наличие технологии нанесения пленок карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на характеристики сигналов в такого рода детекторах открывают возможности для создания детекторов большой площади для разных типов станций нейтронного рассеяния будущих исследовательских источников нейтронов.

СРАВНЕНИЕ ДВУХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ С НЕЙТРОННЫХ СЧЁТЧИКОВ НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯТОРА ${}^6\text{LiF/ZnS(Ag)}$ И ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ПЕРЕИЗЛУЧАТЕЛЕМ СПЕКТРА

М. М. Подлесный^{1,2}, А. А. Богдзель¹, В. М. Милков¹*

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Россия

*E-mail: podlesny@phystech.edu

В работе представлены результаты исследования двух методов обработки электронного сигнала с нейтронных счётчиков на основе сцинтиллятора ${}^6\text{LiF/ZnS(Ag)}$ и оптических волокон с переизлучателем спектра.

Первый метод представляет собой отбор нейтронного сигнала по длительности сигнала. Данный метод реализован в блоках MPD-32[1] и используется для обработки сигналов с детектора АСТРА Фурие стресс дифрактометра на реакторе ИБР-2.

Второй метод реализован в дигитайзерах N6730 и N6730B фирмы Caen[2]. Отбор нейтронного сигнала происходит по величине зарядов, накопленных в двух временных окнах (Pulse shape discrimination method — PSD).

Исследование выполнено при различных интенсивностях нейтронного потока на один канал регистрации. В эксперименте задействованы 2 нейтронных счётчика (площадь поверхности составляет 50 см^2 и 1400 см^2), а также 2 источника нейтронов. Первый источник нейтронов — ${}^{252}\text{Cf}$ в капсуле, Второй — нейтронный генератор Диапазон исследуемой загрузки одного канала составил $0.3\text{ — }25\text{ кГц}$.

1. A.A. Bogdzel, V.A. Drozdov, V.V. Kruglov, S.M. Murashkevich, V.I. Prikhodko and V.V. Shvetsov, THE NEW DATA ACQUISITION SYSTEM MPD-32 FOR THE HIGH-RESOLUTION FOURIER DIFFRACTOMETER AT THE IBR-2 PULSED REACTOR, Proceedings of the 27th International Symposium Nuclear Electronics and Computing, 2019.
2. 8 Channel 14-bit 500 MS/s Digitizer, <https://www.caen.it/products/n6730>

ВЕКТОРНЫЙ МАГНИТ НА ОСНОВЕ ВТСП ДЛЯ РАБОТЫ С ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ НЕЙТРОНАМИ

А. В. Алтынов¹, А. П. Буздавин¹, В. И. Боднарчук¹, В. Д. Жакетов¹, А. В. Петренко¹,
М. Д. Проявин², А. Н. Черников^{1*}

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия

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

Обсуждается проект векторного магнита на основе высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) с охлаждением криокулером замкнутого цикла. Векторный магнит состоит из двух пар несимметричных катушек Гельмгольца, расположенных перпендикулярно друг другу. Для изготовления векторного магнита предлагается использовать ВТСП ленту шириной 4 мм производителя «С-инновации» [1]. Криомагнит позволит прикладывать максимальное поле в вертикальной плоскости до 3 Тл, а в горизонтальной плоскости до 1 Тл.

Обсуждается проект рефрижератора растворения ^3He в ^4He , который будет расположен в центре магнита.

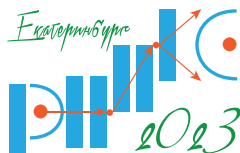
Криостат с магнитом и рефрижератором растворения будет установлен на рефлектометре РЕМУР реактора ИБР-2.

1. <https://www.s-innovations.ru/vtsp-provod/>

Секция 1.

Источники нейтронов, приборы и методы нейтронного эксперимента.

Компактный источник нейтронов DARIA



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

КОМПАКТНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ DARIA

Т. В. Кулевой

НИЦ «Курчатовский институт», ККТЭФ, г. Москва

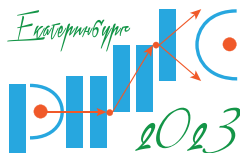
* E-mail: kulevoy@itep.ru

Компактный источник нейтронов (КИН) DARIA (neutron source Dedicated to Applied Research and Industrial Applications - источник нейтронов, предназначенный для прикладных исследований и промышленного применения) создается в рамках Программы развития синхротронных и нейтронных исследований под руководством НИЦ «Курчатовский институт» (ККТЭФ НИЦ КИ). Конечной целью проекта является создание прототипа серийной установки, предназначенной для формирования инфраструктуры нейтронных исследований, охватывающую всю территорию страны от Калининградской области до Дальнего востока. Пучок протонов с током 100 мА, длиной импульса 100 мкс и частотой повторения 100 имп/с, ускоренный в линейном ускорителе до энергии 13 МэВ, позволит обеспечить генерацию потока нейтронов на уровне 10^{14} н/с.

В создании установки помимо специалистов НИЦ «Курчатовский институт» принимают участие специалисты из ведущих научных центров страны – БФУ им И. Канта, СПбГУ, ПИЯФ-НИЦ «Курчатовский институт», ИЯИ РАН, ОИЯИ, ИФМ УрО РАН, ИПФ РАН, РФЯЦ-ВНИИТФ, ИЯФ СО РАН.

В докладе представлены детали проекта, достигнутые результаты и планы развития проекта.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения №075-15-2022-830 от 27 мая 2022г.



НЕЙТРОННЫЕ УСТАНОВКИ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ DARIA: ПАРАМЕТРЫ И ОСОБЕННОСТИ

С. В. Григорьев^{1,2*}

¹Петербургский институт ядерной физики, НИЦ «Курчатовский институт», 188300 Гатчина, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, 198504 Санкт-Петербург, Россия

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

Компактный источник нейтронов DARIA на основе линейного протонного ускорителя предназначен для создания пучков тепловых и холодных нейтронов, обеспечивающих максимальные потоки нейтронов для порошкового дифрактометра, рефлектометра поляризованных нейтронов и установки малоуглового рассеяния нейтронов [1]. Экспериментальные установки, используемые для исследования структуры и магнитных свойств вещества, оптимизированы по диапазону переданных импульсов, инструментальному разрешению, геометрическим размерам, а так же по частоте повторения и длительности нейтронных импульсов.

1. С. В. Григорьев, Н. А. Коваленко, К. А. Павлов, Е. В. Москвин, В. Г. Сыромятников, Н. А. Григорьева, Известия Российской академии наук. Серия физическая, № 11, том 87, 2023.

ОПТИМИЗАЦИЯ ХОЛОДНОГО ИСТОЧНИКА НА ОСНОВЕ ПАРАВОДОРОДА ДЛЯ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ DARIA

Н. А. Коваленко*

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

*E-mail: kovnik-15@ya.ru

В работе рассматриваются различные варианты реализации источника холодных нейтронов на основе параводорода в составе мишенной сборки компактного источника нейтронов DARIA.

Применение малоразмерных холодных источников нейтронов на основе параводорода для кратного увеличения яркости было показано в ранних работах [1,2]. Спустя некоторое время внедрение подобных источников нашло свое практическое использование в реализации «spallation»-источников нейтронов, что представлено в работах [3,4]. Однако, наибольшую значимость это сыграло для импульсных источников, проектируемых на базе маломощных и среднемощных линейных ускорителей (средняя мощность пучка 1-100 кВт). Увеличение яркости и импульсный режим работы сделали потенциально привлекательными внедрение компактных источников нейтронов малой и средней мощности для решения практических задач нейтронного рассеяния.

В настоящей работе предлагаются варианты совместного размещения различных типов холодных замедлителей в единой мишенной сборке. Рассматриваются холодные замедлители, которые широко используются на действующих и проектируемых нейтронных источниках – жидкий параводород и дейтерий; твердый метан; мезитилен. Акцент в работе сделан прежде всего на оптимизацию геометрии и расположения параводородного холодного замедлителя. Изложены возможные ограничения в части количества нейтронных экспериментальных установок, размещаемых на одной мишенной сборке.

1. Mezei, F., Zanini, L., Takibayev, A., Batkov, K., Klinkby, E., Pitcher, E., & Schönfeldt, T. (2014). Low dimensional neutron moderators for enhanced source brightness. *Journal of Neutron Research*, 17(2), 101-105.
2. Batkov, K., Takibayev, A., Zanini, L., & Mezei, F. (2013). Unperturbed moderator brightness in pulsed neutron sources. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 729, 500-505.
3. Andersen, K. H., Bertelsen, M., Zanini, L., Klinkby, E. B., Schönfeldt, T., Bentley, P. M., & Saroun, J. (2018). Optimization of moderators and beam extraction at the ESS. *Journal of Applied Crystallography*, 51(2), 264-281.
4. Harada, M., Teshigawara, M., Ohi, M., Klinkby, E., Zanini, L., Batkov, K., ... & Ikeda, Y. (2018). Experimental validation of the brightness distribution on the surfaces of coupled and decoupled moderators composed of 99.8 % parahydrogen at the J-PARC pulsed spallation neutron source. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 903, 38-45.
5. Brückel, T., Gutberlet, T., Menelle, A., Eliot, E., Perez, M., Frommen, C., ... & Mezei, F. (2020). Low energy accelerator-driven neutron sources: Closing the gap and shaping the future. *Neutron News*, 31(2-4), 2-3.

Секция 2.

Структурные исследования.

Кристаллические структуры и элементарные возбуждения

THE EFFECTS OF HIGH PRESSURE ON THE CRYSTAL STRUCTURE AND VIBRATION SPECTRA OF LAYERED PEROVSKITE-LIKE $\text{Nd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$

A. G. Asadov^{1,2}, A. Mammadov², D. P. Kozlenko¹, R. Mehdiyeva², S. E. Kichanov¹,
E. V. Lukin¹, O. N. Lis^{1,3}*

¹Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR, 141980 Dubna, Russia.

²Institute of Physics, Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku AZ-1143, Azerbaijan.

³Institute of Physics, Kazan Federal University, 420008, Kazan, Russia.

*E-mail: asifasadov@jinr.ru

Abstract

The structural and vibrational properties of a layered perovskite-like $\text{Nd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ compound have been studied by means of X-ray diffraction and Raman spectroscopy at pressures up to 30 GPa. The gradual structural phase transition from the initial monoclinic P2_1 phase to the monoclinic P2 phase was observed at $P \sim 19$ GPa. This pressure-induced phase transition is accompanied by anomalies in unit cell compression and pressure behaviour in vibrational modes.

Results

1. X-Ray diffraction

The X-ray diffraction patterns of $\text{Nd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ that were measured at room temperature and selected pressures up to 30.8 GPa.

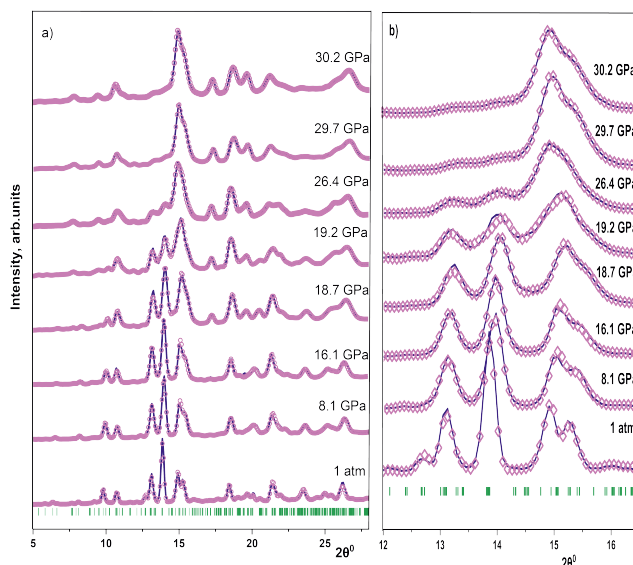


Рис. 1. The X-ray diffraction patterns of $\text{Nd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ at selected pressures and processed by the Rietveld method. The experimental points and calculated profiles are shown. Vertical ticks at the bottom and top represent the calculated positions of the nuclear peaks of the monoclinic P2_1 and high pressure monoclinic P2 phases at 0 and 30.2 GPa, respectively.

During the experimental data was analyzed at ambient pressure, it was discovered that the crystal structure of the $\text{Nd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ sample has a monoclinic structure with $P2_1$ symmetry. The lattice parameters were determined to be $a = 7.763(4) \text{ \AA}$, $b = 5.503(2) \text{ \AA}$, $c = 25.962(3) \text{ \AA}$, and $\beta = 98.4(2)^\circ$. These values agree with the neutron diffraction data and previous studies [1].

A structural phase transition occurred upon compression above $P = 17 \text{ GPa}$, which was evidenced by the emergence of additional diffraction peaks at approximately 7.70° , 9.60° , and 17.10° (as shown in Fig. 1). Changes in the intensities of diffraction peaks were observed throughout the entire 2θ -range. To analyze the diffraction data, various structural models with $P2_1$, $P2$, Pm , $P2/m$, $Cmc2_1$, and $Pna2_1$ symmetry were considered [2]. Ultimately, the monoclinic $P2$ structural model was deemed reasonable for the high-pressure phase, and a satisfactory fit of the experimental data was achieved. The calculated lattice parameters for the high-pressure monoclinic $P2$ phase were determined to be $a = 7.763(4) \text{ \AA}$, $b = 5.503(2) \text{ \AA}$, $c = 25.962(3) \text{ \AA}$, and $\beta = 98.4(2)^\circ$. This observed structural phase transition is akin to the one brought about by pressure in the $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ sample [3]. In Figure 2, the pressure-dependencies of the lattice parameters and unit cell volume of both monoclinic phases of $\text{Nd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ are presented. At a pressure of approximately 19 GPa, anomalies in the pressure behavior of the lattice parameters were observed, indicating a structural phase transformation.

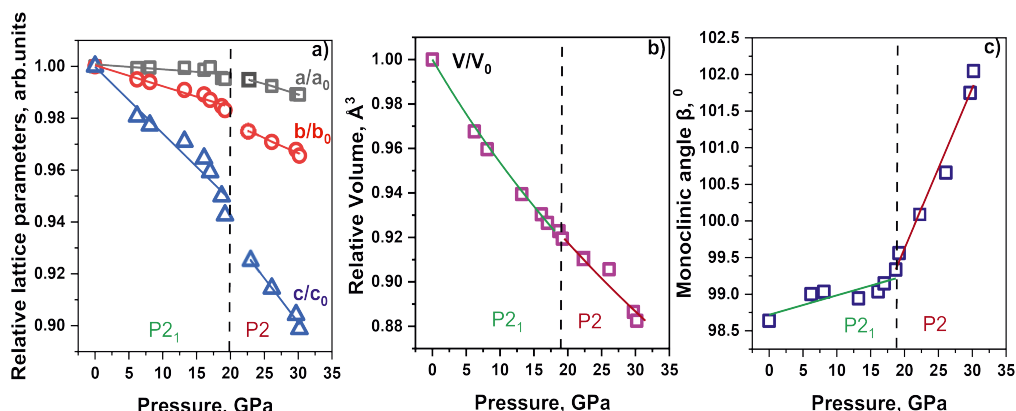


Рис. 2. Lattice parameters (a) and unit cell volume (b) of $\text{Nd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ as functions of pressure. The unit cell volume data were interpolated by the Birch-Murnaghan equation of state (1). The unit cell parameters and monoclinic angle β were fitted by linear functions. The pressure dependence of the monoclinic angle β for both monoclinic phases is shown in (c).

The compression of the lattice is anisotropic, with the c-axis in the monoclinic phases being the most compressible. The average compressibility ($k_{ai} = -(1/a_{i0})(da_i/dP)|_T$, $a_i = a, b, c$) of the c-parameter is determined to be $k_c = 0.0026(1) \text{ GPa}^{-1}$, which is approximately three times greater than that of the a- and b-parameters, $k_a = 0.0009$ and $k_b = 0.0008 \text{ GPa}^{-1}$, respectively. Following the structural phase transition, the strong compression anisotropy persists, with $k_a = 0.00084(2)$, $k_b = 0.0015(6) \text{ GPa}^{-1}$, and $k_c = 0.0040(2) \text{ GPa}^{-1}$. A sharp increase in the monoclinic angle β in the vicinity of the transition pressure is also observed (as shown in Fig. 2c).

2. Raman spectroscopy

Figure 3 displays the Raman spectra of $\text{Nd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ measured at various pressures. The Raman spectrum at ambient conditions is similar to that of $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$.

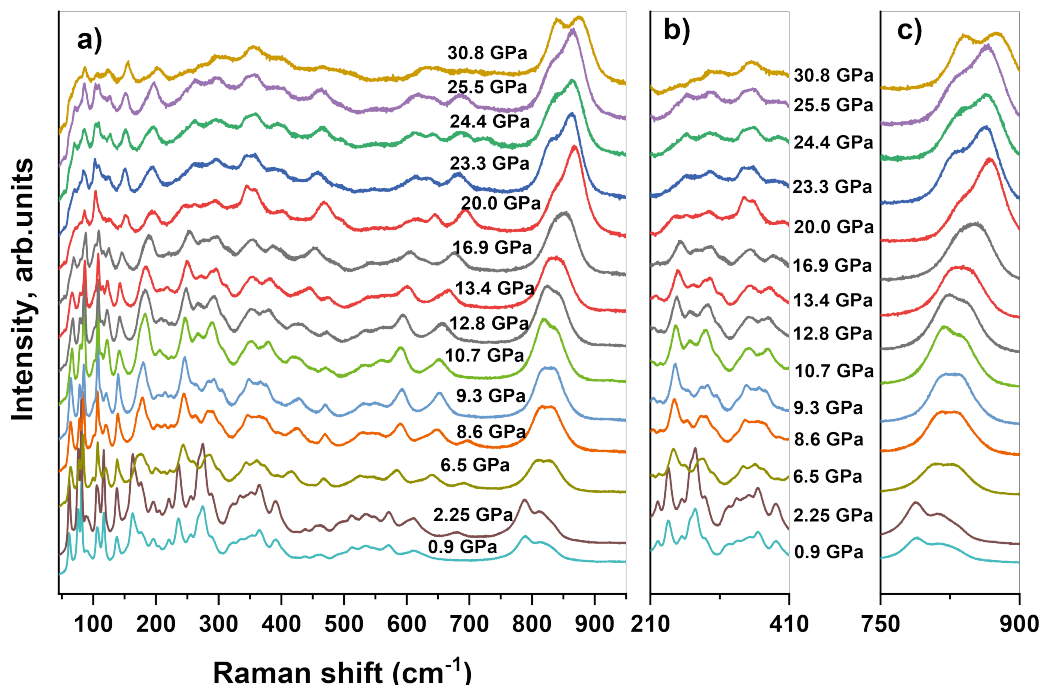


Рис. 3. Raman spectra (a) and those enlarged parts (b and c) of $\text{Nd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ at different pressures and room temperature.

The pressure dependencies of the vibration modes of $\text{Nd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ are shown in Figure 4. Anomalies in the pressure behavior of most vibrational modes were observed near the transition pressure of 19 GPa. The appearance of several additional Raman modes confirms the X-ray diffraction data, indicating a phase transition to the lower symmetry monoclinic phase. The pressure coefficients of the stretching modes are positive and reflect the anisotropic deformation of inequivalent Ti-O bonds. The suppression of the ferroelectric state in $\text{Nd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ may be caused by the expanding disorder of the crystal structure. Anomalies were observed in the bending vibrations of O-Ti-O and Nd-O bonds at high pressures above 19 GPa, indicating mutual changes in the Nd-O layers [4]. Several noteworthy vibrational modes have been identified and reported in previous studies [5].

3. Conclusion

Our results demonstrate that the application of high pressure $P > 19$ GPa leads to the formation of the monoclinic phase of P2 symmetry in the layered perovskite-like compound $\text{Nd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$. Modification of lattice parameters, their compression, and anomalies in the pressure behavior of the vibrational modes point to changes in the orientations of the Ti-O octahedra as well as possible changes in Nd-O layers in the unit cell.

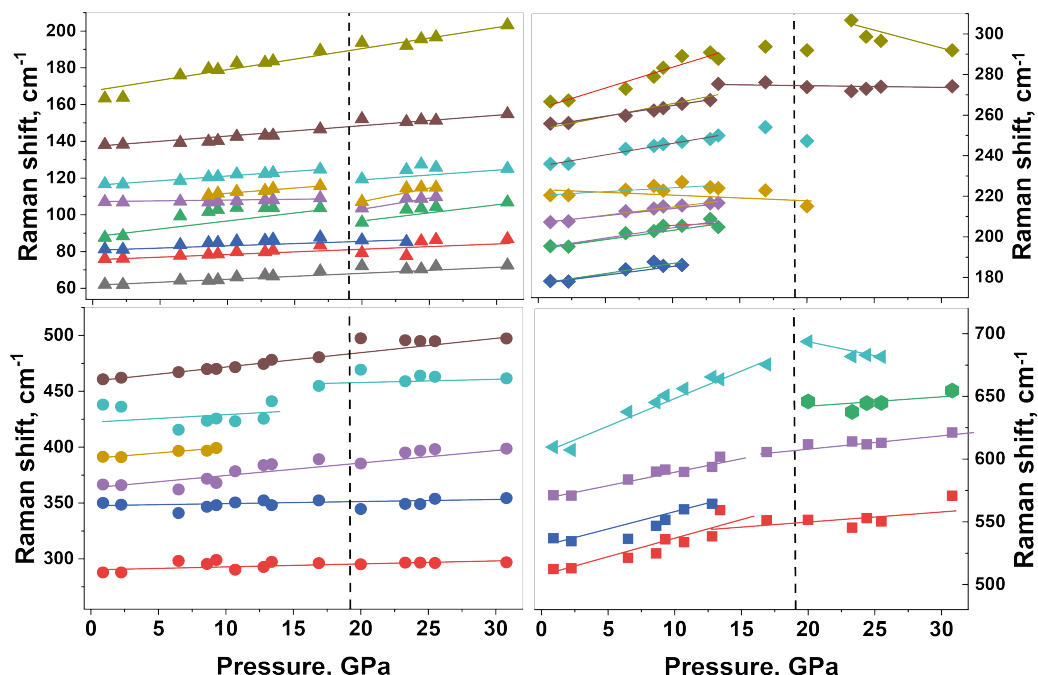


Рис. 4. Pressure dependencies of the vibration modes of $\text{Nd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ and their linear interpolation. The error bars are within the symbol size. Dashed lines denote the pressure $P = 19$ GPa corresponding to the structural phase transition.

1. K. Scheunemann, Hk. Müller-Buschbaum, Zur Kristallstruktur von $\text{Nd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$, Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry, 37 (1975) 2261–2263, [https://doi.org/10.1016/0022-1902\(75\)80723-8](https://doi.org/10.1016/0022-1902(75)80723-8).
2. F.X. Zhang, J. Lian, U. Becker, R.C. Ewing, L.M. Wang, Jingzhu Hu, S.K. Saxena, Structural change of layered perovskite $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ at high pressures, J. Solid State Chemistry 180 (2007) 571–576, <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2006.11.022>.
3. A.G. Asadov, D.P. Kozlenko, A. Mammadov, R. Mehdiyeva, S.E. Kichanov, E.V. Lukin, O.N. Lis, A.V. Rutkauskas, A structural phase transition in $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ at high pressure, Physica B: Condensed Matter, 655 (2023) 414753, <https://doi.org/10.1016/j.physb.2023.414753>.
4. F. X. Zhang, M. Lang, J. M. Zhang, Z. Q. Cheng, Z. X. Liu, J. Lian, R. C. Ewing, Phase transition and abnormal compressibility of lanthanide silicate with the apatite structure, Phys. Rev. B, 85 (2012) 214116, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.85.214116>.
5. S. Jiang, J. Liu, L. Bai, X. Li, Y. Li, S. He, S. Yan, D. Liang, Anomalous compression behaviour in Nd_2O_3 studied by x-ray diffraction and Raman spectroscopy, 8 (2018) 025019, <https://doi.org/10.1063/1.5018020>

**СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ-СУПЕРПРОТОНИКОВ
МЕТОДОМ НЕЙТРОННОЙ МОНОКРИСТАЛЬНОЙ ДИФРАКЦИИ***Н.Н. Исакова*, А. И. Калюканов, И. П. Макарова*

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

* E-mail: Isakova_NN@nrcki.ru

На реакторе ИР-8 «Курчатовский Институт» был введен в строй монокристалльный четырехкружный дифрактометр МОНД. Основное направление работы прибора было определено, как решение задач, связанных с локализацией атомов водорода и других легких элементов в кристаллических структурах монокристаллов.

Первыми образцами для проведения не модельных структурных исследований на дифрактометре МОНД были выбраны кристаллы-суперпротоники, представляющие семейство с общей формулой $M_m H_n (AO_4)_{(m+n)/2} \cdot yH_2O$ ($= K, Rb, Cs, NH_4$; $O_4 = SO_4, SeO_4, HPO_4, HAsO_4$). Во-первых, исследование данных соединений представляет высокий научный интерес с точки зрения выявления влияния водородной подсистемы на физико-химические свойства материалов, во-вторых, поскольку изучаемые кристаллы являются протонными проводниками, особое внимание при исследовании их структуры уделяется локализации атомов водорода и системам водородных связей, что ставит перед нами характерную задачу нейтронной монокристалльной дифракции. На монокристалльном четырехкружном дифрактометре МОНД реактора ИР-8 были проведены структурные исследования соединений $Cs_4(HSO_4)_3(H_2PO_4)$ и $Cs_3(HSO_4)_2(H_2PO_4)$ с целью локализации атомов водорода, определения конфигурации и длин водородных связей при комнатной температуре.

Дифракционные данные были собраны на позиционно-чувствительный детектор MAR345n. Определение элементарной ячейки проводилось в программе DIRAX, первичная обработка данных в программе EVAL14. Уточнение кристаллической структуры было выполнено с помощью кристаллографического пакета JANA2006.

В результате уточнения данных, метод нейтронной монокристалльной дифракции позволил на основе разностного синтеза Фурье экспериментально определить позиции водорода в структуре исследуемых образцов, все основные межатомные расстояния и длины водородных связей.

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ, МАГНИТНУЮ СТРУКТУРУ И КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СПЕКТРЫ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

О. Н. Лис*, Д. П. Козленко, С. Е. Кичанов, Е. В. Лукин, И. Ю. Зель

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

* E-mail: olis@jinr.ru

Ван-дер-ваальсовы соединения в настоящее время являются одними из самых интересных объектов исследования в области физики конденсированного состояния за счёт недавно открытых магнитных свойств в их двумерных формах. Такие соединения с решеткой типа «пчелиные соты» состоят из слабо связанных ван-дер-ваальсовых слоев и считаются магнитными аналогами графена. Особенности структуры приводят к значительной чувствительности физических свойств в этих соединениях к внешним воздействиям, которые могут вызвать множество необычных явлений: зарядовое, орбитальное и спиновое упорядочение, сверхпроводимость, появление аномального эффекта Холла, скирмионные состояния, различные фазовые переходы и др., также важные для разработки широкого спектра спинтронных устройств. Яркими представителями этого класса соединений являются бромид хрома CrBr_3 и теллурид железа Fe_3GeTe_2 , в которых также наблюдается ряд необычных физических явлений, представляющих как фундаментальный, так и практический интерес.

По сравнению с другими экспериментальными методами, воздействие высокого давления является прямым методом контролируемого изменения магнитных взаимодействий за счет вариации межатомных расстояний и углов. Проведение исследований при высоких давлениях дают уникальную возможность изучения взаимосвязи изменений структурных параметров кристалла с изменениями магнитной структуры, что необходимо для понимания природы и механизмов физических явлений, наблюдаемых в исследуемых объектах. Нейтронная дифракция в свою очередь предоставляет уникальную возможность исследовать одновременно кристаллическую и магнитную структуры.

Настоящая работа посвящена исследованию кристаллической, магнитной структуры и колебательных спектров CrBr_3 и Fe_3GeTe_2 в широких диапазонах температур и давлений. Детальные исследования кристаллической и магнитной структуры соединений проводились с помощью нейтронной дифракции на дифрактометре ДН-6 импульсного высокопоточного реактора ИБР-2 (ЛНФ, ОИЯИ, Дубна, Россия). Исследования с помощью нейтронной дифракции CrBr_3 позволили обнаружить в области ниже $T_C = 37$ К отрицательное тепловое объемное расширение, а также аномальное поведение межатомных расстояний, углов и рамановских сдвигов, что указывает на проявляющуюся сильную спин-решеточную связь. Воздействие высокого давления приводит к подавлению магнитного упорядочения, а полное подавление ФМ-состояния и магнитный переход либо в АФМ-состояние, либо в магнитно-неупорядоченное состояние ожидается при $P \sim 8.4$ ГПа. Наши результаты также демонстрируют индуцированный давлением изоструктурный фазовый переход в ферромагнетике CrBr_3 , который происходит в диапазоне давлений 2.5 - 7 ГПа. Также были получены барические зависимости параметров элементарной ячейки и температуры Кюри. Дополнительные аномалии в поведении частот колебательных мод, обнаруженные при $P \sim 15$ ГПа, указывают на другое фазовое превращение, предположительно связанное с процессом металлизации. Исследования с помощью рентгеновской дифракции Fe_3GeTe_2 при высоких давлениях также позволили выявить изменения в барическом поведении структурных параметров, связанных с наблюдаемым изоструктурным переходом при $P \sim 7$ ГПа. Наблюдаемое аномальное поведение параметров элементарной ячейки, межатомных расстояний и углов, и колебательных мод могут свидетельствовать о конкурирующем характере внутрислойных (ab) и внеплоскостных (вдоль c) взаимодействий.

О ДЕСТАБИЛИЗАЦИИ АТОМНОЙ СТРУКТУРЫ РАЗБАВЛЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ II-VI В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МАТРИЦЫ И МАГНИТОАКТИВНОЙ 3d-ПРИМЕСИ

В. И. Максимов, Е. Н. Максимова, Т. П. Суркова, В. Д. Пархоменко*

Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

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

Разбавленные магнитные полупроводники (РМП) с матрицами $A^{II}B^{VI}$ на основе магнитоактивных 3d- ионов широко применяются в устройствах электронной оптики и перспективны для целей спинтроники. Поразительные результаты при изучении формирования в них магнетизма на сегодня достигнуты на объектах наномасштаба [1]. Ранее на объёмных монокристаллах нами показано, что огромную роль в физике названных объектов на наноуровне должна играть вариантность деформационного поля в зависимости от вида и количества легированных 3d- ионов [2].

В настоящей работе мы представляем картину формирования структурных свойств РМП, легированных 3d- ионами матриц II - VI, по результатам нейтрон-дифракционного эксперимента (дифрактометр Д76 ОРАР ИФМ, реактор ИВВ-2М, г. Заречный) на кристаллах с основой халькогенидов цинка, входящих в круг названных объектов (включая твёрдые растворы замещения по халькогену $ZnS_xSe_{1-x}:M$, $M = 3d$ - ион). Установлены следующие характеристики поля локальных деформаций в объёмах разбавленного полупроводникового материала.

При уровнях легирования 3d- ионами 0.0001-0.001 в формульной единице, в структуре матрицы образуются нанобласти искажений с чувствительной к её составу протяжённостью от единиц до десятков и сотен нм, выявляя тригональный и тетрагональный типы в зависимости от сорта ян-теллеровского легированного иона. С понижением температуры признаки влияния ян-теллеровской деформации в структуре усиливаются, в то время как проявления динамического (квазисферического) характера деформации подавляются. При легировании, близком к пределу растворимости 3d-иона, со значениями порядка 0.1 в формульной единице для V, Cr, Fe, Co, Ni, обобщённый анализ полученных картин рассеяния характеризует увеличение объёма, связанного с множественными повреждениями структуры. Рассматривая в изоморфических рядах $ZnX - MX$ ($M = 3d$ - металл, – халькоген) состояние структуры насыщено легированной матрицы ZnX как предпереходное, возможны варианты формирования сверхструктур по типу смещения, обусловленных корреляциями между изменениями межатомных расстояний допустимой направленности в жёстких условиях, налагаемых плотной упаковкой структурного мотива исходного полупроводника. Дополнительные осложнения картины дестабилизации с появлением сверхструктур налагает изначальная нестабильность матриц легирования, определяющая их политипию. Именно перечисленными структурными свойствами, по нашему мнению, и определяется необычайно широкий спектр магнитоупорядоченных состояний, обнаруживаемых сегодня на нанобъектах РМП с матрицами II - VI.

Результаты исследований получены с использованием УНУ «Нейтронный материаловедческий комплекс ИФМ» в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «ПОТОК», №122021000031-8).

1. H. Wang, J. Gao, M. Zhang, P. Liu, Y. Guo, H. Li, G. Zhao, S. Hu, Z. Cheng, J. Zang, R. Wen, T. Liu, Yu Tong, Z. Sun, and H. Wang, ACS Appl. Nano Mater., 5, 8448 (2022).
2. В. И. Максимов, Е. Н. Максимова, Т. П. Суркова, В. Д. Пархоменко, Поверхность. 36 (2020).

КАТОДНЫЙ МАТЕРИАЛ PRUSSIAN WHITE ДЛЯ НАТРИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ: OPERANDO ДИФРАКЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

Н. Ю. Самойлова^{1*}, С. В. Сумников¹, М. Е. Донец^{1,2}, Р. Н. Васин¹, И. А. Бобриков³,
О. Ю. Иваньшина¹, Е. А. Корнеева¹

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³CIC energiGUNE, Витория-Гастейс, Испания

* E-mail: rny03@nf.jinr.ru

Активное использование литий-ионных аккумуляторов в самых разнообразных устройствах ведут к резкому росту потребления лития, природные запасы которого ограничены. В качестве альтернативных рассматриваются химические источники тока на основе ионов натрия, одного из самых распространенных элементов в земной коре и по своим свойствам являющегося самым близким к литию элементом. Гексацианоферрат натрия, Prussian White (PW), со структурой берлинской лазури рассматривается в качестве перспективного катодного материала для натрий-ионных источников тока. Его открытая каркасная структура может легко вмещать ионы натрия и обеспечивать их быструю транспортировку. Однако стандартные экологические методы их синтеза предполагают наличие ряда вакансий $\text{Fe}(\text{CN})_6$ и структурированной воды в исходной структуре соединения, которые влияют на устойчивость кристаллической решетки при электрохимическом циклировании и приводят к падению емкости после длительной работы.

В докладе представлены результаты исследования влияния предварительной термической обработки готовых электродов на основе PW, механического помола и покрытия порошка PW полианилином на их электрохимические свойства и фазовые переходы в процессах интеркаляции и деинтеркаляции натрия из структуры гексацианоферрата натрия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-12-00261).

ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПУТЕЙ МИГРАЦИИ КАТИОНОВ Li^+ В ЛИТИЙ-ВАНАДИЕВОЙ БРОНЗЕ $\text{Li}_{1+x}\text{V}_3\text{O}_8$ ($x = 0.1, 0.2$ и 0.3)

Е. А. Шерстобитова^{1}, Н. В. Проскурнина¹, М. А. Сёмкин¹, В. И. Воронин¹,
М. С. Щелканова², Г. Ш. Шехтман²*

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

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

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

Литий-ванадиевые бронзы общего состава $\text{Li}_{1+x}\text{V}_3\text{O}_8$ находят широкое применение в качестве катодных материалов в литиевых батареях, так как обладают высоким рабочим потенциалом (~ 3 В) и высокой емкостью (~ 374 мАч/г) [1]. Высокие емкостные показатели $\text{Li}_{1+x}\text{V}_3\text{O}_8$ связаны с возможностью вместить не менее трех дополнительных ионов Li^+ на формульную единицу [2]. Тем не менее, механизм ионного переноса в $\text{Li}_{1+x}\text{V}_3\text{O}_8$ до сих пор неизвестен, несмотря на его ключевую роль в формировании электрохимических свойств. Известно, что структурные исследования $\text{Li}_{1+x}\text{V}_3\text{O}_8$ осложнены малой чувствительностью рентгеновских лучей к легким элементам — кислороду и литию. С другой стороны, ванадий, обладая малым сечением когерентного рассеяния, практически не виден в дифракционных экспериментах на нейтронных пучках.

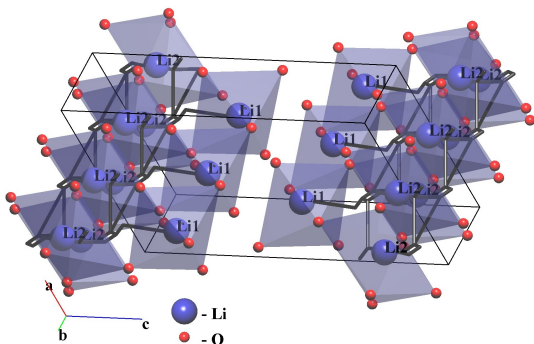


Рис. 1. Возможный путь миграции катионов Li^+ в $\text{Li}_{1+x}\text{V}_3\text{O}_8$ ($x = 0.1, 0.2$ и 0.3)

В данной работе кристаллическая структура $\text{Li}_{1+x}\text{V}_3\text{O}_8$ ($x = 0.1, 0.2$ и 0.3) изучалась в рамках комплексного подхода с использованием рентгеноструктурного и нейтронографического анализа. Комбинированная обработка данных дифракции рентгеновских лучей и нейтронов по методу Ритвельда на исследуемых образцах позволила уточнить структуру соединения и определить распределение атомов лития по кристаллографическим позициям.

Методом разбиения Вороного-Дирихле при помощи комплекса структурно-топологических программ TOPOS [3] проведен анализ путей миграции катионов лития в структуре $\text{Li}_{1+x}\text{V}_3\text{O}_8$ ($x = 0.1, 0.2$ и 0.3). Получена карта систем пустот и каналов. На рис. 1 приведена возможная карта проводимости для катионов Li^+ . Показано, что проводимость в $\text{Li}_{1+x}\text{V}_3\text{O}_8$ ($x = 0.1, 0.2$ и 0.3) является одномерной вдоль кристаллографического направления $[010]$ и обусловлена прямым перескоком катионов Li^+ , что согласуется с теоретическими расчетами.

1. S. Panero, M. Pasquali, G. Pistoia, J. Electrochem. Soc.: Accelerated Brief Communication. 130, 1225 (1983).
2. A. Pan, J. Liu, J.-G. Zhang, G. Cao, W. Xu, Z. Nie, X. Jie, D. Choi, B.W. Arey, C. Wang, S. Liang, J. Mater. Chem. 21, 1153 (2011).
3. V.A. Blatov, A.P. Shevchenko, D.M. Proserpio, Cryst. Growth Des. 14, 3576 (2014).

Секция 2.

Структурные исследования. Функциональные и конструкционные материалы, радиационное материаловедение

**НАВОДОРОЖИВАНИЕ СПЛАВА Zr-2.5%Nb В ПРОЦЕССЕ
ДЛИТЕЛЬНОГО НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ***С. А. Аверин, В. А. Цыгвинцев*

АО «ИРМ», Заречный. Россия

* E-mail: irm@irmatom.ru

Циркониевые сплавы широко используются в атомной промышленности как одни из основных конструкционных материалов активной зоны ядерных водо-водяных тепловых реакторов. Они подвергаются воздействию нейтронного облучения при различных температурах. Это приводит к изменению состояния и свойств материалов.

В реакторах РБМК эксплуатируются каналы системы управления и защиты (СУЗ) из циркониевого сплава Zr-2.5%Nb (Э125), которые предназначены для размещения органов управления и контроля мощности реактора, поддержания его в подкритическом состоянии.

Канал СУЗ состоит из центральной циркониевой трубы, к концам которой приварены переходники сталь–цирконий. В процессе эксплуатации канал подвергается воздействию нейтронного облучения плотностью потока быстрых нейтронов $\sim 2.5 \times 10^{16} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$, охлаждается водным теплоносителем температурой 40 °С на входе 80 °С на выходе.

Назначенный срок службы реакторов РБМК-1000 был 30 лет. В настоящее время он продлен до 45 лет. Планируется, что каналы СУЗ должны эксплуатироваться в течение всего срока работы реактора.

Обоснование работоспособности каналов СУЗ реакторов РБМК, которые работают за пределами проектного срока службы, является одной из составных задач для продления срока эксплуатации реакторов. В соответствии с регламентным контролем проводятся периодические послереакторные исследования участков каналов в защитных камерах.

В АО «ИРМ» проводятся регулярные послереакторные исследования топливных каналов и каналов СУЗ реакторов РБМК. К настоящему моменту исследованы каналы СУЗ со сроками эксплуатации от 4 до 40 календарных лет.

Выявлен факт повышения содержания водорода в материале труб и ниппелей переходников каналов СУЗ после эксплуатации в течение более 26 лет. Повышенное содержание водорода сопровождается появлением на внутренней поверхности локальных областей скопления гидридов типа «блистеров». Зарегистрированы факты потери герметичности ряда каналов СУЗ, повреждение которых произошло по ниппелю переходника в зоне термического влияния электронно-лучевой сварки. Фрактографические исследования установили, что разрушение хрупкое и происходит по гидридам.

Выведено предположение, что ускорение наводороживания циркониевых частей каналов СУЗ с образованием гидридов и блистеров обусловлено наличием отложений, которые оседают на внутренней поверхности канала из водного теплоносителя в процессе длительной эксплуатации. При достижении критической толщины отложений повышается парциальное давление водорода на поверхности канала, что и приводит к ускорению наводороживания.

ИНИЦИИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ С ПОМОЩЬЮ ОБЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ

В. И. Бобровский, С. В. Афанасьев, В. И. Воронин, В. А. Казанцев, Н. В. Катаева,
В. Д. Пархоменко, Н. В. Проскурнина, В. В. Сагарадзе*

Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

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

В исследованиях воздействия облучения быстрыми нейтронами на никелид титана [1] ранее было показано, что такое облучение подавляет существующий в данном сплаве эффект памяти формы (ЭПФ), проявляясь помимо этого в аморфизации материала.

Известно, что в марганцевых аустенитных сталях, которым также присущ ЭПФ, его возникновение связано с формированием ϵ -мартенсита деформации или деформационным двойникованием и образованием кристаллов мартенсита новых ориентационных вариантов. При этом масштаб проявления ЭПФ существенно зависит от микроструктуры материала, а именно от наличия выделений нанокарбидов ванадия [2,3], возникающих в процессе искусственного состаривания сталей, сопровождающегося уходом углерода из матрицы. С другой стороны, было установлено, что нейтронное облучение может оказывать существенное воздействие на такие подсистемы нанокарбидов, что позволяло ожидать и в них влияния нейтронного облучения на ЭПФ.

Предварительно деформированный в форме дуги окружности со стрелой прогиба 3.0 мм образец из аустенитной стали 30X13Г14СЗФ размерами $25 \times 5 \times 0.5$ мм был подвергнут облучению быстрыми нейтронами флюенсом $2 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$ в мокром вертикальном канале реактора ИВВ-2М при температуре 80°C .

Данный материал относится к классу нержавеющей марганцевых аустенитных сталей. ЭПФ в таких сталях, находящихся в исходном мартенситном состоянии, развивается в результате двойниковой переориентации ϵ -мартенсита при холодной деформации с последующим обратимым передвойникованием или обратным мартенситным превращением при нагреве [2].

Изначально ожидалось, что облучение уменьшит величину ЭПФ при последующем нагреве в сравнении с эталонным образцом. Однако вместо этого было выявлено проявление ЭПФ непосредственно под воздействием облучения с уменьшением стрелы прогиба примерно на 30 %. Контрольные эксперименты (ступенчатые отжиги аналогичных образцов и dilatометрические измерения) подтвердили, что нижняя температурная граница проявления иницируемого нагревом ЭПФ в данном материале лежит при 120°C , а при 80°C он отсутствует.

Тем самым впервые наблюдалось прямое иницирование ЭПФ нейтронным облучением.

Результаты исследования получены с использованием УНУ «Нейтронный материало-ведческий комплекс ИФМ» в рамках государственного задания МИНОБНАУКИ России (тема «ПОТОК № 122021000031-8»).

1. В.Д. Пархоменко, С.Ф. Дубинин. ФММ, 113, 679 (2012).
2. В.В. Сагарадзе, А.И. Уваров. Упрочнение и свойства аустенитных сталей. РИО УрО РАН, Екатеринбург (2013).
3. В.В. Сагарадзе, Б.Н. Гощицкий, Е.Г. Волкова, В.И.Воронин, И.Ф. Бергер, А.И. Уваров. ФММ, 111, 82 (2011).

ЭВОЛЮЦИЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА НЕРАВНОВЕСНЫХ СПЛАВОВ Fe–(31–40)Ga В ПРОЦЕССЕ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ

Т. Н. Вершинина^{1}, Н. Ю. Самойлова¹, С. В. Сумников¹, А. М. Балагуров¹,
В. В. Палачева², И. С. Головин²*

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

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

Интерес к Fe–Ga сплавам возник в начале 2000-х гг после открытия в них эффекта гигантской магнитострикции, для которой характерно наличие двух пиковых значений, соответствующих 19-20 и 27-29 ат.% Ga [1]. Таким образом, область с относительно малым содержанием галлия (< 30 ат.%) представляла наибольший интерес с точки зрения дальнейшего практического использования Fe–Ga сплавов и на ее изучение были направлены основные усилия ученых, в то время как сплавы с большим содержанием Ga несколько выпали из поля зрения. Тем не менее, в их изучении есть необходимость, так как при высоких концентрациях галлия возможно выделение метастабильной фазы Fe₁₃Ga₉, которая согласно теоретическим оценкам [1], может наблюдаться в этих сплавах при понижении концентрации Ga вплоть до 25 ат.%. Ее формирование способно влиять на поведение константы магнитострикции (быстрое уменьшение при содержании галлия > 30 ат.%). В ЛНФ ОИЯИ на реакторе ИБР-2 была выполнена серия дифракционных экспериментов, целью которых было определение того, в каких диапазонах концентраций и при каких условиях, в принципе, возможно выделение фазы Fe₁₃Ga₉.

Различия в фазовом составе сплавов наблюдаются уже в исходном as cast состоянии: 31.1Ga – (B2/D0₃), 32.9Ga – (B2 + Fe₁₃Ga₉), 34.4Ga – (B2/A2 + Fe₁₃Ga₉), 38.4Ga – (A2 + Fe₁₃Ga₉), Fe-39.5Ga – (Fe₁₃Ga₁₃ + α-Fe₆Ga₅ + D0₃ + Fe₁₃Ga₉). При нагреве до 850 °C и последующем охлаждении первых четырех сплавов удастся выявить некоторые общие закономерности в протекании в них фазовых превращений. Сплав Fe-39.5Ga этим закономерностям не соответствует, что связано с присутствием в нем интерметаллидов Fe₁₃Ga₁₃ и α-Fe₆Ga₅.

Пример фазовых превращений в сплавах Fe-(31-38)Ga приведен на рисунке 1. При нагреве в диапазоне температур 350-425 °C в сплаве Fe-31.1Ga наблюдается возникновение, а в сплавах Fe-32.9Ga и Fe-34.4Ga резкое возрастание объемной доли интерметаллида Fe₁₃Ga₉. Температура начала протекания этого процесса уменьшается с ростом концентрации галлия. Следующая стадия сопровождается возникновением кубической (на базе ГЦК) фазы L₁₂, причем рост объемной доли L₁₂ осуществляется как за счет уменьшения содержания ОЦК фаз, так и Fe₁₃Ga₉. По достижении максимального содержания L₁₂ при температуре ~ 570 °C реализуется переход Fe₁₃Ga₉ → α-Fe₆Ga₅. Температура исчезновения L₁₂ и формирования двухфазного состояния ОЦК + α-Fe₆Ga₅ близка для всех сплавов и лежит в диапазоне 650-670 °C. Температура перехода ОЦК + α-Fe₆Ga₅ → B2 растет с ростом содержания галлия. При охлаждении ввиду различий в фазовом составе при 850 °C сплав с 31.1 ат.% Ga ведет себя отличным от Fe-32.9Ga и Fe-34.4Ga образом. Если в последних двух при охлаждении происходит реакция B2 → B2 + α-Fe₆Ga₅, то в первом α-Fe₆Ga₅ не образуется вообще. В Fe-31.1Ga сначала происходит выделение L₁₂, а затем увеличивается доля интерметаллида Fe₁₃Ga₉. В Fe-32.9Ga и Fe-34.4Ga L₁₂ образуется после выделения α-Fe₆Ga₅. Во всех сплавах после охлаждения образуется фаза D0₃, которая согласно диаграмме состояния Fe-Ga является метастабильной.

В сплаве Fe-39.5Ga (рисунок 2) полное исчезновение метастабильного интерметаллида Fe₁₃Ga₉ происходит так же как и в остальных исследованных сплавах при 570 °C.

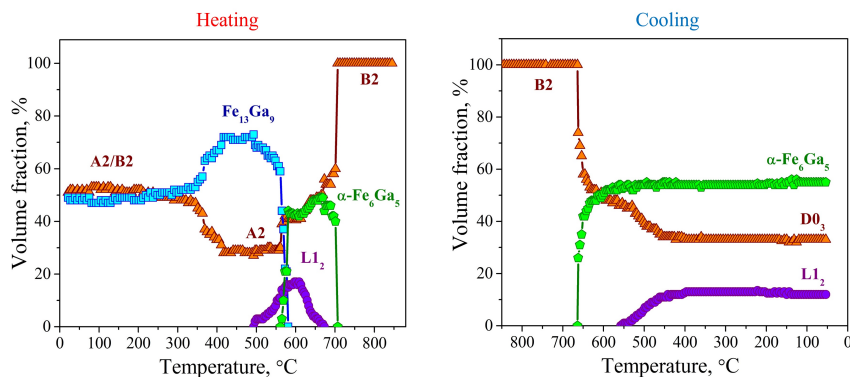


Рис. 1. Эволюция фазового состава сплавов Fe–31.1Ga в процессе нагрева и последующего охлаждения

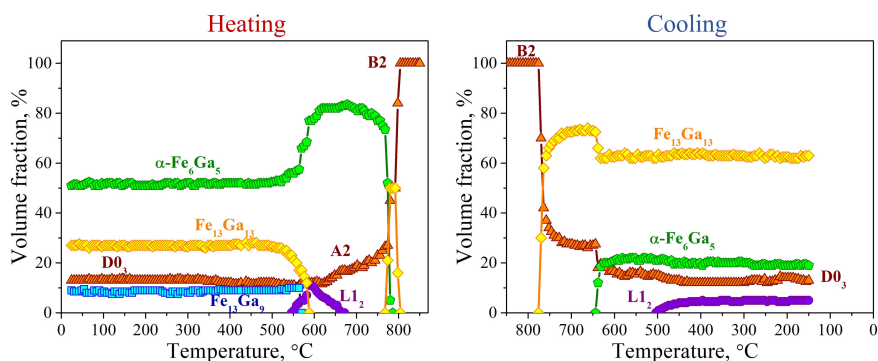


Рис. 2. Эволюция фазового состава сплавов Fe–39.5Ga в процессе нагрева и последующего охлаждения

Фаза $L1_2$ существует в интервале 550–660 °C. Ее максимальная объемная доля достигается при 580 °C и в этот же момент происходит полное исчезновение интерметаллида $Fe_{13}Ga_{13}$ и резкий рост доли $\alpha-Fe_6Ga_5$. При 770 °C $\alpha-Fe_6Ga_5$ полностью исчезает и происходит повторное выделение высокотемпературной фазы $Fe_{13}Ga_{13}$, которая существует в сплаве вплоть до 800 °C. По достижению 800 °C сплав переходит в однофазное B2 состояние, которое сохраняется вплоть до 850 °C.

При охлаждении от 850 °C происходит последовательное выделение фаз: при 770 °C - $Fe_{13}Ga_{13}$, при 640 °C - $\alpha-Fe_6Ga_5$, при 500 °C - $L1_2$.

В сплавах Fe-(31–40)Ga, области существования наблюдаемых фаз смещены и соответствуют областям фазовой диаграммы Fe-Ga с большими концентрациями галлия. Вероятной причиной такого поведения является сильно замедленное протекание диффузии, и, несмотря на проведение полного цикла нагрева и охлаждения, сплавы все еще находятся в неравновесном состоянии.

Работа выполнена в рамках проекта № 22-42-04404 РНФ.

1. E.M. Summers, T.A. Lograsso, M. Wun-Fogle, J. Mater. Sci. 42, 9582–9594 (2007).
2. A. Leineweber, H. Becker, A.O. Boev, I.A. Bobrikov, A.M. Balagurov, I.S. Golovin, Intermetallics 131, 107059 (1–8) (2020).

СТРУКТУРЫ И ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ТРОЙНЫХ СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ Fe

Б. Ержанов^{1,3}, С. В. Сумников¹, А. М. Балагуров¹, И. С. Головин²*

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

² Университет науки и технологий МИСиС, Москва, Россия

³Институт Физики КФУ, Казань, Россия

*E-mail: bekarys@jinr.ru

Открытие увеличения магнитострикции α -Fe при частичном замещении железа на галлий [1] вызвало появление большого числа исследований, в которых аналогичный эффект искался в разнообразных бинарных (Fe-Al, Fe-Ge, Fe-Si и др.) и тройных (Fe-Ga-Al, Fe-Ga-Ge и др.) сплавах на основе железа. Физические и технические свойства этих функциональных материалов во многом зависят от их специфической атомной структуры, объемного содержания различных структурных фаз и их микроструктурного состояния.

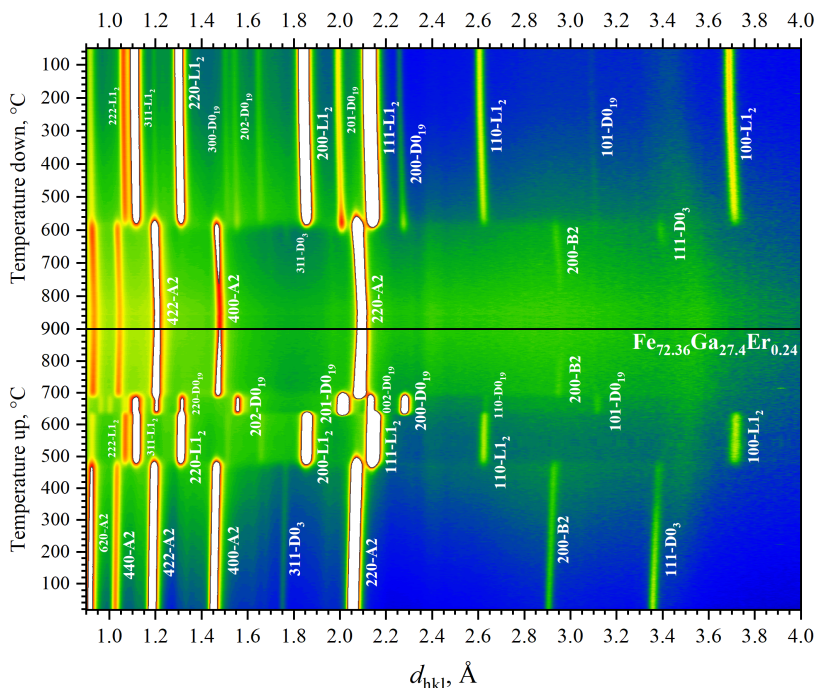


Рис. 1. Дифракционные спектры образца $\text{Fe}_{72.36}\text{Ga}_{27.4}\text{Er}_{0.24}$, измеренные в ходе его непрерывного нагрева от 20 до 900 °С и последующего охлаждения до 50 °С со скоростью ± 2 °С/мин. Ось температуры направлена снизу вверх. 2D карта содержит 958 отдельных дифракционных спектров со временем измерения 1 минута

В настоящее время имеется немалое число исследований структуры и свойств сплавов Fe-Ga (повышенная магнитострикция) и сплавов Fe-Al (улучшенные механические

свойства) [2]. Однако структурные работы по тройным сплавам Fe-Ga-Al (перспективные по сочетанию механических и магнитных свойств), практически отсутствуют. Еще одной интересной структурной темой являются исследования влияния легирования редкоземельными элементами (РЗМ), такими как Tb, Dy, Ce, Y, Er, Pr, Sm, La, на характеристики сплавов Fe-Ga.

В настоящей работе приведены исследования эволюции структурных фаз и микроструктурного литого состояния составов $\text{Fe}_{100-(x+y)}\text{Ga}_x\text{Al}_y$ в диапазоне $17 \leq (x+y) \leq 39$ at.% [3] и $\text{Fe}_{100-(x+y)}\text{Ga}_x\text{РЗМ}_y$, (с $x = 27.4\%$ и 26.7%), где в качестве редкоземельных металлов использовались элементы Er ($y = 0.5\%$ и 0.2%) и Yb ($y = 0.5\%$ и 0.24%). Результаты получены в нейтронных дифракционных экспериментах, выполненных с высоким разрешением и в режиме непрерывного сканирования по температуре при нагреве до $\sim 900^\circ\text{C}$ и последующем охлаждении. Установлено, что структуры литых состояний тройных сплавов в изученном диапазоне содержания Ga и Al в основных чертах повторяют структуру двойного состава $\text{Fe}_{100-y}\text{Al}_y$ до $y \approx 50\%$. А именно, в них наблюдаются только кубические фазы (A2, D0₃ и B2). Расширение диапазона образования кубических фаз, образующихся на основе ОЦК-ячейки, в тройных сплавах по сравнению с $\text{Fe}_{100-x}\text{Ga}_x$, свидетельствует о роли Al в стабилизации этих структур.

В составах $\text{Fe}_{100-(x+y)}\text{Ga}_x\text{РЗМ}_y$ были обнаружены как кубические фазы A2, D0₃, B2, A1, L1₂, так и гексагональные фазы A3 и D0₁₉, см. рисунок 1. Структура составов с содержанием редкоземельных элементов в количестве 0.2 % Yb или 0.24 % Er демонстрируют некоторое сходство со структурой сплава $\text{Fe}_{73}\text{Ga}_{27}$ [4]. А легирование Fe-Ga сплавов редкоземельными элементами в количестве 0.5 % привело к частичной или полной стабилизации кубических структур на основе ОЦК-ячейки.

Работа выполнена в рамках проекта № 22-42-04404 РНФ.

1. A. E. Clark, J. B. Restorff, M. Wun-Fogle, T. A. Lograsso, and D. L. Schlagel, IEEE Trans. Magn. 36, 3238 (2000).
2. И.С. Головин, В.В. Палачева, А.К. Мохамед, А.М. Балагуров, Физика металлов и металловедение. том 121, № 9. с. 937–980 (2020).
3. А. М. Балагуров, И.А. Бобриков, С.В. Сумников, Б. Ержанов, Д.Г. Чубов, В.В. Палачева, И.С. Головин, Физика твердого тела. том 64, 1873–1881 (2022).
4. A.M. Balagurov, I.S. Golovin, I.A. Bobrikov, V.V. Palacheva, S.V. Sumnikov, V.B. Zlokazov, J. Appl. Crystallogr. 50,198–210 (2017).

**НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ $\sin^2\psi$ МЕТОДОМ***И. Д. Карпов^{1*}, В. Т. Эм¹, Р. Mikula²*¹НИИЦ «Курчатовский институт, Москва, Россия²Nuclear Physics Institute CAS, 250 68 Řež, Czech Republic*E-mail: Karpov_ID@nrcki.ru

Нейтронный метод измерения напряжений позволяет измерить три главные компоненты тензора деформаций/напряжений внутри материалов и изделий большой толщины (~ 5 см в стали). Однако метод имеет ограничения при измерении напряжений вблизи поверхности. Связано это с тем, что при неполном погружении пробного объема (gauge volume, GV) в материал, дифракционный пик смещается и необходимо делать поправку на это смещение, не связанное с напряжением. В последние годы была разработана программа расчёта поправок и проведено измерение напряжений до глубины ~ 0.2 мм. Отметим, что измеряется напряжение, усредненное по объёму материала, находящемуся в части пробного объема, погружённого в материал. Поэтому пространственное разрешение ухудшается с увеличением глубины измерения.

Другой метод измерения напряжений вблизи поверхности основан на использовании узких (~ 0.2 мм) щелей и проведении обычных нейтронных измерений. Недостатком этого метода является то, что щели должны быть расположены близко (~ 10 мм) от пробного объема (центра дифрактометра), что ограничивает допустимую толщину образца (~ 6 мм).

Минимальная возможная глубина измерений в обоих методах определяется минимальным количеством материала, которое можно измерить на данном приборе. Чем меньше глубина, тем меньше объём отражающего материала и меньше интенсивность дифракционного пика. При нейтронных измерениях одна компонента деформации измеряется в геометрии отражения, а две компоненты в геометрии пропускания, когда нейтронный пучок проходит всю толщину образца. Из-за ослабления нейтронного пучка в материале с уменьшением глубины уменьшается допустимая толщина материала.

В данной работе исследовалась возможность нейтронных измерений напряжений вблизи поверхности хорошо известным рентгеновским $\sin^2\psi$ методом. Обычно этот метод не используется в нейтронных измерениях, поскольку в объёме материала необходимо измерять все три главные компоненты тензора деформации. В рентгеновском методе измеряются напряжения на поверхности, где нормальная компонента напряжений равна нулю и реализуется двухосное напряжённое состояние. Компоненты напряжений в плоскости определяются $\sin^2\psi$ методом.

Можно было предположить, что во многих случаях, на малых глубинах от поверхности нормальная компонента напряжений близка к нулю и можно использовать $\sin^2\psi$ метод. Чем меньше глубина, тем меньше нормальная компонента и тем лучше должен работать этот метод. Как и в случае рентгеновских измерений, критерием применимости $\sin^2\psi$ метода является линейная зависимость деформации, межплоскостного расстояния или угла рассеяния от $\sin^2\psi$.

В работе показано, что в стальных деталях, изготовленных методами аддитивных технологий и стальной пластине, обработанной дробеструйным аппаратом, напряжений на глубине до 1 мм, можно определять $\sin^2\psi$ методом. Метод не имеет ограничений по толщине образца, поскольку все измерения проводятся в геометрии отражения.

Работа выполнена на оборудовании УНУ НИК ИР-8.

КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕМЕНТИТА В СТАЛЯХ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ НЕЙТРОНОВ

Т. А. Лычагина^{1}, Д. И. Николаев¹, А. А. Зисман²*

¹Объединенный институт ядерных исследований, Московская область, Дубна, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: lychagina@jinr.ru

Карбиды наряду с остаточным аустенитом образуются при термической обработке сталей. Хотя такие дисперсные фазы имеют небольшие объемные доли (порядка нескольких процентов и менее), их влияние на механические свойства стали при низких температурах очень велико. Цементит представляет собой карбид железа с формулой Fe_3C и имеет орторомбическую кристаллическую структуру. В углеродистой стали цементит выделяется из аустенита по мере того, как аустенит превращается в феррит при медленном охлаждении или из мартенсита во время отпуска.

Рентгеновская дифракция (РД) обычно считается наиболее надежным методом оценки доли остаточного аустенита [1]. Но у этой методики есть некоторые ограничения. Во-первых, этим методом можно определить содержание остаточного аустенита только на поверхности образца. Во-вторых, его можно применять только для бестекстурных материалов. Объемы металлов, изучаемые методом нейтронной дифракции (НД), на несколько порядков превышают объемы, которые доступны рентгеновской дифракции (РД), что открывает большие перспективы в фазовом анализе. В частности, с помощью НД можно оценить очень малые объемные доли (менее одного процента) остаточного аустенита, незаметные с помощью РД.

Существующие методики [1-2] для количественного определения остаточного аустенита в сталях также могут быть применены для определения цементита. Однако даже методика, основанная на применении НД [2], имеет следующие серьезные недостатки. Во-первых, нет прямых способов проверить точность результатов; во-вторых, на измерения сильно влияет кристаллографическая текстура. Кроме того, этот метод подразумевает, что цементит является единственной второй фазой в стали.

В данной работе предложена новая методика определения цементита в высокопрочных сталях методом нейтронной дифракции. Эта методика основана на предложенном ранее авторами методе определения остаточного аустенита [3-4]. Измерения нейтронных спектров проводились на текстурном дифрактометре СКАТ, расположенном на канале 7-А2 импульсного реактора ИБР-2 (ОИЯИ, Дубна, РФ), с целью исключения влияния текстуры на результат. Основными достоинствами предлагаемой методики является непосредственная проверяемость получаемых результатов, а также независимость результатов от наличия кристаллографической текстуры в исследуемых образцах.

Выполнены измерения калибровочных образцов с заданным содержанием цементита. На рисунке 1 представлен участок нейтронного времяпролетного спектра для четырех калибровочных образцов, который иллюстрирует, как увеличивается интенсивность дифракционных рефлексов фазы цементита с ростом объемной доли этой фазы в образцах. Измерения проведены на составных образцах, имеющих разное содержание цементита: первый образец состоял на две трети из армко-железа ($\alpha\text{-Fe}$) и на одну треть из перлита (perlite2_33), второй образец состоял на одну треть из армко-железа

(α -Fe) и на две трети из перлита (perlite2_67). Содержание цементита в первом образце 3.8 %, во втором образце - 7.3 %. Образец perlite2_100 полностью состоял из перлита с содержанием цементита 10.64%. Образец armko полностью состоял из армко-железа (α -Fe).

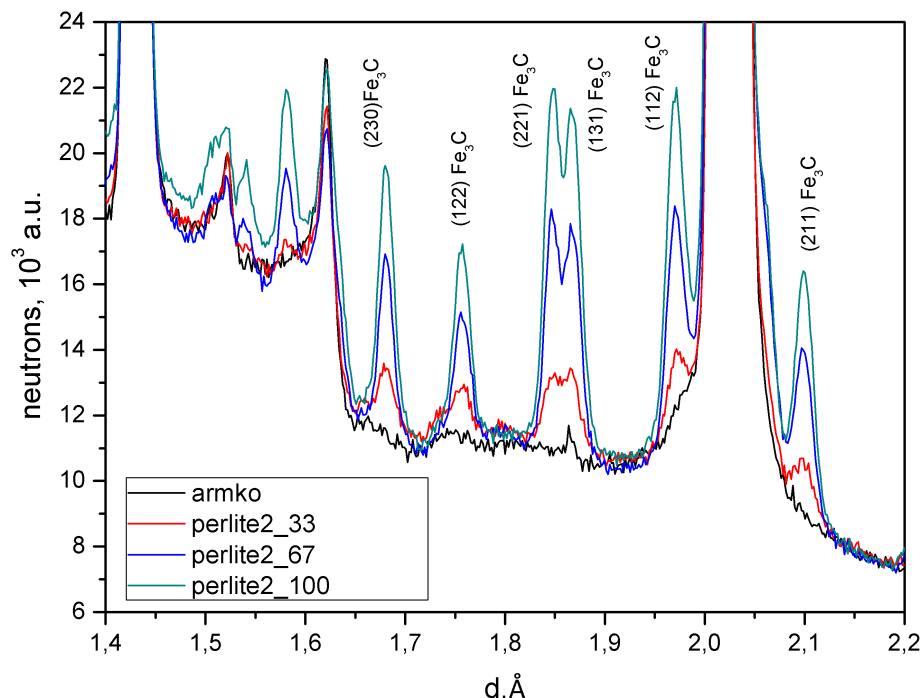


Рис. 1. Участок нейтронного времяпролетного спектра для калибровочных составных образцов стали

На основе этих измерений были рассчитаны калибровочные линии, которые далее использовались для определения содержания цементита в образцах из среднеуглеродистой сталей (0,3–0,4 %) с пределом текучести 1500 МПа, подвергнутых различным отжигам (400–550 °C) после заковки.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, Проект №. 22-19-00627.

1. ASTM E975-00, Standard Practice for X-Ray Determination of Retained Austenite in Steel with Near Random Crystallographic Orientation, vol. 03.01, ASTM International, W. Conshohocken, PA, (2003).
2. T. Gnaupel-Herold, A. Creuziger, Mat. Sci. Eng. A, 528, 3594 (2011).
3. T. Lychagina, D. Nikolayev, A. Zisman, E. Yashina, Adv. Eng. Mat. 20, DOI 10.1002/adem.20170559 (2018).
4. А.А. Зисман, Д.И. Николаев, Т.А. Лычагина, Е.А. Яшина, Журнал технической физики, 88, №. 11, 1752-1758 (2018).

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ НА МАЛОУГЛОВОЕ РАССЕЙАНИЕ НЕЙТРОНОВ В ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЯХ

Ф. С. Джепаров, Д. В. Львов, С. В. Рогожкин, А. Н. Тюлюсов, Й. Шмайсер, А. С. Шутов

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

* E-mail: lvov@itep.ru

Дисперсно-упрочненные оксидами (ДУО) сплавы и стали обеспечивают значительное повышение жаропрочности в сравнении с традиционными материалами за счет внедрения значительного числа равномерно распределенных оксидов с размерами от нескольких нанометров. Характеризация таких малых объектов требует применения или методик ультрамикроскопии, таких как просвечивающая электронная микроскопия и атомно-зондовая томография (АЗТ), или спектроскопии, как методы малоуглового рентгеновского или нейтронного рассеяния. В работе [1] малоугловое рассеяние нейтронов (МУРН) применялось для анализа ДУО сталей. Обработка угловых спектров МУРН проводилась без учета пространственных корреляций в расположении неоднородностей.

В данной работе на основе анализа данных АЗТ была определена парная корреляционная функция рассеивателей. Интенсивность однократного малоуглового рассеяния на образце с одинаковыми неоднородностями имеет вид [2,3]

$$I_1(\mathbf{q}) = N |f_0(\mathbf{q})|^2 \left\{ 1 + c \int_V d^3x \psi(\mathbf{x}) e^{-i\mathbf{q}\mathbf{x}} \right\}, \quad \psi(\mathbf{x}) = \frac{C_2(\mathbf{x})}{c^2} - 1. \quad (1)$$

Здесь $f_0(\mathbf{q})$ - амплитуда рассеяния на одной неоднородности, а $C_2(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = C_2(\mathbf{x} - \mathbf{y})$ - парная корреляционная функция, при больших расстояниях $C_2(\mathbf{x}) \rightarrow c^2$, где c - концентрация неоднородностей. Если расположение неоднородностей изотропно, но они имеют распределение по размерам:

$$I_1(\mathbf{q}) = N \langle |f_0(\mathbf{q}, R)|^2 \rangle + Nc \left\langle f_0(\mathbf{q}, R_1) f_0^*(\mathbf{q}, R_2) \int_0^\infty 4\pi r^2 dr \frac{\sin qr}{qr} \psi(r, R_1, R_2) \right\rangle. \quad (2)$$

Здесь R_i - радиусы неоднородностей. Полученная экспериментально функция ψ аппроксимировалась различными модельными функциями, допускающими аналитическое вычисления интеграла (2), как например

$$\psi(r, R_1, R_2) = -\theta(r < R_1 + R_2) + g_0 \frac{R_1 + R_2}{r} \exp\left(-\frac{r - (R_1 + R_2)}{r_c}\right) \theta(r > R_1 + R_2).$$

Здесь r_c - корреляционная длина. После этого аппроксимация угловых спектров МУРН выполнялась по методу наименьших квадратов, где распределение неоднородностей по размерам предполагалось лог-нормальным, и определялись параметры неоднородностей. Продемонстрировано влияние имеющихся корреляций в расположении включений на функцию распределения неоднородностей по размерам, определяемую из данных МУРН.

1. С.В. Рогожкин, Ю.Е. Горшкова, Г.Д. Бокучава и др., Поверхность 2023, в печати.
2. Д.И. Свергун, Л.А. Фейгин, Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние, Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 280 с.
3. Ф. С. Джепаров, Д. В. Львов. Письма в ЖЭТФ, т. 103, с. 163 – 167, 2016

**ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ АДДИТИВНЫХ
ПРОИЗВОДСТВ МЕТОДАМИ НЕЙТРОННОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ**

М. М. Мурашев^{1}, В. Т. Эм¹, В. П. Глазков¹, И. В. Шишковский², К. И. Макаренко²*

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

*E-mail: mihail.mmm@inbox.ru

В настоящее время аддитивные технологии (АТ) являются одним из наиболее динамично развивающихся направлений современной промышленности. Это объясняется тем, что они позволяют значительно уменьшить материалоемкость, трудоемкость и время изготовления деталей по сравнению с традиционными технологиями, основанными на удалении первичного материала (точение, фрезерование, шлифование, строгание). С помощью АТ можно получить принципиально новые материалы или конструкции, которые трудно или невозможно получить традиционными методами.

АТ изделия создаются путем послойного наплавления металла до нужной толщины. Поскольку создание АТ материала происходит при больших градиентах температур и высоких скоростях нагрева/охлаждения, в изделиях образуются большие (близкие к пределу текучести материала) остаточные напряжения, которые могут сильно изменить прочностные свойства и геометрические параметры материала, а также привести к образованию трещин. Металлические порошки, из которых методами АТ изготавливаются детали, имеют высокую удельную поверхность, что обуславливает перенос адсорбированных на поверхности порошинок загрязняющих веществ в объем готового изделия. Неоптимальный выбор скоростного и температурного режима печати приводит к образованию пор в образце. Количество трещин, пор и включений во многом определяет итоговые механические свойства готового изделия. По этой причине контроль АТ изделий, в том числе неразрушающими методами, является актуальной задачей.

В докладе продемонстрированы возможности экспериментальных установок на реакторе ИР-8 НИЦ «Курчатовский институт» для исследований методами нейтронной визуализации внутренних дефектов размерами от 200 мкм в металлических изделиях, полученных с помощью аддитивных технологий.

Показано, что использование монохроматических (станция ДРАКОН) и полихроматических (томограф ПОНИ) нейтронных пучков позволяет получить взаимодополняющую информацию о внутренней структуре изделий.

Работа выполнена на оборудовании УНУ НИК ИР-8.

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ
НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ СТАЛИ 07X15H19M2Г2БТР***В. Л. Панченко, И. А. Портных, А. Е. Устинов*

АО «ИРМ», Заречный, Россия

*E-mail: panchenko_vl@irmatom.ru

Усовершенствование технологий изготовления элементов конструкций атомной техники, вариации химического состава материалов для их производства даже в пределах имеющихся технических условий приводят к изменениям служебных свойств изделий – прочности и пластичности, формоизменению, коррозионной стойкости. Чтобы более целенаправленно воздействовать на материалы с целью улучшения служебных характеристик изделий, требуется знание структурно-фазового состояния материала и его зависимости от условий облучения. Для этого требуется собрать и систематизировать большой объем экспериментальных результатов по свойствам и структуре материала.

В работе проводится анализ структурно-фазового состояния стали 07X15H19M2Г2 БТР после облучения в реакторе БН-600. Исследования проводились на образцах оболочек твэлов, облученных в составе одной ТВС. Были исследованы образцы оболочек четырех твэлов, из разных участков по высоте активной зоны. Микроструктура изучалась на электронном микроскопе высокого разрешения Talos F200X G2, оснащенного энергодисперсионным детектором характеристического рентгеновского излучения Super-X EDS (ThermoFisher Scientific), позволяющим проводить регистрацию и анализ спектров элементов в диапазоне от Be4 до Am95 с пределом обнаружения ~ 0,1 масс. %.

Исследования показали, что в условиях облучения уже при температуре ~ 370 °С при дозах порядка 0,1 сна в сплаве происходит сегрегация Si и Ni на дислокациях и границах зерен. В условиях облучения при более высоких температурах наблюдалось интенсивное образование радиационно-стимулированных вторых фаз. Идентифицированы основные фазы — G, γ' , $M_{23}C_6$ и M_6C в диапазоне температур (440...590) °С. Выделения фазы Лавеса обнаружены только в высокотемпературном диапазоне (560 ... 630) °С. Мелкодисперсные игольчатой формы фосфиды обнаружены в диапазоне (510 ... 630) °С. Мелкодисперсные частицы никелидов титана обнаружены в температурном диапазоне (540 ... 590) °С. Также в некоторых образцах обнаружены вторичные мелкодисперсные карбиды типа TiC при температуре 590 °С и выше.

Очевидно, что с ростом температуры и дозы облучения в материале оболочек увеличивалась объемная доля вторых фаз, как следствие менялся состав матрицы сплава. Микроанализ показал, что в наибольшей степени матрица обеднилась по никелю (на 40...50 %) и кремнию (на 60...80 %), в результате чего в матрице возросло относительное содержание хрома, несмотря на то, что объем хромсодержащих фаз также увеличивался с ростом температуры.

ЭВОЛЮЦИЯ РАДИАЦИОННОЙ ПОРИСТОСТИ СТАЛИ 07X15N19M2G2BTP ПРИ НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ В ЗОНЕ МАЛОГО ОБОГАЩЕНИЯ РЕАКТОРА БН-600 ДО ПОВРЕЖДАЮЩИХ ДОЗ ОТ 0.3 ДО ~ 106 снА В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР ОБЛУЧЕНИЯ ОТ 370 ДО 630 °С

И. А. Портных, В. Л. Панченко, А. Е. Устинов, А. В. Козлов*

АО «ИРМ», Заречный, Россия

*E-mail: portnyh_ia@irmatom.ru

Для повышения эффективности реакторов на быстрых нейтронах планируется увеличение срока эксплуатации твэлов до достижения выгорания топлива более 15 % т.а. и соответственно повреждающей дозы не менее 140 снА. Для определения предельных ресурсных возможностей твэлов с оболочками из этой стали необходимо знание закономерностей протекания процесса распухания в стали 07X15N19M2G2BTP (ЭК164-ИД х.д.) при ее облучении в диапазоне температур и доз, характерных для быстрых реакторов. Одним из факторов, лимитирующих ресурс эксплуатации твэла, является образование и рост радиационных пор в материале оболочки, которое приводит к формоизменению твэла, уменьшению проходного сечения теплоносителя, а также к исчерпанию деформационной способности оболочки.

Целью работы являлось получение экспериментальных данных по радиационной пористости стали ЭК164-ИД х.д. после облучения в ЗМО реактора БН-600 при температурах 370-630 °С до максимальных повреждающих доз ~ 106 снА и выявление характерных особенностей процесса образования и эволюции радиационных пор.

Исследования проводились на образцах оболочек твэлов из стали ЭК64-ИД х.д. прошедших эксплуатацию в реакторе БН-600 до достижения максимальных повреждающих доз ~ 106 снА в составе ТВС зоны малого обогащения (ЗМО) в течение 750 эфф. сут. Были исследованы образцы оболочек четырех твэлов, вырезанные из различных участков по высоте твэла, набравших различную повреждающую дозу, т.к. различались скорости набора дозы.

Микроструктура изучалась в просвечивающем режиме на электронном микроскопе высокого разрешения Talos F200X G2. Обработка изображений проводилась с использованием программы для оцифровки и количественной обработки изображений - цифровая фотолаборатория SIAMS Photolab. По результатам измерений строились гистограммы распределения пор по размерам. Гистограммы представлялись в виде суммы унимодальных распределений, при этом выделяются системы пор: мелкие - гелий-вакансионные зародыши пор (пузырьки), и более крупные (среднего размера и крупные) поры, растущие преимущественно за счет поступления вакансий. После чего рассчитывались медиальные размеры пор каждого типа, их концентрация, величина распухания.

Однозначных зависимостей среднего размера и концентрации мелких, среднего размера и крупных пор от повреждающей дозы в образцах оболочек твэлов из стали ЭК164-ИД х.д. выявить не удалось. Средний размер мелких и крупных пор увеличивается с ростом температуры облучения, средний размер пор среднего размера увеличивается до температуры облучения ~ 450 °С, не изменяется до температуры облучения ~ 520 °С и снижается с дальнейшим ростом температуры облучения. Концентрация мелких и крупных пор уменьшается с ростом температуры облучения, а концентрация пор среднего размера имеет максимум при температуре облучения ~ 450 °С. Суммарная площадь поверхности пор в стали ЭК164-ИД х.д. во всех температурных диапазонах облучения увеличивается с ростом пористости, стремясь к насыщению.

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА БАЗЕ ПЛАСТИКА С ВНЕДРЕНИЕМ БОРСОДЕРЖАЩИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ

Ю. О. Четвериков^{1*}, А. А. Быков¹, Н. А. Коваленко¹, А. В. Кротов², А. А. Мистонов³,
М. М. Мурашев⁴, И. В. Смирнов³, В. В. Тарнавич¹

¹Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, НИЦ “Курчатовский Институт”, Гатчина, Россия

²ООО «РАД», г. Всеволожск, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

⁴Курчатовский комплекс синхротронно-нейтронных исследований, НИЦ “Курчатовский Институт Москва, Россия

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

Проведены исследования механических свойств, нейтронного пропускания и радиационной стойкости образцов на основе пластиковых композитных материалов с борсодержащим наполнителем массовой долей 25-37 %. Композитные образцы изготовлены с использованием метода плавленных нитей (FFF). В качестве материала полимерной матрицы использовались акрилонитрилбутадиенстирольные (ABS) и полиэтилен-терефталатгликолевые (PETG) пластики, а в качестве борсодержащих наполнителей – порошок нитрида бора и порошок аморфного бора.

По результатам измерений нейтронной трансмиссии на монохроматическом пучке реактора ИР-8 (основной канал монохроматического нейтронного пучка - 2.4 Å), использование бора в качестве наполнителя в пластике обеспечивает уменьшение глубины проникновения нейтронов на 56 %-78 %: от 3.0 мм для образца из пластика без наполнителя до 0.65 мм для образца с порошком аморфного бора.

Механические испытания на растяжение и изгиб показали, что добавка борсодержащего порошка приводит к развитию хрупкости композиционных материалов. У борсодержащих образцов наблюдалось снижение прочности на 40-55 %, а разрушение образцов происходило без пластической деформации, в то время как в образцах из ABS и PETG пластическая деформация занимает значительную часть диаграммы испытаний.

Изготовленные образцы композитных и матричных пластиков экспонировались на нейтронном источнике флюенсом 10^{11} нейтронов/см². Под действием нейтронного излучения у пластика PETG с аморфным бором наблюдалось увеличение прочности и пластичности на величину порядка 20 %. У образцов матричных пластиков (ABS и PETG), а так же пластика ABS с нитридом бора значительных изменений механических свойств после облучения не наблюдалось.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-01186 «Разработка и исследование композитных материалов с повышенными характеристиками по радиационной защите»). Авторы выражают благодарность сотрудникам ресурсного центра «Исследования экстремальных состояний материалов и конструкций» Научного парка СПбГУ за проведение механических испытаний.

**ПЕРВОПРИНЦИПНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОНОННЫХ СПЕКТРОВ
КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ, СОДЕРЖАЩИХ ПРИМЕСИ И ДЕФЕКТЫ**

П. В. Чирков^{1*}, Г. С. Ельцов¹, А. В. Караваев¹, В. В. Дремов¹, А. А. Мирзоев²

¹РФЯЦ–ВНИИТФ, Снежинск, Россия

²Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

*E-mail: chirkovpv@vniitf.ru

Рассеяние нейтронов используется в том числе и для получения фононных спектров материалов. При этом, недостаточно изученным остается вопрос о чувствительности фононных спектров к различного рода дефектам кристаллической решетки и примесям. Целью данной работы является расчетно-теоретическое исследование степени влияния легирующих добавок и наноразмерных дефектов на дисперсионные кривые фононов, что представляет интерес с точки зрения определения «разрешающей способности» экспериментальных спектров (используемых детекторов) в плане реагирования на изменения микроструктуры.

Теоретическое изучение фононов в неупорядоченных сплавах замещения, несмотря на бурное развитие квантово-химических методов моделирования «из первых принципов», до последнего времени было весьма ограниченным, поскольку большинство подходов рассматривало достаточно грубые приближения. Одним из таких примеров является приближение когерентного потенциала (Coherent Potential Approximation, CPA) [1], такой среднепольный подход учитывает только распределение массы, без учета зависимости компонент матрицы силовых констант от типа взаимодействующих элементов. В последнее время были предложены более точные теоретические подходы к изучению фононных состояний неупорядоченных сплавов [2], позволяющие получать данные о спектральных характеристиках фононов с учетом симметрии кристаллической решетки.

В данной работе неупорядоченные сплавы исследовались на примере системы Fe-Cr с объемно-центрированной кубической кристаллической решеткой, данный материал служит основой многих марок ферритно-мартенситных сталей. Первопринципные расчеты в рамках теории функционала плотности (Density Functional Theory, DFT) были проведены при помощи PAW-метода (Projector Augmented Wave) [3] с использованием обменно-корреляционного функционала в форме PBE (Perdew-Burke-Ernzerhof) [4], реализованные в программном пакете VASP [5]. Базисные функции в виде плоских волн имели энергию обрезания равной 500 эВ, расчеты проводились для спин-поляризованного магнитного состояния. Псевдопотенциалы для железа и хрома имели в качестве валентных электронов 8 и 6 электронов на 3d и 4s орбиталях соответственно. Сетка в обратном пространстве имела размерность $2 \times 2 \times 2$ или 4 неприводимых k -точки. Сходимость по энергии при выполнении минимизации полной энергии внутри самосогласованного цикла достигалась на уровне 10^{-8} эВ на систему.

В качестве примера здесь приводятся результаты для суперячейки изначально содержащей 128 атомов в ОЦК-решетке, т.е. $4 \times 4 \times 4$ трансляции элементарной ячейки. Атомы Cr в количестве 15 (11.72 ат. %) для получения структуры, наиболее соответствующей неупорядоченному сплаву, распределялись по суперячейке как атомы замещения при помощи метода SQS (Special Quasirandom Structure) [6], реализованного в

пакете программ ATAT [7]. Вторым типом моделируемой суперячейки являлось включение вторичной α' -фазы в матрицу ОЦК-железа, 15 атомов хрома представляли собой преципитат размером α_0 , т.е. один центральный атом и 14 соседей в первой и второй координационной сфере.

Расчёт матрицы силовых констант второго порядка Φ_{ij} проводился при помощи метода малых смещений, равных $0.01 \text{ \AA}$, представленного в пакете *phonopy* [8]. Поскольку в случае неупорядоченной системы моделируемая суперячейка в $N_{\text{at}} = 128$ атомов рассматривается в качестве элементарной, то количество конфигураций, для которых необходимо провести расчет сил, составляет $768 (6 \cdot N_{\text{at}})$, после чего становится возможным вычисление матрицы Φ_{ij} размером $1152 (9 \cdot N_{\text{at}}) \times 1152$ элементов. В принципе, из силовых констант можно получить спектральные характеристики фононов через динамическую матрицу. Однако, дисперсионные соотношения будут содержать большое число линий, по три на каждый атом в элементарной ячейке.

Для получения так называемых «развернутых» дисперсионных кривых с учетом симметрии кристаллической решетки для неупорядоченного сплава FeCr был использован метод, предложенный в работе [2]. Результаты расчетов для неупорядоченного сплава и матрицы с преципитатом в сравнении с данными для чистого железа представлены на Рис. 1. Из графиков видно, что ширина спектров в области низких частот до 2 ТГц относительно невелика, однако в области частот выше 8 ТГц в окрестности точек **H** и **N** наблюдается значительное уширение спектра, вызванное примесными атомами хрома. Рисунок также демонстрирует отличие дисперсионных кривых для двух типов распределения хрома. В работе рассмотрены также другие типы дефектов и микроструктуры.

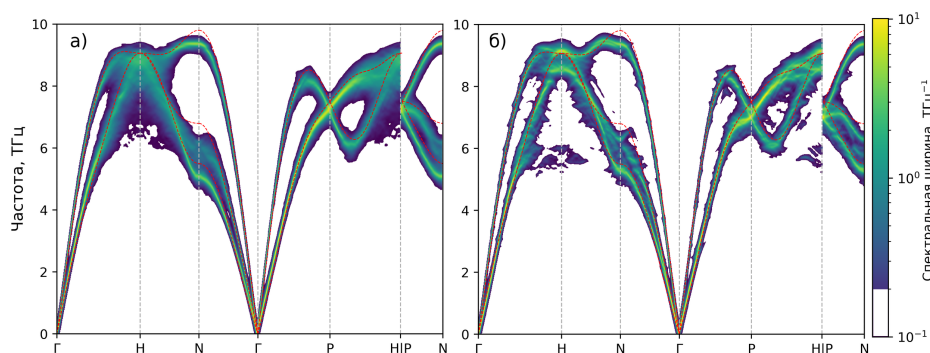


Рис. 1. Дисперсионные соотношения для системы Fe-12Cr вдоль высокосимметричных направлений в неупорядоченном случае (а) и для включения α' -фазы (Cr), (б) полученные с помощью метода развертки фононов. Красным пунктиром изображены результаты для чистого ОЦК-Fe.

1. D. W. Taylor, Phys. Rev. 156, 1017 (1967).
2. Y. Ikeda, A. Carerras, A. Seko, Phys. Rev. B 95, 024305 (2017).
3. P. E. Blochl, Phys. Rev. B 50, 17953 (1994).
4. J. P. Perdew, K. Burke, M. Ernzerhof, Phys. Rev. Lett. 77, 3865 (1996).
5. G. Kresse, J. Furthmuller, Comput. Mater. Sci. 6, 15 (1996).
6. A. Zunger, S. H. Wei, L. G. Ferreira, J. E. Bernard, Phys. Rev. Lett. 65, 353 (1990).
7. A. van de Walle, P. Tiwary, M. de Jong, CALPHAD 42, 13 (2013).
8. A. Togo, J. Phys. Soc. Jpn. 92, 012001 (2023).

Секция 3.

Магнетизм.

Магнитные структуры и взаимодействия

ИЕРАРХИЯ МАГНИТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ГЕЛИМАГНЕТИКАХ И СКРМИОННАЯ РЕШЕТКА

С. В. Григорьев^{1,2*}

¹Петербургский институт ядерной физики, НИЦ «Курчатовский институт», 188300 Гатчина, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, 198504 Санкт-Петербург, Россия

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

Кубическая нецентросимметричная структура соединений В20 образует винтовую (гомокиральную) структуру с волновым вектором $k_s = D/J$, обусловленную конкуренцией двух взаимодействий: ферромагнитного обменного взаимодействия $J = A/S$ с жесткостью спиновых волн A и спином S и антисимметричного взаимодействия Дзялошинского-Мория (ДМ) с константой D (модель Бака-Йенсена) [1]. Приложение магнитного поля H превращает спираль в коническую структуру, которая схлопывается в индуцированный полем ферромагнетик в точке H_{C2} . Это поле определяется иерархией взаимодействия через $g\mu_B H_{C2} = A k_s^2$.

Эксперименты по малоугловому рассеянию нейтронов и СКВИД-измерения проводились на серии гелимагнетиков Дзялошинского-Мория $Mn_{1-x}Fe_xSi$ и $Fe_{1-x}Co_xSi$. В экспериментах были получены значения волнового вектора спирали k_s , критического поля H_{C2} и значения спина S . Прямое измерение жесткости спиновых волн в $MnSi$ подтвердило справедливость модели Бака-Йенсена на количественном уровне во всем температурном диапазоне от 0 до T_C [2-4].

Известно, что Скирмионная Решетка/а (СКР) реализуется под действием приложенного магнитного поля в пределах узкого полевого коридора $[H_{A1}, H_{A2}]$ и только вблизи T_C . Волновой вектор СКР практически равен вектору спирали k_s , [5,6]. Предложена модель устойчивости скирмионной решетки в нецентросимметричных ферромагнетиках с взаимодействием Дзялошинского-Мория в магнитном поле. Рассмотрена скирмионная решетка как двумерно-модулированная гексагональная спиновая структура, построенная на той же конкуренции взаимодействий (ферромагнитный обмен и взаимодействие Дзялошинского-Мория), что и одномерно-модулированная спиновая спираль, превращающаяся в магнитном поле в коническую структуру. СКР является устойчивой структурой, энергетически более выгодной по сравнению с конической структурой вблизи $H_A = 0.4 H_{C2}$. Границы устойчивости скирмионной фазы увеличиваются за счет размагничивающего фактора конической фазы, который не зависит от температуры. Границы скирмионной фазы сокращаются по мере роста поля размагничивания H_d , скирмионной решетки с понижением температуры.

Таким образом, предложена модель, описывающая возникновение, и установлены границы стабильности скирмионной фазы. Экспериментальные данные, полученные для серии соединений гелимагнетиков Дзялошинского-Мория $Mn_{1-x}Fe_xSi$ и $Fe_{1-x}Co_xSi$ подтвердили справедливость модели.

Показано, что вся (H-T) фазовая диаграмма в гелимагнетиках с взаимодействием Дзялошинского-Мория построена на основе иерархии взаимодействий, определяющих энергетический ландшафт магнитной системы: ферромагнитного обменного взаимодействия, антисимметричного взаимодействия Дзялошинского-Мория и дипольного взаимодействия, обуславливающего устойчивость скирмионной решетки.

1. P. Bak, M.H. Jensen, J. Phys. C13 (1980) L881.

2. S.V. Grigoriev, A. S. Sukhanov, E. V. Altynbaev, S.-A. Siegfried, A. Heinemann, P. Kizhe, and S. V. Maleyev, Phys. Rev. B 92, (2015) 220415(R).

НЕСОИЗМЕРИМАЯ МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА, БЛИЖНИЙ МАГНИТНЫЙ ПОРЯДОК И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИНАРНОГО ИНТЕРМЕТАЛЛИДА Ho_7Rh_3

А. Ф. Губкин^{1,2*}, А. А. Ваулин¹, А. Ф. Прекул¹, Н. В. Баранов^{1,2}

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

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

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

Бинарные редкоземельные интерметаллиды $R_7\text{Rh}_3$ с нецентросимметричной кристаллической решеткой привлекают внимание исследователей наличием сложных магнитных фазовых диаграмм, гигантским магнитокалорическим и магниторезистивным эффектами. В частности, для соединения Ho_7Rh_3 было показано существование трех магнитных фазовых переходов: при температуре Нееля $T_N = 32$ К и спин-переориентационные переходы при дальнейшем охлаждении $T_{t1} = 21$ К и $T_{t2} = 9$ К [1, 2]. Изучение электрических свойств соединения Ho_7Rh_3 выявило аномальное поведение электросопротивления в широком интервале температур выше и ниже температуры Нееля, а также гигантский магниторезистивный эффект в области низких температур, наблюдающийся при приложении внешнего магнитного поля [1, 2]. Несмотря на значительный интерес исследователей к макроскопическим свойствам соединений $R_7\text{Rh}_3$ в литературе мало данных о магнитных свойствах данных систем на микроуровне. Количественное описание магнитных структур в Ho_7Rh_3 осложняется тем фактом, что в соединениях $R_7\text{Rh}_3$ наблюдаются несоизмеримые магнитные фазы, чьи трансформационные свойства описываются двумерными неприводимыми представлениями либо суперпозицией нескольких неприводимых представлений разной размерности. В настоящей работе при помощи подхода магнитных суперпространственных групп проведено полное количественное описание несоизмеримой магнитной фазы и установлено влияние низкотемпературных магнитных фаз на магнитные, электрические и тепловые свойства соединения Ho_7Rh_3 . Установлено, что в Ho_7Rh_3 сохраняется ближний антиферромагнитный порядок вплоть до температур, вдвое превышающих температуру Нееля $T_N \approx 32$ К (см. вставка к рис.1(а)). Показано, что ближний антиферромагнитный порядок в Ho_7Rh_3 является причиной аномального поведения теплового расширения и удельного электросопротивления в области температур выше температуры Нееля.

Установлено, что при температурах ниже температуры Нееля $T_N \approx 32$ К реализуется несоизмеримая магнитная структура типа волна спиновой плотности, описываемая волновым вектором $\mathbf{k}_{IC} = (0\ 0\ 0.389)$ и магнитной суперпространственной группой $Cmc2_1.1'(00g)0sss$, связанной с двумерным неприводимым представлением $m\Delta_6$. Дальнейшее охлаждение ниже $T_{t1} \approx 21$ К приводит к эволюции несоизмеримой амплитудно-модулированной магнитной структуры типа "волна спиновой плотности" по направлению к магнитной структуре с равными магнитными моментами типа "антифазных доменов" проявляющейся в виде нечетных гармоник $3\mathbf{k}_{IC}$ на нейтронограммах при температурах ниже $T_{t1} \approx 21$ К.

Измерения нелинейной части магнитной АС восприимчивости показали, что при охлаждении до температуры $T_{t2} = 9$ К в Ho_7Rh_3 проявляется ярко выраженные аномалии на температурных зависимостях 2-й и 3-й гармоник АС восприимчивости (рис. 2(а,б)).

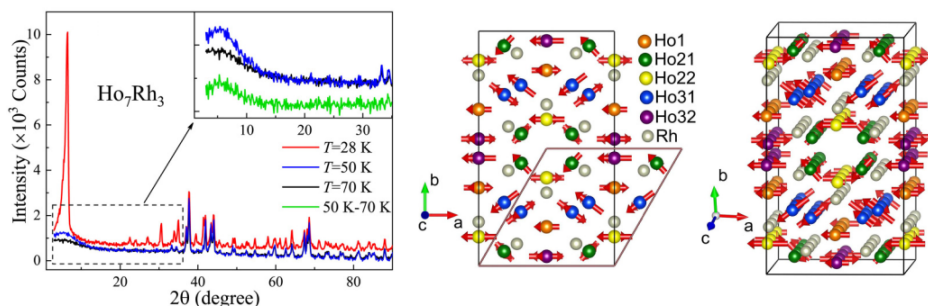


Рис. 1. Результат уточнения магнитной структуры соединения Ho_7Rh_3 по данным нейтронной дифракции при 28 K: (а) аппроксимация экспериментальных данных и (б) уточненная модель магнитной структуры. На вставке представлены порошковые нейтронограммы, измеренные при температурах 70 и 50 K и их разностная кривая

Подобное поведение характерно для магнитных фазовых переходов с потерей операции инверсии времени $\{1'|000\frac{1}{2}\}$ вследствие возникновения спонтанной намагниченности. Понижение симметрии до подгруппы индекса $i = 2$ в связи с потерей операции инверсии времени $\{1'|000\frac{1}{2}\}$ приводит к двум возможным моделям низкотемпературной магнитной структуры в Ho_7Rh_3 : $Cmc'2_1'(00g)000$ или $Cm'c2_1'(00g)s0s$ допускающих существование ферромагнетизма в базисной плоскости. Карточка с данными магнитной структуры Ho_7Rh_3 добавлена в международную базу данных магнитных структур MAGNDATA на кристаллографическом сервере Университета Бильбао [3].

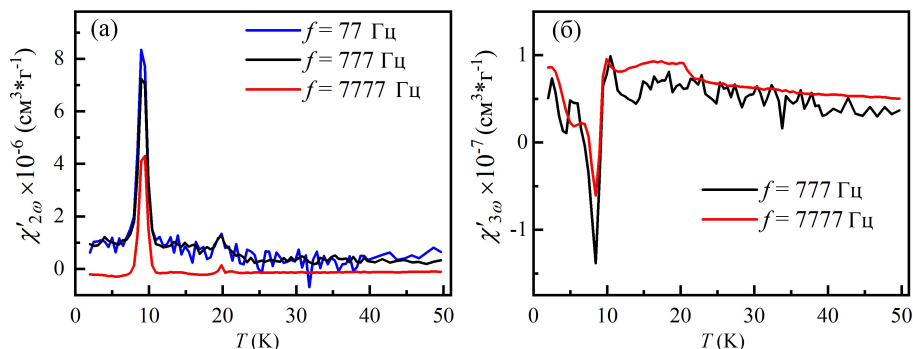


Рис. 2. Температурная зависимость реальных компонент $\chi'_{n\omega}(T)$ ($n=2,3$) (а, б) гармоник магнитной восприимчивости при различных частотах осциллирующего магнитного поля

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-32-90047 и госзадания Минобрнауки (тема «Поток», № 122021000031-8).

1. Magnetic and transport properties of Ho_7Rh_3 / T. Tsutaoka et al. // Physica B: Condensed Matter. – 2003. – Т. 327. – №. 2-4. – С. 352-356.
2. Magnetic order, phase transitions and electrical resistivity of Ho_7Rh_3 single crystals / T. Tsutaoka et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – Т. 654. – С. 126-132.
3. http://webbdcrista1.ehu.es/magndata/index_incomm.php?index=1.1.146.

МАГНЕТИЗМ СЛОИСТЫХ ТЕЛЛУРАТОВ A_2MnTeO_6 ($A = Li, Na, Ag, Tl$) С СОТОВОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ И ТРЕУГОЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ПОДРЕШЕТКАМИ

А. И. Курбаков*, А. Е. Суслопарова

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

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

Низкоразмерные магнитные системы весьма чувствительны к незначительным изменениям параметров обменного взаимодействия, ответственных за образование либо жидких, либо дальнедействующих упорядоченных основных состояний. Так же они чувствительны к эффектам одноионной анизотропии, следуя качественно разным протоколам в случаях типов Гейзенберга или Изинга. Одним из решающих факторов, влияющих на поведение низкоразмерных магнетиков, является величина спинового момента. Квантовые эффекты наиболее ярко проявляются при малых значениях спина, в то время как системы на основе ионов с большими значениями спина имеют тенденцию к классическому магнетизму.

Треугольные магнитные системы подвержены магнитным фрустрациям, возникающим из-за конкуренции взаимоисключающих связей. В магнетиках со спином $S = 1/2$ или 1 эти фрустрации часто приводит к жидкоподобному поведению при низких температурах. Системы с большим спином $S = 3/2$ или $5/2$ снимают фрустрацию за счет образования дальнедействующих упорядоченных магнитных структур. В частности, слоистые системы типа Гейзенберга могут демонстрировать 120° неколлинеарные порядки различных конфигураций.

Изучались проявления необычного магнетизма в новых, впервые направлено синтезированных нами материалах, демонстрирующих явления сильных фрустраций обменных взаимодействий и 2D магнетизм. Представлено комплексное исследование магнитных, структурных термодинамических и резонансных свойств четырех членов семейства теллуридов марганца, A_2MnTeO_6 ($A = Li, Na, Ag, Tl$). Замена А-катионов приводит к небольшому увеличению параметра а элементарной ячейки в слое на единицы % и значительному увеличению параметра с вдоль направления укладки слоев на десятки %. Такие химические замещения влияют как на углы, так и на длины путей магнитного обмена, очень нетривиального и плохо предсказуемого как по величинам, так и по знаку, из-за конфигурации кислородных октаэдров с разделением по ребру. Это все привело к большому различию магнитных свойств изученных составов, обнаруженному, исследованному и проанализированному в цикле статей [1-3].

Методом порошковой нейтронной дифракции (ПНД) было установлено, что магнитная структура первого члена этой серии (минимальный ионный радиус А-элемента, гА), Li_2MnTeO_6 , может быть представлена как 120° неколлинеарная, с вектором распространения $\mathbf{k} = (1/3, 1/3, 0)$. Также обнаружен нетривиальный эффект скрытого магнитного порядка. Статические и динамические магнитные свойства указывают на сильную фрустрацию на треугольной решетке и двумерный характер магнетизма. Магнитная восприимчивость $\chi(T)$ демонстрирует очень необычное поведение: она описывается законом Кюри-Вейсса при высокой температуре с температурой Кюри-Вейсса $\Theta = -51$ К, не обнаруживает явной аномалии, указывающей на дальнейшее магнитное упорядочение при низких значениях магнитного поля. Однако в сильных магнитных полях

характер $\chi(T)$ изменяется с уже заметным максимумом примерно при $T = 9$ К. То, что этот максимум $\chi(T)$ отражает начало АФМ порядка, было подтверждено измерениями теплоемкости, которые показывают четкую λ -типа аномалию при $T_N \sim 9$ К даже в нулевом магнитном поле, а также по данным ЯМР ^7Li и измерениям диэлектрической проницаемости. Температура 3D магнитного упорядочения T_N заметно ниже абсолютного значения температуры Кюри-Вейсса Θ (т.е. индекс фрустрации большой: $f = \Theta/T_N \approx 6$), что свидетельствует о наличии сильной обменной фрустрации в каждом треугольнике спиновой решетки. Наши данные ЭПР и ЯМР показывают 2D магнитный характер в широком диапазоне температур выше T_N . Подтверждение 2D картины магнетизма в $\text{Li}_2\text{MnTeO}_6$ было получено также из магнитной теплоемкости и критической расходимости ширины линии ЭПР.

Симметричный анализ результатов магнитного рассеяния нейтронов соединениями $\text{Na}_2\text{MnTeO}_6$ и $\text{Ag}_2\text{MnTeO}_6$ в рамках суперсимметричного подхода позволил выявить одинаковую модель спиновой структуры основного состояния в рамках магнитной пространственной подгруппы $R - 3'c'$ (№ 167.4.1337). Магнитная структура, определенная методом ПНД при $T = 1.6$ К, представляет собой соизмеримую неколлинеарную 120-градусную спиновую структуру с вектором распространения $\mathbf{k} = (1/3, 1/3, 1/3)$. Магнитные ионы Mn^{4+} (d^3 , $S = 3/2$) в октаэдрическом кислородном окружении образуют треугольную сеть, в которой все спины направлены из центра каждого треугольника (в литиевом образце не так). На элементарную магнитную ячейку приходится шесть слоев АФМ упорядоченных ионов марганца, магнитные моменты которых выстроены как спиновый геликоид вдоль кристаллографического c -направления. Особо отметим, что при переходе от слоя к слою, в магнитной элементарной ячейке, магнитные моменты на атомах Mn в позиции $(2/3, 1/3, 1/4)$ поворачиваются на 120° по часовой стрелке (вправо), а атомы в позиции $(1/3, 2/3, 1/4)$ против часовой стрелки (влево) в плоскости ab . Соединение $\text{Tl}_2\text{MnTeO}_6$ с наибольшим r_A не формирует дальний магнитный порядок вплоть до $T = 1.6$ К, магнитное рассеяние нейтронов в этом соединении не зарегистрировано.

В итоге были выявлены не только сходные черты, но и существенные различия между исследуемыми соединениями и продемонстрирован важный аспект влияния межслойной связи на магнетизм в слоистых квазидвумерных магнетиках с фрустрированным взаимодействием внутри слоев в случае, когда кислородные октаэдры с общими ребрами с магнитными ионами в центре образуют треугольную структуру. Очевидно, небольшие вариации межслоевых обменных взаимодействий приводят к качественно новому изменению основного магнитного состояния, что формирует разные спиновые порядки, причем эти изменения совсем нетривиальные. Говоря простыми словами, продемонстрировано не очень ожидаемое явление: в образце лития, где магнитные слои расположены максимально близко друг к другу, все магнитные взаимодействия сосредоточены в пределах одного слоя, спин-обменные взаимодействия, оцененные для $\text{Li}_2\text{MnTeO}_6$ расчетами функционала плотности, во многом определяются АФМ обменом ближайших соседей в каждой треугольной спиновой решетке. А когда расстояния между слоями увеличиваются у других составов, значимыми становятся также обмены с соседями из других слоев и формируется 3D спиральный порядок, причем он сильно фрустрирован и хирален. 3D порядку предшествуют и сосуществуют с ним 2D спиновые корреляции, характерные для треугольной спиновой подрешетки.

1. E.A. Zvereva, ..., A.E. Susloparova, A.I. Kurbakov, et al. Phys. Rev. B. 102, 094433 (2020).
2. A.I. Kurbakov, A.E. Susloparova, V.Yu. Pomjakushin, et al. Phys. Rev. B. 105, 064416 (2022).
3. A.E. Суслопарова, А.И. Курбаков, Физика металлов и металловедение. 123, 704 (2022).

НЕЙТРОНОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СОСТОЯНИЙ В СЛОИСТЫХ ХАЛЬКОГЕНИДАХ Fe_xTiS_2

Н. В. Селезнева^{1}, А. Ф. Губкин^{1,2}, Н. В. Баранов^{1,2}*

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

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

*E-mail: hope_s@mail.ru

Слоистые халькогениды с общей формулой M_xTCh_2 (M и T – атомы переходного металла, Ch – халькоген) обладают уникальным кристаллохимическим строением. В зависимости от концентрации x могут кристаллизоваться как в разупорядоченных по катионной подрешетке структурных типах CdJ_2 или NiAs , так и обладать вакансионно-упорядоченными структурными типами, такими как M_5X_6 , M_2X_3 , M_3X_4 и M_7X_8 , которые при определенных условиях, в частности, в зависимости от температуры отжига, скорости охлаждения, претерпевают различные фазовые переходы. Особенность структур такого типа состоит в том, что им нельзя приписать какой-либо один предельный тип химической связи. Эти соединения обладают смешанным типом связи (ионно-ковалентным или ионно-ковалентно-металлическим). Характер связи меняется не только с изменением количества компонентов соединения, но и в пределах структурного типа, что обусловлено различиями в электронном строении компонентов соединения. Среди данного класса соединений обнаружены различные типы магнитного состояния от парамагнетиков, спиновых стекол и кластерных стекол до ферро- или антиферромагнетиков. Наряду с концентрацией и сортом атомов переходных металлов магнитные свойства этих соединений определяются типом халькогена, распределением катионов разного сорта между слоями и внутри слоев, магнитокристаллической анизотропией и обменными взаимодействиями разного типа. В соединениях со слоистой структурой типа NiAs возможно как прямое катион-катионное обменное взаимодействие, условием существования которого являются достаточно малые расстояния между атомами металла в соединениях, так и косвенное обменное взаимодействие через немагнитный ион (сверхобмен) или косвенный обмен через электроны проводимости. В ряде соединений значительную роль в формировании магнитного упорядочения играет взаимодействие Дзялошинского-Мории. Последнее, в частности, приводит к реализации длиннопериодических спиральных структур и киральных солитонных решеток, наблюдаемых в $\text{Cr}_{0.33}\text{NbS}_2$ и $\text{Cr}_{0.33}\text{TaS}_2$ [1]. За счет нестехиометричности состава и/или неоднородного распределения вакансий в подрешетке металла могут наблюдаться более сложные магнитные состояния. Теоретические расчеты дают только качественное описание магнитного упорядочения со структурой типа NiAs , что обусловлено необходимостью учета гибридизации s -, p - и d -электронов.

В настоящее время синтезировано несколько железосодержащих халькогенидных соединений со структурой NiAs , которые, как оказалось проявляют неординарные свойства, в частности, в них наблюдаются экстремально высокие значения коэрцитивной силы при перемагничивании несмотря на то, что магнетизм этих соединений обусловлен присутствием только атомов Fe. Например, соединения $\text{Fe}_{0.5}\text{TiS}_2$ (структурный тип M_3X_4) и $\text{Fe}_{0.25}\text{TaS}_2$ (структурный тип M_5X_8) проявляют высокую магнитокристаллическую анизотропию (поля анизотропии на около 500 кЭ) и большой гистерезис при перемагничивании (до $H_c = 70$ кЭ при низких температурах). Кроме того, изменение степени порядка в катионной подсистеме соединений Fe_xTaS_2 и Fe_xTiS_2 значительно влияет на гистерезисные свойства и поведение магнитосопротивления [2-5]. На поликристаллических образцах дихалькогенидов титана интеркалированных железом, с целью выявления эволюции магнитных состояний при увеличении концентрации Fe были проведены комплексные исследования с помощью рентгеновской и нейтронной дифракции, а также измерений намагниченности в стационарных и импульсных магнитных по-

лях, теплоемкости и магнитосопротивления. Данные порошковой нейтронной дифракции были получены на широкоугольном нейтронном дифрактометре (WAND2), установленном на высокопоточном реакторе HFIR в Окриджской национальной лаборатории (США) с длиной волны $\lambda = 1.482 \text{ \AA}$. Для измерений в магнитных полях до 50 кЭ и в диапазоне температур от 2 до 200 К использовался криомагнит с вертикальным полем. Порошковые нейтронографические измерения на образце $\text{Fe}_{0.50}\text{TiS}_2$ проводились на дифрактометре DMC в Spallation Source SINQ, Швейцария, с длиной волны нейтронов $\lambda = 3.8 \text{ \AA}$ в магнитных полях до 28 кЭ.

Обнаружено, что в системе Fe_xTiS_2 с увеличением содержания Fe реализуются различные магнитные состояния в следующей последовательности: спиновое и кластерное стекло при $x < 0.25$, антиферромагнитное упорядочение при $x \approx 0.25$, кластерное стекло при $x \approx 0.33$, затем снова антиферромагнитное состояние при $x \approx 0.50$, которое переходит в ферромагнитный порядок при $x > 0.50$. Нейтронографические измерения, выполненные в присутствии магнитного поля при разных температурах, выявили особенности в эволюции магнитных состояний соединений в зависимости от концентрации железа в соединениях. Так, в соединении $\text{Fe}_{0.25}\text{TiS}_2$ при охлаждении ниже 52 К на нейтронограммах обнаружено появление дополнительных рефлексов магнитной природы, интенсивность которых подавляется при приложении магнитного поля и не возвращается к исходному значению после выключения поля. Аналогичное поведение интенсивности нейтронного рассеяния было раньше обнаружено при исследовании соединения $\text{Fe}_{0.25}\text{TiS}_2$ [2]. Такое поведение свидетельствует о существовании в этих соединениях антиферромагнитного (АФМ) упорядочения, которое трансформируется в метастабильное ферромагнитное (ФМ) состояние. Полученные данные позволили объяснить необычное поведение магнитосопротивления в этих соединениях, в частности существование большого остаточного магнитосопротивления [5]. Как установлено нейтронографическими измерениями соединение $\text{Fe}_{0.33}\text{TiS}_2$ с промежуточным содержанием железа между $x = 0.25$ и $x = 0.50$ не обладает дальним магнитным порядком при температурах выше 2 К, на нейтронограммах этого соединения присутствуют только широкие диффузные максимумы, которые свидетельствуют о наличии ближнего магнитного порядка. Эти результаты согласуются с данными магнитных измерений, согласно которым поведение намагниченности этого соединения характерно для кластерных стекол. Под действием магнитного поля на нейтронограммах соединения $\text{Fe}_{0.33}\text{TiS}_2$ наблюдается подавление диффузных максимумов и рост магнитного вклада в ядерные рефлексы, указывающий на увеличение ферромагнитной составляющей. Такое поведение интенсивности нейтронного рассеяния в этом соединении согласуется с результатами измерения магнитосопротивления, поведение которого, как оказалось, вполне типично для кластерных стекол.

Анализ полученных данных показал, что различие в магнитном состоянии исследованных соединений и в их поведении под действием магнитного поля кроется в различии их кристаллической структуры, а именно в распределении атомов железа в слоях между S-Ti-S блоками. В отличие от антиферромагнитных соединений $\text{Fe}_{0.25}\text{TiS}_2$ и $\text{Fe}_{0.5}\text{TiS}_2$, в которых атомы железа формируют цепочки, что приводит к моноклинности кристаллической структуры, атомы железа в соединении $\text{Fe}_{0.33}\text{TiS}_2$ образуют треугольные сетки, в результате чего из-за фрустраций обменных взаимодействий в этом соединении дальний магнитный порядок не формируется.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-13-00158).

1. L.S. Xie et al., J. Am. Chem. Soc. 144, 9525 (2022).
2. N.V. Baranov et al., J. Phys.: Condens. Matter., 25, 066004 (2013).
3. E. Morosan et al., J. Phys. Rev. B 75, 104401 (2007).
4. C.-W. Chen et al., J. Phys. Rev. B 94, 054406 (2016).
5. N.V. Selezneva et al., J. Phys. Rev. Mater. 7, 014401 (2023).

MAGNETIC STRUCTURES of $\text{La}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Mn}_2\text{Si}_2$ COMPOUNDS ($x = 0.6$ and 0.8)

H. M. Alsafi^{1*}, E. G. Gerasimov^{1,2}, P. B. Terentev², P. A. Borisova³, V. P. Glazkov³, E. V. Dujeva³,
N. V. Mushnikov^{1,2}, A. N. Pirogov^{1,2}

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

²Institute of Metal Physics of UB RAS, Ekaterinburg, Russia

³Institute Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

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

The magnetic structures and properties of ternary rare-earth–transition metal silicides and germanides have been intensively studied for about three decades. There has been special interest in compounds of the general formula RM_2Si_2 crystallizing in the tetragonal ThCr_2Si_2 -type structure (R stands for rare earth, M for 4d- or 5d-electron metal and X for silicon or germanium), space group $I4/mmm$. The unit cell of the ThCr_2Si_2 -type structure can be described as a stacking of atomic layers (each layer contains atoms of a single type). The layers are perpendicular to the c-axis and stacked according to the sequence $-R-X-M-X-R-$ [1]. The such structure can be considered as quasi two dimensional one. This layer crystal structure leads to highly anisotropic magnetic interactions and, in consequence, to a wide variety of magnetic properties and complex magnetic structures [2].

Magnetic phase diagram of the $\text{La}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Mn}_2\text{Si}_2$ system was obtained from magnetization and neutron diffraction measurements for $0 \leq x \leq 0.4$ in our paper [3]. We continue to study this system for samples $\text{La}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Mn}_2\text{Si}_2$ and $\text{La}_{0.4}\text{Tb}_{0.6}\text{Mn}_2\text{Si}_2$ in the present research.

Neutron diffraction patterns were recorded over angle interval $(8-120)^\circ$. The neutron length was equal to $1.49 \text{ \AA}$. In both samples magnetic order is described by the propagation vector $\mathbf{k} = 0$. The rare earth subsystem is magnetic in the $\text{La}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Mn}_2\text{Si}_2$ and $\text{La}_{0.4}\text{Tb}_{0.6}\text{Mn}_2\text{Si}_2$ below 48 K and 28 K, respectively. The Tb-ion magnetic moments are mutually parallel and oriented along the c-axes. At 9 K the Tb magnetization is equal to $9.0 \mu_B$ and $8.0 \mu_B$ for $\text{La}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Mn}_2\text{Si}_2$ and $\text{La}_{0.4}\text{Tb}_{0.6}\text{Mn}_2\text{Si}_2$, respectively. The Mn-atom magnetic moment is equal to $2.0 \mu_B$ and has two components. One of them is lied in the basis plane and is antiferromagnetic. The other component is oriented along the c-axis and antiparallel to Tb moments.

Above 48 K in $\text{La}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Mn}_2\text{Si}_2$ in $\text{La}_{0.4}\text{Tb}_{0.6}\text{Mn}_2\text{Si}_2$ the Tb subsystem magnetization is disordered. The Mn moments are ordered antiferromagnetic.

Thus, Ferro-antiferromagnetic change of orientations of Mn-atom moments takes place in $\text{La}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Mn}_2\text{Si}_2$ and $\text{La}_{0.4}\text{Tb}_{0.6}\text{Mn}_2\text{Si}_2$ at 48 and 28 K, respectively.

This work was supported by MES of RF (contract No. FEUZ-2020-0051) and project PSF 23-12-00265.

1. Korotin, D. M., Streltsov, S. V., Gerasimov, E. G., Mushnikov, N. V., Zhidkov, I. S., Kukharensko, A. I., ... & Kurmaev, E. Z. (2018). Magnetic ordering in intermetallic $\text{La}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Mn}_2\text{Si}_2$ compounds. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 454, 144-149.
2. Gerasimov, E. G., Mushnikov, N. V., Terentev, P. B., & Pirogov, A. N. (2018). Magnetic structure of $\text{La}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Mn}_2\text{Si}_2$ compounds. *Journal of Alloys and Compounds*, 731, 397- 402.
3. Gerasimov, E. G., Mushnikov, N. V., Terentev, P. B., Yazovskikh, K. A., Titov, I. S., Gaviko, V. S., & Umetsu, R. Y. (2017). Competing exchange interactions and magnetic anisotropy of $\text{La}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Mn}_2\text{Si}_2$. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*,

НЕСОИЗМЕРИМАЯ СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА Ho_3Co

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

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

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

*E-mail: artavaulin@gmail.com

Бинарные редкоземельные интерметаллические соединения R_3T (R – редкоземельный металл, T – переходный металл) кристаллизуется в орторомбическую структуру типа Fe_3C с пространственной группой Pnma . Конкуренция РККИ обменных взаимодействий и действие низкосимметричного кристаллического поля приводят к возникновению сложных низкотемпературных несоизмеримых магнитных фаз и различных аномалий в поведении физических свойств R_3T . В частности, соединение Ho_3Co демонстрирует сложную магнитную фазовую диаграмму с двумя последовательными магнитными фазовыми переходами при температуре Нееля $T_N = 22$ К и $T_t = 9$ К [1]. В области температур ниже $T_t = 9$ К в Ho_3Co наблюдается появление небольшой ферромагнитной компоненты. Данные порошковой дифракции нейтронов, опубликованные ранее для Ho_3Co [2], показали, что в интервале температур $T_t < T < T_N$ магнитное упорядочение связано с комбинацией несоизмеримого и соизмеримого антиферромагнитных вкладов с волновыми векторами $\mathbf{k}_{\text{IC}} = (0.15 \ 0 \ 0)$ и $\mathbf{k}_C = (0 \ 0 \ 0)$. Получить количественное описание магнитной структуры в работе [2] не удалось. В настоящей работе проведено полное количественное описание сложной несоизмеримой магнитной структуры соединений Ho_3Co при помощи нового формализма магнитных суперпространственных групп и установлен механизм возникновения спонтанной намагниченности в области низких температур.

Из данных нейтронной дифракции на порошковом образце Ho_3Co были построены магнитные фазовые диаграммы (рис. 1). В частности, при охлаждении ниже температуры Нееля $T_N \approx 22$ К в Ho_3Co реализуется двухкомпонентная магнитная структура, описываемая комбинацией двух волновых векторов: соизмеримая компонента с волновым вектором $\mathbf{k}_C = 0$ и несоизмеримая компонента с волновым вектором $\mathbf{k}_C = \mu \mathbf{b}_1$ ($\mu = 0.133$, $b_1 = 2\pi/a$). Уточнение магнитной структуры из данных нейтронной дифракции при температуре $T = 15$ К, проведенное по методу Ритвельда с использованием формализма магнитных суперпространственных групп, позволило получить полное количественное описание данной магнитной структуры. Установлено, что магнитная структура при $T = 15$ К определяется суперпозицией двух физически неприводимых представлений $[\mathbf{k}_C]m\Gamma_{4-}$ и $[\mathbf{k}_{\text{IC}}]m\Sigma_4$ и описывается магнитной суперпространственной группой $Pm'cn(00g)000$. Данная магнитная структура представляет собой набор скошенных поперечных спиновых волн, распространяющихся вдоль направления несоизмеримого волнового вектора $\mathbf{k}_{\text{IC}}$ (рис. 2).

Измерение температурных зависимостей реальной и мнимой компонент магнитной АС восприимчивости демонстрируют появление частотного гистерезиса в области низких температур $T < 11$ К. Подобное поведение сигнализирует о появлении магнитной вязкости и процессах диссипации энергии в магнитной подсистеме при приложении осциллирующего магнитного поля. Наблюдаемые частотные зависимости кривых магнитной АС восприимчивости связаны с появлением магнитной вязкости в системе вследствие возникновения слабой спонтанной намагниченности вдоль кристаллографического направления $\mathbf{a}$.

Показано, что при охлаждении ниже $T \approx 11$ К на нейтронограммах наблюдаются нечетные гармоники $3\mathbf{k}_{\text{IC}}$, $5\mathbf{k}_{\text{IC}}$ указывающих на эволюцию гармонической волны спиновой плотности по направлению к магнитной структуре с равными моментами типа

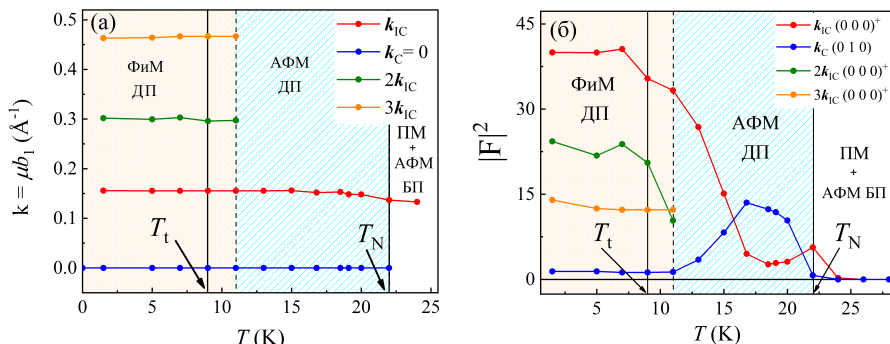


Рис. 1. Магнитные фазовые диаграммы соединения Ho_3Co построенные в виде: (а) температурных зависимостей волновых векторов магнитной структуры $\mathbf{k}_C$, $\mathbf{k}_{IC}$, $2\mathbf{k}_{IC}$, $3\mathbf{k}_{IC}$ и (б) температурных зависимостей структурного фактора $|\mathbf{F}|^2$ Брэгговских пиков $(0\ 1\ 0)$, $(\mu\ 0\ 0)^+$, $(2\mu\ 0\ 0)^+$ и $(3\mu\ 0\ 0)^+$. Величина $|\mathbf{F}|^2$ спутника $(\mu\ 0\ 0)^+ \mathbf{k}_{IC}$ уменьшена в 90 раз, рефлекса $(0\ 1\ 0)$ уменьшена в 5 раз

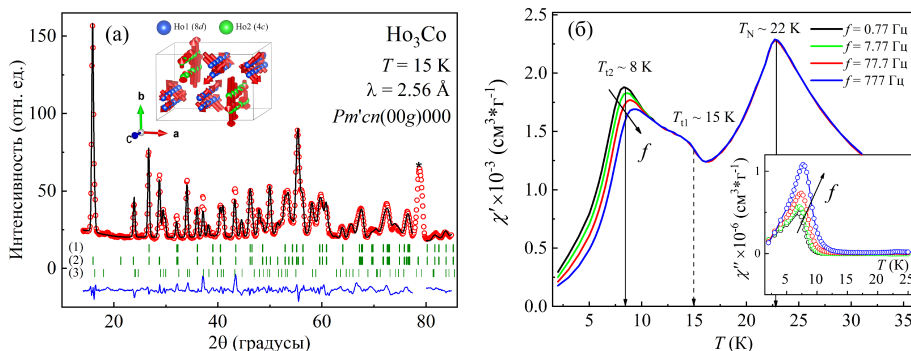


Рис. 2. (а) Результаты уточнения магнитной структуры соединения Ho_3Co по данным нейтронной дифракции, измеренным при температуре 15 К. Метка (1) указывает на положения структурных пиков, метка (2) - магнитных пиков индексируемых $\mathbf{k}_C$, метка (3) - магнитных пиков, индексируемых $\mathbf{k}_{IC}$. Звёздочкой обозначен пик от окружения образца. (б) температурная зависимость магнитной АС-восприимчивости.

«антифазных доменов». При этом, наблюдаемые пики четных гармоник $2\mathbf{k}_{IC}$, $4\mathbf{k}_{IC}$ имеют магнитный характер и свидетельствуют раскомпенсации несоизмеримой антиферромагнитной структуры типа «антифазных доменов» при формировании фазы «спинового проскальзывания». Таким образом, слабый ферромагнетизм фазы «спинового проскальзывания» возникает вследствие конкуренции ферромагнитного и антиферромагнитного обменов и раскомпенсации антиферромагнитной подрешетки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-32-90047 и госзадания Минобрнауки (тема «Поток», № 12202100031-8).

1. Irreversible field-induced magnetic phase transitions and properties of Ho_3Co / N. V. Baranov et al. // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2005. – Т. 17. – №. 21. – С. 3445.
2. Magnetic structures and magnetic phase transitions in Ho_3Co / A. Podlesnyak et al. // Journal of magnetism and magnetic materials. – 2004. – Т. 272. – С. 565-567.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОПОДРЕШЕТОЧНЫХ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР В ЗАРЯДОВО-УПОРЯДОЧЕННЫХ ПЕРОВСКИТНЫХ МАНГАНИТАХ С ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ НЕИЗОВАЛЕНТНОЙ ПРИМЕСИ

Л. Э. Гончарь^{1,2*}

¹Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

²Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

* E-mail: l.e.gonchar@yandex.ru

Устный доклад

Кристаллы манганита $R_{1-x}A_xMnO_3$ (где R^{3+} – ион редкоземельных элементов или Bi^{3+} , A^{2+} – ион щелочноземельных элементов, x – концентрация примеси) исследуются как сильно коррелированный магнетик с подрешеткой ян-теллеровских ионов Mn^{3+} . Взаимосвязь между кристаллической решеткой, зарядовой, орбитальной и магнитной подсистемами приводит к низкоразмерным, несоизмеримым и фрустрированным магнитным структурам.

Настоящее исследование посвящено манганитам с концентрациями примеси $x = 2/3, 3/4, 4/5$. Орбитальное состояние Mn^{3+} описывается углом Θ_i смешивания многоэлектронных волновых функций основного 5E -состояния [5]. Модель вигнеровского кристалла [1–4], описывающая кристаллическую структуру, учитывает, что при зарядово-орбитальном упорядочении состоит из ионов Mn^{3+} в bc -плоскостях (в обозначениях $Pnma$) с одним и тем же орбитальным состоянием, которые чередуются с соответствующим количеством плоскостей Mn^{4+} (2, 3 или 4) в направлении оси a . Упорядочение орбиталей в соседних плоскостях Mn^{3+} вдоль a -направления описывается соотношением:

$$\Theta_1 \approx 2\pi - \Theta_2 \approx \frac{5\pi}{3} \quad (1)$$

где Θ_1 характеризует одну bc -плоскость, а Θ_2 совпадает со следующей плоскостью bc ионов Mn^{3+} . Примерное равенство в формуле (1) используется для указания слабой разницы между некоторыми соединениями и их пространственной симметрией ($Pnma$ [1–3] или $P2_1/m$ [4]).

Сверхобменное взаимодействие между ближайшими соседними ионами марганца зависит от орбитального состояния каждого взаимодействующего иона в обменной паре.

$$J_{ij}(\Theta_i, \Theta_j) = \frac{J_{0,k} \cos^2 \phi_{ij}}{r_{ij}^{10}} F_{ij}(\Theta_i, \Theta_j) \quad (2)$$

где ϕ_{ij} и r_{ij} – структурные характеристики конфигурации связи $Mn-O-Mn$. Орбитально-зависимые функции $F_{ij}(\Theta_i, \Theta_j)$ могут не только масштабировать величину сверхобменного взаимодействия, но и быть причиной различия знаков параметров в некоторых кристаллографических направлениях. Уравнение (2) включает в себя взаимодействующие пары $Mn^{3+}-Mn^{3+}$, $Mn^{3+}-Mn^{4+}$ и $Mn^{4+}-Mn^{4+}$ во всех направлениях и с разным

количеством переменных Θ . Эта модель позволяет численно описать обменные взаимодействия в зависимости от орбитальных состояний ионов пары и соответствует правилам Гуденафа-Канамори-Андерсена [5].

Зависимости (2) при учете орбитальных характеристик (1) вызывают негеометрическую магнитную фрустрацию в кристаллах в связи с возникающей конкуренцией ферромагнитных (ФМ) и антиферромагнитных (АФМ) обменных взаимодействий. Структурными элементами магнитного упорядочения являются сильно связанные ФМ тримеры ближайших соседей $\text{Mn}^{4+}-\text{Mn}^{3+}-\text{Mn}^{4+}$ [5, 7] с обменным взаимодействием величиной ~ 10 мЭВ (с упорядочением магнитных моментов приближенно по псевдоперовскитным осям x_p и y_p) обладают конкуренцией сверхобменного взаимодействия между тримерами имеется АФМ обменная связь (~ 3 мЭВ) по линии $\text{Mn}^{4+}-\text{Mn}^{3+}-\text{Mn}^{4+}$, перпендикулярной ФМ тримеру. Соседние Mn^{4+} , связаны АФМ обменом ~ 1 мЭВ с тримерами или между собой внутри ac -плоскости, а также между плоскостями. Именно такая конфигурация создает конкуренцию обменного взаимодействия, ведущую к магнитной фрустрации.

В работе обсуждаются зависимости магнитной структуры от орбитального угла смешения Θ , от количества промежуточных слоев Mn^{4+} и от соотношения параметров АФМ обмена внутри плоскости. От угла Θ смешивания орбитальных функций (1) зависит также волновой вектор упорядочения магнитной структуры $\mathbf{k}_C = (0, 0, 0)$ или $\mathbf{k}_C = (0, 0, 1/2)$. Обменные взаимодействия АФМ знака, определяющие, какое из упорядочений будет реализовываться, связаны соотношением:

$$K = \frac{2J^{a,c,1} \cdot S_1}{2J^{a,c,3} \cdot S_2} \quad (3)$$

где $J^{a,c,1}$ – АФМ обменное взаимодействие между тримерами, $J^{a,c,3}$ – АФМ обменное взаимодействие в парах Mn^{4+} в плоскости ac , S_1 , S_2 – спины ионов Mn^{3+} и Mn^{4+} , соответственно. Величины $K < 1$ соответствуют магнитной ячейке, совпадающей с кристаллической, а величины $K > 1$ соответствуют удвоению магнитной ячейки вдоль оси c . Угловая характеристика граничного состояния $K = 1$ соответствует $\Theta \approx 5\pi/3$, однако за счет структурного множителя $\cos^2 \phi / r_{ij}^{10}$ может различаться для разных соединений.

1. P.G. Radaell et al., Phys. Rev. B 59, 14440 (1999).
2. D.P. Kozlenko et al., Phys. Rev. B 82, 014401 (2010).
3. S. Grenier et al., Phys. Rev. B 75, 085101 (2007).
4. M. Pissas et al., Phys. Rev. B 72, 064426 (2005).
5. L.E. Gonchar, J. Magn. Magn. Mater., 513, 167248 (2020).
6. J. B. Goodenough, Phys. Rev., 100, 564 (1955).
7. L. E. Gonchar, Low Temp. Phys. 48, 37 (2022).

ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТОТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ И НЕЙТРОНОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОЧИСТЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ ГОЛЬМИЯ

В. И. Зверев^{1*}, Р. Р. Гимаев¹, А. Ф. Губкин^{2,3}, А. А. Ваулин²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

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

³УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

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

Экспериментальные исследования магнитных свойств и структуры тяжелых лантанидов, включая Ho, начались в 1950-х годах. Гольмий обладает одним из самых больших магнитных моментов в ряду лантаноидов, $\mu_{\text{эфф}} = 10.61 \mu_B$. В металле наблюдаются многочисленные магнитные фазовые переходы при изменении температуры и/или магнитного поля.

Ряд авторов предложили магнитные фазовые диаграммы для Ho, однако в них отмечены существенные различия. Отчасти это связано с использованием образцов различного качества и, зачастую, низкой чистоты, что затрудняет сравнение и, следовательно, понимание природы многочисленных фазовых переходов. Кроме того, поскольку магнитные фазовые переходы в редкоземельных металлах могут сильно зависеть от междоузельных примесей, концентрация которых часто не указывается, систематическое исследование монокристаллов высокой чистоты имеет принципиальное значение.

Такое исследование было выполнено в настоящей работе: представлены результаты измерения магнитотепловых (намагниченность, теплоемкость, магнитокалорический эффект) свойств высокочистых монокристаллических образцов гольмия. На основании полученных данных была уточнена магнитная фазовая диаграмма монокристаллического гольмия вдоль оси легкого намагничивания.

Кроме того, в настоящей работе были выполнены эксперименты по дифракции нейтронов на высокочистых монокристаллических образцах гольмия, вырезанных из того же монокристалла, который использовался для измерения макроскопических магнитотепловых свойств. Эксперименты по дифракции нейтронов были выполнены на двухосевом дифрактометре E4 исследовательского реактора BER II на 10 MB в Берлинском центре материалов и энергии имени Гельмгольца. Фазовые диаграммы (L, T) построены из анализа температурной и полевой зависимости магнитных сателлитов, которые визуализированы методом нейтронной дифракции на монокристалле. В результате были получены фазовые диаграммы в виде колористических 2D карт в обратном пространстве (L, T).

Прямые исследования магнитной структуры методом нейтронной дифракции, выполненные впервые в мире на монокристаллических образцах гольмия самой высокой доступной на сегодняшний день степени химической чистоты (99.92 ат. % (99.993 масс. %)), позволили частично подтвердить правильность проведенных выше косвенных доказательств наличия тех или иных магнитных фаз и доказать сложность магнитной фазовой диаграммы гольмия вдоль оси легкого намагничивания.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки (тема «Поток» № 122021000031-8).

МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА И ОБМЕННЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МУЛЬТИФЕРРОИКЕ МАГНИТОКАЛОРИКЕ HoFeO_3

А. К. Овсяников^{1*}, И. А. Зобкало¹, W. Schmidt², S. N. Barilo³, V. Hutanu⁴

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

²Jülich Centre for Neutron Science Outstation at Institut Laue-Langevin, Grenoble, France

³Scientific-Practical Materials Research Centre NAS of Belarus, Minsk, Belarus

⁴Institute of Crystallography, RWTH Aachen University and Jülich Centre for Neutron Science at Heinz Maier-Leibnitz Zentrum, Garching, Germany

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

Редкоземельные (R) ортоферриты $R\text{FeO}_3$ представляют собой интересное и важное семейство магнитных соединений. Их магнитные свойства могут возникать в результате сложных взаимодействий между моментами 3d-электронов переходного металла и 4f-электронов редкоземельных атомов [1]. Эти взаимодействия могут привести к появлению таких полезных функциональных свойств, как, например, мультиферроичность или магнитокалорический эффект [2]. HoFeO_3 - один из интересных представителей семейства $R\text{FeO}_3$, который обладает такими свойствами. Спонтанная электрическая поляризация в HoFeO_3 возникает при температуре ≈ 210 K [3]. При более низких температурах сильный магнитокалорический эффект делает соединение перспективным кандидатом для использования в технологиях магнитного охлаждения и сжижения криогенных газов. При воздействии внешнего магнитного поля 0-7 T на температурной зависимости возникают три пика соответствующие изменению магнитной энтропии: $\Delta S_M = 9$ Дж/кг K при $T = 53$ K, $\Delta S_M = 15$ Дж/кг K при $T = 10$ K и $\Delta S_M = 18$ Дж/кг K при $T = 3$ K [4]. Эти пики могут быть связаны со спин-ориентационными переходами в системе.

В данной работе представлены результаты исследований эволюции магнитной структуры HoFeO_3 во внешнем магнитном поле. Эксперименты проводились методом нейтронной дифракции на двухосном монокристаллическом дифрактометре POLI в Майера-Лейбница центре (MLZ) [5]. В нулевом магнитном поле полученные результаты полностью соответствуют данным из работы [6]. Затем магнитное поле было приложено вдоль кристаллографической оси c и был измерен набор брэгговских отражений для каждого типа магнитного упорядочения: A (h + l четное, k нечетное), C (k нечетное, h + l четное), F (h + l четное, k четное) и G (h + l нечетное, k нечетное), в температурном диапазоне 2 K и 70 K с шагом 2 K при семи дискретных значениях внешнего магнитного поля до 8 T (рис. 1a). Полученный набор данных, можно описать разными магнитными представлениями, а также разными направлениями и величинами компонент магнитных моментов. По нашим соображениям мы можем выделить 8 различных магнитных фаз, индуцированных или подавленных магнитным полем.

Для более лучшего понимания механизмов приводящих к спин-ориентационным переходам были проведены эксперименты по неупругому рассеянию нейтронов в институте Лауэ-Ланжевена (ILL). Высокоэнергетические возбуждения изучались на IN20 - трехосный спектрометр на тепловых нейтронах, а низкоэнергетический диапазон исследовался на IN12 - трехосный спектрометр холодных нейтронов. В ходе эксперимента были выполнены измерения в режиме "постоянного-q". Для высокоэнергетических исследований шаг по энергии составлял $\Delta E = 1$ мэВ вдоль сканирования в диапазоне

энергий 10-70 мэВ. При этом измерения проводились в окрестности узла $q = [3 \ 0 \ 5]$ вдоль направления h в диапазоне от $q = [1 \ 0 \ 5]$ до $q = [3 \ 0 \ 5]$. Низкоэнергетические измерения на IN12 проводились в диапазоне 0-7 мэВ с шагом $\Delta E = 0.1$ мэВ вдоль сканирования. Сканирование проводилось в окрестности узла $q = [1 \ 0 \ 1]$ вдоль направления h в диапазоне от $q = [0 \ 0 \ 1]$ до $q = [2 \ 0 \ 1]$. На сканах видны пики, которые соответствуют, как магнонам, так и уровням кристаллического поля (рис. 16). Объединив все сканы были получены карты интенсивности неупругого рассеяния нейтронов. Для анализа результатов использовалась линейная теория спиновых волн. Полученные значения параметров обменных взаимодействий в подсистеме Fe находятся в хорошем согласии с аналогичными значениями в других ортоферритах [7,8]. Также даны оценки величин обменных взаимодействий между Ho и Fe подсистемой и внутри Ho подсистемы. Показано, что конкуренция обменных взаимодействий внутри кристалла приводит к изменению энергетического баланса системы, что и является причиной возникновения магнитных фазовых переходов.

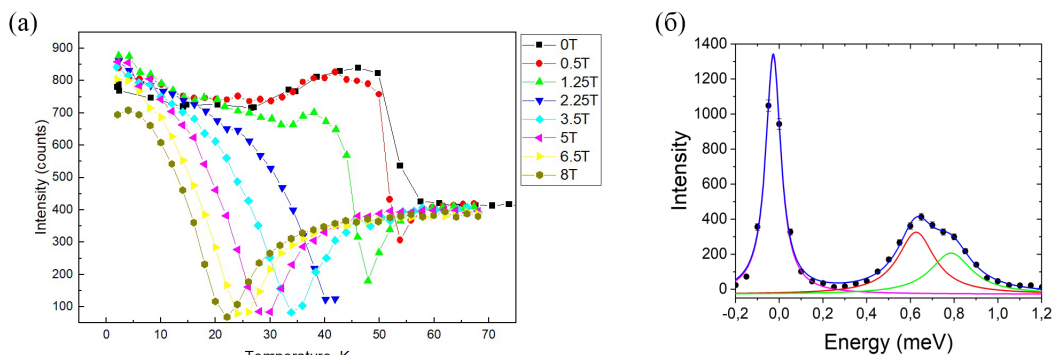


Рис. 1. а) Температурная зависимость интегральных интенсивностей отражения G типа (011). б) Скан по энергии в диапазоне от -0.2 до 1.2 мэВ при температуре 2.5 К. Розовая линия — пик, соответствующий упругому рассеянию нейтронов, красная линия — уровню кристаллического поля, зеленая линия — Ho магнону, синяя линия — результирующая кривая

1. W.C. Koehler et al., Phys. Rev. 118 (1960).
2. M. Marezio et al., Acta Cryst. B 26 (1970).
3. K. Dey et al., Phys. Rev. B 100, 214432 (2019).
4. M. Shao et al., Solid State Communications 152 (2012).
5. V. Hutnanu, Journal of large-scale research facilities, vol. 1, p. A16, (2015).
6. T. Chatterji et al., AIP Adv. 7 (2017).
7. A. K. Ovsianikov et al., JMMM, V. 563, (2022).
8. S.E. Nikitin et al., Phys. Rev. B 98 (2018).

МАГНИТНЫЕ СТРУКТУРЫ В СИСТЕМЕ СОЕДИНЕНИЙ $\text{Tb}(\text{Ni}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{Si}_2$

Е. Г. Герасимов^{1,2}, П. Б. Терентьев^{1,2}, Х. Альсафи², П. А. Борисова³, В. П. Глазков³,
Е. В. Дюжева³, Н. В. Мушников^{1,2}, А. Е. Теплых¹, М. А. Сёмкин^{1,2}, А. Н. Пирогов^{1,2*}

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

²Институт естественных наук и математики УрФУ, г. Екатеринбург, Россия

³Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

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

Интенсивное развитие спинтроники требует лучшего понимания и классификации антиферро- и ферромагнитных материалов. Среди них особый интерес представляют интерметаллические соединения RMn_2X_2 , (где R – редкоземельный ион, X – Si или Ge) со структурой типа ThCr_2Si_2 (пространственная группа $I4/mmm$). Особенность этих соединений состоит в их естественной слоистой структуре: различные атомы формируют отдельные плоскости, упакованные вдоль оси c в строгой последовательности $-\text{Mn}-\text{X}-\text{R}-\text{X}-\text{Mn}-$. Такую структуру можно рассматривать как модельный объект для изучения моноатомных многослойных пленок. Среди магнитных свойств соединений RMn_2X_2 наибольшее внимание привлекают изучение магнитных фазовых переходов и магнитных структур.

В данной работе проведено нейтронографическое исследование магнитных фазовых переходов в системе соединений $\text{Tb}(\text{Ni}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{Si}_2$.

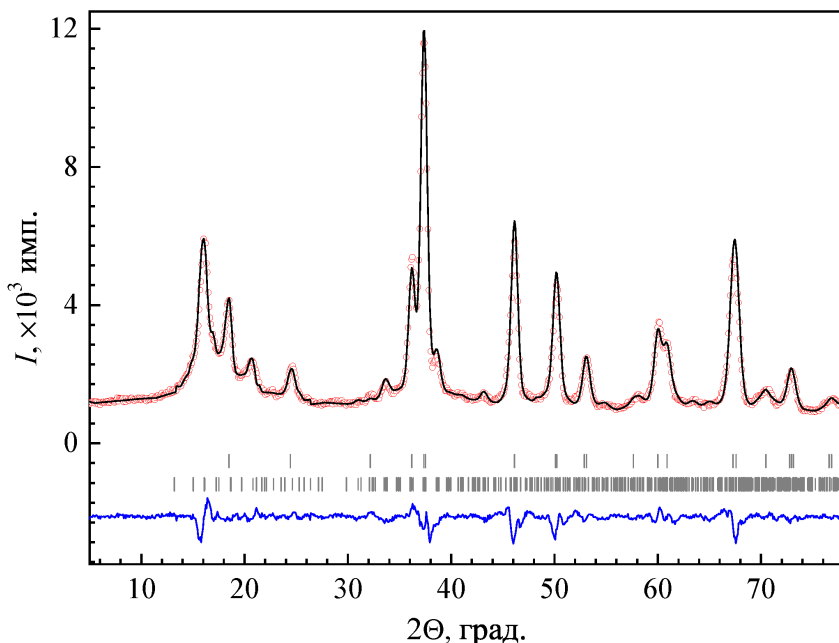


Рис. 1. Экспериментальная (точки), расчетная (линия) нейтронограммы $\text{Tb}(\text{Ni}_{0.9}\text{Mn}_{0.1})_2\text{Si}_2$ при 3 К ($\lambda = 1.544\text{\AA}$), разность между ними (линия внизу)

Были выплавлены образцы $x = 0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$. Нейтронограммы получены на дифрактометрах Д-3 и ДИСК, смонтированных на каналах реакторов ИВВ-2М и ИР-8, соответственно. Использовались длины волн 1.54, 2.4 и 3.8 Å.

При 4.2 К в TbNi_2Si_2 и $\text{Tb}(\text{Ni}_{0.95}\text{Mn}_{0.05})_2\text{Si}_2$ реализуется дальний магнитный порядок, который описывается волновым вектором $\mathbf{k} = (0.5, 0.5, 0)$.

На рис. 1 приведена нейтронограмма $\text{Tb}(\text{Ni}_{0.9}\text{Mn}_{0.1})_2\text{Si}_2$ при 3 К. Замещение атомов никеля атомами марганца до концентрации $x = 0.1$ сопровождается фазовым переходом к несоизмеримой магнитной структуре, описываемой волновым вектором $\mathbf{k} = (0.5 - \delta, 0.5 + \delta, 0)$, где $\delta \approx 0.85$.

В образце с $x = 0.4$ возникает ближний магнитный порядок с $\mathbf{k} = 0$.

Дальний магнитный порядок в образцах с $x = 0.6, 0.8, 1.0$ описывается волновым вектором $\mathbf{k} = (0, 0, 1)$. При $x = 1.0$, спины Tb ионов и компонента магнитного момента атомов Mn антипараллельны.

Работа поддержана проектом РНФ № 23-12-00265.

МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКИЕ КАРКАСНЫЕ СТРУКТУРЫ: СИНТЕЗ И АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ

Т. Н. Вершинина¹, И. И. Виноградов¹, Н. А. Дрожжин¹, В. Д. Жакетов¹, Е. И. Куницына²,
Ю. В. Никитенко¹, А. Павлюк³, О. Ю. Пономарева^{1*}

¹Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,
Черноголовка, Россия

³Институт ядерной химии и техники, Варшава, Польша

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

В ЛНФ ОИЯИ развита инфраструктура, необходимая для синтеза металл-органических каркасных (одно-, двух- или трехмерных) структур (МОКС), включающих ионы или кластеры металлов, координированные мостиковыми органическими лигандами. МОКС перспективны для использования в качестве адсорбентов, сенсорных материалов и катализаторов и могут обладать интересными магнитными свойствами [1]. В частности, некоторые МОКС могут проявлять свойства мономолекулярных магнитов (МММ), т.е. являться классическими магнитами на уровне единичной молекулы и сохранять намагниченность в течение длительного времени. Таким образом, МММ потенциально могут быть использованы в устройствах сверхплотного хранения информации [2].

Нами были синтезированы два типа МОКС на основе кобальта и никеля: $\{[M(L\text{-trp})(bpe)(H_2O)] \cdot H_2O \cdot NO_3\}_n$ и $Ni(L\text{-his})_2 \cdot H_2O$, здесь $M = (Co, Ni)$, $L\text{-trp} = L\text{-триптофан}$, $bpe = 1,2\text{-ди(4-пиридил)этилена}$, $L\text{-his} = L\text{-гистидин}$, и исследованы их магнитные свойства с помощью магнитометрии в постоянных и переменных магнитных полях и деполаризации нейтронов (спектрометр поляризованных нейтронов РЕМУР на ИБР-2). Показано, что Co-МОКС является парамагнетиком и его полевая зависимость при температуре 2 К подчиняется закону Бриллюэна. Явного гистерезиса намагниченности не обнаружено. Измерения в переменном магнитном поле при температурах 1.6 – 4 К показали, что магнитная релаксация в Co-МОКС достаточно медленная, чтобы отнести это соединение к МММ. Зависимость времени релаксации от температуры указывает на наличие нескольких конкурирующих процессов, участвующих в релаксации.

Обнаруженные эффекты оказались слишком малыми для практического применения, но интересными с фундаментальной точки зрения.

1. M. Kurmoo, Chem. Soc. Rev. 38, 1353–1379 (2009).

2. В.В. Новиков, Ю.В. Нелюбина, Успехи химии 90 (10) 1330-1358 (2021).

МОДЕЛЬ БАКА-ЙЕНСЕНА ДЛЯ ГЕЛИМАГНЕТИКОВ С ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ДЗЯЛОШИНСКОГО-МОРИЯ

С. В. Григорьев^{1,2}, К. А. Пшеничный¹*

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

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

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

Соединения $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ и $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$ являются твердыми растворами с кристаллической структурой B20. Эти соединения магнитно упорядочиваются ниже T_C в спиральную структуру с малым вектором распространения k [1,2]. По аналогии с магнитной структурой MnSi и FeGe спиновая спираль индуцируется антисимметричным обменным взаимодействием Дзялошинского-Мория (ДМ), обусловленным отсутствием центра симметрии в расположении магнитных атомов железа и кобальта (модель Бака-Йенсена) [3]. Согласно этой модели, спиральный порядок стабилизируется за счёт обычного обменного взаимодействия и взаимодействия Дзялошинского-Мория при этом волновой вектор определяется как $k = SD/A$, где A — жёсткость спиновых волн, D — коэффициент взаимодействия Дзялошинского-Мория. С приложением магнитного поля формируется однодоменная коническая структура, которая остается стабильной вплоть до критического поля H_{c2} , когда происходит переход из конического состояния в ферромагнитное, при этом $g_{\mu_B}H_{c2} = Ak_2$ [4].

Методом малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов нами были экспериментально измерены такие параметры магнитной системы как волновой вектор спирали k , критическое поле H_{c2} , и жесткость спиновых волн в широком температурном диапазоне в соединениях $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$ с $x = 0.0, 0.03, 0.06, 0.09$ [5,6], $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ с $x = 0.25, 0.30, 0.50$ [7], и соединении Cu_2OSeO_3 [8]. Эксперименты показали, что модель Бака-Йенсена на количественном уровне хорошо описывает характерные параметры системы во всем температурном диапазоне от 0 до критической температуры T_C .

1. С. Григорьев и др., Нецентросимметричные кубические геликоидальные ферромагнетики $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$ и $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ // Физика твердого тела. — 2010. — Т. 52, No 5. — С. 852.
2. Beille, J. Long period helimagnetism in the cubic B20 $\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x}\text{Si}$ and $\text{Co}_x\text{Mn}_{1-x}\text{Si}$ alloys. / J. Beille, J. Voiron, M. Roth // Solid State Commun. — 1983. — Vol. 47. — P. 399–402.
3. Bak, P. Theory of helical magnetic structures and phase transitions in MnSi and FeGe / P. Bak, M. H. Jensen // J. Phys. C. — 1980. — No. 13. — P. L881.
4. Maleyev, S. V. Cubic magnets with Dzyaloshinskii-Moriya interaction at low temperature / Phys. Rev. B. — 2006. — No. 73. — P. 174402.
5. S.V. Grigoriev, A. S. Sukhanov, E. V. Altynbaev, S.-A. Siegfried, A. Heinemann, P. Kizhe, and S. V. Maleyev, Phys. Rev. B 92, 220415(R) (2015).
6. S. V. Grigoriev, E. V. Altynbaev, S.-A. Siegfried, K. A. Pschenichnyi, D. Menzel, A. Heinemann, and G. Chaboussant, Phys. Rev. B 97 (2018) 024409.
7. S. V. Grigoriev, K. A. Pschenichnyi, E. V. Altynbaev, S.-A. Siegfried, A. Heinemann, D. Honnecker, and D. Menzel, Phys. Rev. B 100 (2019) 094409.

ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ В СИСТЕМЕ $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{PO}_4$

П. Е. Ромашко^{1,2*}, Е. В. Дюжева-Мальцева³, Д. С. Незнахин^{1,2}, В. П. Глазков³,
М. А. Сёмкин^{1,2}

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

²Институт естественных наук и математики УрФУ, г. Екатеринбург, Россия

³НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

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

С фундаментальной точки зрения ортофосфаты LiMPO_4 ($M = \text{Ni}, \text{Co}$) представляют интерес благодаря наличию магнитных и магнитоэлектрических свойств [1]. Среди них наиболее изучены недопированные соединения, поэтому смешанные составы могут сыграть ключевую роль в формировании феноменологической теории описания свойств, например магнитоэлектрического эффекта. Для материалов, в которых существует взаимодействие между электрическими и магнитными подсистемами, упругое когерентное рассеяние нейтронов обеспечивает одновременное изучение кристаллической и магнитной структуры.

Нами были проведены нейтронографические исследования системы $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{PO}_4$, где $x = (0.05, 0.25, 0.75, 0.9, 1)$ на станции нейтронной порошковой дифракции ДИСК (длина волны нейтронов $\lambda = 2.43805 \text{ \AA}$) с использованием криостата замкнутого цикла в интервале температур от 2.5 до 25 К. Обработка нейтронографических данных выполнена полнопрофильным методом Ритвелда в пакете программ *Fullprof Suite*.

Соединения $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{PO}_4$ имеют структуру оливина (пространственная группа *Pnma*) типа CaMgSiO_4 , в которой ионы 3d переходных металлов расположены в октаэдрической позиции 4с ($x; 0.25; z$). Ионы Li занимают позицию 4а с координатами (0; 0; 0), ионы Р занимают позиции 4с ($x; 0.25; z$), а ионы О расположены в двух узлах 4 и позиции 8d ($x; y; z$). При увеличении концентрации кобальта от $x = 0.05$ до $x = 1$ наблюдается линейный рост размеров элементарной ячейки, группа симметрии сохраняется, наибольшие изменения наблюдаются для параметра a . На рис. 1а показаны температурные зависимости параметра a для всех концентраций, видно что параметр существенно не изменяется в исследуемом интервале температур.

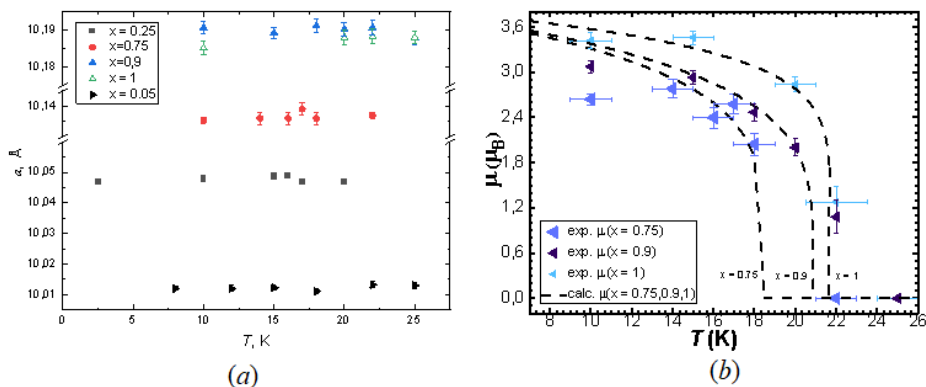


Рис. 1. Температурные зависимости соединений $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{PO}_4$ ($x = 0.25, 0.75, 0.9, 1$) (а) параметра a , (б) магнитного момента на 3d ионе, точки – уточненные значения из расчета нейтронограмм, линии – расчетные кривые в рамках 2D модели.

Соединения $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{PO}_4$ обладают антиферромагнитным (АФМ) упорядочением при низких температурах, ниже 20 К [1]. Магнитные свойства обусловлены спином на ионах 3d-переходных металлов, расположенных в узлах $r_1 = (\frac{1}{4} + \epsilon, \frac{1}{4}, 1 - \delta)$, $r_2 = (\frac{3}{4} + \epsilon, \frac{1}{4}, \frac{1}{2} - \delta)$, $r_3 = (\frac{3}{4} + \epsilon, \frac{3}{4}, \delta)$, $r_4 = (\frac{1}{4} - \epsilon, \frac{3}{4}, \frac{1}{2} - \delta)$, где $\epsilon = 0.025$ и $\delta = 0.018$ для LiNiPO_4 [2], $\epsilon = 0.029$ и $\delta = 0.021$ для LiCoPO_4 [3].

На рис. 16 показаны температурные зависимости магнитного момента на ионе 3d переходного металла и расчётные кривые в рамках 2D модели Изинга. Величина магнитного момента ионов Ni/Co уменьшается и может быть описана в рамках 2D модели Изинга. Параметры для расчета модели для $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{PO}_4$ с $x = (0.75, 0.9, 1)$ равны, $\beta \approx 0.21$ (формула 1). Значения температуры Нееля (T_N) было определено из ранее полученных температурных зависимостей производных магнитной восприимчивости $T_N = (18.5, 20.7, 21.8)$ К для $x = (0.75, 0.9, 1)$ соответственно. При минимальной температуре измерений величина суммарного магнитного момента на ионе 3d переходного металла в $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{PO}_4$ для $x = (0.75, 0.9, 1)$ не превышает $3.5 \mu_B$.

$$\mu_{2D} = \mu_0 \left(1 - \frac{T}{T_N}\right)^\beta \quad (1)$$

Установлено, что магнитные структуры исследуемых соединений $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{PO}_4$ описываются волновым вектором $\mathbf{k} = 0$ и базисными функциями двух неприводимых представлений (НП) τ_4 и $\tau_{6,2}$ с АФМ упорядочением ионов Ni/Co вдоль кристаллографических осей b и c , соответственно. Для составов с $x = (0.05, 0.25)$ магнитная структура описывается НП $\tau_{6,2}$, для $x = (0.75, 0.9 \text{ и } 1.0)$ описывается – τ_4 . На рис. 2 показаны соответствующие им модели магнитных структур $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{PO}_4$.

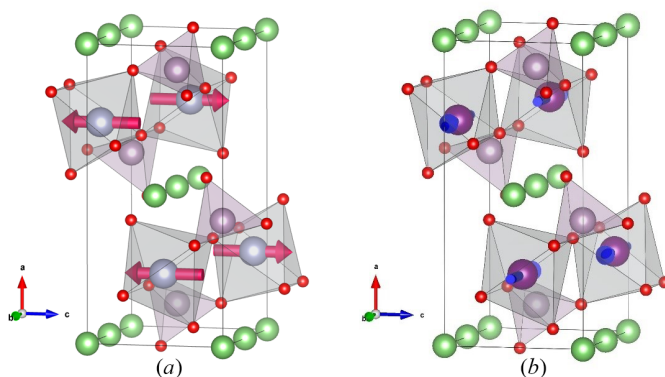


Рис. 2. Модели магнитных структур $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{PO}_4$ для концентраций $x = (0.05, 0.25)$ (а), АФМ упорядочение вдоль оси c ($\tau_{6,2}$) и больших $x = (0.75, 0.9 \text{ и } 1.0)$ (б), АФМ упорядочение вдоль оси b (τ_4).

Результаты исследований выполнены в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «ПОТОК», № 122021000031-8).

1. N. V. Urusova, M. A. Semkin, A. Hoser, A. N. Pirogov, J. Surf. Invest. 16(5), 847 (2022).
2. D. Vaknin, J. L. Zarestky, L. Miller, J.-P. Rivera, H. Schmid, J. Phys. Rev. 65, 22 (2002).
3. E. Fogh, Magnetic and magnetoelectric properties of lithium orthophosphates: Doctoral dissertation Technical University of Denmark, Denmark, (2018).

СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ И МАГНИТНОЕ УПОРЯДОЧЕНИЕ СИСТЕМ ШПИНЕЛЬ/СЕГНЕТОЭЛЕКТРИК

М. А. Сёмкин^{1,2*}, А. Е. Теплых¹, С. Г. Богданов¹, А. Н. Пирогов^{1,2}

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

²Институт естественных наук и математики УрФУ, г. Екатеринбург, Россия

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

Композитные материалы на основе систем магнитных шпинелей $(\text{Co}, \text{Ni})\text{Fe}_2\text{O}_4$ и сегнетоэлектрика BaTiO_3 являются представителями класса мультиферроиков, которые обладают магнитоэлектрическими свойствами при комнатной температуре [1]. Магнитоэлектрическое взаимодействие в системах шпинель/сегнетоэлектрик определяется особенностями их кристаллических структур, магнитным упорядочением и сегнетоэлектрическим состоянием. Следовательно, изучая в композитных системах поведение структурных параметров, электрических и магнитных характеристик можно сделать вывод о величине магнитоэлектрической связи и природе явления.

Нами выполнено всестороннее комплексное исследование структурного состояния, магнитных и сегнетоэлектрических свойств двух систем композитных мультиферроиков $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{BaTiO}_3$ и $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{BaTiO}_3$ с наиболее перспективными, с точки зрения величины магнитоэлектрических свойств, номинальными соотношениями компонент шпинель/сегнетоэлектрик: 20/80, 30/70 и 40/60.

Методами когерентного рассеяния рентгеновских лучей и нейтронов показано, что магнитные компоненты имеют структуру частично обращенной кубической шпинели (пространственная группа $Fd\bar{3}m$) типа MgAl_2O_4 , в которой двухвалентные ионы $3d$ -переходного металла (Co^{2+} или Ni^{2+}) распределяются с ионами Fe^{3+} по частным тетра- (8a) и окта- (16d) позициям с координатами (0.125, 0.125, 0.125) и (0, 0, 0), соответственно. Ионы O^{2-} занимают узлы $32e$: (x, x, x), где $x = 0.2562(2)$ для подсистемы с кобальтом и $x = 0.2555(1)$ – никелем. Размеры кристаллической решетки CoFe_2O_4 составили $a = 8.3775(8)$ Å, NiFe_2O_4 – $a = 8.3285(4)$ Å. Магнитные ячейки шпинелей совпадают с кристаллическими (волновой вектор $\mathbf{k} = 0$), но из-за кубической симметрии однозначно определить направления магнитных моментов из нейтронографических экспериментов на поликристаллическом образце невозможно. Однако, удалось оценить величину магнитного момента по тетра- (А) и окта- (В) позициям, которые формируют соответствующие две подрешетки с суммарной ферримагнитной структурой. Уточненные значения компонент магнитных моментов в подсистеме CoFe_2O_4 составляют $\mu_A = 3.80(5)$ μ_B , $\mu_B = 3.74(4)$ μ_B , суммарный момент $\mu_\Sigma = 3.7(1)$ μ_B , для NiFe_2O_4 – $\mu_A = 4.11(4)$ μ_B , $\mu_B = 2.87(3)$ μ_B , суммарный $\mu_\Sigma = 1.6(1)$ μ_B .

Сегнетоэлектрическая компонента имеет тетрагональную структуру, описываемую пространственной группой $P4mm$, с параметрами $a = 3.9912(12)$ Å, $c = 4.0310(13)$ Å. Ионы Ti^{4+} занимают частную позицию $1a$ с координатами: (0, 0, z), где $z = 0.0$. Ионы $\text{Ba}^{2+} - 1b$: (0.5, 0.5, z), $z = 0.513(7)$. Ионы кислорода занимают две неэквивалентные позиции $\text{O}^{2-}(1) - 1a$: (0, 0, z), $z = 0.536(7)$ и $\text{O}^{2-}(2) - 2c$: (0, 0.5, z), $z = 0.033(7)$. Видно, что сегнетоэлектрической подсистеме все ионы имеют фиксированные координаты x и y , магнитоэлектрическая связь может происходить только вдоль оси за счет смещения атомов. Величина смещений бария и кислорода по отношению к центросимметричным позициям титана в структуре сегнетоэлектрической подсистемы определяет ионный вклад в спонтанную поляризацию.

По данным сканирующей электронной микроскопии средний размер частиц шпинелей не превышал 0.5 мкм, титаната бария – 5 мкм. Из результатов малоуглового рассеяния нейтронов отмечается, что в исследуемых композитах имеются и более мелкие частицы размером порядка 40 нм и концентрацией менее 15 %, также нельзя исключить

наличия в них и более мелких неоднородностей. Отметим, что полуширины рефлексов экспериментальных нейтронограмм исследованных образцов близки полуширинам отражений для стандартного образца Al_2O_3 , тогда, следует ожидать, что рассеивающие частицы имеют размер не менее 0.1 мкм. В качестве примера, на рис. 1 приведена нейтронограмма композитного образца $\text{CoFe}_2\text{O}_4(20)/\text{BaTiO}_3(80)$ полученная при 293 К на дифрактометре Д-2 с длиной волны нейтронов $\lambda = 1.805 \text{ \AA}$ (реактор ИВВ-2М, г. Заречный). Видно, что рефлексы от компоненты шпинели и сегнетоэлектрика не перекрываются на углах рассеяния (2θ) менее 80° , это позволило уточнить значения структурных и магнитных параметров с хорошей степенью точности (фактор $\chi^2 \leq 4 \%$).

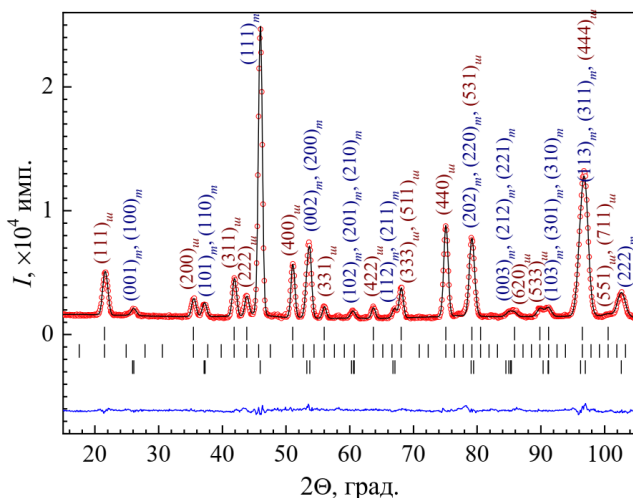


Рис. 1. Экспериментальная (точки), расчетная (линия) нейтронограммы при 293 К ($\lambda = 1.805 \text{ \AA}$) композитного образца $\text{CoFe}_2\text{O}_4(20)/\text{BaTiO}_3(80)$, разность между ними (линия внизу), в скобках указаны индексы Брэгговских рефлексов. Верхний и средний ряд штрихов – угловые положения ядерных и магнитных рефлексов шпинели, нижний ряд штрихов – ядерные рефлексы подсистемы сегнетоэлектрика

Шпинели NiFe_2O_4 и CoFe_2O_4 различаются по зависимостям интенсивности дифракции нейтронов от распределения ионов $3d$ -переходных металлов по тетра- и окто-кристаллографическим позициям. Для естественной смеси изотопов амплитуды когерентного рассеяния нейтронов ядрами железа $b_{\text{Fe}} = 0.945 \cdot 10^{-12} \text{ см}$ и никеля $b_{\text{Ni}} = 1.030 \cdot 10^{-12} \text{ см}$ [2] близки по величине. Расчет нейтронограмм с никелевой шпинелью проведен в предположении, что ионы Ni занимают половину узлов $16d$, а ионы Fe находятся в позиции $8a$ и заполняют вторую половину узлов $16d$ (полностью обращенная шпинель). Благодаря тому, что амплитуды когерентного рассеяния нейтронов ядрами кобальта $b_{\text{Co}} = 0.249 \cdot 10^{-12} \text{ см}$ [2] и железа различаются почти в четыре раза, нам удалось обнаружить характерное изменение интенсивности рефлекса (400) кобальтовой шпинели и определить степени обращенности структуры.

Результаты исследований выполнены в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «ПОТОК», № 122021000031-8).

1. Сёмкин, М.А. Кристаллическая структура и магнитные свойства мультиферроиков на основе ванадатов, ортофосфатов и ферритов: автореф. дис. физ.-мат. наук: 01.04.11/ Сёмкин Михаил Александрович. – Е., 2017. – 24 с.
2. V. F. Sears, Neutron News 3(3), 26 1992.

РАСЩЕПЛЕНИЕ МАГНИТНОГО И КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЙ В $\text{Fe}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Ge}$

Д. О. Сканченко^{1,2*}, Е. В. Алтынбаев^{1,2,3}, В. А. Сидоров², G. Chaboussant⁵, N. Martin⁵,
Д.А. Саламатин³, С. В. Григорьев¹, Н. М. Щелкачев², М. В. Магнитская², А. В. Цвященко²

¹Петербургский Институт Ядерной Физики НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина, 188300
Санкт-Петербург, Россия

²Институт Физики Высоких Давлений РАН, 142190, Троицк, Москва, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет, 198504 Санкт-Петербург, Россия

⁴Физический институт им. Лебедева РАН, 119991, Москва, Россия

⁵Laboratoire Leon Brillouin, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

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

Проведено комплексное экспериментальное и теоретическое исследование соединений $\text{Fe}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Ge}$ во всем диапазоне концентраций $x \in [0,0-1,0]$ с использованием рентгеновской дифракции, малоуглового рассеяния нейтронов, магнитометрии и теоретических расчетов.

Эти соединения, синтезированные при высоком давлении, кристаллизуются в нецентросимметричную кубическую структуру B20 [1]. Отсутствие инверсионной симметрии в расположении магнитных атомов приводит к возникновению антисимметричного взаимодействия Дзялошинского-Мория (ДМ) и образованию магнитной спирали [2, 3]. В частности, магнитная система соединения FeGe упорядочивается в магнитную спираль при температурах ниже $T_C = 278$ К [4]. Тем не менее известно, что бинарное соединение B20 RhGe проявляет слабый ферромагнетизм ниже $T_m = 140$ К и переходит в сверхпроводящее состояние при $T_C = 4,5$ К [5].

В то время как FeGe и RhGe являются однофазным гелимагнетиком и нетрадиционным сверхпроводником соответственно, для промежуточных составов $x \in [0,2-0,9]$ обнаружено внутреннее расщепление кристаллографического и магнитного состояний. Теоретический анализ стабильности двух обнаруженных фаз вместе с экспериментальными данными показывают, что это расщепление сохраняет общую пространственную группу и происходит внутри монокристаллитов, а не является следствием кристаллизации соединений с близкими значениями содержания $\text{Rh}(\text{Fe})$ -концентрации. Несмотря на кажущееся сходство, эти две фазы, тем не менее, демонстрируют различные магнитные структуры с отчетливым ферро- и гелимагнитным характером.

Авторы благодарят за поддержку Российский научный фонд (грант № 22-12-00008).

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. C13 L881 (1980).
4. B. Lebech, et.al., Journal of Physics: Condensed Matter 1, 6105 (1989).
5. A.V. Tsvyashchenko et al., J. of All. and Comp., vol. 686, pp. 431–437 (2016).

УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРОЙ СПИН-ОРИЕНТАЦИОННОГО ПЕРЕХОДА В МОНОКРИСТАЛЛАХ $\text{HoFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$

С. А. Скоробогатов^{1,2*}, К. А. Шайхутдинов^{1,2}, Ю. В. Князев¹, Т. Н. Камкова^{1,2},
А. Д. Васильев^{1,2}, С. В. Семенов^{1,2}, М. С. Павловский^{1,2}, А. А. Красиков¹

¹Институт физики им. Л.В. Киренского, СО РАН, Красноярск 660036, Россия

²Сибирский Федеральный Университет, Красноярск 660041, Россия

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

Замещение или допирование различных химических элементов в соединении является одним из основных методов выявления новых физических свойств или управления уже существующими эффектами. Так, в случае ортоферритов (RFeO_3) изменение магнитных свойств можно наблюдать в случае замещения железа на трехвалентные ионы с другим магнитным моментом (на Cr^{3+} , Mn^{3+} , Co^{3+}) [1-4].

В данной работе представлены результаты исследования замещения иона Fe^{3+} на ионы Mn^{3+} в соединении $\text{HoFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$, при этом особое внимание было уделено росту монокристаллов методом оптической зонной плавки, определению предела растворимости марганца и области стабильности ромбической фазы. Кроме роста монокристаллов, в работе также проведены рентгеноструктурные исследования, благодаря которым удалось определить качество монокристаллов и изменение позиций ионов O^{2-} в кислородных октаэдрах, возникающее при увеличении доли Mn^{3+} в составе. Получены мессбауэровские спектры и проведена характеристика образцов с их помощью.

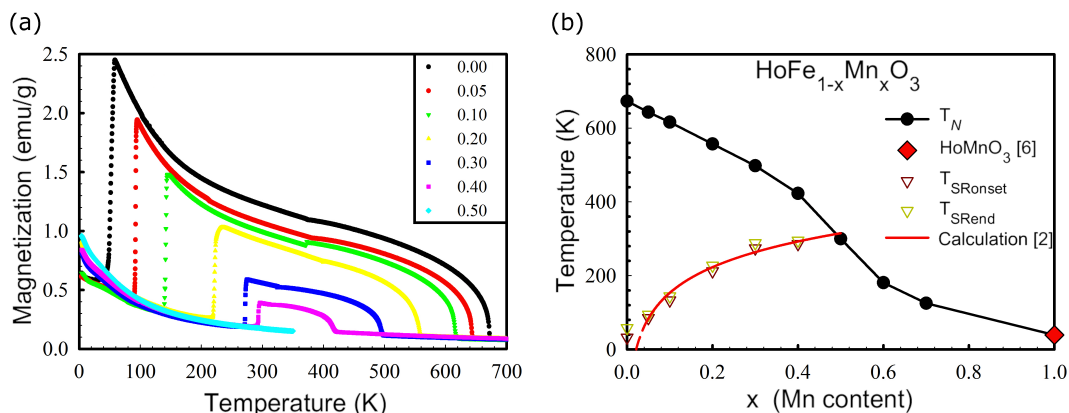


Рис. 1. (a) Намагниченности исследованных соединений от температуры, измерения выполнены при внешнем поле 1 кОе приложенном вдоль оси **b** в установке Pnma. (b) Фазовая диаграмма эволюции T_{SR} и T_N в зависимости от концентрации Mn^{3+} в составе, красной точкой отмечен случай HoMnO_3 в орторомбической фазе, полученный раствор-расплавным методом

В результате работы были получены монокристаллические образцы с содержанием ионов марганца относительно железа $x = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$. При концентрациях ($0.7 < x < 0.8$) наблюдается граница раздела фаз между орторомбической

и гексагональной модификацией в твердом растворе $\text{HoFe}_{1-x}\text{MnO}_3$. Возникшие искажения в октаэдрах являются следствием эффекта Яна –Теллера [5], который подтверждается результатами мессбауровской спектроскопии. Магнитные измерения, приведенные в диапазоне температур от 4.2 до 1000 К представлены на Рис. 1а, а на Рис. 1b приведена фазовая диаграмма $\text{HoFe}_{1-x}\text{MnO}_3$, представляющая изменения температур Нееля T_N и спин ориентационного перехода T_{SR} .

Результаты измерения температурных зависимостей намагниченности $M(T)$ (Рис. 1а) демонстрируют смещение спин-ориентационного перехода из области низких температур в комнатные при концентрации ионов марганца 0.4, с последующим его исчезновением при концентрациях 0.5. Наличие магнитного перехода при комнатных температурах и возможность им управлять, например с использованием лазерных импульсов, открывает широкие перспективы для построения устройств на основе подобных соединений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-10026, <https://rscf.ru/project/23-22-10026/>, Красноярского краевого фонда науки.

1. L. Su et al., Physica B: Condensed Matter **575**, 411687, (2019).
2. Y. Fang et al., Scientific Reports **6**, 33448, (2016).
3. G. Song et al., Physica B: Condensed Matter **589**, 412185, (2020).
4. Z. Habib et al., Appl. Phys. A **123**, (2017).
5. F.-K. Chiang et al., PHYSICAL REVIEW B **83**, 245105, (2011).
6. N. Lee et al., PHYSICAL REVIEW B **84**, 020101(R), (2011).

ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА $\text{LiMn}^{2+}\text{Mn}^{3+}\text{TeO}_6$

А. Е. Суслопарова^{1,2*}, А. И. Курбаков¹

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

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

* E-mail: susloparovanna@mail.ru

Исследуемое в работе соединение $\text{LiMn}_2\text{TeO}_6$ принадлежит к обширному классу сложных оксидов марганца в смешанно валентном состоянии с редкоземельными, щёлочноземельными элементами или щелочными металлами.

Соединения семейства $\text{LiMn}^{2+}\text{Mn}^{3+}\text{TeO}_6$ ($X = \text{Sb}, \text{Te}$) являются прототипами сильно коррелированных систем и представляют собой уникальные объекты для современной физики магнетизма, в которых одновременно проявляются спиновые, зарядовые и орбитальные степени свободы. Нецентросимметричность этих соединений определяет обязательное наличие наряду с основным обменным, взаимодействия Дзялошинского-Мория и, в итоге, возможно, хирального магнетизма. А наличие в элементарной ячейке 4-х различных марганцев может вызвать образование более одной магнитной спирали. Благодаря уникальным физическим свойствам, такие соединения могут найти потенциальное применение в областях спинтроники, компьютерных технологий и литий-ионных аккумуляторов, что делает их интересными объектами для исследований.

В отличие от широко изученных манганитов, в которых марганец находится в смешанновалентном состоянии $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$, физические свойства соединений со степенью окисления марганца от 2 до 3 до настоящего времени практически не изучены. В изучаемой системе ионные радиусы отличаются достаточно, чтобы марганец был валентно локализован, в отличие от степени окисления между 3+ и 4+, где ионы разных валентностей часто занимают одну и ту же кристаллографическую позицию из-за сходства ионных радиусов. Это приводит к тому, что подобная модификация может эффективно изменять электрические и магнитные свойства.

Для определения кристаллической структуры была проведена порошковая дифракция нейтронов в режиме высокого разрешения дифрактометра D2B, ILL, Франция.

$\text{LiMn}_2\text{TeO}_6$ кристаллизуется в пространственную группу низшей сингонии 1, с параметрами элементарной ячейки $a = 5.0956(1)$, $b = 8.5566(2)$, $c = 5.0405(1)$, $\alpha = 92.651(2)$, $\beta = 92.145(2)$, $\gamma = 89.766(2)$. Предлагаемая модель представлена на рисунке 1. Триклинная кристаллическая структура $\text{LiMn}_2\text{TeO}_6$ представляет собой сильно искаженный вариант орторомбической ($\text{Pnn}2$) структуры $\text{Li}_2\text{TiTeO}_6$ [1] с упорядочением Li/Mn на двух независимых позициях Li. При этом, сам $\text{Li}_2\text{TiTeO}_6$ является надстройкой, производной от LiSbO_3 . $\text{LiMn}_2\text{TeO}_6$ можно рассматривать как квазидвумерную или даже одномерную магнитную структуру, так как расстояния между тремя атомами Mn-Mn-Mn (расстояния в зигзагообразных цепочках вдоль оси b , определенные из нейтронных измерений, короче, чем в двух других направлениях, а минимальные расстояния между слоями (только между двумя атомами) более 5 Å.

Благодаря особому кристаллическому строению, при понижении температуры и возникновении дальнего магнитного упорядочения, в системе возможна реализация неклассических типов спинового упорядочения. Предварительные данные показывают довольно сложное магнитное поведение стехиометрического $\text{LiMn}_2\text{TeO}_6$. При понижении

температуры $\chi(T)$ имеет резкий максимум около ~ 20 К, который свидетельствует о начале антиферромагнитного дальнего упорядочения в материале при низких температурах. Тем не менее, дальнейшее охлаждение образца приводит к появлению второй, гораздо более интенсивной аномалии на $\chi(T)$ в районе $T_{N2} \sim 13$ К.

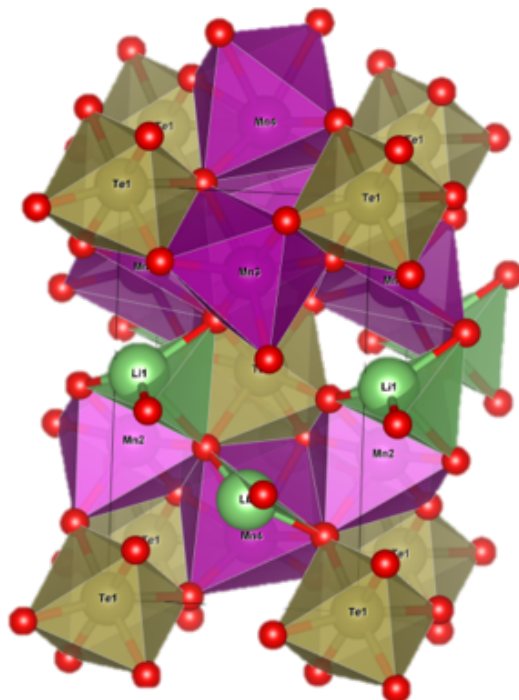


Рис. 1. Модель кристаллической структуры $\text{LiMn}_2\text{TeO}_6$

Исследование магнитной структуры и её особенностей проводились при температурах в районе температуры Нееля с помощью нейтронной дифракции. Характер возникновения дополнительного рассеяния указывает на реализацию в системе антиферромагнитного типа магнитного упорядочения при температурах ниже 20 К. При этом, ниже 13 К происходит резкое изменение магнитной части нейтронограмм, что может быть связано с переходом магнитной структуры от несоизмеримой к соизмеримой.

1. J. Choisnet, A. Rulmont, et al., J. of Solid State Chemistry 82, 272-278 (1989).

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СИСТЕМЫ Co_xTiS_2

А. И. Меренцов², Е. А. Степанова³, Н. В. Урсова^{1,3*}

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

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

Дихалькогениды переходных металлов, интеркалированные различными металлами, являются объектом многочисленных исследований [1-3]. Слоистая морфология соединений обеспечивает относительно слабую связь между соседними слоями халькогена, что даёт возможность обратимо вводить (интеркалировать) атомы, ионы или молекулы в межслоевое пространство без потери слоистой структуры соединения [4]. TiS_2 принадлежит к семейству TiX_2 ($X = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$). Эти материалы кристаллизуются в слоистую структуру 1T-CdI_2 (пространственная группа $P-3m1$) [1]. Наиболее интересны соединения $M_x\text{TiX}_2$ ($M = 3d$ -переходный металл), поскольку электроны $3d$ -оболочки переходного металла, участвуя как во взаимодействиях «хозяин-гость», так и во взаимодействиях «гость-гость», определяют электронную структуру, кинетику и магнитные свойства соединения. Так, различные магнитные упорядочения наблюдаются в интеркалатных соединениях $M_x\text{TiX}_2$ с $M = \text{V}, \text{Cr}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Co}$ и Ni [5]. В этих соединениях атомы частично занимают в пространстве между слоями $X\text{-Ti-X}$ позиции, октаэдрически координированные ближайшими атомами халькогена. При высокой концентрации интеркаланта ($x \geq 0.25$) в $M_x\text{TiX}_2$ могут наблюдаться различные типы упорядочения как атомов интеркаланта, так и вакансий в межслоевом пространстве [6]. В настоящей работе объектами исследований являлись интеркалатные соединения Co_xTiS_2 в широкой ($0.05 \leq x \leq 0.80$) области концентраций кобальта. Несмотря на то, что эта система широко изучалась [7-10], данные как о кристаллической, так и о магнитной структуре даже для соединений одного состава часто противоречивы.

Поликристаллические образцы Co_xTiS_2 ($0.05 \leq x \leq 0.80$) получены методом твердофазной реакции в вакуумированных кварцевых ампулах. Кристаллическая структура и фазовый состав образцов определялись при комнатной температуре методом порошковой рентгеновской дифракции на дифрактометре высокого разрешения Shimadzu XRD-7000 (монохроматическое излучение $\text{Cu K}\alpha$, $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$). Магнитные измерения для Co_xTiS_2 ($0.05 \leq x \leq 0.80$) проводились на СКВИД-магнитометре MPMS XL-7 в температурном интервале 2 – 300 К во внешнем магнитном поле 100 Э в ZFC (охлаждение в нулевом поле) и FC (охлаждение в ненулевом поле) режимах. Измерены полевые зависимости намагниченности соединений Co_xTiS_2 в интервале внешних полей от -7 кЭ до 7 кЭ при $T = 40, 210, 290, 360 \text{ K}$.

Для соединений с $x \leq 0.20$ на температурной зависимости магнитной восприимчивости $\chi_m(T)$ при $T \approx 10 - 12 \text{ K}$ наблюдается расхождение кривых FC и ZFC, что может свидетельствовать о состоянии спинового стекла. При $x \geq 0.30$ на температурных зависимостях $\chi_m(T)$ присутствует ферромагнитный вклад. Для соединений $\text{Co}_{0.30}\text{TiS}_2$, $\text{Co}_{0.40}\text{TiS}_2$ и $\text{Co}_{0.50}\text{TiS}_2$ наблюдается фазовый переход в магнитоупорядоченное состояние при температурах $T = 218 \text{ K}$, $T = 212 \text{ K}$ и $T = 180 \text{ K}$, соответственно.

Соединения $\text{Co}_{0.75}\text{TiS}_2$ и $\text{Co}_{0.80}\text{TiS}_2$ существенно отличаются от других составов системы Co_xTiS_2 . Их магнитная восприимчивость увеличивается с температурой по край-

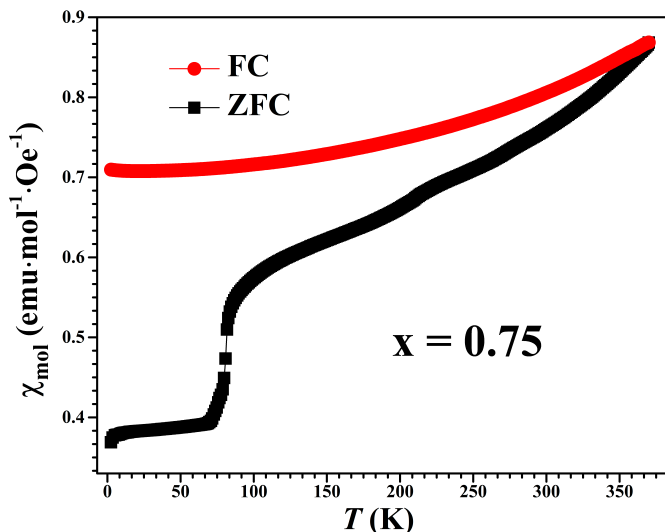


Рис. 1. Температурные зависимости молярной восприимчивости во внешнем магнитном поле 100 Э соединения $\text{Co}_{0.75}\text{TiS}_2$

ней мере до 370 K, как показано на рисунке 1. Исходя из кривых $\chi_m(T)$, можно предположить, что переход в магнитоупорядоченную фазу происходит при температуре выше 370 K.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-72-00094).

1. T. Hibma, London: Acad. Press, (1982).
2. M.S. Whittingham, Prog. Solid State Chem. 12(1), 41 (1978).
3. G.V. Subba-Rao, M.W. Shafer, Reidel Publishing Company, Dodrecht (Holland), (1979).
4. Y.-S. Kim et al., Jpn. J. Appl. Phys. 37, 4878 (1998).
5. H. Negishi et al., J. Magn. Magn. Mater. 67, 179 (1987).
6. A.F. Gubkin et al., J. Alloys Compd. 616, 148 (2014).
7. M. Inoue et al., J. Magn. Magn. Mater. 53(1–2), 131 (1985).
8. M. Danot, J. Rouxel, O. Gorochoy, Mater. Res. Bull. 9(10), 1383 (1974).
9. T. Kawasaki, K. Ohshima, J. Phys. Soc. Japan. 80(4), 044601 (2011).
10. G. Guélou et al., J. Mater. Chem. C 4(9), 1871 (2016).

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МАГНИТНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ КВАЗИДВУМЕРНОГО ОКСИДА $\text{Li}_2\text{Ni}_2\text{TeO}_6$

Н. С. Фокин, А. Е. Суслопарова, А. И. Курбаков*

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

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

Соединение $\text{A}_2\text{Ni}_2\text{TeO}_6$ (где А — ион одновалентного металла, в данном случае Li) относится к огромному классу квазидвумерных оксидов и, благодаря ряду уникальных магнитных свойств, имеют перспективы для применения в области электрохимии [1], материалов для аккумуляторов [2], катализа [3] и многих других.

В настоящей работе, методом нейтронной дифракции изучены особенности формирования магнитного порядка в двух образцах квазидвумерного оксида стехиометрического состава $\text{Li}_2\text{Ni}_2\text{TeO}_6$, полученных путём ионообменного синтеза из двух прекурсоров: $\text{Na}_2\text{Ni}_2\text{TeO}_6$ и $\text{K}_2\text{Ni}_2\text{TeO}_6$. Серия экспериментов проводилась на нейтронном порошковом дифрактометре G4.1 (LLB, Сакле, Франция) в диапазоне температур 1.5–35 K, при длине волны 2.4283 Å.

Обработка полученных экспериментальных данных осуществлялась с применением полнопрофильного анализа, методом Ритвельда в программном пакете FullProf.

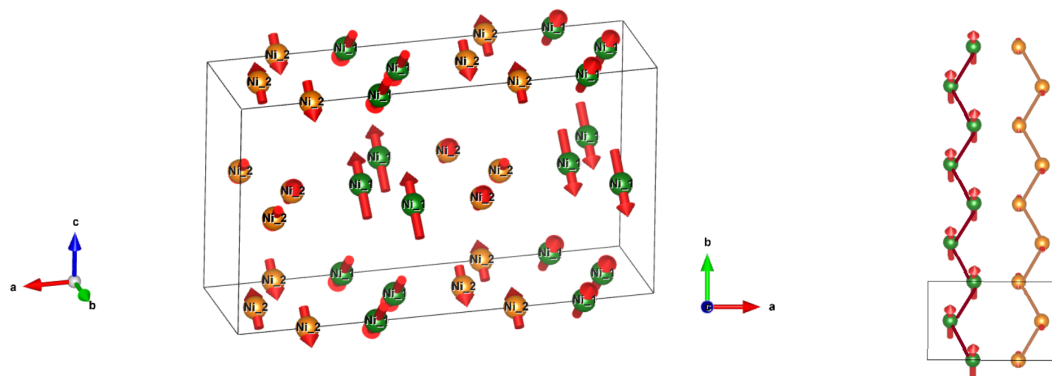


Рис. 1. Магнитная структура $\text{Li}_2\text{Ni}_2\text{TeO}_6$ полученного из $\text{Na}_2\text{Ni}_2\text{TeO}_6$

Оба образца, вне зависимости от используемого прекурсора кристаллизуются в ромбическую пространственную группу Rmca . В направлении оси с происходит чередование немагнитных слоев, содержащих ионы Li^+ с магнитными, которые состоят из ионов Ni^{2+} и Te^{6+} , находящихся в октаэдрической координации с ионами кислорода. Особенностью магнитных слоев является сотообразное расположение ионов никеля, окруженных шестью ионами теллура. Такая кристаллическая упаковка может стать причиной возникновения дальнего магнитного порядка при низких температурах. У образца, полученного из $\text{Na}_2\text{Ni}_2\text{TeO}_6$ была обнаружена примесная фаза (16 вес. %) того же стехиометрического состава, имеющая моноклинные искажения и кристаллизующаяся в пространственную группу $\text{C2}/m$.

Для уточнения магнитной структуры был использован подход Шубниковских групп, проведенный с использованием сервиса MaxMagn на сайте Bilbao Crystallographic Server.

Спиновая структура $\text{Li}_2\text{Ni}_2\text{TeO}_6$ полученного из $\text{Na}_2\text{Ni}_2\text{TeO}_6$ соответствует магнитной группе P_6bcn и представляет собой две магнитные подрешетки, одна из которых характеризуется ферромагнитным характером распределение спинов, а вторая антиферромагнитным. Суммарный магнитный момент составил: $2.54(4) \mu_B(\text{Ni})$.

Магнитная структура $\text{Li}_2\text{Ni}_2\text{TeO}_6$ полученного из $\text{K}_2\text{Ni}_2\text{TeO}_6$ соответствует пространственной группе P_6nma и также представляет собой две подрешетки с похожим строением, как и у предыдущего образца: одна характеризуется антиферромагнитным распределением спинов, а вторая ферромагнитным. Суммарный магнитный момент составил: $\mu = 1.11(1) \mu_B(\text{Ni})$.

В результате полнопрофильного анализа были уточнены магнитные структуры обоих образцов, а также вычислены величины и направление магнитных моментов на ионах никеля. Установлен сотообразный порядок спинового распределения с двумя подрешетками, который дает представление о магнитных взаимодействиях в исследуемых соединениях.

1. Evstigneeva M.A., Nalbandyan V.B., Petrenko A.A. et al. // Chem. Mater. 2011. V. 23. P. 1174.
2. Pu Y., Liu Y., Liu D. et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2018. V. 43, P. 17271.
3. Kadari R., Velchuri R., Sreenu K et al. // Mater. Res. Express. 2016. V. 3. P. 115902.

Секция 3.

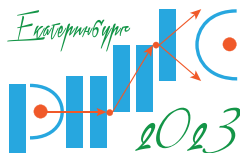
Магнетизм.

Нейтронная спектроскопия в физике магнитных явлений

**НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В НИЗКОСИММЕТРИЧНЫХ СИСТЕМАХ***Е. С. Клементьев^{1*}, П. А. Алексеев^{2,3}*¹БФУ им. И. Канта, Калининград, Россия²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия³НИЯУ МИФИ, Москва, Россия* E-mail: EKlementev@kantiana.ru

В работе получены истинные параметры кристаллического электрического поля (КЭП) для нескольких систем с орторомбической кристаллической решеткой и орторомбической точечной симметрией с группой C_{2v} в позиции редкоземельных ионов. Потенциал КЭП играет ключевую роль в формировании основного состояния и физических свойств в соединениях редкоземельных элементов с не полностью заполненными 4f электронными оболочками и хорошо локализованными магнитными моментами. Для высоких симметрий проблема определения истинных параметров КЭП не является сложной, в то время как для низкосимметричных систем, в частности, для случая орторомбической локальной симметрии, эта задача не может быть решена на основе измерений макроскопических свойств и требует детального анализа спектроскопических данных высокого качества. Были изучены интерметаллиды на основе ионов Nd как основного элемента, а также как примесной парамагнитной метки в подрешетке Ce и La в интерметаллидах с ионами Cu, Ni, Fe и Al. Ключевую роль в решении задачи играла экспериментальная информация, полученная методом неупругого рассеяния нейтронов (НРН) на времяпролетных (TOF) и на трехосных (TAS) нейтронных спектрометрах при переданной нейтроном энергии в несколько десятков мэВ в широком температурном диапазоне.

Для ионов Nd^{3+} с полным угловым моментом $J=9/2$ потенциал КЭП расщепляет основной 4f мультиплет на 5 крамерсовских дублетов. В TOF и TAS нейтронных спектрах наблюдались как переходы с основного состояния, так и переходы между возбужденными уровнями. Обсуждается объем экспериментальной информации (положения энергетических уровней и интенсивности переходов между ними, а также анизотропия переходов в зависимости от взаимной ориентации переданного нейтронами импульса Q и главными кристаллографическими осями), которые можно извлечь из TOF и TAS спектров НРН при использовании ионов Nd^{3+} в сопоставлении с 9 независимыми параметрами КЭП в рамках наиболее общего феноменологического подхода. Обсуждаются преимущества Nd^{3+} по сравнению с прочими крамерсовскими и некрамерсовскими 4f ионами для увеличения объема и качества экспериментальной информации о потенциале КЭП, получаемого методикой НРН. Задача определения параметров КЭП была решена методом глобального поиска на основе данных НРН без каких-либо модельных предположений о потенциале КЭП. Использовалась модифицированная параметризация, позволившая сократить время глобального поиска. Полученная информация играет важную роль для количественного понимания эффектов, связанных с необычными магнитными состояниями и с проявлением сильных электронных корреляций в исследованных интерметаллических системах.



КИТАЕВСКОЕ ВЗАМОДЕЙСТВИЕ В ЦЕПОЧКАХ КОБАЛЬТА В ПИРОКСЕНЕ $\text{SrCoGe}_2\text{O}_6$

П. А. Максимов^{1,2}, А. В. Ушаков², А. Ф. Губкин², Г. Редхаммер³, А. И. Колесников⁴,
А. Сантос⁴, Ч. Гай⁴, М. А. Макгуайр⁴, А. Подлесняк⁴, С. В. Стрельцов^{2,5}

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна МО, Россия

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

³Университет Зальцбурга, Зальцбург, Австрия

⁴Национальная лаборатория Окридж, Теннесси, США

⁵Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

*E-mail: maksimov@theor.jinr.ru

Соединения кобальта недавно привлекли внимание как платформа для китаевской спиновой жидкости. В данной работе мы рассматриваем магнитные взаимодействия в цепочках ионов кобальта в пироксене $\text{SrCoGe}_2\text{O}_6$. Используя комбинацию нейтронных методов и численного анализа, мы предлагаем обменную модель для $\text{SrCoGe}_2\text{O}_6$, которая является одномерным аналогом модели Китаева на решетке "пчелиные соты". Расчет спин-волнового спектра и расчеты DFT показывают, что межцепочечное взаимодействие играет важную роль, но при этом взаимодействие Китаева достаточно сильно внутри цепочек.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки (тема «Поток» № 122021000031-8). Авторы благодарны российскому научному фонду за поддержку (проект РНФ 23-12-00159).

НЕОБЫЧНЫЙ МАГНЕТИЗМ В РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЯХ С СИЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ КОРРЕЛЯЦИЯМИ

П. С. Савченков^{1*}, П. А. Алексеев¹

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

*E-mail: savch92@gmail.com

Для редкоземельных соединений характерно наличие дальнего магнитного порядка, обусловленного взаимодействием периодически расположенных в кристаллической решетке локальных магнитных моментов редкоземельных ионов, обусловленных f-электронами. В докладе рассматриваются возможности формирования упорядоченного состояния в тех случаях, когда не приходится говорить о локальном моменте f-оболочки в таком традиционном смысле.

Подобный случай реализуется в системах с синглетным основным состоянием редкоземельного иона. В таких системах при определённом соотношении между дипольным матричным элементом, связывающим синглет с вышележащим состоянием, и величиной межионного взаимодействия на каждом узле кристаллической решётки может сформироваться наведённый магнитный момент и произойти одновременное упорядочение таких моментов. Подобное явление, называемое «наведённым» магнетизмом, рассмотрено в работе на примере интерметаллида PrNi. Приводятся некоторые результаты экспериментальных исследований наведённого магнетизма в PrNi и систем на его основе. Прежде всего, анализируется информация, которая может быть извлечена из спектров магнитного неупругого рассеяния нейтронов, обсуждаются развитые теоретические и модельные представления.

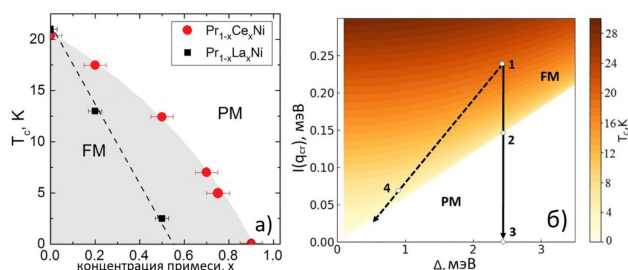


Рис. 1. а) Зависимость температуры магнитного упорядочения (T_c) от концентрации примеси x в системах $\text{Pr}_{1-x}\text{La}_x\text{Ni}$ (черные квадраты) и $\text{Pr}_{1-x}\text{Ce}_x\text{Ni}$ (красные кружки) [2]. Серым цветом обозначена область ферромагнитного состояния системы $\text{Pr}_{1-x}\text{Ce}_x\text{Ni}$, которая значительно больше, чем в случае $\text{Pr}_{1-x}\text{La}_x\text{Ni}$ б) Диаграмма магнитных состояний систем на основе PrNi [2]. Представлена взаимосвязь между T_c , параметром 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. $\text{Pr}_{0.25}\text{Ce}_{0.75}\text{Ni}$

Особое внимание уделено объяснению влияния 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 (см. Рис.1).

Еще одним типом «необычного» магнетизма, рассмотренным в докладе, является наблюдаемое в ряде интерметаллических соединений Eu, на первый взгляд, аномальное сосуществование магнитного порядка и быстрых спиновых флуктуаций, обусловленных промежуточно-валентным состоянием редкоземельного иона (см Рис.2). Представлены результаты экспериментов по изучению влияния высоких гидростатических давлений (до 15 ГПа) на дальний магнитный порядок в EuCu_2Si_2 и приводятся свидетельства однородности промежуточно-валентного состояния Eu в $\text{EuCu}_2(\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x})_2$ [3]. Опираясь на комплексный анализ результатов совокупности нейтронных экспериментов [4] и расчёты в рамках теории наведённого магнетизма, для $\text{EuCu}_2(\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x})_2$ предлагается реалистичное описание механизмов формирования упорядоченного антиферромагнитного состояния на фоне однородной промежуточной валентности.

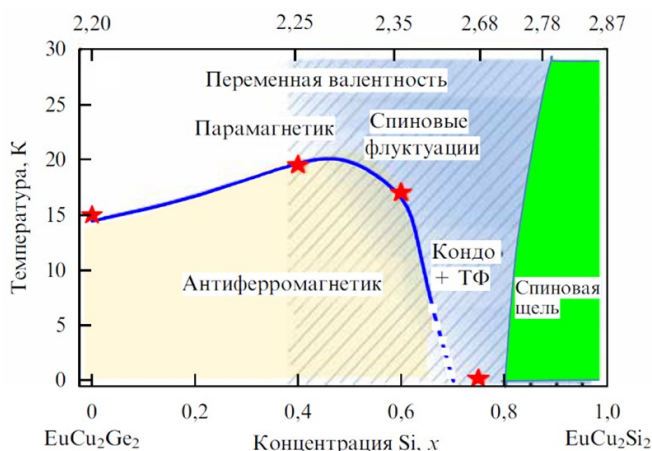


Рис. 2. Магнитная фазовая диаграмма $\text{EuCu}_2(\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x})_2$. Звезды соответствуют значения T_N , полученным из экспериментов по дифракции нейтронов, сплошная линия, соответствует фазовой границе между АФМ и парамагнитным состоянием. Область синего цвета соответствует спин-флуктуационному режиму, область зеленого цвета — режиму спиновой щели. Штриховкой обозначена область с экспериментально обнаруженными спиновыми флуктуациями — наблюдается квазиупругий сигнал в нейтронном спектре. На верхней шкале отмечены значения валентности Eu

1. Savchenkov, P. S., Clementyev, E. S., Alekseev, P. A., & Lazukov, V. N. (2019). Induced magnetism and "magnetic hole" in singlet ground state system PrNi. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 489, 165413.
2. Savchenkov, P. S., Clementyev, E. S., Lazukov, & V. N., Alekseev, P. A. (2020). Dramatic impact of intermediate-valence impurity on induced magnetism in singlet ground state system PrNi. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 514, 167187.
3. Savchenkov, P. S., Sidorov, V. A., Guo, J., Sun, L., & Alekseev, P. A. (2021). Evidence of Homogeneous Intermediate Valence Coexisting with the Long-Range Magnetic Order in $\text{EuCu}_2(\text{Si}, \text{Ge})_2$. *JETP Letters*, 114, 528-535.
4. Savchenkov, P. S., Alekseev, P. A., Podlesnyak, A., Kolesnikov, A. I., & Nemkovski, K. S. (2018). Intermediate-valence state of the Sm and Eu in SmB_6 and EuCu_2Si_2 : neutron spectroscopy data and analysis. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 30(5), 055801.

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ШИРИНУ СПИН-ОРИЕНТАЦИОННОГО ПЕРЕХОДА В РЕДКОЗЕМЕЛЬНОМ ОРТОФЕРРИТЕ YbFeO_3

С. А. Скоробогатов^{1,2*}, L. S. Wu³, T. Xie³, К. А. Шайхутдинов^{1,2}, Е. В. Помякушина⁴,
А. А. Подлесняк⁵, С. Е. Никитин⁴

¹Институт физики им. Л.В. Киренского, СО РАН, Красноярск 660036, Россия

²Сибирский Федеральный Университет, Красноярск 660041, Россия

³Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

⁴Paul Scherrer Institute (PSI), CH-5232 Villigen, Switzerland

⁵Oak Ridge National Laboratory, Tennessee 37831, USA

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

Редкоземельные ортоферриты с общей формулой RFeO_3 изучаются уже более 70 лет и за это время было обнаружено множество интересных и уникальных эффектов таких как: спонтанный спин-ориентационный переход [1], сверхбыстрое перемагничивание доменных стенок, индуцированное лазерным импульсом [2], анизотропная эволюция магнитной энтропии [3] возникновение солитонных решеток [4], формирование квази-одномерные структуры [5]. 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. Сегодня принято считать, что уникальные свойства, наблюдаемые в данных соединениях обусловлены взаимодействием 3d и 4f электронов, и именно построение макроскопической модели данного взаимодействия одно из приоритетных направлений данной области исследований.

В этой работе мы пытались решить данную проблему, изучая влияние давления на спиновую динамику редкоземельной подсистемы соединения YbFeO_3 . Монокристалл, использованный в работе, был получен методом оптической зонной плавки по своей структуре относится к перовскитам. Особенность данного исследования стало использование ячейки давления позволяющей получить величины до 2 ГПа на образец и магнитного поля до 6 Т. Измерения проводились с применением спектрометра CNCS (Cold Neutron Chopper Spectrometer) имеющим диапазон энергий нейтронов ($E_i = 3.3$ мэВ и 12 мэВ), размещенной в Oak Ridge National Laboratory.

Результаты исследования показали, что температура спин ориентационного перехода не изменилась при приложении давления 2 ГПа. Однако, наблюдается уменьшение ширины спин-ориентационного перехода, относительно перехода, полученного без давления, при прочих равных условиях. Этот факт потребовал расширить уравнение для свободной энергии включив в него дополнительный член разложения анизотропии четвертого порядка (K_4). Расчет на основе экспериментальных данных показал кратное изменения ширины перехода от константы анизотропии K_4 .

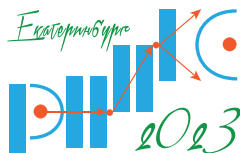
1. R.L. White, J. Appl. Phys. **40**, 1061 (1969).

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**, 694 (2012).

5. S.E. Nikitin et al., Phys. Rev. B **98**, 064424 (2018)



ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПОЛЯ В РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ОРТОФЕРРИТАХ $RFeO_3$ ($R = Ho, Tb, Tm$)

*И. А. Зобкало, А. К. Овсяников, О. В. Усманов**

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

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

По рентгеноструктурным данным соединений $RFeO_3$ ($R = Ho, Tb, Tm$) для соответствующих редкоземельных ионов R^{3+} численным расчетом получены наборы параметров кристаллического электрического поля (КЭП) в рамках модели точечных зарядов в диапазоне температур 4 – 300 К [1-3]. Рассмотрены оптимальные алгоритмы расчета параметров КЭП в программной среде PyCrystalField [4, 5]. На основе значений полученных наборов параметров рассчитано расщепление энергетических уровней мультиплета основного состояния рассматриваемых R^{3+} , получены температурные зависимости спектров расщепления, построены кривые изотермической намагниченности $M(H)$. Выполнено сравнение макроскопической намагниченности, полученной из набора параметров КЭП с данными измерений [6, 7].

1. K. W. H. Stevens, Proc. Phys. Soc. A 65, 209 (1952).
2. M. T. Hutchings, Point-charge calculations of energy levels of magnetic ions in crystalline electric fields, in Solid State Physics, 16, Academic, (1964).
3. M. Rotter, J. Magn. Magn. Mater., E481, 272-276 (2004).
4. A. Scheie, J. Appl. Cryst., 54, 356-362 (2021).
5. M. Shao et al., Solid State Commun., 152, 947 (2012).
6. A. Ovsianikov et al., J. Magn. Magn. Mater., 557, 169431 (2022).

Секция 3.
Магнетизм.
Поляризованные нейтроны

СИММЕТРИЧНЫЕ И АНТИСИММЕТРИЧНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МУЛЬТИФЕРРОИКАХ-МАНГАНИТАХ

И. А. Зобкало

НИЦ КИ — ПИЯФ, Гатчина, Россия

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

Магнитные взаимодействия в орторомбических редкоземельных марганцевых оксидах RMnO_3 и RMn_2O_5 привлекают большой интерес с точки зрения их связи с электрическими системами этих семейств. Электрическая поляризация и в RMn_2O_5 и в RMnO_3 возникает вследствие упорядочения магнитных ионов марганца, имеет один и тот же порядок величины, что позволяет сделать предположение о сходстве механизмов, обеспечивающих это явление. Однако, если в RMnO_3 ионы Mn^{3+} , находящиеся в октаэдрическом окружении кислорода, образуют единственную марганцевую магнитную систему, то в RMn_2O_5 существуют две марганцевые системы, образованные ионами Mn^{3+} , находящимися вблизи основания кислородной пирамиды, а также ионами Mn^{4+} , окруженными кислородными октаэдрами.

Одним из следствий такой разницы является различие в предлагаемых микроскопических механизмах мультиферроичности в RMnO_3 и RMn_2O_5 . В качестве магнитного механизма, обеспечивающего возникновение сегнетоэлектрической поляризации в орторомбических манганитах RMnO_3 рассматривается смещения атомов вследствие минимизации энергии взаимодействия Дзялошинского-Мория (ДМ) – антисимметричная стрикция [1]. Для объяснения магнитоэлектрических взаимодействий в RMn_2O_5 чаще используется модель симметричной обменной стрикции [1], что связано с почти коллинеарным магнитным порядком. В обоих случаях эти теоретические подходы рассматривают только магнитную структуру на марганце.

В целях экспериментального уточнения применимости той или иной модели для описания механизмов мультиферроичности в этих соединениях, на монокристаллах RMn_2O_5 ($R = \text{Eu}, \text{Tb}, \text{Nd}$) [3 - 6], RMnO_3 ($R = \text{Dy}, \text{Ho}$) [6, 7] были выполнены исследования с использованием дифракции поляризованных нейтронов. Полученные результаты для всех измеренных кристаллов RMn_2O_5 ($R = \text{Eu}, \text{Tb}, \text{Nd}$) [2 - 5] свидетельствуют о наличии в этих системах кирального вклада в магнитное рассеяние. антисимметричного взаимодействия. Так, измерения интенсивности рассеянных нейтронов для двух направлений поляризации падающих на кристалл нейтронов, сделанные на TbMn_2O_5 , показывают наличие кирального рассеяния в трех магнитоупорядоченных фазах [3] (Рис. 1). Киральное рассеяние наблюдалось также для соединений EuMn_2O_5 [2], NdMn_2O_5 [4], $\text{Nd}_{0.8}\text{Tb}_{0.2}\text{Mn}_2\text{O}_5$ [5]. Причем, этот тип рассеяния отсутствовал при тех температурах, где отсутствует сегнетоэлектрическая поляризация. О связи антисимметричного ДМ взаимодействия с электричеством свидетельствует также и тот факт, что в процессе исследований удавалось изменять заселенность киральных доменов, прикладывая внешнее электрическое поле [3 - 5].

В соединении DyMnO_3 электрическая поляризация возникает при температуре перехода в циклоидальную киральную структуру и плавно возрастает при дальнейшем понижении температуры. Однако при упорядочении Dy^{3+} в структуру с волновым вектором, отличным от волнового вектора магнитной системы ионов Mn^{3+} наблюдалось снижение электрической поляризации [9], что также подтверждается нашей работой

[6]. В то же время, для соединений с частичным замещением Dy на Ho такого эффекта не наблюдалось [10]. Наши исследования позволяют сделать предположение, что рост поляризации в DyMnO_3 обусловлен влиянием редкоземельной магнитной системы. Упорядочение ее при столь высоких температурах индуцируется магнитным порядком на марганце с соответствующим вектором распространения. Такая ситуация способствует обменно-стрикционному (симметричному) механизму генерации электрической поляризации. При спонтанном упорядочении редкоземельной системы с другим волновым вектором этот механизм выключается. Измерения на замещенном манганите $\text{Dy}_{0.8}\text{Ho}_{0.2}\text{MnO}_3$ показывают, что в этом соединении спонтанное упорядочение редкоземельной подсистемы происходит с тем же волновым вектором, что и у марганцевой. Таким образом, когерентное пространственное распространение двух магнитных систем приводит к усилению поляризации.

Проведенный нами цикл исследований RMnO_3 и RMn_2O_5 позволяет сделать обобщенные выводы о том, что в этих соединениях задействованы оба магнитных механизма, генерирующие сегнетоэлектрическую поляризацию: как симметричная, так и антисимметричная стрикция.

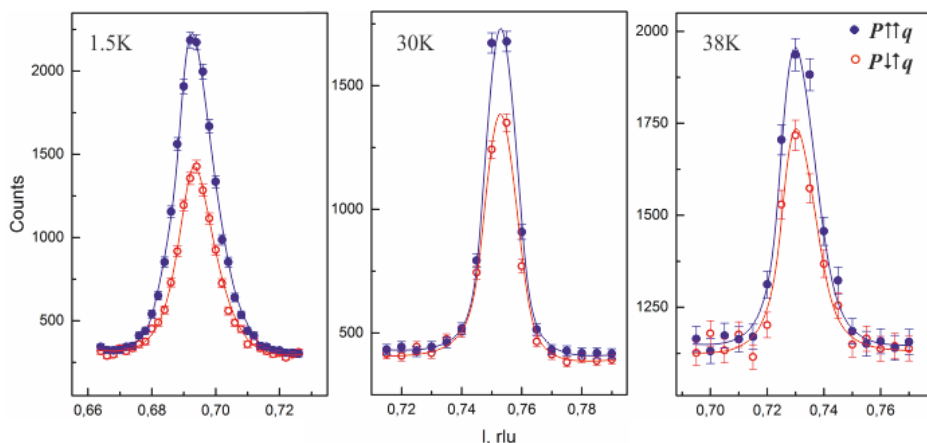


Рис. 1. Интенсивность магнитного сателлита $(0\ 0\ 1)^+$ в TbMn_2O_5 , измеренная при температурах, соответствующих различным магнитным фазам [3]. Разница в интенсивности для $\mathbf{P} \uparrow \uparrow \mathbf{q}$ и $\mathbf{P} \downarrow \uparrow \mathbf{q}$ соответствует разнице в заселенности киральных доменов [8]

1. I.A. Sergienko and E. Dagotto, Phys. Rev. B 73, 094434 (2006).
2. И.А. Зобкало, В.А. Поляков, О.П. Смирнов, С.В. Гаврилов, В.П. Плахтий, И.В. Голосовский, С.Н. Шарыгин, ФТТ 38, 1307 (1996).
3. I.A. Zobkalo, S.V. Gavrilov, A. Sazonov and V. Hutanu, J. Phys.: Condens. Matter 30, 205804 (2018).
4. I. A. Zobkalo, A. N. Matveeva, A. Sazonov, S. N. Barilo, S. V. Shiryayev, B. Pedersen, and V. Hutanu, Phys. Rev. B 101, 064425 (2020).
5. I. Zobkalo, S. Gavrilov, A. Matveeva, A. Sazonov, S. Barilo, S. Shiryayev and V. Hutanu, IEEE Transactions on Magnetics 58, 1 (2022)
6. A.N. Matveeva, I.A. Zobkalo, M. Meven, A.L. Freidman, S.V. Semenov, K. Yu. Terentjev, N.S. Pavlovskiy, M.I. Kolkov, K.A. Shaykhutdinov and V. Hutanu, J. Magn. Magn. Mat. 569, 170415 (2023).
7. A.N. Matveeva, I.A. Zobkalo, A. Sazonov, A.L. Freidman, S.V. Semenov, M.I. Kolkov, K. Yu. K. Terentjev, N.S. Pavlovskiy, K.A. Shaykhutdinov and V. Hutanu, Physica B 658, 414821 (2023).
8. Ю.А. Изюмов, Р.П. Озеров, Магнитная нейтронография, Наука, Москва, (1966).
9. O. Prokhnenko, R. Feyerherm, E. Dudzik, S. Landsgesell, N. Aliouane, L. C. Chapon, and D. N. Argyriou, Phys. Rev. Lett. 98, 057206 (2007).
10. N. Zhang, S. Dong, Z. Fu, Z. Yan, F. Chang & J. Liu, Sci. Rep. 4, 6506 (2014).

ДИСПЕРСИОННОЕ СООТНОШЕНИЕ В АМОРФНЫХ ФЕРРОМАГНЕТИКАХ

С. В. Григорьев^{1,2}, Л. А. Азарова^{1,2*}, К. А. Пшеничный¹ и О. И. Утесов^{1,2}

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

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт Петербург, Россия

*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 довольно сложными. Наличие структурного, а также магнитного беспорядка играет важную роль в аморфных системах. Однако понимание процесса формирования и роста спиновых кластеров в аморфных системах является сложной задачей. Свойства спиновых кластеров в аморфной системе под воздействием внешнего магнитного поля зависят от их морфологии. Следовательно, 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.

Дисперсия спиновых волн в аморфном ферромагнитном сплаве $\text{Fe}_{48}\text{Ni}_{34}\text{P}_{18}$ может быть описана в рамках модели ферромагнетика со случайной анизотропией: $\epsilon(q) = Aq^2 + g\mu_B H + \delta\omega(q)$ где $\delta\omega(q)$ - линейная по $|q|$ добавка [1-3]. Мы используем метод малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов, чтобы доказать значимость добавочного члена $\delta\omega(q)$ в дисперсии. Измерения проводились при различных значениях внешнего магнитного поля H и длины волны нейтронов λ . Карта рассеяния нейтронов представляет собой окружность определенного радиуса с центром в точке $q = 0$. Жесткость спиновых волн A извлекается непосредственно из λ -зависимости радиуса этой окружности. спин-волновая жесткость A аморфного сплава слабо уменьшается от 140 до 110 мЭВ $\text{\AA}^2$ с ростом температуры в диапазоне от 50 до 300 К. Полевая зависимость радиуса демонстрирует наличие добавки $\delta\omega(q)$ в виде энергетической щели, которая практически не зависит от поля и температуры. Величина добавки равна $0.015 \div 0.002$ мЭВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2022-830 от 27 мая 2022 г. (продолжение Соглашения №.075-15-2021-1358 от 12 октября 2021г). Вклад в работу Утесова О.И. выполнен при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-22-00028).

1. Игнатченко В. А., Исаков Р. С. Спиновые волны в случайно-неоднородной анизотропной среде // ЖЭТФ. 1977. Т.72.
2. Исаков Р. С. и др. Размерность системы Обменно-связанных зерен и магнитные свойства нанокристаллических и аморфных ферромагнетиков // Письма в ЖЭТФ. 2000. Т.72. №. 6. С. 440-444.
3. Исаков Р. С. и др. Изучение магнитных корреляций в наноструктурных ферромагнетиках методом корреляционной магнитометрии // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т.78. №. 10. С. 1142-1146.

**СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОПОРОШКОВ ОКСИДОВ
ЖЕЛЕЗА γ -Fe₂O₃ и Fe₃O₄, СИНТЕЗИРОВАННЫХ МЕТОДАМИ
«МЯГКОЙ» ХИМИИ**

Т. В. Хамова¹, А. М. Николаев¹, А. С. Коваленко¹, Г. П. Копица^{1,2}, Н. В. Цвигун³,
К. В. Фролов³, Ю. Е. Горшкова⁴, О. В. Геращенко², А. Е. Баранчиков⁵, 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

⁴Лаборатория Нейтронной Физики им. И.М. Франка, Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия

⁵Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия

* E-mail: kopitsa_gp@npni.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, гидро-термальный метод, микродуговой плазменный метод, а также золь-гель метод. Каждый из перечисленных методов имеет свои достоинства и недостатки. К достоинствам химического осаждения и 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 намагнитченности, мессбауэровской спектроскопии, МУРР и МУРПН было проведено исследование структурных и магнитных свойств нанопорошков оксидов железа (магнетита и маггемита), полученных методами: химического осаждения из растворов хлоридов железа FeCl₂ и FeCl₃ при комнатной температуре с последующей сушкой при 100⁰С в течение 24 ч; и золь-гель синтеза из растворов этиленгликоля (C₂H₄(OH)₂) и нитрата железа (Fe(NO₃)₃ · 9H₂O) с последующей термообработкой в течение 2 часов при 300⁰С в вакууме (Fe₃O₄) или на воздухе (γ -Fe₂O₃).

Из анализа экспериментальных сечений $d\Sigma(q)/d\Omega$ малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов получен вид ядерного и магнитного корреляторов, а также магнитно-ядерного кросс-коррелятора, определены характерные радиусы ядерных R_n , магнитных R_m и магнитно-ядерных корреляций R_{mn} . Проведено сравнение данных МУРПН с результатами, полученными методами: РФА, СЭМ, низкотемпературной адсорбции азота, МУРР, мессбауэровской спектроскопии и индукционного измерения намагнитченности.

ОРИЕНТАЦИЯ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ Dy и Co В СВЕРХРЕШЁТКАХ Dy/Co

М. В. Макарова^{1*}, Н. О. Антропов¹, В. В. Проглядо¹, Е. А. Кравцов^{1,2}, Ю. Н. Хайдуков³

¹Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

³Институт физики твердого тела общества Макса Планка, Штутгарт, Германия

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

Многослойные наноструктуры на основе ферромагнетиков являются перспективными материалами для магнитооптической записи и хранения информации [1]. Недавно возобновился интерес к сверхрешёткам переходный металл/редкоземельный металл (ПМ/РЗМ), так как появилась возможность переключения намагниченности системы без внешнего магнитного поля с помощью фемтосекундного пульсирующего лазера [2-4]. Важными условиями данного переключения являются перпендикулярная магнитная анизотропия (ПМА), точка компенсации и антиферромагнитное взаимодействие. Подходящей системой является сверхрешетка Dy/Co [5].

Ранее нами установлено, что сверхрешетки с тонкими слоями Dy, Co представляют собой композиционно-модулированный сплав, в котором, с одной стороны, выдерживается строгая периодичность в толщинах и композиции слоев, а с другой стороны, интердиффузия Co и Dy на межслойных границах приводит к периодическому изменению с глубиной концентрации Co и Dy [6, 7].

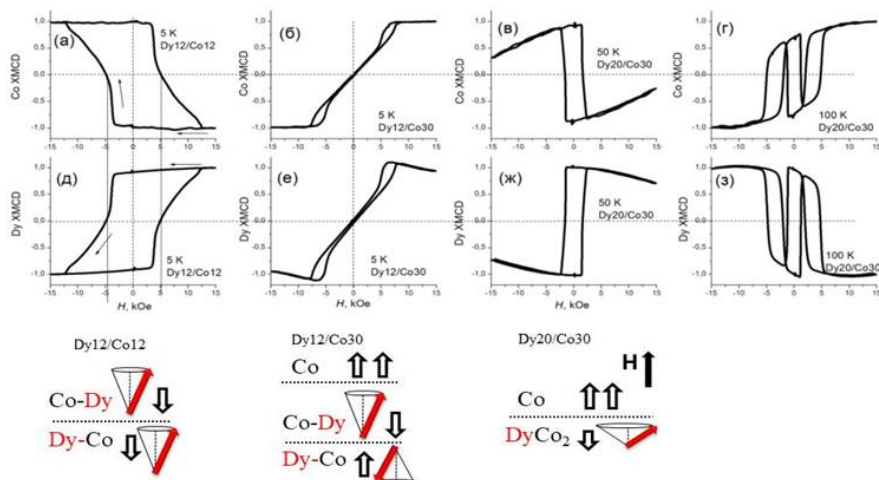


Рис. 1. Верхний ряд: Co (а-г) и нижний: Dy (д-з) XMCD петли гистерезиса для образцов Dy12/Co12 (а, д), Dy12/Co30 (б, е) при 5 К и Dy20/Co30 (в, г, ж, з) при 50 К и 100 К, измеренные в магнитном поле $H = \pm 15$ кЭ при фиксированных значениях энергий на краях поглощения Co L_3 и Dy M_5 . Схематичное изображение магнитных моментов Dy и Co, внешнее магнитное поле приложено перпендикулярно плоскости образца.

Мы провели всестороннее экспериментальное исследование системы Dy/Co с использованием чрезвычайно мощных взаимодополняющих методов (рентгеновский магнитный круговой дихроизм и рефлектометрия поляризованных нейтронов). Измеренные образцы демонстрируют разное магнитное поведение (Рис. 1).

Показали, что жесткая антиферромагнитная обменная связь между ферромагнетиками Dy и Co и ее конкуренция с внутрислойной обменной энергией и зеемановской энергией приводят к значительной неоднородности системы. Изменяя толщины слоёв и температуры можно устанавливать как перпендикулярную магнитную анизотропию, так и неколлинеарное магнитное упорядочение, что может позволить разработать новое поколение устройств.

Синтез образцов выполнен в Центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема "Спин" № АААА-А18-118020290104-2). Эксперименты по рефлектометрии поляризованных нейтронов и анализ экспериментальных нейтронографических данных выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения №075-15-2022-830 от 27 мая 2022 г. (продолжение Соглашения № 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021 г.).

1. B. Tudu, A. Tiwari, Vacuum 146, 329-341 (2017).
2. S. Mangin, M. Gottwald, C.-H. Lambert, D. Steil, Nature Materials 13, 286 (2014).
3. C. Schubert, A. Hassdenteufel, P. Matthes, J. Schmidt, M. Helm, R. Bratschitsch, and M. Albrecht, Appl. Phys. Lett. 104, 082406 (2014).
4. J. Becker, A. Tsukamoto, A. Kirilyuk, J. C. Maan, T. Rasing, P. C. M. Christianen, and A. V. Kimel, Phys. Rev. Lett. 118, 117203 (2017).
5. T. Ferté, G. Malinowski, E. Terrier, V. Halté, L. Le Guyader, K. Holldack, M. Hehn, C. Boeglin, N. Bergeard, JMMM 530, 167883 (2021).
6. I.A. Subbotin, E.M. Pashaev, A.L. Vasiliev, Yu.M. Chesnokov, G.V. Prutskov, E.A. Kravtsov, M.V. Makarova, V.V. Proglyado, V.V. Ustinov, Physica B. 573, 28. (2019).
7. М.В. Макарова, Е.А. Кравцов, В.В. Проглядо, Ю.Н. Хайдуков, В.В. Устинов, ФТТ 9, 1499 (2020).

ИЗУЧЕНИЕ СЛАБОМАГНИТНЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ В МАЛОУГЛОВОМ РАССЕЯНИИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ

В. В. Рунов

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

E-mail: runov_vv@pnpi.nrcki.ru

Устный доклад

Дан обзор работ по малоугловому рассеянию поляризованных нейтронов [1-6], характерной особенностью которых является измерение и анализ магнитно-ядерного интерференционного рассеяния (МЯ), т.е. произведение ядерной (A) и магнитной (B) амплитуд рассеяния, (AB). Цель обзора - показать высокую эффективность и чувствительность метода при решении определенных задач, которая основана на возможности изучать магнитно-ядерное контрастирующее рассеяние (МЯ) на фоне общего, существенно более сильного, магнитного или ядерного, или того и другого. В эксперименте интерференционное рассеяние $\Delta(q)$ измеряют как разность в интенсивности рассеяния с поляризацией нейтронов по/против поля, прикладываемого к образцу, т.е. $\Delta(q) = I^+(q) - I^-(q) \approx P(AB)$, где P – поляризация прошедших образцов нейтронов. Наблюдение МЯ интерференционного рассеяния однозначно свидетельствует о наличии в изучаемом материале намагниченных областей характерного масштаба.

В работе [1] при изучении магнитных неоднородностей в сверхпроводящей керамике впервые были получены и объяснены характерные картинки, («факсимиле» - интерференции магнитного рассеяния с прямым и рассеянными пучками, Рисунок 1, в слабых (~ 100 Э) полях, показаны характерные масштабы МЯ корреляций и высокая чувствительность метода к слабым (~ 10 Э) полям.

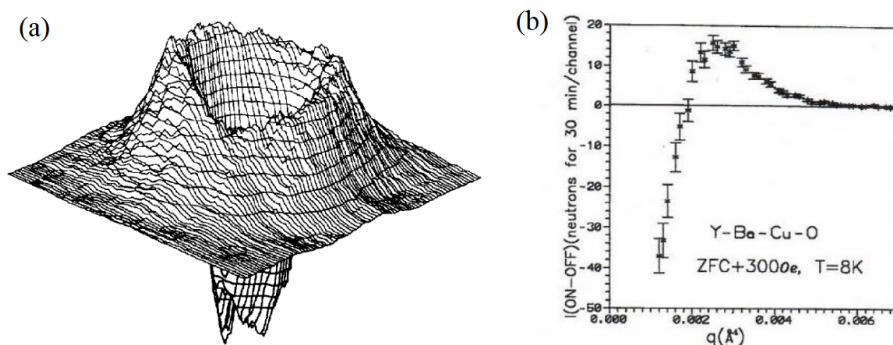


Рис. 1. а) 3-d и b) 2-d изображения МЯ ($\Delta(q)$) рассеяния в YBaCuO керамике ($H = 300$ Э, $T = 8$ К) [1]

В работах [2-5] изучались спиновые корреляции и магнитные фазы (масштаб и параметры) в материалах с примесью магнитных элементов.

В работе [2] изучались магнитные корреляции в немагнитных матрицах, обусловленные примесью d металла (CuZn(20) с 1 % примесью Ni). В работе [3] изучалась эволюция магнитно-ядерной контрастирующей фракции в магнитном сплаве P91 в про-

цессе термообработки (закалка и отжиг). В работе [4] была обнаружена слабомагнитная фаза Fe_3P в LFePO_4 материале при определенной термической обработке. В работе [5] приведены экспериментальные результаты исследования мезоструктуры сегментного полиуретанимида, содержащего 4–10 мас. % наночастиц CoFe_2O_4 или $\text{Al}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$. Цель работы заключалась в изучении трансформации доменной структуры магнитных эластомеров на основе полиуретанимида в зависимости от концентрации, химического состава и локализации наночастиц ферритов в полимерных цепях. Определены корреляционные радиусы в магнитной подсистеме наночастиц ферритов, встроенных в жесткие ароматические блоки полиуретанимида.

В работе [6], используя метод МЯ интерференции, **удалось, впервые, оценить масштаб магнитных корреляций в материалах на основе восстановленного оксида графена (ВОГ)**. Химические и спектроскопические анализы исследуемых образцов показали отсутствие в них примеси магнитных элементов. Нейтронные эксперименты показали наличие в материалах намагниченных областей масштаба $1000 \text{ \AA}$, т.е. масштаб магнитных кооперативных эффектов и, соответственно, магнитного рассеяния, которое можно оценить из анализа этих данных на уровне $\sim 10^{-3}$ от ядерного рассеяния, рисунок 2.

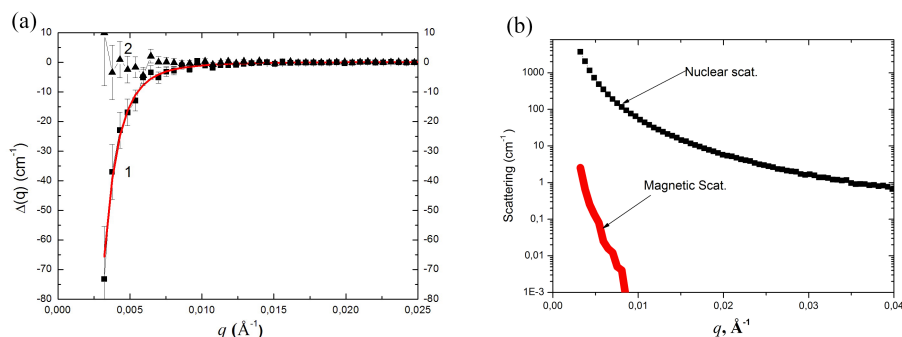


Рис. 2. а) 3-d и б) 2-d изображения МЯ (а) Импульсная зависимость интенсивности магнитно-ядерного интерференционного рассеяния в поверхностно модифицированном ТМСПМ ВОГ во внешнем магнитном поле $H = 1 \text{ Тл}$ (1) и при $H = 0$ (2). Сплошной линией показана аппроксимация экспериментальных данных с корреляционным радиусом $R_c = 640(220) \text{ \AA}$; б) ядерное и магнитное рассеяния

1. G. Gordeev, A. Okorokov, V. Runov, M. Runova, B.Toperverg, A. Brulet, R. Kahn, R. Papoular, J.Rossat-Mignod, H. Gladli, H.Eckerlebe, R. Kampmann, R.Wagner // Physika B 234-2366, 837-838 (1997).
2. Рунов В. В., Ильин Д. С., Рунова М. К., Раджабов А. К. // Письма в ЖЭТФ.. Т. 95. С. 530. (2012).
3. Рунов В. В., Скоробогатых В. Н., Рунова М. К., Сумин В. В. // ФТТ. Т. 56(1). С. 68 (2014).
4. E.Ershenko, A. Bobyl, M.Boiko, Y. Zubavichus, V.Runov, M.Trenikhin, M. Sharkov // Ionics 23, 2293-2300 (2017).
5. В. В. Рунов, А. Н. Бугров, Р. Ю. Смыслов, Г. П. Колица, М. К. Рунова, Б. В. Васильев, Е. Н. Попова, С. А. Кириллова, А. Феоктистов, В. Пипич // Журнал неорганической химии 66, 2, 1-13 (2021).
6. В. В. Рунов, А. Н. Бугров, Р.Ю. Смыслов, Г. П. Колица, Е. М. Иванькова, А. А. Павлова, А. Феоктистов // Письма в ЖЭТФ vol. 113 N. 6 pp. 385 - 389 (2021).

Секция 4.

Методы исследования вещества, комплементарные нейтронному рассеянию

РЕОРИЕНТАЦИИ АНИОНОВ И ДИФФУЗИЯ КАТИОНОВ В НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ КЛОЗО-БОРАТАХ: ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДАМИ ЯМР И КВАЗИУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ

А. В. Скрипов^{1}, О. А. Бабанова¹, Р. В. Скорюнов¹, А. В. Солонинин¹, М. S. Andersson²,
V. Stavila³, M. Dimitrievska⁴, T. J. Udovic⁴*

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

²Uppsala University, Uppsala, Sweden

³Sandia National Laboratories, Livermore, USA

⁴National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA

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

Интерес к исследованию динамических свойств клозо-боратов щелочных металлов обусловлен тем, что некоторые из этих соединений обнаруживают высокую ионную проводимость [1], что делает их перспективными твердыми электролитами для электрохимических источников тока. Как правило, высокая ионная проводимость появляется выше структурных фазовых переходов порядок - беспорядок, тогда как в упорядоченных низкотемпературных фазах ионная проводимость остается низкой. Для большинства исследованных клозо-боратов фазовые переходы порядок - беспорядок наблюдаются при температурах выше комнатной; поэтому для практического использования этих соединений в качестве твердых электролитов необходимо каким-либо образом понизить температуру фазовых переходов или же полностью подавить их. В качестве одной из возможностей подавления фазового перехода и стабилизации высокотемпературной неупорядоченной фазы мы предложили внедрение клозо-боратов в нанопористые матрицы [2]. В данной работе мы рассмотрим такой подход на примере внедрения карбозамещенного клозо-бората натрия $\text{NaCB}_{11}\text{H}_{12}$ в матрицу SBA-15 из SiO_2 с цилиндрическими пораами со средним диаметром 8 нм.

Кристаллические клозо-бораты состоят из катионов щелочных металлов и комплексных двухвалентных (таких как $[\text{B}_{12}\text{H}_{12}]^{2-}$) или одновалентных (таких как $[\text{CB}_{11}\text{H}_{12}]^-$) анионов. Особенность динамики этих соединений состоит в том, что комплексные анионы участвуют в очень быстром реориентационном (вращательном) движении, которое может быть связано и с трансляционной диффузией катионов [3]. Для исходного соединения $\text{NaCB}_{11}\text{H}_{12}$ вблизи 376 К наблюдается переход из ориентационно-упорядоченной низкотемпературной фазы в ориентационно-разупорядоченную высокотемпературную фазу, который сопровождается как резким ускорением (более, чем на два порядка величины) реориентаций анионов $[\text{CB}_{11}\text{H}_{12}]^-$, так и резким увеличением частоты диффузионных перескоков катионов Na^+ [4].

Нам удалось внедрить $\text{NaCB}_{11}\text{H}_{12}$ в цилиндрические нанопоры матрицы SBA-15 путем инфильтрации водного раствора клозо-бората с последующим удалением воды. Как показали дифракционные исследования, в условиях пространственного ограничения $\text{NaCB}_{11}\text{H}_{12}$ сохраняет базовые структурные особенности своей неупорядоченной фазы. Динамические свойства полученного наноструктурированного клозо-бората были изучены с помощью измерений параметров ядерного магнитного резонанса (ЯМР) ^1H и ^{23}Na и спектров некогерентного квазиупругого рассеяния нейтронов. Нейтронные измерения проводились в Национальном институте стандартов и технологии (NIST) в США на спектрометре обратного рассеяния HFBS с разрешением по энергии 0.8 μeV и на времяпролетном спектрометре DCS с разрешением по энергии 17 μeV и 30 μeV . Наши измерения показали, что в наноструктурированном соединении $\text{NaCB}_{11}\text{H}_{12}$ происходит полное подавление фазового перехода порядок – беспорядок, и неупорядоченная фаза

с быстрыми реориентациями анионов и высокой диффузионной подвижностью катионов сохраняется вплоть до криогенных температур. Рисунок 1 иллюстрирует данные по частотам реориентационных перескоков анионов τ^{-1} в исходном $\text{NaCB}_{11}\text{H}_{12}$, а также в этом же соединении, внедренном в SBA-15 и еще в одну нанопористую матрицу (KCC-1) на основе SiO_2 .

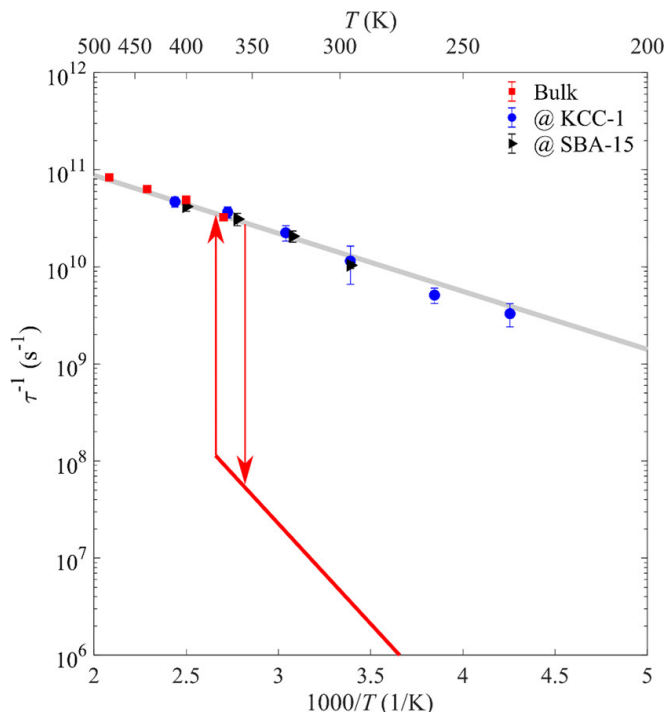


Рис. 1. Найденные из данных по квазиупругому рассеянию нейтронов частоты реориентационных перескоков анионов для исходного соединения $\text{NaCB}_{11}\text{H}_{12}$ и того же соединения, внедренного в нанопористые матрицы SBA-15 и KCC-1. Красная линия показывает частоты реориентационных перескоков анионов для исходного соединения $\text{NaCB}_{11}\text{H}_{12}$, найденные из данных ЯМР. Красными стрелками обозначены температуры фазового перехода в исходном соединении при нагреве и охлаждении

Как видно из рисунка, для обоих наноструктурированных образцов выше 380 K частоты перескоков τ^{-1} почти совпадают с данными для исходного $\text{NaCB}_{11}\text{H}_{12}$, но обусловленный фазовым переходом скачок в τ^{-1} для наноструктурированных образцов отсутствует. Следует отметить, что измерения параметров ЯМР позволяют зондировать более широкий диапазон частот реориентационных перескоков, чем измерения спектров квазиупругого рассеяния нейтронов. В частности, данные ЯМР дают информацию о частотах, существенно меньших, чем 10^9 c^{-1} .

Данная работа поддержана грантом Российского научного фонда № 23-23-00028.

1. T.J. Udovic, M. Matsuo, A. Unemoto, N. Verdal, V. Stavila, A.V. Skripov, J.J. Rush, H. Takamuro, S. Orimo, Chem. Commun. 50, 3750 (2014).
2. M.S. Andersson, V. Stavila, A.V. Skripov, M. Dimitrievska, M.T. Psurek, J.B. Leão, O.A. Babanova, R.V. Skoryunov, A.V. Soloninin, M. Karlsson, T.J. Udovic, J. Phys. Chem. C 125, 16689 (2021).
3. A.V. Skripov, A.V. Soloninin, O.A. Babanova, R.V. Skoryunov, Molecules 25, 2940 (2020).
4. A.V. Skripov, R.V. Skoryunov, A.V. Soloninin, O.A. Babanova, W.S. Tang, V. Stavila, T.J. Udovic, J. Phys. Chem. C 119, 26912 (2015).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ НА ОСНОВЕ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ДЕКОМПОЗИЦИИ ГАММА-ИЗЛУЧАЮЩИХ НУКЛИДОВ В СЛОЖНОСОСТАВНЫХ СПЕКТРАХ

А. В. Арбузов

ООО «Гамматек», Москва, 1-й Нагатинский проезд 2 строение 35БН, офис 19

* E-mail: alexey.arbuzov@gmail.com

В последние годы наблюдается тенденция на использование методов машинного и глубокого обучения для самых различных задач науки и техники.

При этом, в ряде областей эти методы, несмотря на все возложенные на них ожидания, показывают весьма скромный результат.

В данной работе мы оцениваем применимость методов машинного обучения в приложении к задачам идентификации гамма-излучающих нуклидов и обработке сложно-составных спектров. Цель работы – показать, что напротив, методы на основе ИИ весьма успешно дополняют “классические” подходы и справляются с их ограничениями.

Предположение, что методы глубокого обучения смогут внести существенный вклад в решение задач идентификации в этой области, основывается на нескольких факторах:

- По своей сути методы глубокого обучения пытаются имитировать работу человека и головного мозга (нейроны, нейронные связи, обучение и поиск паттернов). Поэтому эти методы особенно хорошо работают там, где в решаемой задаче помимо понятной расчетно-алгоритмической части (например, при решении ОДУ или уравнений в частных производных), имеется математически плохо формализованный поиск паттернов. Как оказалось, при использовании специалистами по спектрометрии классического подхода идентификации, помимо формально-алгоритмизованного процесса выделения пиков, применяется шаг сопоставления найденных пиков с имеющимися библиотеками нуклидов. При этом, для получения финального списка гамма-нуклидов, входящих в состав анализируемой смеси, специалистами используется достаточно большое количество эвристик [1]. Соответственно, у методов глубокого обучения есть потенциал для того, чтобы успешно научить машину этим эвристикам. Это в итоге продвинет нас к большей автоматизации процесса разбора гамма-спектров.
- Методы глубокого обучения требуют очень большого объема данных для обучения (data-hungry). Однако, в области гамма-спектроскопии имеется большое количество как реально измеренных, так и синтетических данных, полученных из программ моделирования физики процесса Geant4, GADRAS-DRF и пр. Немаловажно, что эти данные размечены: построено сопоставление “результат измерения – нуклид”. Это позволяет успешно собрать репрезентативные данные для обучения моделей.
- В области гамма-спектроскопии имеется потенциальная возможность с помощью машинного обучения построить человеко-ориентированные классификаторы и методы декомпозиции спектров. Даже если в этой области не будет достигнуто 100

% автоматизация, где машина полностью заменит человека, построение таких классификаторов уже будет существенным упрощением задачи. Функция машины – выполнить достаточное количество предварительной работы по выделению характеристик, по которым либо она сама, либо человек сможет сделать разбор и анализ спектра. Особенно это актуально для разбора сложносоставных спектров, с 4-мя и более нуклидами).

В нашей работе мы показываем текущие результаты применения глубокого обучения на свёрточных архитектурах (CNN) и на архитектурах 1D U-Net. Мы анализируем, насколько эти архитектуры помогли продвинуться вперед в решении задач разбора спектров, а также делаем вывод, как можно улучшить текущий подход и архитектуры в соответствии с задачей построения интерпретируемых человеком классификаторов, как описано выше.

1. Kamuda, M., Zhao, J., & Huff, K. (2020). A comparison of machine learning methods for automated gamma-ray spectroscopy. In Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment (Vol. 954, p. 161385). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.063>.
2. G. Marcus, "Deep Learning: A Critical Appraisal." arXiv, 2018. doi: 10.48550/ARXIV.1801.00631.

**ВЛИЯНИЕ КАРБИДООБРАЗУЮЩИХ ДОБАВОК НА ФАЗОВЫЕ
ПРЕВРАЩЕНИЯ В ФУЛЛЕРЕНАХ ПРИ СПЕКАНИИ**

П. А. Борисова, М. С. Блантер*

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, Россия

*E-mail: Borisovapa@mail.ru

Высокотемпературный синтез под давлением разнообразных углеродных фаз и их производных с различным типом связи (sp , sp^2 , sp^3) и их комбинацией позволяет получить углеродные функциональные наноматериалы с высокими контролируемыми свойствами [1]. Например, производные аморфных углеродных материалов, полученные в условиях высоких давлений и температур, могут сочетать выдающиеся механические и электронные свойства и потенциально использоваться в фотоэлектрических приложениях, требующих сверхвысокой прочности и износостойкости [2]. Сильное влияние на уникальные свойства аморфных углеродных материалов, помимо экстремальных воздействий, оказывают легирующие элементы. Например, свойства пленок SiC можно варьировать от изолирующего, полупроводникового до металлического в зависимости от легирующих примесей (n-типа, например, азотом, фосфором или p-типа, например, бериллием, бором). В настоящем исследовании изучено влияние легирующих элементов (Fe, Al, V, Ni, Ag) на фазовые превращения фуллеренов C_{60} при высоких температурах и высоком давлении.

Углеродные компакты из порошковых композиций C_{60} с 7 ат. % двух групп легирующих металлов: карбидообразующих (Fe, Al, V) и не образующих карбидов (Ni, Ag) были синтезированы при температурах до 1100 °C и давлении 8 ГПа и охарактеризованы с помощью методов нейтронной и рентгеновской дифракции и рамановской спектроскопии. Было показано, что карбидообразующие металлы повышают температуру превращения фуллерена в «разориентированный» графит, а не образующие карбидов - нет. Так же показано, что при температуре спекания 500 °C карбиды еще не образовывались, а выше этой температуры карбиды образовывались только тогда, когда фуллерен уже превратился в «разориентированный» графит. Объяснение полученных результатов дается на основе химического взаимодействия металл-фуллерен.

1. Sundqvist B. Carbon under pressure. Physics Reports 909, 1 (2021).

2. S. Zhang, Z. Li, K. Luo et al National Science Review 9(1), nwab140 (2022).

РОССИЙСКИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ (500-1000 МС/С) МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ДИДЖИТАЙЗЕРЫ

И. С. Бредихин

ООО «Гамматек», Москва, 1-й Нагатинский проезд 2 строение 35БН, офис 19

* E-mail: ivan@gammatech.pro

Построение цифровых схем для обработки и управления экспериментальными установками является обязательным атрибутом построения современного научного эксперимента в области ядерной физики или физики частиц. Растущая сложность экспериментов приводят к появлению всё новых требований к цифровой электронике. Они не ограничиваются ростом скоростей оцифровки, или ростом скорости передачи и обработки данных. Растущие объёмы данных делают всё более и более заманчивой идею не переносить данные на компьютер, а обрабатывать их прямо на «железе», непосредственно во время сбора данных. Проблемой тут встает либо невозможность изменять встроенную в ПЛИС прошивку, либо требования к написанию сложного низкоуровневого кода для работы с ПЛИС.

Таблица 1. Таблица сравнения ключевых параметров и областей применения диджитайзеров

Модель	# Канал	МВыб /с	# Бит	Применение
D125-16A	16	125	14	Спектроскопия & работа в режиме МКА. Продвинутое усиление, форма)
D500-4/8	4/8	500	14	Средне-быстрые детекторы, суб-нс времена вместе с хорошим разрешением по энергии
D1000-4	4	1000	14	Сверхбыстрые детекторы (алмазные, MPCs, SiPMs). Изучение процессов с пикосекундным разрешением
GT-01	1/2	20/40	12	Спектроскопия & работа в режиме МКА

В рамках реализации проекта разрабатывается линейка высокоскоростных диджитайзеров с программируемой ПЛИС. Действительно, в мире существует целый ряд международных компаний, специализирующихся на разработке, производстве и коммерческой реализации широкого спектра диджитайзеров. Но в отличие от большинства имеющихся на мировом рынке решений, где алгоритмы обработки преобразованного сигнала зашиты жестко в диджитайзер (конкретно в ПЛИС) и позволяют каждой



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

отдельной модели диджитайзера решать конкретную задачу, в разрабатываемых нами решениях предусмотрена возможность лёгкого перепрограммирования ПЛИС без необходимости изменять всю внутреннюю архитектуру, что делает возможным менять алгоритм обработки сигнала — так называемый подход «открытый ПЛИС».

Кроме того, вышеупомянутые мировые производители — это компании из Франции, США, Италии, Германии — стран, что ввели санкции против Российской Федерации в 2022 году. Все высокоскоростные диджитайзеры, подпадая под категорию двойного назначения были запрещены к поставкам в Россию и Беларусь [1].

В рамках докладываемой работы будут представлены практические результаты разработки высокоскоростных многоканальных диджитайзеров российского производства, обладающих конкурентными техническими характеристиками и возможностью быстрой смены пользовательской прошивки для лёгкой адаптации приборов под стоящие научные задачи.

1. Official Journal of the European Union 25.2.2022 L 49/1 “amending Regulation (EU) No 833/2014 concerning restrictive measures in view of Russia’s actions destabilising the situation in Ukraine”

ОСОБЕННОСТИ САМОПРОИЗВОЛЬНОЙ ОБЪЁМНОЙ МАГНИТОСТРИКЦИИ В АНТИФЕРРОМАГНЕТИКАХ И ГИГАНТСКАЯ ОБЪЁМНАЯ МАГНИТОСТРИКЦИЯ В СПЛАВЕ FeRh

Э. З. Валиев

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

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

Наш расчет объемной магнитострикции антиферромагнетика (АФ) основан на обобщении обменно-стрикционной модели ферромагнетика, впервые предложенной Бинном и Ротбеллом в работе [1]. Обобщение этой модели для случая антиферромагнетика с двумя магнитными подрешетками дано в нашей работе [2].

Здесь мы используем термодинамический потенциал, учитывающий обменную энергию кристалла, энергию изотропных объемных деформаций и фононный вклад в приближении Дебая. Основной особенностью модели является учет зависимости обменных интегралов и температуры Дебая от объема: $J_{11} = J_{22} = J_{11}^0 + \gamma_1 \omega$, $J_{12} = J_{12}^0 + \gamma_2 \omega$, $\Theta = \Theta_0 - \Gamma \omega$, $\omega = \Delta V/V$. Здесь $J_{11} > 0$, $J_{12} < 0$ - внутри-подрешеточный и меж-подрешеточный обменные интегралы антиферромагнетика, Θ - температура Дебая, γ_1 , γ_2 и Γ - постоянные магнитоупругого взаимодействия и Грюнаизена, соответственно. Таким образом, получена формула для относительного изменения объема ω :

$$\omega = \left\{ 1/2ns^2\gamma_1[\sigma_1^2 + \sigma_2^2] + ns^2\sigma_1\sigma_2(\mathbf{e}_1\mathbf{e}_2) - P + 6kn(T/\Theta)\Gamma D(T/\Theta) \right\} \cdot B^{-1} \quad (1)$$

Где: n – число атомов в подрешетке, s - спин атома; σ_1 , σ_2 и $\mathbf{e}_1$, $\mathbf{e}_2$ – приведенные намагниченности подрешеток 1, 2 и единичные вектора направления их магнитных моментов, B – модуль сжатия, $D(T/\Theta)$ - функция Дебая, P – давление.

В формуле (1) первые 3 слагаемые есть самопроизвольная объемная магнитострикция АФ, два последних слагаемых представляют зависимость объема от давления и обычное тепловое расширение. Основной особенностью этой формулы является зависимость ω от направления векторов $\mathbf{e}_1$, $\mathbf{e}_2$. В основном состоянии АФ $(\mathbf{e}_1\mathbf{e}_2) = -1$. В магнитном поле $H \geq H_C$ ($H_C = S |J_{12}| \sigma/\mu$ критическое магнитное поле) единичные вектора становятся параллельными друг другу и $(\mathbf{e}_1\mathbf{e}_2) = 1$. То есть при большой самопроизвольной объемной магнитострикции в АФ должна наблюдаться сильная зависимость объема от магнитного поля.

В общем случае $(\mathbf{e}_1\mathbf{e}_2) = 2(H/H_C)^2 - 1$. Расчет по формуле (1) удовлетворительно объясняет гигантскую объемную магнитострикцию ($\omega \sim 10^{-2}$) в АФ сплаве FeRh, которую наблюдали в работе [3].

В докладе также обсуждается и сравнивается с экспериментом в [3] температурная зависимость магнитного критического поля и зависимость намагниченности антиферромагнитного сплава FeRh от магнитного поля.

Результаты исследования, получены с использованием УНУ «Нейтронный материаловедческий комплекс ИФМ» в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «ПОТОК № 122021000031-8»).

1. C.P. Been and D.C. Rodbell, Phys. Rev. B 12, 104 (1962).
2. Э.З. Валиев, ФММ 96, 5 (2003).
3. M.R. Ibarra and P.A. Algarabel, Phys. Rev. B 50, 4196 (1994).



ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НЕЙТРОННО-РАДИАЦИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД

Р. Р. Гумаев, В. И. Зверев*

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

*E-mail: RRGumaev@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.

Проведенные эксперименты показали возможность определения, как основных породообразующих элементов, так и РЗЭ в образцах горных пород.

ПОТЕНЦИАЛ МАЛОУГЛОВОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ СТАНЦИИ XEUSS 3.0 ДЛЯ БИМЕДИЦИНЫ

Ю. Е. Горшкова

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

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

В контексте создания современных биосовместимых имплантов используют комплексные материалы органического и органического-неорганического происхождения. Целью создания таких материалов является конструирование и выращивание вне организма человека живых, функциональных тканей или органов для последующей трансплантации пациенту с целью замены или стимуляции регенерации поврежденных органов или тканей. При этом происходит регенерация ткани, а не простое замещение ее синтетическим материалом, как это происходит в случае использования имплантатов из инертных материалов, которые устраняют только физические и механические недостатки поврежденных тканей.

Функциональные свойства инновационных материалов, способность их к интеграции во многом определяются их внутренней структурой, поверхностной морфологией. Это, в свою очередь, требует проведения рутинных исследований комплементарными методами. Малоугловое рентгеновское или нейтронное рассеяние (МУР) дает информацию о внутренней структуре и форме исследуемых объектов в нативной среде при контролируемых физико-химических параметрах: температуре, влажности, pH, что несомненно является преимуществом данного метода. Полный спектр таких исследований возможно проводить на установке малоуглового рентгеновского рассеяния XEUSS 3.0.

Одно из значимых практических исследований, проведенных на станции XEUSS 3.0 в 2022-2023 гг., — совместная работа с офтальмологическим центром «Восток-Прозрение» г. Москва по исследованию материала Корнеопласт для кератопластики. Инновационный трансплантат представляет собой бесклеточный графт стромы роговицы свиньи, подверженный дегидротермическому кросслинкингу (ДТК) - образование поперечных сшивок в биоматериалах при их нагревании под вакуумом [1].

Проведен комплексный анализ структур сухих и полностью гидратированных графтов, выдержанных в воде или сбалансированном солевом буфере BSS, подвергшихся ДТК при температурах 60, 100 и 140 °C. Установлено, что графты свиньи, подверженные ДТК при 140 °C, не способны к гидратации, и как следствие, эти образцы в дальнейшем не прошли тест на эпителизацию, то есть непригодны для использования в офтальмологической хирургии. При полной гидратации графтов в буфере BSS (контроль, 60 °C, 100 °C) наблюдается уменьшение расстояния между коллагеновыми каркасами до 0.33 нм, в то время как для сухих образцов это расстояние составляет 0.45 нм [2]. Для этих графтов характерно незначительное увеличение расстояния между соседними аминокислотными остатками вдоль центральной оси спиральной структуры полипептидной цепи до 0.29 нм (для сухих графтов D = 0.28 нм). Кроме этого, для графтов, подверженных ДТК при 60 и 100 °C, как и для контрольного графта, выдержанного в буфере BSS одни сутки, полностью исчезает пик (в отличие от образцов, гидратированных в воде), отвечающий за среднее расстояние 1.1 ± 0.2 нм между тройными спиралью в четвертичной структуре (типичное расстояние молекул сухого коллагена) [2].

Влияние влажности на структуру графтов исследовалась в специальном держателе (Рис. 1а) при 37 °C в диапазоне влажности 10-90-10 %RH. Выявлено незначительное (на 1 нм) увеличение периода повторяемости, что связано с удлинением фибрилл вдоль оси (Рис. 1б).

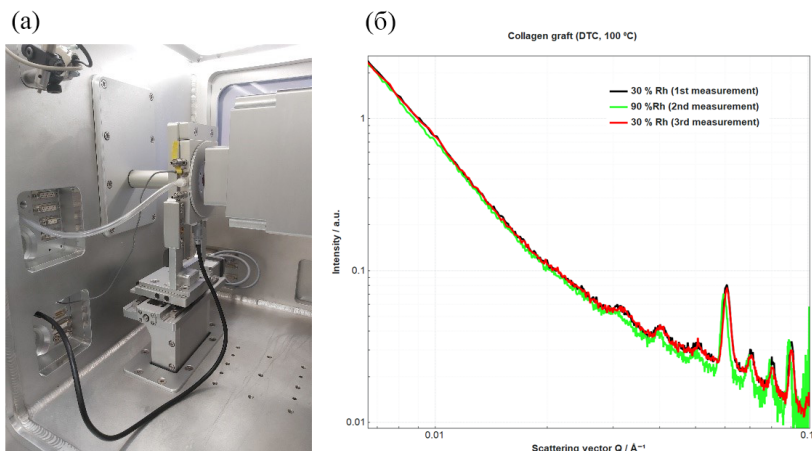


Рис. 1. (а) Схема эксперимента с контролем температуры и влажности; (б) Кривые МУРР для графта (ДТК, 100 °С) при варьировании влажности

Кроме экспериментов с использованием стандартного окружения образца, возможно проведение исследований с использованием уникального оборудования, приспособленного под потребности пользователей. Так, например, при изучении свойств и структуры инновационного материала для эндопротезов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), который сочетает в себе три слоя: сплошной, имитирующий скользкий и гладкий хрящ, пористый СВМПЭ, имитирующий губчатую костную ткань и пористый коллаген, учеными из МИСиСа было разработано специальное рамочное испытательное устройство для моделирования механических нагрузок образцов углекомполитов (Рис.2а). Подобная разработка позволила оценить изменение структуры при различной нагрузке в реальном времени (Рис.2б) [3]. Полученные результаты крайне важны для усовершенствования создаваемых имплантатов, применяемых в тазобедренном суставе, которые должны сочетать в себе низкий коэффициент трения и высокую износостойкость – свойства, присущие нанокполитам на основе СВМПЭ.

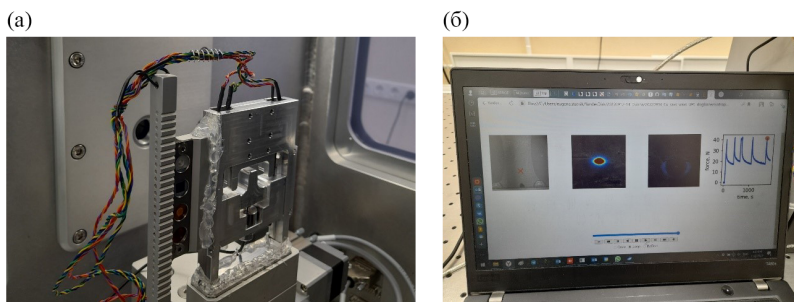


Рис. 2. (а) Испытательное рамочное устройство в рабочей камере Heuss 3.0; (б) Анализ структурных исследований углекомполитов

1. С. И. Анисимов и др., The EYE ГЛАЗ 25(1), 49-55 (2023).
2. A. Terzi et al., Sci Rep. 8(1), 1-15 (2018).
3. E.S. Statnik et al., Polymers 14, 5374 (2022).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ Fe НА
НАНОСТРУКТУРУ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЕЙ
МЕТОДАМИ АТОМНО-ЗОНДОВОЙ ТОМОГРАФИИ И
ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ**

А. В. Клауз^{1,2}, С. В. Рогожкин^{1,2}, А. А. Хомич^{1,2}, А. А. Богачев^{1,2}, А. Г. Залужный^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

* E-mail: uni.klauz@gmail.com

В перспективных ядерных и термоядерных реакторах материалы активной зоны должны обладать высокой радиационной стойкостью и жаропрочностью при температурах до 700 °С и дозах до 200 сна (смешений на атом). Перспективными материалами, способными удовлетворить эти требования, являются дисперсно-упрочненные оксидами (ДУО) стали, содержащие в своей матрице однородно распределенные термически стабильные наноразмерные оксиды.

Основной тенденцией современного развития разработок ДУО сталей, является создание модельных сплавов, отличающихся друг от друга легирующими добавками и их содержанием, попытка установить различного рода корреляции между исходным составом и поведением структурно-фазового состояния в условиях облучения.

В данной работе рассматривались три ДУО стали 10Cr ODS, KP-3 ODS и Eurofer ODS в исходном состоянии и после облучения ионами Fe²⁺ с энергией 5.6 МэВ при температурах 350 °С и 500 °С и повреждающих дозах до 100 сна. Исследование проводилось с использованием современных методов ультрамикроскопии: просвечивающей электронной микроскопии и атомно-зондовой томографии.

В исходном состоянии сталей обнаружены оксидные включения и кластеры. Средний размер оксидов варьировался от 3 до 8 нм, их объемная плотность составляла от $2 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ до $13 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Объемная плотность кластеров варьировалась от $2 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ до $4 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$.

Обнаружено, что оксидные включения в стали Eurofer ODS более стабильны к ионному облучению до дозы 30 сна при 350 °С, чем включения в сталях 10Cr ODS и KP-3 ODS. При этом объемная плотность кластеров уменьшилась во всех трёх сталях.

Исследование, облучённых до 100 сна при 500 °С образцов, существенное уменьшение объемной плотности оксидных частиц в сталях 10Cr ODS (в ~5 раз) и KP-3 ODS (в ~4 раза). При этом в Eurofer ODS объемная плотность оксидных частиц сохранилась в пределах погрешности. При этом объемная плотность кластеров резко уменьшилась только в Eurofer ODS, а в 10Cr ODS и KP-3 ODS наоборот выросла. Предположительно это связано с взаимодействием кластеров с подсистемой оксидных частиц.

Комплекс исследований показал, что сталь Eurofer ODS имеет стабильные частицы не только в области нижней границы температурного интервала эксплуатации, но и для промежуточных температур эксплуатации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 22–29–01279). Томографический атомно-зондовый анализ выполнен на оборудовании Центра коллективного пользования КАМИКС (<http://kamiks.iter.ru/>) НИЦ «Курчатовский институт».

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МУРР ДЛЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ НЕФТЯНЫХ АСФАЛЬТЕНОВ

Ю. В. Ларичев

Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

*E-mail: ylarichev@gmail.com

В связи с ростом доли тяжелых нефтей в нефтедобыче и нефтепереработке, растет интерес и к асфальтенам - высокомолекулярным углеводородам, относящимся к самым тяжелым нефтяным фракциям. Молекулы асфальтенов склонны к агрегации по механизму $\pi - \pi$ стекинга, что приводит к формированию первичных частиц асфальтенов в нефтях, имеющих размеры от 1-2 нм и более. Асфальтены в нефтяных системах могут также формировать и более сложные агрегаты различной формы, размеров и иерархии [1,2]. При изменении температуры, давления или химического состава (при добыче, смешении нефтей или разбавлении их нефтяными дистиллятами) первичные частицы асфальтенов могут образовывать вторичные и третичные агрегаты, что приводит к макроскопическим отложениям, препятствующим транспортировке и переработке нефти [3-5]. При взаимодействии с твердой поверхностью (например, при контакте нефтей с горными породами) перечисленные явления могут усложняться адсорбционными процессами, приводя к неконтролируемому осаждению асфальтенов в поровом пространстве и снижению проницаемости нефтяных коллекторов. Таким образом, в зависимости от внешних условий, надмолекулярная структура асфальтенов может варьироваться в широких пределах, что требует развития методов для диагностики дисперсного состава асфальтенов и последующего управления ими в нефтяных дисперсиях. Одним из таких методов, позволяющих отслеживать изменения дисперсного состава асфальтенов вне зависимости от их агрегатного состояния является метод малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР). В докладе будут рассмотрены комплексные особенности исследования структуры асфальтенов методом МУРР в зависимости от разных факторов (влияние температуры, химического состава и агрегатного состояния). Будет рассмотрено влияние смол и алифатических углеводородов на процессы формирования вторичных агрегатов асфальтенов в нефтях in-situ. Будет продемонстрирована ключевая роль в стабилизации асфальтенов азотсодержащих оснований, присутствующими в нефтяных смолах. Показано, что процессы адсорбции асфальтенов на оксидные поверхности можно использовать для стабилизации лабильных асфальтеновых структур и их последующего изучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект № АААА-А21-121011390053-4).

1. J. Jennings, D.J. Grownuey, H. Brice, O.O. Mykhaylyk, S.P. Armes, Fuel 327, 125042 (2022).
2. О.Н. Мартъянов, Ю.В. Ларичев, Е.В. Морозов, С.Н. Трухан, S.G. Kazarian, Успехи химии 86, 999 (2017).
3. K. Akbarzadeh, et al., Oilfield Review 19(2), 22 (2007).
4. R. Guzmán, J. Ancheyta, F. Trejo, S. Rodríguez, Fuel 188, 530 (2017).
5. H.Yu.V. Larichev, O.N. Martynov, Journal of Petroleum Science and Engineering 165, 575 (2018).

Секция 5.

Некристаллические материалы, полимеры, жидкости и биологические системы

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИИ ХРОМАТИНА В ЯДРЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ КЛЕТКИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ

Е. Яшина^{1,2}, Е. Варфоломеева², Р. Пантина², В. Байрамуков², Р. Ковалев²,
Н. Федорова², К. Пшеничный², Ю. Е. Горшкова³, С. Григорьев^{1,2}*

¹Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург

²НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина

³Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, 141980, Россия

* E-mail: yashina_91@inbox.ru

Вопрос о том, каким образом невероятно длинная макромолекула ДНК уложена в относительно компактном ядре биологической клетки является одним из фундаментальных проблем микробиологии. На сегодняшний момент наиболее популярным методом для исследования генома является метод Hi-C - захвата конформации хромосом [1]. С помощью этого метода было идентифицировано, что хроматин делится на два полногеномных компартмента: «открытый» хроматин образует компартмент **A**, «закрытый» хроматин - компартмент **B**. Компартмент **B** упакован плотнее, а взаимодействующие гены проявляют большую тенденцию к близкой пространственной локализации, иными словами, гены чаще всего взаимодействуют с соседними генами. В то время как в компартменте **A** находятся активно транскрибируемые гены, для которых необходима большая доступность для осуществления экспрессии генов и сборок молекулярных машин.

Наиболее популярной моделью для описания крупномасштабной упаковки ДНК является модель фрактальной глобулы, предложенная Гроссбергом в конце 20-ого века. Согласно этой модели нить ДНК, подобно кривой Гильберта, полностью заполняет трехмерное пространство без самопересечений, а ее размерность равна $D_F = 3$ [2]. Данная модель является хорошим приближением для описания «закрытого» хроматина (Компартмента **B**), массовая доля которого превалирует в ядре. Однако, эта модель, видимо, не описывает структуру «открытого» хроматина (Компартмента **A**).

Эксперименты по МУРН, Ультра МУРН и Спин-Эхо МУРН на разных типах ядер: куриных эритроцитов [3], ядра HeLa [4] (Рис.1 а) и крысиных лимфоцитов [5], показали, что наднуклеосомная организация хроматина представляет собой двухуровневую фрактальную структуру.

Мелкомасштабный фрактальный уровень описывается моделью объемного фрактала, в то время как крупномасштабный фрактальный уровень описывается моделью логарифмического фрактала. Эксперименты по МУРН демонстрируют корреляцию транскрипционной активности ядер HeLa с наличием и размером объемно фрактальной структуры в организации хроматина (Рис.1 б). По-видимому, открытый хроматин компартмента **A** описывается структурой объемного фрактала. Кроме того, с точки зрения МУРН однородно заполненное пространство фрактальной глобулы представляет собой сплошную среду с границей по краю ядра [6].

Обобщая результаты по МУРН и принимая во внимание успех описания неактивного (закрытого) хроматина моделью фрактальной глобулы [1,2], мы предлагаем би-фрактальную модель [3-6] организации активного (открытого) хроматина, который существует на фоне неактивного хроматина, плотно и однородно заполняющего простран-

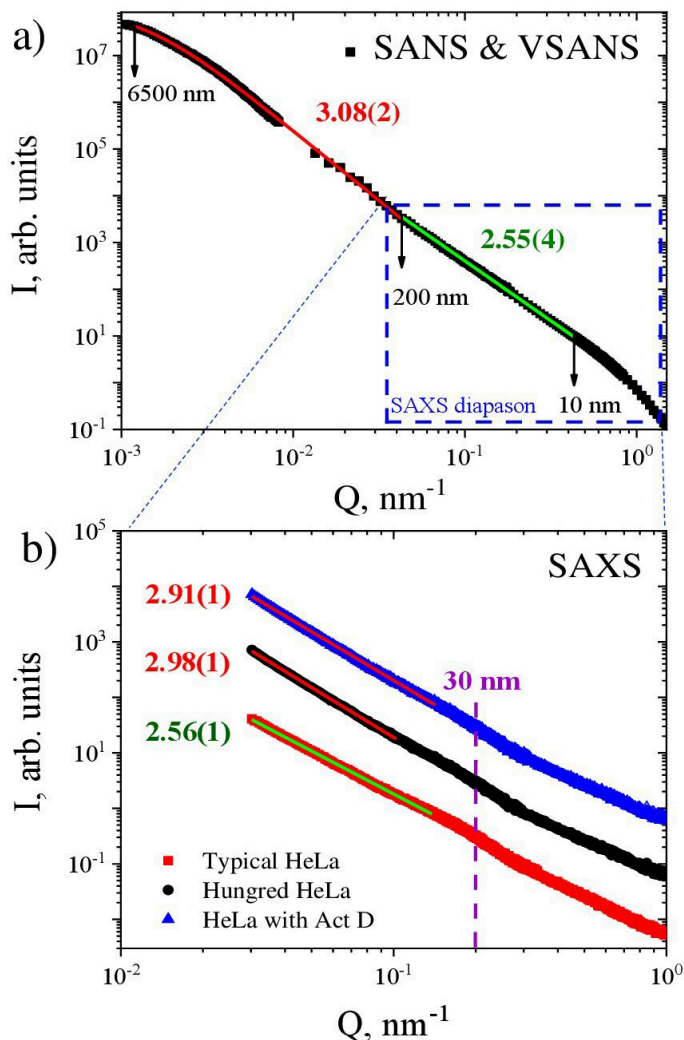
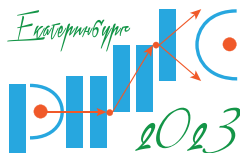


Рис. 1. Интенсивность малоуглового рассеяния нейтронов на ядрах HeLa, помещенных в тяжелую воду, измеренная на установках KWS-2 и KWS-3 (MLZ, Германия, Гархинг). Интенсивность малоуглового рассеяния рентгеновского излучения для референсных ядер HeLa - красные открытые квадраты. Интенсивность малоуглового рассеяния рентгеновского излучения для ядер HeLa, культивированных в условиях дефицита питательной среды - черные открытые круги. Интенсивность малоуглового рассеяния рентгеновского излучения для референсных ядер HeLa, культивированных с добавлением ингибитора транскрипции Актиномицином Д - синие открытые треугольники

ство ядра. На масштабах от нескольких десятков до нескольких сотен нанометров активный хроматин формируется в структуру объемного фрактала с фрактальной размерностью равной $D_F = 2.5$, в то время, как на масштабах от нескольких сотен нанометров до нескольких микрометров (вплоть до размера самого ядра), в ядре образуется особая структура полостей (транспортных каналов), описываемая моделью ло-



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

гарифмического фрактала. В классификации МУРН на фрактальных объектах, модель объемного фрактала соответствует однородной самоподобной классической фрактальной структуре, характеризующейся хаусдорфовой размерностью D_F и наблюдается в эксперименте, как убывающая степенная зависимость интенсивности малоуглового рассеяния от вектора рассеяния с показателем $2 < \nu < 3$ ($\nu = D_F$), в то время как модель логарифмического фрактала описывает иерархическую структуру, которая описывается логарифмической мерой и формируется согласно принципу сохранения объема при изменении масштаба. Экспериментально структура логарифмического фрактала наблюдается как кубический закон в интенсивности малоуглового рассеяния. Принцип построения этого фрактала заключается в следующем: изначально имеется куб объема V , далее к вершинам этого куба добавляются 8 одинаковых кубов поменьше, таких что их суммарный объем равен объему исходного куба V ; на следующей итерации к вершинам каждого из добавленных в предыдущей итерации куба добавляются еще 8 кубов поменьше, таких что их суммарный объем равен объему также равен объему исходного куба V и т.д. В ядрах некоторых клеток число итераций доходит до 4 или 5.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 20-12-00188).

1. Lieberman-Aiden E. et al. // Science. 2009. V. 326. P. 289.
2. Halverson J.D. et al. // Rep. Prog. Phys. 2014. V. 77. P. 022601.
3. Grigoriev S. V. et al. // Physical Review E. 2020. V. 102. No. 3. P. 032415.
4. Grigoriev, S. V. et al. // Physical Review E. 2021. V. 104. No. 4. P. 044404.
5. Iashina E. G. et al. // Physical Review E. 2021. V. 104. P. 064409.
6. Яшина Е. Г., Григорьев С. В., ЖЭТФ, 2019, том 156, вып. 2 (8), стр. 540–544.

INVESTIGATION OF BARIUM HEXAFERRITE NANOPARTICLES BY SMALL-ANGLE NEUTRON AND X-RAY SCATTERING FOR PREPARING NEW FERROFLUIDS

M. Balasoiu^{1,2,3}, S. Lysenko⁴, S. Astaf'eva⁴, O. Ivankov¹, A. Kuklin^{1,5}, V. Turchenko¹,
S. Kichanov¹, O. M. Bunoiu³*

¹Joint Institute of Nuclear Research, Dubna, Moscow Region, 141980, Russia

²Horia Hulubei National Institute for R&D in Physics and Nuclear Engineering, Bucharest - Magurele, Romania

³West University of Timisoara, Timisoara, Romania

⁴Institute of Technical Chemistry, Perm Federal Research Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

⁵Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia

*E-mail: masha.balasoiu@gmail.com

Lately, one more issue of interest to researchers is the preparation of ferrofluids from ferrite nanoparticles of various anisometric shapes [1-5].

In the present work, anisometric magnetic nanoparticles of barium hexaferrite ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) and colloidal solutions of these particles are studied by small-angle neutron and X-ray scattering.

Generally, different methods have been used to synthesize $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ nanoparticles (NPs), such as co-precipitation, sol-gel, microemulsion, aerosol pyrolysis, glass crystallization and hydrothermal methods [5].

The samples examined in this work were prepared at the Institute of Technical Chemistry from Perm using the hydrothermal method [2]. With the help of small-angle scattering methods, the structural features of the systems obtained using various surfactants are revealed and analyzed.

1. K. May, A. Eremin, R. Stannarius, B. Szabó, T. Börzsönyi et al., Journal of Magnetism and Magnetic Materials 431, 79-83 (2017).
2. S.N. Lysenko, A.V. Lebedev, S.A. Astaf'eva, D.E. Yakusheva, M. Balasoiu et al., Phys. Scr. 95(4), 044007 (2020); S. N. Lysenko, A. V. Lebedev, S. A. Astaf'eva, M. Balasoiu, Russian Journal of Applied Chemistry 91(10), 1574-1580 (2018).
3. M. Tadic, L. Kopanja, M. Panjan, J. Lazovic, B. Vucetic Tadic et al., Materials Research Bulletin 133, 111055 (2021).
4. L. Scarabelli, M. Sun, X. Zhuo, S. Yoo, J.E. Millstone, M.R. Jones, and L.M. Liz-Marzán, Chem. Rev. 123(7), 3493–3542 (2023).
5. M. Drofenik, M. Kristl, A. Žnidaršič, D. Hanžel, D. Lisjak, J. Am. Ceram. Soc., 90 (7) 2057–2061 (2007).

**МЕХАНИЗМЫ СТРУКТУРНОЙ РЕОРГАНИЗАЦИИ ЛИПИДНОЙ
МЕМБРАНЫ В ПРИСУТСТВИИ АМИЛОИДНОГО БЕТА-ПЕПТИДА**

**Т. Н. Муругова¹, А. И. Иваськов^{1*}, Е. В. Ермакова¹, Д. Р. Бадреева¹, А. И. Куклин^{1,2},
Н. Кучерка^{1,2}**

¹Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия

²Московский Физико-Технический Институт, Долгопрудный, Россия

³Университет Коменского в Братиславе, Братислава, Словакия

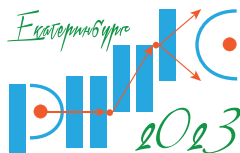
*E-mail: ivankov@jinr.ru

Амилоидный бета-пептид (Аβ-пептид) относится к группе антимикробных пептидов и считается одним из ключевых факторов развития болезни Альцгеймера. В последнее время понимание его патогенного действия сместилось от объяснения образования крупных фибрилл, находящихся в межклеточной среде, к образованию небольших олигомеров, взаимодействующих с клеточной мембраной. Например, малоугловое рассеяние нейтронов выявило эффект разрушения мембраны и ее структурной перестройки в присутствии небольших количеств Аβ-пептида в системе. Исходные экструдированные однослойные везикулы (диаметр ~ 600 – 700 Å) спонтанно трансформировались в бичесельные диски (диаметр ~ 400 Å) и однослойные везикулы небольшого размера (диаметр ~ 200 Å). Форма образующейся структуры (везикула или диск) зависит от термодинамической фазы мембраны [1].

В данной работе с помощью малоугольного рассеяния нейтронов мы изучили этот эффект для систем, состоящих из фосфатидилхолиновых липидов с различной длиной углеводородной цепи (DLPC, DMPC, DPPC, DSPC) в присутствии короткого (Аβ25-35) и полноразмерного (Аβ1-42) пептида. Также проведено моделирование поведения системы липид-пептид с помощью метода молекулярной динамики в крупнозернистом подходе. Цель нашей работы – выявить механизм структурной реорганизации мембраны. Описанное выше поведение системы пептид-мембрана может свидетельствовать о том, что образование фибрилл и амилоидных бляшек при болезни Альцгеймера может быть уже следствием, а не первопричиной разрушения мембраны. Само же разрушение мембраны происходит под действием мономерных (или небольших олигомерных систем) Аβ-пептида.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 19-72-20186.

1. O.I. Ivankov et al., Sci. Rep. 11 (1), 21990 (2021).



МАЛОУГЛОВОЕ РАССЕЯНИЕ КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ЛИПИДНОГО БИСЛОЯ

М. А. Киселев

Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

*E-mail: kiselev@jinr.ru

Липидный бислой является основой биологической мембраны клетки. Характерный размер липидного бислоя составляет 40 Å - 50 Å, что открывает возможности исследования внутренней структуры липидного бислоя на нейтронных и синхротронных источниках. Малоугловое рассеяние позволяет исследовать структуру липидного бислоя в избытке воды, в то время как дифракция требует создания искусственных многослойных мембран, которые адекватны биологическому объекту только в случае исследования липидной матрицы верхнего слоя кожи.

В докладе рассматриваются следующие вопросы:

1. Сравнение возможностей нейтронного и синхротронного излучения (контраст, некогерентный фон, пространственное разрешение)
2. Методы обработки экспериментальных спектров (сравнение пакета SASview и метода разделенных формфакторов)
3. Сравнение возможностей импульсного источника нейтронов и стационарного источника нейтронов.
4. Приводятся примеры определения структуры липидного бислоя однослойных и олигослойных везикул на нейтронных и синхротронных источниках как для однокомпонентного так и для многокомпонентного липидного бислоя.

Особое внимание будет уделено вопросам определения тех параметров липидного бислоя, которые невозможно или затруднительно определить другими методами.

1. Lombardo D., Kiselev M.A. Methods of Liposomes Preparation: Formation and Control Factors of Versatile Nanocarriers for Biomedical and Nanomedicine Application. *Pharmaceutics* 2022, 14, 543.
2. Tikhonova, E.G.; Tereshkina, Yu.A.; Kostyukova, L.V.; Khudoklinova, Yu.Yu.; Sanzhakov, M.A.; Tamarovskaya, A.O.; Ivankov, O.I.; Kiselev, M.A. Study of Physico-Chemical Properties and Morphology of Phospholipid Composition of Indomethacin. *Nanomaterials* 2022, 12, 2553.
3. M. A. Kiseleva, E. V. Zemlyanaya, E. I. Zhabitskay, M. V. Bashashin, O. I. Ivankov. Investigation of the Possibilities of Analyzing the Vesicular Structure of PTNS-Based Nanodrugs Using Small-Angle Neutron Scattering Data. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2023, Vol. 17, No. 1, pp. 1–6

МЕЗОСТРУКТУРА ВЫСОКОПОРИСТОГО КРЕМНЕЗЕМА, ПОЛУЧЕННОГО ПУТЕМ ПИРОЛИЗА СИЛИКАТНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

С. Ю. Котцов^{1,2}, Х. Е. Еров¹, Г. П. Копица^{3,4*}, Ю. Е. Горшкова⁵, К. Б. Устинович²,
Н. П. Симоненко², А. Е. Баранчиков², В. К. Иванов²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

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

³Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ "Курчатовский институт", Гатчина, Россия

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

⁵Лаборатория Нейтронной Физики им. И.М. Франка, Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия

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

Высокопористые оксидные материалы привлекают большое внимание благодаря широкому спектру их практического применения в качестве гетерогенных катализаторов, сорбентов и т.д. Наиболее распространенные способы получения таких материалов основаны на подходах мягкой химии, включая различные альтернативы золь-гель синтеза. Как правило, золь-гель-полученные вещества можно рассматривать только как предшественники для синтеза основного продукта, поскольку они содержат большое количество физически поглощенной и химически связанной воды. Простая термическая обработка таких прекурсоров приводит к резкому снижению их текстурных характеристик из-за действия капиллярных сил. Таким образом, полученные ксерогели часто обладают низкой удельной поверхностью из-за сильной агрегации частиц, что негативно сказывается на их свойствах. Было предложено несколько способов обойти капиллярные силы и получить оксидные материалы с высокой пористостью и удельной поверхностью, содержащие относительно небольшое количество воды. Наиболее известные из них включают методы сублимационной сушки и сверхкритической (SC) сушки. К сожалению, эти подходы включают использование сложного оборудования и опасных сред (жидкий азот или газы под избыточным давлением). Альтернативный способ, сушка при атмосферном давлении, включает химическую модификацию (например, гидрофобизацию) оксидных поверхностей с использованием относительно дорогих реагентов.

В настоящей работе был предложен новый подход к синтезу высокопористого кремнезема, который основан на простой термической обработке кремнеземной матрицы с порами, заполненными органическим полимером. Первая стадия синтеза заключалась в гелеобразовании SiO_2 в этоксилаттриметилпропантриакрилате (ЕТРТА) - обычной УФ-полимеризуемой органической жидкости.

После полимеризации растворителя был получен монолитный кремнеземно-полимерный композит, удаление органического компонента из которого при 600 °C на воздухе позволило получить кремнеземный пирогель. Также, для сравнения, эталонные образцы ксерогеля и аэрогеля были получены путем промывки ЕТРТА-мономера из геля с мономерной системой ацетоном в течение 3 раз с интервалом 8 часов. Затем ацетон удаляли выпарной сушкой при комнатной температуре в течение недели с последующим нагреванием до 50 °C в течение 8 часов (ксерогель) или сверхкритической сушкой в CO_2 ($t_{cr} = 31$ °C, $P_{cr} = 72.8$ атм) (аэрогель). Далее, эталонные образцы ксерогеля и аэрогеля были отожжены аналогично пирогелю при 600 °C на воздухе.

Структура, в том числе фрактальные свойства, кремнеземного пирогеля, а также эталонных образцов кремнеземных ксерогеля и аэрогеля были исследованы методами: РФА, ИК-спектроскопии, ТГА/ДТА, гелиевой пикнометрии, РЭМ, низкотемпературной адсорбции азота и малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН). Установлено, что

все полученные образцы рентгеноаморфны и обладают высокопористой структурой. При этом, полученный новым методом синтеза кремнеземный пирогель демонстрирует более высокие текстурные свойства (пористость $P = 83\%$, удельный объем пор $V_{уд} = 0.99 \text{ см}^3/\text{г}$, удельная площадь поверхности $S_{уд} = 712 \text{ м}^2/\text{г}$) по сравнению с ксерогелем ($P = 46\%$, $V_{уд} = 0.25 \text{ см}^3/\text{г}$ и $S_{уд} = 559 \text{ м}^2/\text{г}$) и, практически, не уступает по данным характеристикам аэрогелю ($P = 84\%$, $V_{уд} = 3.31 \text{ см}^3/\text{г}$ и $S_{уд} = 747 \text{ м}^2/\text{г}$), подвергнутым термической обработке при равных температурах.

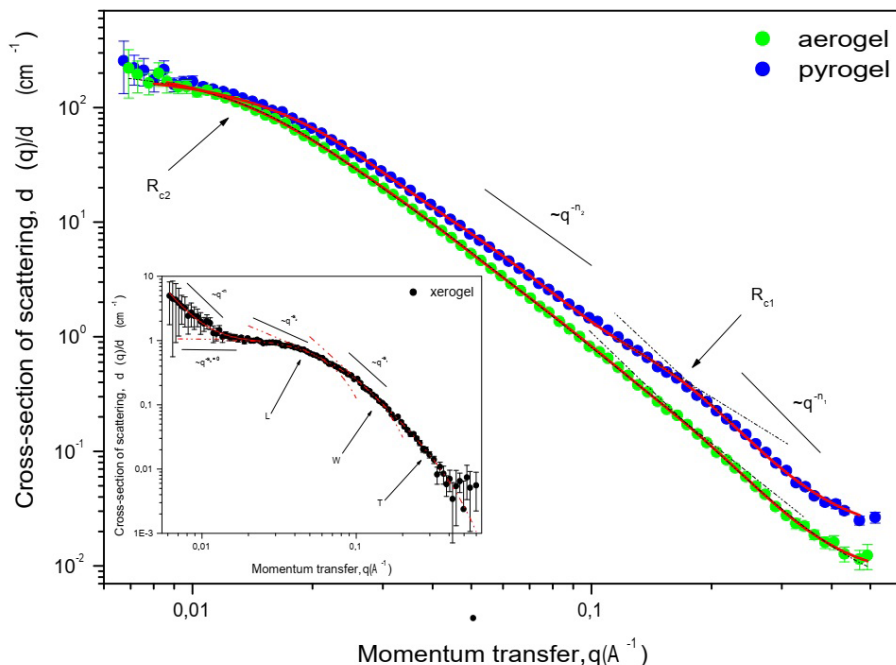


Рис. 1. Зависимости сечения $d\Sigma(q)/d\Omega$ МУРН от переданного импульса q для образцов кремнеземных аэрогеля, пирогиеля и ксерогеля (вставка к рисунку)

Анализ данных МУРН (Рис. 1) показал, что кремнеземные аэрогель и пирогель обладают схожей двухуровневой структурой и состоят из первичных сферических неоднородностей с практически гладкой поверхностью ($D_{\text{mathrmS1}} = 6 - n_1 \approx 2$) и характерными размерами $R_{c1} \approx 26$ и 29 Å , соответственно, из которых формируются объемно-фрактальные кластеры с размерностями $D_{V2} = 2.78$ и 2.59 и верхней граница самоподобия $R_{c2} \approx 155140 \text{ Å}$, соответственно. В тоже время, кремнеземный ксерогель состоит из крупномасштабных агрегатов ($R_c > 580 \text{ Å}$), обладающих развитой фрактальной поверхностью ($D_s = 2.78$) и содержащих в себе поры щелевидной формы с толщиной $T \approx 9 \text{ Å}$, шириной $W \approx 30 \text{ Å}$ и длиной $L \approx 80 \text{ Å}$.

Таким образом, несмотря на то, что пористая структура в пирогелях сохраняется чуть хуже, чем в аэрогелях, пирогелевые материалы обладают многообещающим потенциалом, поскольку для их получения не требуется дорогостоящая система сверхкритической сушки, и, в принципе, любая гелевая матрица, способная выдерживать нагрев до температуры горения полимера, может быть преобразована в высокопористый материал путем окислительного отжига любого полимера, заполняющего его поры и способного к полному сгоранию.

СТРУКТУРА ПРОВОДЯЩИХ КАНАЛОВ И ДИНАМИКА ПРОТОНОВ В ИОНООБМЕННЫХ МЕМБРАНАХ ИЗ ПЕРФТОРИРОВАННЫХ СОПОЛИМЕРОВ

В. Т. Лебедев^{1*}, Ю. В. Кульвелис¹, О. Н. Примаченко², А. В. Швидченко³, А. И. Куклин⁴

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

²Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт Петербург, Россия

³ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁴Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московской обл., Россия

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

Структура и динамические свойства перфторированных полимерных мембран, применяемых в водородных топливных элементах, в сухом и влажном состоянии изучены методами нейтронного малоуглового рассеяния и спинового эха [1]. В набухших в воде мембранах нейтронные данные выявили сеть ионных каналов диаметром ~ 1 -2 нм в виде разветвленных фрактальных структур размерностью ~ 2.2 -2.6. В них на пикосекундных временах ($t \leq 150$ пс) детектировали диффузию воды вместе с перескоками протонов между водными молекулами по Гротгусу и протонным обменом между SO_3H группами в боковых цепях макромолекул.

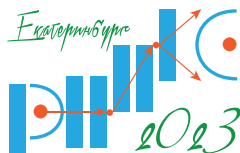
С целью стабилизации системы ионных каналов и усиления протонной проводимости в полимерные мембраны вводили детонационные наноалмазы размерами 4-5 нм с гидрофильной поверхностью, способные встраиваться в матрицу полимера и ассоциировать между собой, создавая каркасные структуры в виде гидрогеля с размером ячеек сетки ~ 40 нм.

Алмазное легирование мембран до концентраций $\leq 1\%$ масс. способствовало увеличению площади их внутренней проводящей поверхности, стимулируя протонную проводимость при нагревании мембран до 50°C [2,3]. Варьирование контраста между каналами и материалом полимера путем замены в каналах легкой воды на тяжелую позволило дифференцировать структурные данные для матрицы и каналов и определить закономерности формирования тех и других структур.

В итоге, достигнуты возможности регулирования структуры мембран посредством армирования алмазами, создающими гидрофильные границы раздела с полимером для миграции протонов, центры связывания ионных каналов, что служит целям получения новых мембранных материалов с повышенными функциональными свойствами.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-23-00129).

1. V. T. Lebedev, Yu. V. Kulvelis, S. S. Ivanchev, A. Ya. Vul, A. I. Kuklin, O. N. Primachenko, A. S. Odínokov. *Physica Scripta*. 95(4), 044008 (2020).
2. V.T. Lebedev, Yu. V.Kulvelis, Gy. Török, O.I. Ivankov, G. A. Polotskaya, L.V. Vinogradova, A.Ya. Vul, O.N. Primachenko, E.A. Marinenko, A.S. Odínokov. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 15(5), 939 (2021).
3. O. N. Primachenko, Yu. V. Kulvelis, A. S. Odínokov, N. V. Glebova, A. O. Krasnova, L. A. Antokolskiy, A. A. Nechitailov, A. V. Shvidchenko, I. V. Gofman, E. A. Marinenko, N. P. Yevlampieva, V. T. Lebedev, A. I. Kuklin. *Membranes*. 12(9), 827 (2022).



СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВНУТРЕННЕ-НЕУПОРЯДОЧЕННОГО БЕЛКА DSUP (DAMAGE SUPPRESSOR PROTEIN) И ЕГО КОМПЛЕКСА С ДНК

М. П. Зарубин¹, Т. Н. Муругова^{1*}, Ю. Л. Рижиков^{1,2}, О. И. Иванов¹, И. С. Охрименко²,
Ю. А. Загрядская², Е. В. Кравченко¹

¹Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия

²Московский Физико-Технический Институт, Долгопрудный, Россия

*E-mail: murugova@jinr.ru

Белок Dsup (damage suppressor) из тихоходки *Ramazzottius varieornatus* защищает ДНК от разрушительного действия активных форм кислорода, образующихся при радиационном и оксидативном стрессе [1-3]. В данной работе с помощью комбинации методов малоуглового рассеяния рентгеновских лучей, кругового дихроизма и биоинформатики была показана неупорядоченная природа белка Dsup. Также было продемонстрировано формирование комплекса между белком и ДНК, а также даны его структурные характеристики.

1. T. Hashimoto et al. Nat. Commun. 7, 12808 (2016).

2. C. Chavez, et al. Elife. 8, e47682, (2019).

3. I. Giovannini, I. et al. Rep. 12, 1938 (2022).

МОРФОЛОГИЯ И СТРУКТУРА ШИХТЫ ДЕТОНАЦИОННОГО НАНОАЛМАЗА, ДОПИРОВАННОЙ БОРОМ, ФОСФОРОМ И ЛИТИЕМ

О. А. Шилова^{1,2}, Г. П. Копица^{1,3}, Н. В. Цвигун^{4*}, Т. В. Хамова¹, Ю. Е. Горшкова⁵,
А. Е. Баранчиков⁶, В. Ю. Долматов⁷

¹Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

³Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ "Курчатовский институт", Гатчина, Россия

⁴ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

⁵Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская область, Россия

⁶Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия

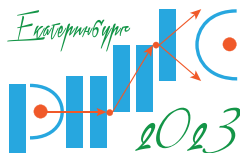
⁷СКТБ «Технолог», Санкт-Петербург, Россия

* E-mail: n_tsvigun@mail.ru

Детонационный наноалмаз, начиная с середины 20 века, не перестает быть объектом научных исследований, поскольку обладает рядом технически ценных свойств, а также биологической активностью, в том числе, фунгицидной. Однако его стоимость достаточно высока. Существенно дешевле в ряде случаев использовать шихту детонационного наноалмаза, промежуточный продукт, который получен в процессе взрыва, но не прошел все степени дорогостоящей очистки от графита и других примесей. Стоимость алмазной шихты в 3-5 раз меньше, чем стоимость очищенного наноалмаза (~ \$300 за 1 кг). В то же время именно шихта может представлять практический интерес, например, при синтезе композиционных материалов и покрытий. Она может найти применение в сельском хозяйстве в качестве недорогого реагента, обладающего полезными для растений свойствами. В этой связи, особый интерес представляет шихта детонационного наноалмаза, обогащенная полезными для растений элементами, например, бором, фосфором и литием. Такая шихта была синтезирована в СКТБ «Технолог» (Санкт-Петербург, Россия) [1]. В качестве заряда подрыва были использованы два варианта исходных веществ: традиционная смесь тротила и гексогена (50/50), а также тетрил. Допанты вводили во взрывчатое вещество в виде аморфного бора, трифенилфосфина и нитрата лития.

Алмазная шихта (АШ) имеет очень сложную структуру, поскольку содержит, как собственно детонационный наноалмаз, так и другие неалмазные формы углерода. Шихта, допированная бором, фосфором или литием имеет еще более сложный состав. Эти инновационные продукты до настоящего времени недостаточно изучены. В настоящей работе с использованием комплементарных методов малоуглового рассеяния нейтронов и рентгеновских лучей, сканирующей электронной микроскопии и низкотемпературной адсорбции азота проведено исследование микро- и мезоструктуры как исходных порошков шихты детонационного наноалмаза, полученных взрывом с использованием в качестве заряда подрыва смеси тротила с гексогеном (50/50) или тетрила, так и порошков АШ, допированных фосфором, аморфным бором и литием.

Комплексный анализ полученных данных показал, что образцы исходной шихты детонационного наноалмаза, полученные подрывом зарядов тротила с гексогеном и тетрила, представляют собой высокопористые системы, состоящие из частиц пластинчатой формы, обладающих так называемой «диффузной» поверхностью (показатель степени $n > 4$) и характерными размерами: толщиной ≈ 5 и 4 нм и шириной $W > 55$ и ≈ 10 нм, соответственно.



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

Образцы АШ, допированные фосфором, аморфным бором и литием также состоят из частиц пластинчатой формы, однако их структурные параметры, как характерные размеры (толщина и ширина W), так и локальная структура границы раздела фаз (твердая фаза – пора) существенным образом зависят от природы заряда, используемого для подрыва. Так, при использовании традиционной смеси тротила с гексогеном порошки АШ состоят из частиц с поверхностью, близкой к гладкой ($n = 4$), а в случае применения тетрила частицы АШ обладают «диффузной» поверхностью.

Также установлено, что исходная АШ, полученная из смеси тротила с гексогеном обладает большим удельным объемом пор $V_{уд}$ (1.23 vs. 1.12 см³/г) и в 1.5 раза большей удельной площадью поверхности $S_{уд}$ (271 vs. 165 м²/г). Данное соотношение текстурных параметров наблюдается и для допированных образцов шихты детонационного наноалмаза.

1. В.Ю. Долматов, А.Н. Озерин, И.И. Кулакова, А.А. Бочечка, Н.М. Лапчук, V. Myllymäki, A. Vehanen. Успехи химии, 89(12), 1428 (2020).

Секция 6.

Поверхности, тонкие пленки и многослойные структуры

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ И МАГНЕТИЗМА
В ДВУМЕРНЫХ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ МЕТОДОМ
РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ**

В. Д. Жакетов^{1*}, Д. И. Девятериков², М. М. Авдеев^{1,3}, Н. Г. Пугач⁴, Е. А. Кравцов^{2,5},
Ю. В. Никитенко¹, В. Л. Аксёнов¹

¹Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

³Московский государственный университет, Москва, Россия

⁴НИУ «Высшая школа экономики», Москва, Россия

⁵Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

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

В настоящее время активно исследуются эффекты близости на границе раздела двух сред. Особый интерес представляют двумерные низкоразмерные структуры со сверхпроводящими (S) и ферромагнитными (F) свойствами, в которых реализуется взаимодействие двух антагонистичных друг другу параметров порядка [1]. Перспективными системами для изучения эффектов близости являются S/F-гетероструктуры из ниобия и редкоземельных (RE) металлов [2]. В первую очередь отмечается высокая прозрачность границы раздела S/F для таких систем RE/Nb, как Gd/Nb, что упрощает проникновение сверхпроводящих корреляций в F-слои. Во-вторых, редкоземельные металлы характеризуются низкими значениями точки Кюри, что сближает энергии обоих взаимодействий и облегчает реализацию эффектов близости. В докладе приводятся результаты исследования электромагнитного эффекта близости в трёхслойных структурах Nb(100 нм)/Gd(d_f)/V(70 нм). Обнаружено изменение магнитной структуры под влиянием сверхпроводимости на уровне 4-10 %, что, по-видимому, обусловлено электромагнитным эффектом близости [3]. Эффект наблюдался в подслоях сверхпроводников (Nb и V) толщиной примерно 10 нм.

С другой стороны, некоторые редкоземельные элементы, такие как Dy и Ho, являются редкоземельными антиферромагнетиками с геликоидальной структурой [4], позволяющей генерировать дальнodelствующую триплетную сверхпроводимость.

Для слоистой гетероструктуры Al₂O₃/Nb(40 нм)/[Dy(6 нм)/Ho(6 нм)]₃₄/Nb(10 нм) получено, что при температуре ниже сверхпроводящего перехода магнитное состояние гелимагнетика подстраивалось под сверхпроводимость. Характерная глубина проникновения сверхпроводящих корреляций в гелимагнетик соответствовала примерно 30 периодам геликоида. Изготовлены структуры-сверхрешётки с чередующимися F и S слоями: Al₂O₃/[Nb(25 нм)/RE(d_f)]_x12/Nb(5 нм), где RE = Dy, Ho, d_f = 2, 4, 6 нм, таким образом изготовлены структуры с толщиной магнитных слоев как меньше, так и больше периода магнитного геликоида $d_h \sim 3 - 4$ нм. Толщины слоёв отличались не более чем на 5 % относительно номинального значения, среднеквадратичная амплитуда шероховатостей составила не более 1.5 нм, межслойные границы были охарактеризованы как границы с высокой степенью гладкости. Магнитометрические измерения показали, что при почти нулевом приложенном магнитном поле виден сильный рост магнитного отклика, связанный с действием сверхпроводимости.

1. V. D. Zhaketov et al. JETP, 129, 2, 258-276 (2019).

2. Yu. N. Khaydukov et al. PRB 99, 140503(R) (2019).

3. S. Mironov et al. Applied physics letters 113, 022601 (2018).

4. D.I. Devyaterikov et al. Journal of Surface Investigation, 16, 5, 839-842 (2022).

**МЕЗОСТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ГРАНУЛИРОВАННОЙ
ПЛЕНКИ $\text{SiO}_2\text{-Co}$ НА КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ**

Н. А. Григорьева^{1}, А. А. Воробьев², В. Уклеев³, С. В. Григорьев⁴*

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

²Department of Physics and Astronomy, Uppsala University, Uppsala, Sweden

³Laboratory for Neutron Scattering and Imaging, Paul Scherrer Institute, CH-5232 Villigen, Switzerland

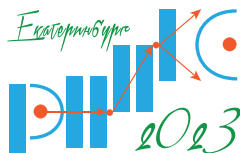
⁴Петербургский Институт Ядерной Физики им. Б.П. Константинова НИЦ «КИ», г. Гатчина, Россия

* E-mail: n.a.grigorieva@yandex.ru

Гранулированные пленки $\text{SiO}_2(\text{Co})$ обладают необычными магнитными и магнито-транспортными свойствами, которые сильно зависят от состава пленки и материала подложки. Например, коэффициент инжекционного магнитосопротивления (IMR) достигает гигантского (GIMR) значения 105 % при комнатной температуре в пленках $\text{SiO}_2(\text{Co})$ на подложке n-GaAs. Однако в случае аналогичной гранулированной пленки, нанесенной на подложку n-Si, эффект IMR пренебрежимо мал.

В работе исследованы структурные и магнитные свойства пленок SiO_2 (x ат.% Co) при 54 ат.% < x < 82 ат.%), осажденных на подложку Si. Исследования проводились с использованием дополняющих друг друга методов - рефлектометрия поляризованных нейтронов, малоугловое рассеяние рентгеновского излучения в скользящей геометрии, рентгеновская рефлектометрия, сканирующая электронная микроскопия и СКВИД-магнитометрия.

Установлена причина резкого различия коэффициентов IMR для гетероструктур SiO_2 (x ат.% Co), осажденных на подложки GaAs или Si. Несмотря на то, что обе гранулированные пленки имеют очень близкие значения толщины, расстояний между частицами кобальта и намагниченности, а также обе гетероструктуры имеют дополнительный слой на границе гранулированная пленка/подложка с частицами Co большего размера, для (x ат.% Co)/Si имеется различие в морфологии интерфейса пленка/подложка. На границе гранулированная пленка/подложка Si происходит граничная межслоевая диффузия атомов Si в Co, приводящая к образованию границы раздела переменного бинарного состава - силицидов кобальта. Образование силицида кобальта на границе пленка/Si приводит к тому, что проводимость гранулированной пленки определяется движением электронов по цепочкам «ферромагнитная гранула (Co) - металл (Co-Si) - полупроводник (Si)», а не туннелирование электронов между ферромагнитными гранулами через диэлектрическую матрицу SiO_2 в полупроводник Si, как было описано в [1,2]. Авторы связывают большую величину GIMR - эффекта в SiO_2 (x ат.% Co) на подложке GaAs со спин-зависимым потенциальным барьером, формируемым в слое накопления электронов в полупроводнике вблизи интерфейса. Действие спин-зависимого потенциального барьера усиливается лавинным процессом и накоплением электронов в квантовой яме в области интерфейса полупроводника, индуцированным процессом обратного рассеяния инжектированных электронов на обменно-расщепленных уровнях. В гранулированной пленке SiO_2 (x ат.% Co) на подложке Si силицид кобальта не позволяет сформировать область на границе пленка/Si, насыщенную электронами, способными поляризоваться в направлении приложенного магнитного поля. Поэтому для получения высокого положительного магнитосопротивления в гетероструктуре SiO_2 (x



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

● → ● → ● → Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

ат. % Co)/Si необходимы дальнейшие усилия по формированию квантовой ямы на поверхности Si с обменно-расщепленными уровнями на ее вершине. Например, этого можно добиться введением буферного слоя между гранулированной пленкой и подложкой [3,4].

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках договора № 075-15-2022-830 (Продление договора № 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021 г.).

1. Lutsev L.V., Stognij A.I., Novitskii N.N., Phys. Rev. B 80, 184423 (2009).
2. Lutsev L., Magnetoresistance: Types, Roles and Research; Gonzalez, R., Ed.; Nova Science Publishers, Incorporated: New York, (2017).
3. Fan Z., Li P., Zhang L., et al., Thin Solid Films 520, 3641 (2012).
4. Volkov N., Tarasov A., et al. J. Appl. Phys. 114, 093903 (2013).

ВОЗМОЖНОСТИ НЕЙТРОННОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ В СТРУКТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ГИБРИДНЫХ ПЕРОВСКИТОВ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

М. В. Авдеев^{1*}, Т. В. Тропин¹, М. Ердаулетов^{1,2,3}, В. В. Садилов¹, Т. Ю. Зеленьяк¹,
В. В. Кригер^{1,4}

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна МО, Россия

²Институт ядерной физики, Министерство энергетики Республики Казахстан, Алматы, Казахстан

³Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

⁴Государственный университет «Дубна», Дубна МО, Россия

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

В настоящее время большой интерес представляют нанокompозитные перовскитные материалы для фотовольтаики благодаря сравнительно простому и эргономичному процессу их изготовления в сочетании с возможностью тонкой регуляции электронных свойств. Наряду с оптимизацией материалов для многослойных структур с целью улучшения характеристик конечных солнечных элементов, также остро стоит вопрос обеспечения структурной устойчивости их компонент в условиях повышенных температуры и влажности. Последнее ограничивает реализацию такого рода материалов в промышленных масштабах. В этой связи, важными являются структурные исследования, в том числе на основе методов рассеяния нейтронов. Настоящий доклад призван охарактеризовать возможности нейтронной рефлектометрии в исследованиях данных перспективных систем.

В докладе представлены результаты исследования перовскитных пленок для фотовольтаики, приготовленных с помощью двухстадийного синтеза из растворов на стеклянных и кремниевых подложках методом вращающейся подложки. Изучались составы на основе йодоплюмбат метиламмония и йодоплюмбата с формамидинием. Диапазон толщин изготовленных пленок в зависимости от концентрации растворов и скорости вращения подложки составил 10 – 200 нм. Проведена структурная характеристика пленок, включая: рентгеновскую дифракцию, рентгеновскую рефлектометрию, растровую электронную микроскопию, атомно-силовую микроскопию, ИК-спектроскопию, УФ-Вид спектроскопию, фотолюминесценцию.

Для проведения экспериментов *in situ* по нейтронной рефлектометрии зеркального отражения для изучения границы раздела пленки и подложки разработаны специализированные ячейки, которые позволяют проводить эксперименты с внешним контролем в диапазоне 40-99 % по влажности и диапазоне 20-150 °С по температуре. Рассмотрена экспериментальная возможность вариации контраста в модифицированной структуре «подложка/оксидированный металлический слой/перовскит» на основе для гибридных перовскитных материалов с использованием регулирующих слоев оксидов металлов (титан, медь). Для варьирования металлического слоя предложено использовать смешанную систему титана и никеля с различным соотношением компонент, поверх которой напыляется слой титана и осуществляется его оксидирование. Пленка перовскита осаждается на металлическую поверхность. Выбирая плотность «несущего» металлического слоя, можно регулировать чувствительность рефлектометрического эксперимента к образованию на границе с оксидом титана паразитного слоя PbI_2 при деградации перовскитной пленки в результате нагрева и влияния влажности.

Работа выполнена при финансировании РНФ [грант №22-22-00281].

ЗАКОНОМЕРНОСТИ И МЕХАНИЗМЫ МОДИФИКАЦИИ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ПЛЁНОК ТИПА FeMn/FM ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ

А. А. Быкова^{1*}, А. Н. Горьковенко¹, Н. А. Кулеш¹, В. Н. Лепаловский¹, М. Е. Москалев¹,
В. О. Васьковский^{1,2}

¹Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

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

*E-mail: nastyabykova@gmail.com

В последние десятилетия в физике магнитных явлений большое внимание уделяется тонкопленочным структурам, содержащим обменно-связанные ферромагнитные и антиферромагнитные слои, которые обладают однонаправленной анизотропией (обменным смещением) [1]. В этом контексте значительный интерес представляет использование магнитострикционных ферромагнитных слоев, например, Ni, магнитоупругие свойства которых расширяют возможности варьирования функциональных параметров плёночной среды в целом [2]. В данной работе выполнено сравнительное исследование закономерностей формирования гистерезисных свойств и магнитной анизотропии в «свободных» и обменно-связанных пленках Ni, полученных магнетронным распылением и подвергнутых термомагнитной обработке.

Эксперимент выполнен на плёночных образцах двух типов: glass/Ni/Ta и glass/Ta/Fe₂₀Ni₈₀/FeMn/Ni/Ta. Они были получены на покровных стёклах Corning методом магнетронного напыления, реализованном на установке Orion – 8 в присутствии однородного магнитного поля (технологическое поле). Подложками служили покровные стёкла Corning. Толщина слоёв Ni во всех образцах составляла 40 нм. Слои Ta и FeMn имели толщину 5 и 20 нм соответственно. Структурная аттестация плёнок проводилась с применением рентгеновского дифрактометра Bruker-D8. Элементный состав и его толщинный профиль определялись с помощью флуоресцентного спектрометра Nanohunter. Магнитная аттестация плёнок проводилась на вибромагнитометре Lakeshore 7407. При этом измерялись петли гистерезиса в магнитном поле, ориентированном в плоскости плёнок под различными углами по отношению к оси приложения технологического поля. Термомагнитная обработка состояла в накапливающемся отжиге плёнок в магнитном поле при последовательном увеличении температуры в интервале 200-400 °C и выдержке при каждой температуре в течение 1 часа.

Полученные результаты показывают, что в исходном состоянии «свободные» плёнки Ni характеризуются относительно сложной угловой зависимостью гистерезисных свойств (рисунок 1,а), которая, по-видимому, отражает суперпозицию структурного и магнитоупругого источников магнитной анизотропии. В процессе термомагнитной обработки на фоне общего роста коэрцитивной силы происходит изменение их роли, что приводит к своеобразной трансформации анизотропии коэрцитивной силы. Встраивание слоя Ni в структуру типа ферромагнетик/антиферромагнетик радикально изменяет закономерности его перемагничивания. Обменная связь с FeMn оказывается преобладающей. Она подавляет собственную анизотропию Ni и формирует так называемую однонаправленную анизотропию (рисунок 1,б). Эта анизотропия сохраняется во всём интервале температур отжига, но становится менее выраженной при увеличении $T_{\text{отжига}}$. Последнее связывается с изменением межслойного интерфейса за счёт атомной диффузии, которая зафиксирована непосредственно с помощью рентгенофлуоресцентно-

го анализа. В работе содержится подробное количественное описание наблюдаемых закономерностей и дана их качественная интерпретация.

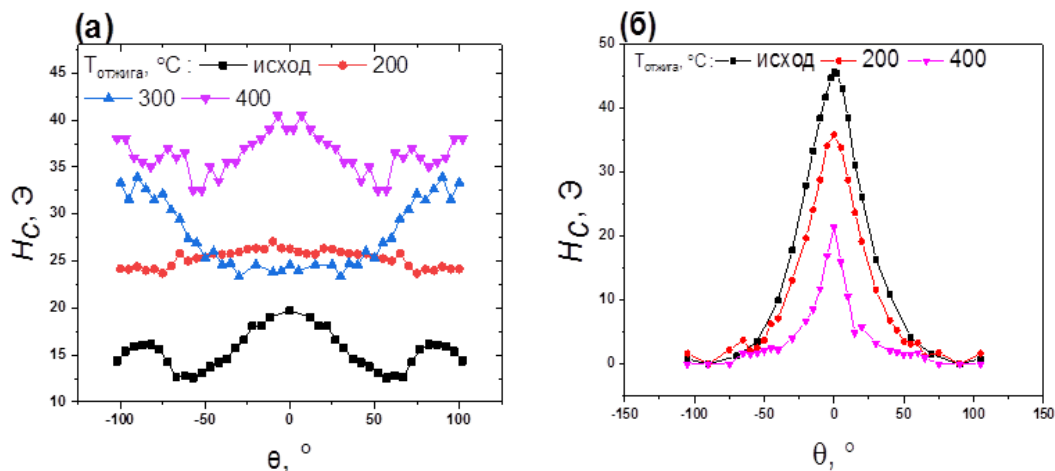


Рис. 1. Угловые зависимости коэрцитивной силы пленок glass/Ni/Ta (а) и Ta/Fe₂₀Ni₈₀/Fe₅₀Mn₅₀/Ni/Ta (б), реализующиеся после термомангнитной обработки при различных температурах $T_{\text{отжига}}$. Значение $\theta = 0$ соответствует ориентации премагнитического поля вдоль оси технологического поля

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Программы развития УрФУ «Приоритет-2030».

1. R.L. Stamps, J. Phys. 33, 247 (2000).
2. Ha K., R. C. O'Handley, Journal of applied physics. 85, 5282 (1999).

**РЕАЛИЗАЦИЯ АНТИФЕРРОМАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ В ПЛЁНКАХ
РЯДА СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ Mn И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СРЕДАХ С ОБМЕННЫМ СМЕЩЕНИЕМ**

В. О. Васьковский^{1,2*}, В. Н. Лепаловский¹, А. Н. Горьковенко¹, М. Е. Москалёв¹,
А. А. Феценко¹, А. А. Быкова¹

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

²Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*E-mail: vladimir.vaskovskiy@urfu.ru

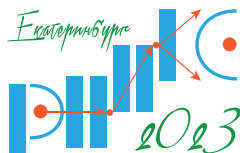
Активное развитие относительно нового научно-технического направления, коротко именуемое как спинтроника, а также стимулированное им совершенствование сред в сфере традиционной магнитной сенсорики существенно повысили интерес к магнитоупорядоченным веществам, не несущим спонтанной намагниченности – антиферромагнетикам. При этом наибольшее внимание, естественно, уделяется антиферромагнетикам, температура Нееля которых превышает комнатную температуру.

Среди них значительное место занимают сплавы на основе Mn. В частности, в устройствах спинтроники достаточно широкое применение нашли плёнки Ir-Mn, высокие функциональные свойства также демонстрируют плёночные среды Pt-Mn и Pd-Mn. Однако во всех этих случаях в состав сплавов кроме Mn входят редкие и дорогостоящие элементы. Настоящий доклад содержит обзор результатов, полученных в последнее время авторами при изучении плёнок альтернативных систем. К ним относятся сплавы Fe-Mn, Ni-Mn, Cr-Mn, которые в объёмном варианте также характеризуются высокими значениями температуры Нееля. Однако переход к тонкоплёночному состоянию и встраивание антиферромагнитных элементов в многослойную наноструктуру с оптимальными функциональными свойствами не являются простыми. Пути и результаты решения соответствующих физико-технологических задач в рамках метода магнетронного распыления обсуждаются в данном докладе.

Эквивалентный сплав FeMn демонстрирует антиферромагнитное упорядочение в ГЦК-модификации кристаллической решетки, которая при комнатной температуре не является равновесной.

Показано, что для реализации устойчивого метастабильного состояния (ГЦК-решётки), образования кристаллической текстуры и однородной микроструктуры необходимо использование комбинированных буферных слоёв типа Ta/Fe₂₀Ni₈₀, а в процессе формирования плёнок целесообразно применять высокочастотное электрическое смещение подложки [1]. На примере анализа зависимости поля обменного смещения от толщины антиферромагнитного слоя в плёнках типа FeMn/Fe₂₀Ni₈₀ продемонстрирована возможность определения температурной зависимости константы магнитной анизотропии антиферромагнетика.

В сплаве Ni-Mn высокотемпературный антиферромагнетизм свойственен двум структурным модификациям: неупорядоченной фазе с ГЦК решёткой (γ-Ni-Mn) и упорядоченной фазе с тетрагональной решёткой (θ-Ni-Mn), которые в плёночном состоянии характеризуются температурами Нееля 450 К и 650 К соответственно. Установлены условия образования указанных фаз, среди которых наличие подходящего буферного покрытия и регламентированная термомагнитная обработка [2].



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

→ → → → Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

В сплаве Cr-Mn антиферромагнетизм связан с ОЦК кристаллической решёткой, образование которой при переходе к плёночному состоянию происходит естественным путём, а кристаллическая текстура варьируется за счёт применения различных буферных покрытий [3]. В то же время найдено, что эффект обменного смещения, реализуемый на основе данного антиферромагнетика в плёнках типа Cr-Mn/Fe₂₀Ni₈₀O весьма чувствителен к состоянию микроструктуры. Представляется, что это является следствием низкой константы кристаллической анизотропии, а обеспечение достаточной стабильности температурной свойств плёночных композитов нужно искать на пути увеличения размеров антиферромагнитных кристаллитов и модификации межслойного интерфейса.

1. A.A. Yuvchenko et al. IEEE Tr.Magn. 51. -2015.51, 2500304 (2015).
2. V.O. Vas'kovskiy et al. J. of Alloys and Compounds. 777, 264 (2019).
3. В.О. Васьковский и др. ЖТФ. 5, 679 (2023).

КАНАЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОНОВ В МАГНИТНОМ ПЛОСКОМ ВОЛНОВОДЕ

*С. В. Кожевников**

ЛНФ им. И.М. Франка, ОИЯИ, Дубна, Россия

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

При изучении локально-неоднородных структур пространственное разрешение определяется шириной нейтронного пучка, которая в обычном эксперименте составляет от 0.1 до 10 мм. Для исследования микроструктур требуются узкие микропучки нейтронов шириной менее 100 мкм. Для этой цели на протяжении многих лет разрабатываются различные фокусирующие устройства (преломляющие линзы, изогнутые кристаллы-монокроматоры, капиллярные линзы и др.). Но все они имеют ограничения, связанные с физическими свойствами используемых материалов или технологией их обработки. Основные недостатки – это большой фон и предельная минимальная ширина пучка 30 мкм. Нейтронные волноводы на основе трёхслойных наноструктур позволяют получить рекордно узкие пучки нейтронов шириной около 1 мкм при относительно низком фоне [1]. Недостатком нейтронных микропучков из волновода является их низкая интенсивность порядка 10 н/с и относительно высокая угловая расходимость порядка 0.1° .

В слоистых волноводах одновременно наблюдается два явления – резонансное усиление нейтронного волнового поля [2] и каналирование нейтронов [3]. Каналирование нейтронов применяется для формирования нейтронных микропучков и отделения полезного сигнала в резонансах от фона. Резонансные свойства используются для усиления слабого взаимодействия нейтронов с веществом. При этом коэффициент усиления нейтронной плотности внутри волновода зависит от его структуры, в частности, от глубины потенциальной ямы Плотности Длины Рассеяния (ПДР) нейтронов. В [4] предложена идея использовать нейтронный волновод с внешними магнитными слоями для создания миниатюрной атомной электростанции. В таком волноводе глубина потенциальной ямы ПДР зависит от величины намагниченности внешних магнитных слоёв, что позволяет регулировать плотность нейтронного волнового поля внутри волновода. В связи с этим исследование магнитных волноводов представляется нам актуальной задачей.

В нашей предыдущей работе [5] глубина потенциальной ямы изменялась с помощью использования различных материалов с разной величиной ядерной части ПДР. В настоящей работе изучался трёхслойный волновод $\text{Ru}(20 \text{ нм})/\text{Cu}(140)/\text{Ru}(20)/\text{стекло}$ с размерами $30 \times 30 \times 5 \text{ мм}^3$ с внешними слоями из материала пермаллой (Ru), который является магнитным сплавом Fe (20.6 % ат.)Ni (79.4 % ат.) с намагниченностью насыщения M_s около 10 кГс. Измерялась длина каналирования нейтронов в зависимости от величины намагниченности слоёв пермаллоя. На рис. 1а показана геометрия эксперимента. Пучок нейтронов I_0 с длиной волны $4.26 \text{ \AA}$ падает на поверхность волновода под малым углом скольжения α_i . На поверхности волновода с некоторым воздушным зазором лежит брусок размером $1 \times 1 \times 35 \text{ мм}^3$ из поглощающего нейтроны материала боралей (алюминий с карбидом бора). Нейтроны каналируют в среднем слое под неосвещённой поверхностью длиной x и выходят из торца волновода в виде расходящегося микропучка. Из зависимости нормированной интенсивности микропучка $I(x)/I(x=0) = \exp((-x)/x_e)$ определяется длина каналирования нейтронов x_e . В эксперименте с помощью микрометрического винта контролируется расстояние L от выхода волновода до переднего края поглотителя и регистрируется интенсивность микропучка $I(L)$. Для нормировки измеряется интенсивность микропучка при полностью освещённой поверхности $I(x=0)$. Методика измерений описана в работе [6].

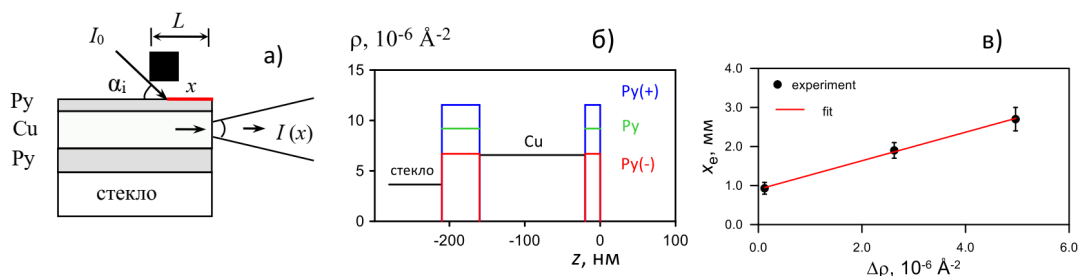


Рис. 1. а) Геометрия эксперимента; б) ПДР волноводной структуры; в) длина каналирования нейтронов в зависимости от глубины потенциальной ямы ПДР

На рис. 16 показана ПДР волновода в зависимости от координаты z в перпендикулярном слоям направлении. Для изменения ПДР пермаллоя использовались нейтроны с поляризацией «+» и «-» с приложенным внешним магнитным полем (намагниченный до насыщения M_s образец) и режим неполяризованного пучка без внешнего магнитного поля на образце (размагниченный образец). Тогда ПДР нейтронов для пермаллоя равна $\rho_1 = \rho_N + \text{const} \cdot M_s$ для поляризации «+», $\rho_1 = \rho_N - \text{const} \cdot M_s$ для поляризации «-» и $\rho_1 = \rho_N$ для немагнитного образца $M = 0$ и неполяризованного пучка. Здесь ρ_N – ядерная часть ПДР нейтронов для пермаллоя.

Измерения проведены на нейтронном рефлектометре NREX с горизонтальной плоскостью образца [7]. В эксперименте регистрировалась интенсивность микропучка нейтронов резонанса порядка $n = 0$. На рис. 1в приведена длина каналирования нейтронов в зависимости от глубины потенциальной ямы ПДР $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$, где ρ_1 – ПДР внешних слоев (пермаллой) и ρ_2 – ПДР волноводного канала (медь). Можно видеть, что длина каналирования нейтронов увеличивается линейно с ростом глубины потенциальной ямы ПДР. Экспериментальные результаты качественно подтверждают результаты работы [5] и расчёты [3].

Таким образом, в работе экспериментально подтверждено предсказание теории, что длина каналирования нейтронов растёт с ростом величины намагниченности внешних слоёв волновода. В [4] предлагается магнитный волновод с ураном внутри волноводного слоя использовать для создания миниатюрной атомной электростанции. В таком волноводе с помощью приложенного магнитного поля можно менять намагниченность внешних слоёв и как следствие плотность нейтронного волнового поля внутри волновода. В нашей работе экспериментально показано, что при этом изменяется расстояние, на котором происходит экспоненциальное затухание плотности нейтронного волнового поля. Мы надеемся, что полученные результаты будут полезны при дальнейших исследованиях магнитных волноводов.

Автор благодарит Ю.Н. Хайдукова и Т. Келлера за помощь в проведении экспериментов на рефлектометре нейтронов NREX на ректоре FRM-II (MLZ, Garching, Germany).

1. F. Pfeiffer, V. Leiner, P. Høghøj, I. Anderson, Phys. Rev. Lett. 88, 055507 (2002).
2. Ю.В. Никитенко, ЭЧАЯ 40, 1682 (2009).
3. С.В. Кожевников, ЭЧАЯ 50, 284 (2019).
4. S.P. Pogossian, J. Appl. Phys. 102, 104501 (2007).
5. С.В. Кожевников и др., ЖЭТФ 153, 712 (2018).
6. S.V. Kozhevnikov et al., Nucl. Instr. and Meth. A 875, 177 (2017).
7. Yu. Khaydukov et al., Journal of Large-Scale Research Facilities 1, A38 (2015).

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСА ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЁНОК ТИПА Cr-Mn/Fe-N

А. А. Фещенко^{1*}, М. Е. Москалев¹, С. В. Северова¹, А. Н. Горьковенко¹,
В. Н. Лепаловский¹, Н. В. Селезнева¹, В. О. Васьковский^{1,2}

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

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

*E-mail: a.a.feshchenko@urfu.ru

Тонкопленочные магнитные материалы являются основой устройств высокоплотной записи памяти и многих датчиков [1]. В качестве функциональных сред применяют слоистые структуры типа ферромагнетик/антиферромагнетик, в которых антиферромагнитные слои обеспечивают закрепление магнитного момента в прилежащем слое ферромагнетика. Для эффективного использования таких материалов в магнитомикроэлектронике антиферромагнетики должны быть способны за счёт реализации эффективной обменной связи с ферромагнетиком индуцировать в последнем эффект обменного смещения, заключающийся в сдвиге его петли гистерезиса, а также обладать высокой температурой блокировки, при которой данный эффект исчезает [2]. Помимо этого – обладать хорошей коррозионной стойкостью и высоким удельным электросопротивлением. К числу перспективных с данной точки зрения антиферромагнетиков относится бинарный сплав Cr-Mn, обладающий достаточно высокой температурой Нееля, значения которой по разным данным для массивных сплавов колеблются от 500 К до 800 К [3]. В литературе, однако, имеется достаточно мало сведений о свойствах данного сплава в тонкопленочном варианте. Данная работа преследует цель восполнить этот недостаток и представляет исследования комплекса физических факторов на гистерезисные и структурные свойства сплава CrMn на примере системы Cr-Mn/Fe-Ni.

Исследуемые образцы представляли собой серии тонких пленок с общей конфигурацией стекло/Ta(5нм)/Cr_{100-x}Mn_x(Lнм)/Fe₂₀Ni₈₀(10нм)/Ta(5нм), полученные методом магнетронного распыления однокомпонентных мишеней Ta, Cr, Mn и сплавной мишени Fe₂₀Ni₈₀ на покровные стекла Corning. В процессе получения пленок изменялась температура нагрева подложки от $17 \leq t_n \leq 500$ °C, варьировался состав слоя Cr_{100-x}Mn_x в пределах от $20 \leq x \leq 40$ ат.%, Mn, и толщина антиферромагнитного слоя в пределах $20 \leq L \leq 500$ нм. Для исследования магнитных свойств пленок использовались Керр-магнитометр EvicoMagnetics, измерительный комплекс PPMS DynaCool 9T производства Quantum Design, вибромагнитометр LakeShore Cryotronics 7407. Для аттестации структурного состояния плёнок использовались рентгеновские дифрактометры PANalytical Empyrean series 2 и BRUKER D8 ADVANCE.

В результате проведённых экспериментов были получены зависимости коэрцитивной силы и поля обменного смещения петель гистерезиса ферромагнитного слоя Fe₂₀Ni₈₀ от толщины и температуры нагрева подложки. Их анализ позволяет утверждать, что в системе Cr-Mn реализуется антиферромагнитное упорядочения в диапазоне составов $20 \leq x \leq 40$ ат.%, Mn вне зависимости от исследуемых параметров L и t_n . Обменное смещение в данной системе наблюдается только при толщинах слоя Cr_{100-x}Mn_x выше 40 нм. Вероятно, это может быть следствием низкой магнитной анизотропии данного материала, и может отражать толщинную зависимость среднего размера антиферромагнитных кристаллитов.



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

• → • → • → Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

Работа представляет собой систематическое исследование структурных и магнитных свойств пленок типа CrMn/FeNi в условиях варьирования комплекса физических факторов. В докладе обсуждаются возможные пути повышения данных функциональных параметров, в том числе и за счёт увеличения среднего размера кристаллитов в слое Cr-Mn, путем изменения технических параметров в процессе получения пленок.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант №22-22-00814.

1. K. O'Grady et al. J. Appl. Phys, 128, № 4, 40901 (2020).
2. S. Soeya, H. Hoshiya, et al. Journal of applied physics, 81, №. 9, 6488-6490 (1997).
3. S. Maki, K. Adachi. Journal of the Physical Society of Japan, 46, 1131-1137 (1979).

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ, МАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОННЫХ
СВОЙСТВ СИСТЕМ Fe/MgO/Gd**

Е. А. Кравцов^{1,2}, Д. И. Девятериков¹, В. В. Проглядо¹, Е. М. Якунина^{1}, А. И. Кухаренко³,
С. О. Чолах³, Э. З. Курмаев^{1,3}*

¹Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, Россия

³Физико-технический институт Уральского федерального университета, Екатеринбург, Россия

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

С развитием спинтроники, исследования магнитного поведения, формирующегося в металлических многослойных наноструктурах, в результате добавления слоев MgO становится особенно важными, поскольку их взаимодействие с атомами металлов создает сложные эффекты, влияющие на формирование магнитных свойств всей структуры [1,2]. Как показали наши недавние исследования [3,4], процессами перемагничивания в ферромагнитных слоях можно управлять, помещая слои MgO между металлическими слоями [5,6], а также изменяя их толщину. Можно ожидать, что расположение MgO относительно различных типов металлических слоев, а также их толщина будут определять сложные магнитные конфигурации в таких наноструктурах.

Гадолиний (Gd) является одним из наиболее привлекательных материалов для различного рода исследований, благодаря его уникальным магнитным и электрическим свойствам. В нескольких исследованиях упоминалось, что намагниченность на поверхности Gd антиферромагнитно связана с объемной намагниченностью. Кроме того, Gd известен как материал, который демонстрирует большое спин-орбитальное расщепление Рашбы на поверхности. Поскольку вклады интерфейса в туннельное магнитосопротивление (ТМС) значительно сильнее, чем вклады в объеме, определение характеристик ТМС является одним из наиболее эффективных методов исследования границы раздела магнитных материалов.

Наноструктуры на основе Fe/MgO/Gd – это новая система, в которой межслойная связь магнитных моментов Fe обеспечивается посредством чередования тонких слоев диэлектриков, металлов и редкоземельных металлов. В настоящий момент, наноструктуры подобного типа изучены слабо. Существует всего несколько публикаций по исследованию систем Gd/MgO/Fe [7,8]. На данный момент неизвестно, как магнитные моменты Fe будут взаимодействовать через тонкую прослойку MgO и слои редкоземельного металла Gd, а также какие эффекты могут быть сформированы в результате. Настоящие исследования направлены на создание и поэтапный анализ структурных и магнитных свойств систем Gd/MgO/Fe с целью будущего, более детального понимания формирования микроскопической картины процессов перемагничивания в системах Fe/MgO/Gd в зависимости от свойств разделяющих слоев Gd и MgO.

В настоящей работе были исследованы комплексные структурные и магнитные свойства серии многослойных систем Nb(200 Å)/Fe(10 Å)/MgO(t Å)/Gd(10 Å)/Nb(30 v) с различной толщиной слоев диэлектрика MgO (t = 0, 4, 8 и 12 Å). Свойства наносистем и структуры межслойных границ были определены с помощью рентгеновской рефлектометрии и дифракции высокого разрешения. Толщину слоев и среднеквадратичную шероховатость границы раздела определяли методом рефлектометрии. На рисунке 1

представлены результаты рефлектометрических исследований наноструктур и результаты их обработки. В дополнение к структурной характеристике и магнитометрических измерений был проведён ряд экспериментов по исследованию электронных свойств систем. С помощью методов рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) исследована межфазная миграция кислорода в наногетероструктурах. На основании измерений спектров РФЭС с высоким энергетическим разрешением и их сравнения со спектрами эталонных образцов сделан вывод о том, что независимо от взаимного положения и толщины барьерного оксидного слоя по отношению к металлическим слоям разных типов наблюдается преимущественное окисление гадолиния и следы окисления железа.

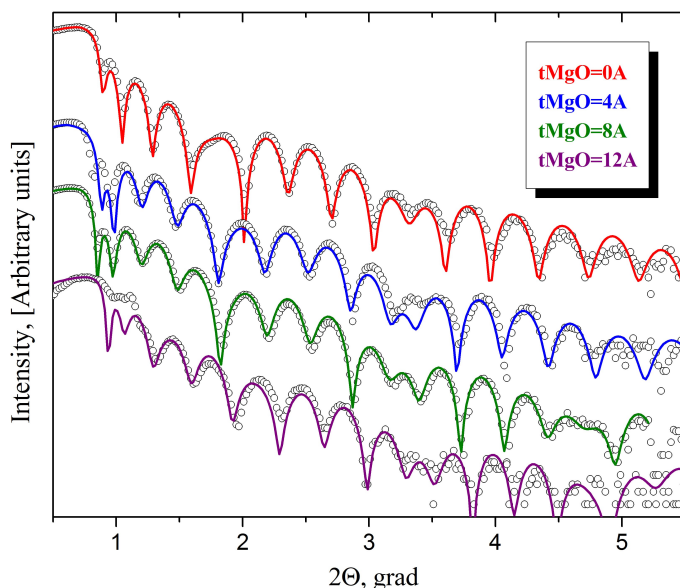


Рис. 1. Экспериментальные рентгеновские рефлектограммы и модельные кривые для образцов с толщинами слоёв MgO 0, 4, 8 и 12 Å соответственно

Результаты получены при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования, соглашение №075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г. (внутренний номер 15.СИН.21.0021). Рентгеновские измерения выполнены в Центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Спин» № 122021000036-3).

1. F. Hellman, A. Hoffmann, Ya. Tserkovnyak et al. Reviews of Modern Physics, 89, 025006 (2017).
2. G.-H. Yu, W.-L. Peng, J.-Ya. Zhang. Rare Metals, 36, 155–167 (2017)
3. Е. М. Якунина, Е. А. Кравцов, Ю. Н. Хайдуков и др. Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования, № 8, 16-22 (2021).
4. Е. М. Якунина, Е. А. Кравцов, Ю. Н. Хайдуков и др. Физика твердого тела, № 9, С. 1306 (2021).
5. Yanga G., Zhang J.-Y., Jiang S.-L. et al. Applied Surface Science, 396, 705–710 (2017).
6. A. Koziol-Rachwał, W. Janus, M. Szytka et al. Applied Physics Letters, 115, 141603 (2019).
7. Y. T. Takahashi, Y. Shiota, S. Miwa et al. IEEE Transactions on Magnetics, 49, 4417 - 4420 (2013).
8. N. Funabashia, R. Higashida, K. Aoshima and K. Machida. AIP Advances, 9, 035336 (2019).

Секция 7.

**Прикладные исследования (энергетика,
окружающая среда, геофизика, культур-
ное наследие)**

ИЗМЕРЕНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ РАКОВИН ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ

Т. А. Лычагина, Д. И. Николаев*, А. В. Пахневич

Объединенный институт ядерных исследований, Московская область, Дубна, Россия

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

Измерение кристаллографической текстуры поликристаллических образцов проводится с помощью метода нейтронной дифракции в ЛНФ ОИЯИ на канале 7А-2 импульсного реактора ИБР-2 на дифрактометре СКАТ. За время его работы был накоплен значительный опыт, связанный как с проектированием, разработкой и модернизацией спектрометра, так и с развитием методики измерения и обработки спектров для получения полюсных фигур. Полюсные фигуры необходимы для вычисления функции распределения зерен по ориентациям, которая дает полное количественное описание кристаллографической текстуры поликристаллического образца. В работе дается описание текстурного дифрактометра СКАТ и примеры измерения кристаллографической текстуры раковин двустворчатых моллюсков.

На рисунке 1 показано расположение образца в гониометре дифрактометра СКАТ. Измерения проводятся на просвет, причем весь образец находится в пучке нейтронов. В одном положении образца одновременно регистрируются 19 времяпролетных нейтронных спектров. Затем образец поворачивается на 5 градусов и снимаются следующие 19 спектров. В результате одного эксперимента регистрируются $19 \times 72 = 1368$ спектров для получения набора полных полюсных фигур.



Рис. 1. Установка образца в дифрактометре СКАТ

Исторически измерения кристаллографической текстуры развивались для металлов и сплавов. Затем начались измерения образцов горных пород, а в настоящее время наблюдается большой интерес к исследованию кристаллографической текстуры биологических образцов. Необходимо отметить, что только нейтронные измерения позволяют измерять глобальную текстуру раковин моллюсков (всей раковины целиком)

[1-3], в отличие от рентгеновского и EBSD методов. Раковины моллюсков состоят из карбоната кальция, который может быть в виде кальцита (тригональная сингония) или арагонита (орторомбическая сингония). В качестве примера рассматриваются раковины рода *Mytilus*, состоящие одновременно из кальцита (наружная часть) и арагонита (внутренняя часть). Были измерены раковины разных видов этого рода. На рисунке 2 приведены полюсные фигуры кальцита и арагонита измеренных раковин.

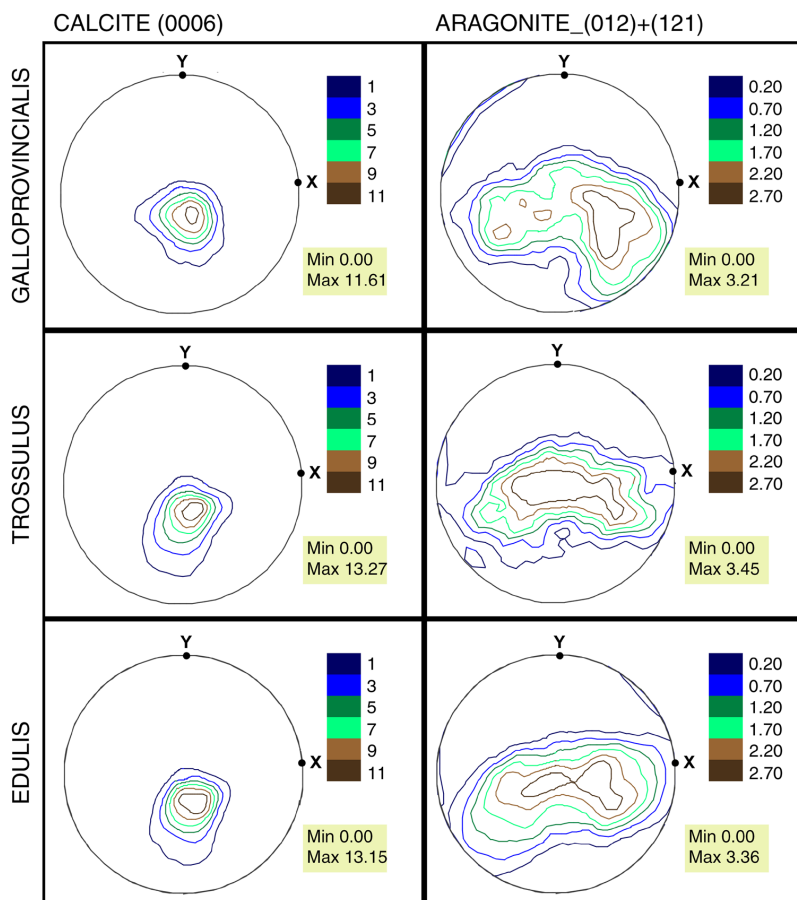


Рис. 2. Полюсные фигуры кальцита и арагонита раковин *Mytilus*; цветовая шкала в верхнем правом углу обозначает интенсивность изолиний, показанную в единицах равномерного распределения (mrd)

Из приведенных полюсных фигур видно, что кальцит имеет острую текстуру, которая не связана с формой раковины, а арагонит имеет неострую текстуру, которая имеет связь с формой измеренной раковины. Кроме того, раковины внутри разных видов, но одного рода имеют одинаковый тип текстуры, но могут отличаться по интенсивности текстурного максимума.

1. D. Nikolayev, T. Lychagina, A. Pakhnevich, SN Appl. Sci. 1, 344 (2019).
2. A. Pakhnevich, D. Nikolayev, T. Lychagina, M. Balasoiu, O. Ibram, Life 12, 730 (2022).
3. A. Pakhnevich, D. Nikolayev, T. Lychagina, Biology, 11, 1300, (2022).

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АРТЕФАКТОВ С РАСКОПОК НЕКРОПОЛЯ ВОЛНА 1

Б. А. Бакиров^{1*}, И. А. Сапрыкина^{1,2}, С. Е. Кичанов¹, В. С. Смирнова¹

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Институт археологии РАН, Москва, Россия

*E-mail: bulatbakirov@jinr.ru

Городской некрополь архаического и классического периода Волна 1 является одним из важнейших археологических памятников греческой колонизации Северного Причерноморья. Данный памятник датируется серединой VI в. до н.э. – началом I в. до н.э. и находится на Таманском полуострове Краснодарского края [1]. Располагаясь на важных торговых путях через Керченский пролив, некрополь имеет большое значение для изучения вопросов взаимодействия варварского и греческого населения этой территории. Археологические предметы как смешанного происхождения, так и явно греческого или варварского, найденные на территории некрополя, свидетельствуют об уровне и динамике взаимного проникновения культур. Особый интерес в данном контексте представляют предметы из различных металлов, обладающие яркими технологическими особенностями, характеризующими различные ремесленные школы. Однако, большая редкость и высокая ценность металлических находок требуют применения особых неразрушающих методов исследования. Одним из таких неразрушающих методов является нейтронная томография, позволяющая определять участки различных металлов или продуктов коррозии, скрытые особенности конструкции [2]. Немаловажной является возможность оценить степень сохранности артефактов, для правильного выбора стратегии консервации. Метод нейтронной дифракции дает дополнительную информацию о фазовом составе образца [2]. Таким образом привлечение неразрушающих нейтронных методов для исследования артефактов некрополя Волна 1 может дать комплексную информацию о древних технологиях производства и взаимодействии греческой и варварской культур.

На реакторе ИР-8 в НИЦ «Курчатовский институт» реализуется пользовательская программа, позволяющая проводить исследования объектов культурного наследия на установках центра. Эксперименты по нейтронной радиографии и томографии выполнялись на станции ДРАКОН на восьмом горизонтальном экспериментальном канале (ГЭК 8). Нейтронная дифракция проводилась на станции ДИСК, размещенной на шестом горизонтальном экспериментальном канале (ГЭК 6).

В данной работе были исследованы фрагменты бронзовых зеркал. Методом нейтронной томографии были визуализированы области распространения коррозии и обнаружены различные конструкционные особенности. Методом нейтронной дифракции было уточнено содержание олова в сплаве, а также определен фазовый состав продуктов коррозии.

Работа выполнялась при финансовой поддержке гранта РФФ № 23-18-00196.

1. Цокур И. В. Грунтовый могильник «Волна 1» // Древности Боспора. – 2016. – Т. 20. – С. 493-500.
2. Bakirov B. et al. Phase Composition and Its Spatial Distribution in Antique Copper Coins: Neutron Tomography and Diffraction Studies // Journal of Imaging. – 2021. – Т. 7. – №. 8. – С. 129.

НЕЙТРОННО-ДИФРАКЦИОННЫЕ И УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАНИТОВ РАПАКИВИ: КАК СОХРАНИТЬ ПАМЯТНИКИ АРХИТЕКТУРЫ?

Т. И. Иванкина^{1}, И. Ю. Зель¹, М. Петрузалек², Т. Локаичек²*

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

²Геологический институт Академии наук Чешской Республики, г.Прага, Чешская Республика

*E-mail: iti@jinr.ru

Строение и минеральный состав гранита «рапакиви» определяют его особые свойства, поэтому не зря с финского языка переводят как «гнилой, крошащийся камень». Эти очень красивые граниты, широко используемые в строительстве как облицовочный материал, часто представлены в природе гранулярно-блочно разрушенными массивами, причем часто разрушение наблюдается только в приповерхностной области. Со временем сделанные из рапакиви архитектурные сооружения также имеют тенденцию покрываться трещинами и разрушаться. Среди прочего, стоит проблема предохранения от разрушения уникальной Александрийской колонны на Дворцовой площади Санкт-Петербурга. Разрушение гранитов рапакиви обычно трактуется как усталостное разрушение, порождаемое, например, циклическими изменениями внутренних напряжений при разогреве и охлаждении горных пород и при их замерзании и оттаивании.



Рис. 1. Сферический образец, изготовленный из гранита рапакиви

В представленной работе [1] исследовалась начальная стадия такого разрушения, когда в визуально целостных образцах гранитов рапакиви развиваются микротрещины, растут анизотропия структуры и величины пористости и проницаемости. Крупнозернистые образцы гранита состоят из овоидальных структур полевого шпата, окру-

женных матрицей из кварца, слюды и плагиоклаза. Обычно окрашенные в розовато-коричневые цвета, овоиды цементируют минералы разных оттенков и цветов, что создает особый удивительный рисунок горной породы (Рис.1).

Эксперименты включали нейтронную дифракцию, 3D ультразвуковые исследования, а также измерения проницаемости и пористости образцов при разных давлениях.

Нейтроннографические исследования образца с помощью текстурного дифрактометра на импульсном реакторе в Дубне (ИБР-2, ЛНФ) дали представление о его кристаллографической структуре. Ультразвуковой метод (Геологический институт ЧАН, Прага) позволил измерить упругие свойства и в результате прийти к выводу, что при атмосферном давлении гранит рапакиви будет почти изотропной породой (на что указывает как слабая текстура, так и почти изотропное распределение упругих скоростей).

Эксперименты предусматривали также циклическое замораживание-разогрев водонасыщенных и сухих образцов и проведение измерений в условиях повышенных давлений.

На рисунке 2 показано, как при первом и повторных циклах замораживания и разогрева образцов в них развивается преимущественно ориентированная микротрещиноватость. При повторных циклах замораживания-разогрева уменьшаются упругие скорости в образце и растут пористость и упругая анизотропия.

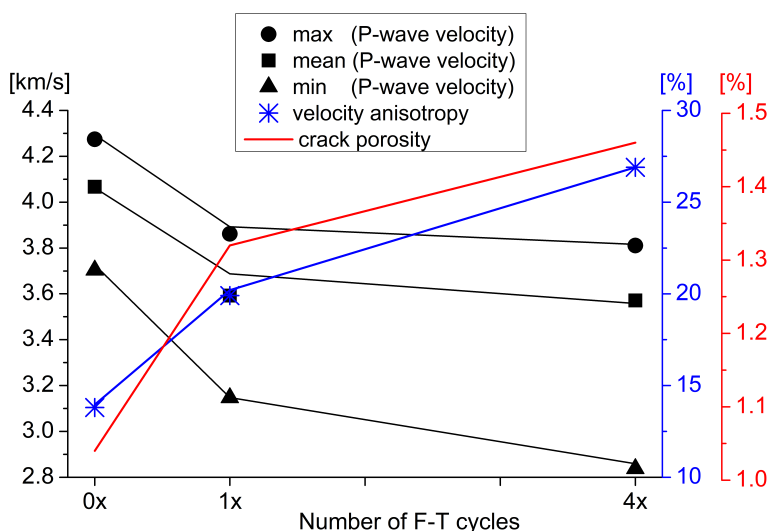


Рис. 2. Уменьшение скоростей упругих волн и рост трещиноватости и анизотропии в 4-х циклах замораживания-разогрева водонасыщенного образца гранита рапакиви

Эти различия в упругих свойствах породы можно объяснить развитием одной из двух обнаруженных систем микротрещин характерной ориентировки. Дальнейшее атмосферное воздействие, вероятно, будет способствовать их развитию и объединению в более крупные трещины. По аналогии с результатами исследований усталостного разрушения можно полагать, что разрушенность образца будут нарастать примерно пропорционально логарифму числа циклов роста-уменьшения внутренних напряжений.

1. Ivankina T.I., Zel I.Y., Petruzalek M., Rodkin M.V., Matveev M.A., Lokajicek T. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 136. 104541 (2020).

ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА НЕЙТРОННОЙ РАДИОГРАФИИ И ТОМОГРАФИИ

С. Е. Кичанов, И. Ю. Зель, Д. П. Козленко*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

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

С помощью метода нейтронной радиографии, за счет разной степени ослабления интенсивности нейтронного пучка при прохождении через материалы различного химического состава, плотности и толщины компонентов изучаемого объекта, можно получить информацию о внутреннем строении исследуемых материалов с пространственным разрешением на микронном уровне. Радиография дает двумерную проекцию объекта, для получения трехмерного изображения используется метод томографии, где выполняется объемная реконструкция внутреннего строения исследуемого объекта из набора радиографических проекций, полученных при различных угловых положениях образца относительно направления пучка [1]. Природа взаимодействия нейтронов с веществом и их значительная глубина проникновения в толщу исследуемых объектов дает важные преимущества нейтронным неразрушающим методам исследования по сравнению с рентгеновскими методиками, что обуславливает возрастающий интерес мирового научного сообщества к их применению в самых различных областях. В настоящее время, метод нейтронной радиографии и томографии, как представитель семейства методов неразрушающего контроля, получил широкое распространение в научных прикладных исследованиях технологических и инженерных объектов [2, 3]; в палеонтологии и геофизике; в изучении структуры метеоритов [4], в археологии [5].

В Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований реализован целый экспериментальный комплекс нейтронной структурной диагностики материалов, который включает в себя специализированные установки для исследований методами нейтронной радиографии и томографии, нейтронной дифракции, рамановской спектроскопии. Развитие методов нейтронной томографии обеспечивает растущий спектр ее применения в различных областях исследований. Следует отметить, что достоверность полученной структурной информации, помимо методических и инструментальных аспектов, зависит от надежности анализа трехмерных данных нейтронной томографии: процедур сегментации, алгоритмов восстановления томографии, приемов количественного анализа внутренних неоднородностей. Поэтому приводятся результаты исследований различных материалов методом нейтронной томографии с фокусом на особые приемы и алгоритмы анализа трехмерных изображений [2, 3]. Это обеспечивает получение количественных результатов, что обеспечивает изучение именно структурных аспектов формирования тех или иных свойств исследуемых материалов: от специальных типов цементов до археологических объектов.

Так, эксперименты с помощью метода нейтронной радиографии и томографии позволили восстановить внутреннюю структуру и геометрию трещин и фазовых компонентов в объеме модельных цементных материалов для хранения алюминиевых и графитовых отходов, полостей в магний-калиевых фосфатный цементах [2, 3]. Установлены зависимости таких структурных особенностей, как длины и толщины трещин, морфологии и ориентации инкапсулируемых компонентов в объеме цементных материалов, размеров богатых водой областей от особенностей химического синтеза.

Следующим примером является нейтронные исследования метеорита Куня-Ургенч. Метеориты - довольно редкие представители внеземной материи и, как и ожидалось, научное сообщество полностью сосредоточено на изучении элементного и изотопного состава, химического и минерального состава, поиске металлических включений в недавно обнаруженных метеоритах. С помощью нейтронной томографии была реконструирована трехмерная модель пространственного распределения металлической и силикатной фаз внутри объема метеорита Куня-Ургенч [4]. Было проанализировано распределение объемов, средних размеров и связанных с формой параметров металлической и силикатной фазы. После анализа ориентации металлических включений проанализированы особенности их предпочтительной ориентации.

Алгоритмы количественного анализа данных нейтронной томографии применялись и для исследования объектов культурного наследия [5]. Изучено пространственное распределение пор внутри нескольких фрагментов древних чугунных котлов, относящихся к средневековому золотоордынскому периоду Волжской Булгарии. Высокое проникновение нейтронов в чугунный материал обеспечило достаточное количество данных для детального анализа восстановленных трехмерных моделей. Получены распределения наблюдаемых внутренних пор по размеру, элонгации и ориентации. Количественные данные анализа предлагается использовать в качестве структурных маркеров для выяснения расположения чугунолитейных цехов Волжской Булгарии, а также особенностей средневекового процесса литья чугунной посуды.

Работа поддержана грантом РФФ № 23-72-01031 «Сегментация нейтронных и рентгеновских изображений пористых и трещиноватых материалов».

1. К. М. Подурец, С. Е. Кичанов, В. П. Глазков и др. Кристаллография. 66, 256-270 (2021).
2. I. Yu. Zel, M. Kenessarin, S. E. Kichanov and et al, Cement and Concrete Composites, 119, 103993 (2021).
3. I. Yu. Zel, M. Kenessarin, S. E. Kichanov and et al, J. Imaging 8, 242 (2022).
4. S. E. Kichanov, B. A. Abdurakhimov, I. Yu. Zel and et al, Meteoritics & Planetary Science, 57, 1836-1845 (2022).
5. B. A. Bakirov, V. S. Smirnova, S. E. Kichanov and et al, J. Imaging 9, 972023 (2023).

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ДЕКОРА ОСНОВАНИЯ НАВЕРШИЯ
МЕЧА ИЗ СУЗДАЛЬСКОГО ОПОЛЬЯ**

Е. С. Коваленко^{1}, М. М. Мурашев¹, К. М. Подурец¹, П. В. Гурьева¹, О. А. Кондратьев¹,
С. Ю. Каинов², Е. Ю. Терещенко^{1,3}, И. Е. Зайцева⁴, Н. А. Макаров⁴, Е. Б. Яцишина^{1,3}*

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

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

³Государственный исторический музей, Москва, Россия

⁴Институт археологии РАН, Москва, Россия

*E-mail: kovalenko_es@mail.ru

Проведено исследование основания железного навершия меча X-XI вв., обнаруженного на одном из сельских поселений Суздальского Ополя. Предмет покрыт слоем продуктов коррозии, из-под которых в некоторых местах видны детали серебряного декора. Целью работы было восстановление рисунка декора с помощью неразрушающих методов. Использовались взаимодополняющие методы: томография – нейтронная на исследовательском реакторе ИР-8, синхротронная на Курчатовском источнике синхротронного излучения и рентгеновская на промышленном томографе X5000, а также рентгенофлуоресцентное картирование. В толще металла наблюдаются скопления шлаков, не удаленных из металла при ковке. В предмете различаются конструкционные отверстия, частично скрытые под слоем продуктов коррозии. В одном из отверстий сохранился фрагмент штифта, скреплявшего основание с верхней частью навершия. Выявление декора оказалось трудной задачей, так как железный предмет значительно поглощает рентгеновское излучение, а коэффициент ослабления тепловых нейтронов веществом коррозионной корки практически совпадает с таковым для серебра. В результате исследований выявлена частично сохранившаяся инкрустация из серебряной проволоки (ширина 150-250 мкм), большая часть которой расположена внутри коррозионного слоя. Узор состоит из чередующихся полей треугольной формы, выполненных линиями и штрихами. «Период» узора – около 3.5 мм. Совместное рассмотрение результатов томографической реконструкции, карт элементного состава предмета и исторических аналогов позволило предположить первоначальный вид орнамента, его художественную ценность и уточнить датировку предмета.

**КОМПОЗИТНЫЕ ПРОТОНОПРОВОДЯЩИЕ МЕМБРАНЫ С
НАНОУГЛЕРОДНЫМИ ДОБАВКАМИ**

Ю. В. Кульвелис^{1*}, В. Т. Лебедев¹, О. Н. Примаченко², А. С. Одинок³, Е. А. Мариненко²,
А. В. Швидченко⁴, Б. Б. Тудупова⁴, В. И. Куулар⁴, А. И. Куклин⁵

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

²Институт Высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург,

³ФГУП «РНИЦ «Прикладная химия», Санкт-Петербург, Россия

⁴Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁵Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия

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

Развитие водородной энергетики включает исследования протонобменных мембран на основе перфторированных сополимеров с различными длинами боковых цепей. Протонобменные мембраны в составе водородных топливных элементов обеспечивают перенос протонов при насыщении мембран водой. Такие мембраны содержат гидрофобную полимерную матрицу на основе политетрафторэтилена с боковыми цепями в сополимере с $-\text{SO}_3\text{H}$ -группами на концах, которые формируют гидрофильную фазу мембраны. Сульфокислотные группы обеспечивают формирование связанной сети протонопроводящих каналов. Наиболее изученными и традиционно используемыми в водородных топливных элементах являются мембраны типа Nafion[®], с длинными боковыми цепями. Однако исследования последнего десятилетия показали преимущества короткоцепных мембран типа Aquivion[®] по проводящим свойствам [1]. Получение модифицированных различными добавками композитных мембран открывает более широкие возможности для улучшения их электрохимических и прочностных свойств.

Нами приготовлены и исследованы композиционные мембраны с короткими и с длинными боковыми цепями (аналоги коммерческих мембран Aquivion[®] и Nafion[®]), модифицированные частицами детонационного наноалмаза (ДНА, размер частиц 4-5 нм). Частицы ДНА распределяются по мембране достаточно однородно, либо образуют крупные кластеры, в зависимости от знака заряда поверхности ДНА и их концентрации в мембране. В структуре мембран, по данным малоуглового рассеяния нейтронов, элементарные тонкие каналы проводимости сохраняются практически без изменений, что видно по сохранению иономерного пика в присутствии ДНА на кривых рассеяния (рис. 1). Частицы ДНА с положительным зарядом встраиваются в мембраны на следующем структурном уровне (между пучками каналов) [2]. Сульфированные ДНА, также обладающие положительным зарядом, наиболее однородно распределяются по мембране (рис. 2). ДНА с отрицательным зарядом распределены менее однородно и формируют отдельную фазу на границе гидрофильной и гидрофобной областей мембраны [3]. Мембраны обладают хорошей механической прочностью, а повышенная протонная проводимость позволит увеличить эффективность их работы в составе водородных топливных элементов.

Для улучшения электрохимических характеристик также изготовлены прототипы мембран с добавками на основе оксида графена (ОГ) и комплексов ОГ-ДНА. ОГ способствует увеличению механической прочности и более однородному распределению частиц ДНА в мембране, что ведет к росту протонной проводимости.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-23-00129).

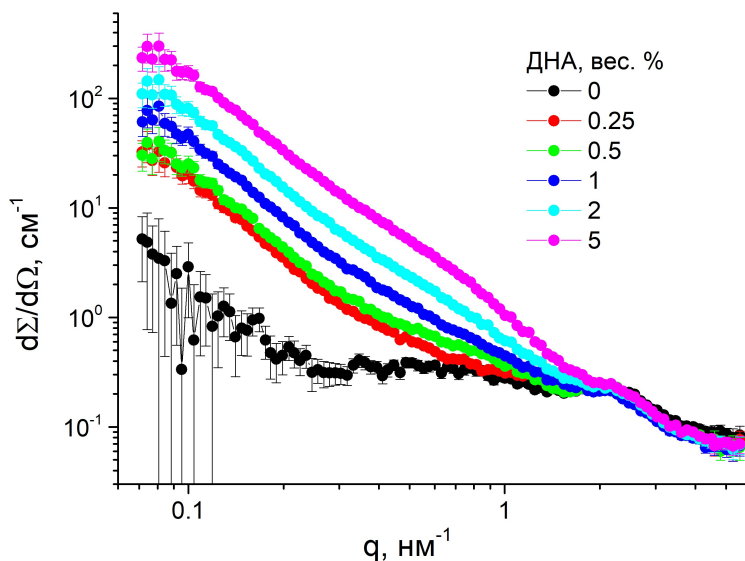


Рис. 1. Малоугловое рассеяние нейтронов на мембранах типа Aquivion® с сульфированными ДНА. Содержание ДНА в мембранах от 0 до 5 вес. %

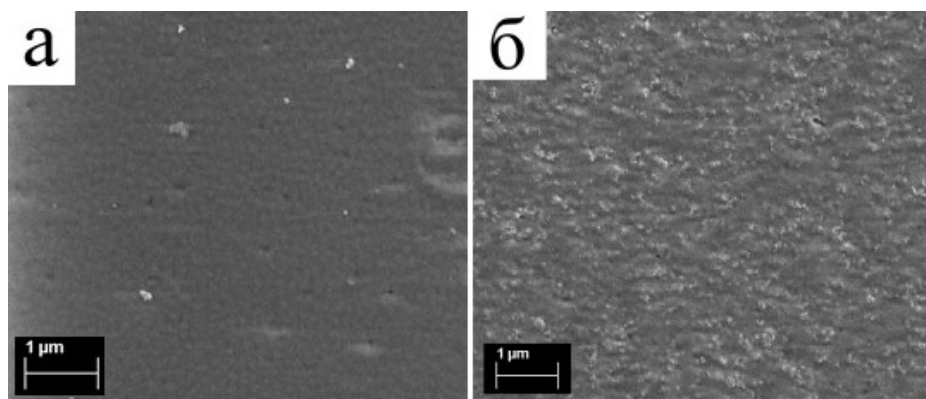


Рис. 2. СЭМ-изображения композитных мембран типа Aquivion® с сульфированными ДНА: а – 0 % ДНА (без наноалмазов); б – 5 вес. % ДНА

1. O.N. Primachenko, E.A. Marinenko, A.S. Odinkov, S.V. Kononova, Yu.V. Kulvelis, V.T. Lebedev. Polym. Adv. Technol. 32, 1386 (2020).
2. O.N. Primachenko, Yu.V. Kulvelis, A.S. Odinkov, N.V. Glebova, A.O. Krasnova, L.A. Antokolskiy, A.A. Nechitailov, A.V. Shvidchenko, I.V. Gofman, E.A. Marinenko, N.P. Yevlampieva, V.T. Lebedev, A.I. Kuklin. Membranes 12, 827 (2022).
3. Yu.V. Kulvelis, O.N. Primachenko, A.S. Odinkov, A.V. Shvidchenko, V.Yu. Bayramukov, I.V. Gofman, V.T. Lebedev, S.S. Ivanchev, A.Ya. Vul, A.I. Kuklin and B. Wu. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures 28, 140 (2020).

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ДРЕВНЕРУССКИХ
ЮВЕЛИРНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ПОМОЩЬЮ
НЕЙТРОННО-СИНХРОТРОННЫХ МЕТОДОВ**

К. М. Подурец¹, Е. С. Коваленко¹, М. М. Мурашев¹, И. Е. Зайцева², Е. Ю. Терещенко^{1,3},
Е. Б. Яцишина¹

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

²Институт археологии РАН, Москва

³ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва

*E-mail: podurets@yandex.ru

При естественно-научных исследованиях сложносоставных объектов культурного наследия одной из ключевых задач является получение максимально полной информации о деталях их конструкции при минимальном воздействии на предмет. Это в полной мере относится к изучению технологических особенностей изготовления ювелирных изделий из археологических раскопок. Нейтронная визуализация – важнейший инструмент для решения подобных задач, так как благодаря высокой проникающей способности нейтронов она позволяет проводить томографические исследования, выявляя детали конструкции предмета. В частности, нейтронная томография позволяет изучать конструкцию изделий из серебра и золота. Среди ювелирных изделий, изученных в Курчатовском институте, – бронзовый колт, украшенный эмалями, из раскопок во Владимире, золотая подвеска с эмалевым медальоном из раскопок в Великом Новгороде, плетеные серебряные браслеты из Исадского клада.

Привлечение нейтронной томографии к исследованию данных изделий позволило уточнить технологические особенности конструкции. Так, в золотой подвеске-квадрифолии перегородки были припаяны к основе медальона, а в других изделиях они были вставлены в эмалевую массу в области контакта эмалей различных цветов. В серебряных браслетах изучена технология изготовления наконечников и порядок плетения проволок. Применение нейтронных и синхротронных методов неразрушающего анализа существенно повышает информативность археологического источника, делая ее практически недоступной по сравнению с традиционным анализом предметов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения проекта №15.СИН.21.0023 (Соглашение № 075-15-2022-1177 от 25.08.2022).

Секция 8.

Фундаментальные исследования с нейтронами

ГРУППОВОЕ ВРЕМЯ ЗАДЕРЖКИ И ГЛУБИНА ФОРМИРОВАНИЯ ОТРАЖЕННОЙ НЕЙТРОННОЙ ВОЛНЫ

А. И. Франк и В. А. Бушуев

*E-mail: frank@jinr.ru

На примере отражения нейтронного импульса (волнового пакета) от двух- и трех-слойных плоских структур ранее было показано, что формирование отраженного импульса происходит с некоторой задержкой по времени относительно к падающему импульсу [1]. Это, очевидно, обусловлено тем обстоятельством, что на проникновение волны внутрь среды и выход ее обратно затрачивается некоторое время, что и является физической причиной хорошо известного эффекта Гуса-Хенхен. В первом приближении эта задержка определяется так называемым групповым временем задержки (ГВЗ) [2-4], равным производной по энергии от фазы амплитудного коэффициента отражения.

В докладе рассматривается более простой случай, а именно отражение нейтронов от полубесконечной однородной среды. Как известно, амплитуда зеркального отражения и распределение поля (или волновой функции) в среде описываются точными формулами Френеля. С их помощью легко получить выражения для амплитуды отражения, структуры поля и глубины проникновения излучения в среду, однако они не дают никакого ответа о толщине приповерхностного слоя, в котором формируется отраженная волна.

В докладе обсуждается связь между ГВЗ и глубиной формирования нейтронной волны, зеркально отраженной от полубесконечной однородной среды. Расчеты показывают, что в области ниже порога полного внешнего отражения (ПВО) эта глубина формирования в точности равна глубине проникновения экспоненциально затухающей волны. Однако в области выше порога ПВО, где глубина проникновения излучения значительно увеличивается, как ГВЗ, так и полученная на основе этой величины глубина формирования отраженной волны, напротив, уменьшаются. Для слабопоглощающей среды полученная таким образом оценка глубины формирования отраженной волны приводит к нефизическому результату, состоящему в субнанометровой глубине этого слоя.

Попытки определить взаимосвязь между глубиной формирования отражения и ГВЗ в области выше порога ПВО приводят к противоречиям. В частности, это относится к результатам, полученным, с одной стороны, на основе первого борновского приближения, а с другой – на основе расчетов времени отражения волновых пакетов с использованием функции Грина.

В заключение кратко обсуждаются вероятные причины такого расхождения, а также возможные экспериментальные подходы к измерению времени отражения нейтронной волны.

1. V.A. Bushuev, A.I. Frank, Physics – Uspekhi, 61 (2018) 952.
2. L. Eisenbud, The formal properties of nuclear collisions (Doctoral dissertation, Princeton University, 1948).
3. D. Bohm, Quantum Theory (New York: Prentice-Hall, 1951).
4. E.P. Wigner, Phys. Rev. 98 (1955) 145.

НАДБАРЬЕРНОЕ ПРОХОЖДЕНИЕ НЕЙТРОНОВ ЧЕРЕЗ ОСЦИЛЛИРУЮЩИЙ ВДОЛЬ ПУЧКА ОБРАЗЕЦ. КВАЗИКЛАССИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Ф. С. Джепаров^{1*}, Д. В. Львов¹, А. И. Франк²

¹ККТЭФ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*E-mail: dzheparov@itep.ru

При прохождении нейтронов через продольно-ускоренную нейтронооптически однородную мишень их состояние на выходе из мишени отличается от входного. Данное явление получило название эффекта ускоренного вещества (ЭУВ) [1,2]. В теоретической части проведенные исследования в основном базировались на чисто классическом подходе [1,2,3] и численных методах [4]. Первый квантовомеханический анализ прохождения нейтронов через продольно-осциллирующую мишень был недавно проведен в работе [5] на основе нестационарного обобщения эйконального приближения, хорошо известного в стационарной теории рассеяния [6]. В данной работе развит полный квазиклассический анализ процесса. Он обобщает результаты работы [5] на существенно больший диапазон энергий нейтронов.

Если нейтрон движется в нестационарном потенциале $U(\mathbf{r}, t)$, удовлетворяющем стандартным условиям квазиклассичности, то обычный пропагатор

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; t, t') = \left\langle \mathbf{r} \left| T \exp \left(-i \int_{t'}^t d\tau H(\tau) / \hbar \right) \right| \mathbf{r}' \right\rangle$$

в квазиклассическом приближении дается соотношением [7]

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; t, t') = (2\pi\hbar)^{-3/2} \left| \det \left(\frac{\partial S(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; t, t')}{\partial \mathbf{r}_\alpha \partial \mathbf{r}'_\beta} \right) \right|^{1/2} e^{iS(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; t, t')/\hbar}, \quad (1)$$

где $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; t \rightarrow t') = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$, а действие

$$S(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; t, t') = \int_{t'}^t d\tau L(\mathbf{q}(\tau), \dot{\mathbf{q}}(\tau), \tau), \quad (2)$$

определяется лагранжианом $L(\mathbf{q}(\tau), \dot{\mathbf{q}}(\tau), \tau)$ и классической траекторией $\mathbf{q}(\tau)$ с граничными условиями $\mathbf{q}(\tau = t') = \mathbf{r}'$ и $\mathbf{q}(\tau = t) = \mathbf{r}$.

В применении к эволюции начального состояния, выбранного в виде плоской волны $\Psi_0(\mathbf{r}, t) = e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} - Et)/\hbar}$, $E = \frac{k^2}{2m}$, пропагатор (1) дает волновую функцию

$$\Psi(\mathbf{r}, \mathbf{k}; t, t') = \int d^3r' G(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; t, t') \Psi_0(\mathbf{r}'; t'). \quad (3)$$

При квазиклассическом (т.е. методом перевала) вычислении интеграла в (3) получается, что результат рассеяния на мишени есть

$$\Psi(\mathbf{r}, \mathbf{k}; t, t') = \left| \det \frac{\partial^2}{\partial r_\alpha \partial k_\beta} \tilde{S}(\mathbf{r}, \mathbf{k}; t, t') \right|^{-1/2} e^{i(\tilde{S}(\mathbf{r}, \mathbf{k}; t, t') - Et')/\hbar} \quad (4)$$

$$\tilde{S}(\mathbf{r}, \mathbf{k}; t, t') = S(\mathbf{r}, \mathbf{r}'(r, \mathbf{k}, t, t'); t, t') + \mathbf{k}\mathbf{r}'(r, \mathbf{k}, t, t') \quad (5)$$

где $\mathbf{r}'(\mathbf{r}, \mathbf{k}; t, t')$ - корень уравнения

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}'} [S(\mathbf{r}, \mathbf{r}'(\mathbf{r}, \mathbf{k}, t, t'); t, t') + \mathbf{k}\mathbf{r}'(r, \mathbf{k}, t, t')] = 0. \quad (6)$$

В применении к случаю, когда кинетическая энергия E на всей траектории существенно превосходит потенциальную $U(\mathbf{q})$, в главном приближении можно принять, что движение нейтрона равномерно и прямолинейно: $\mathbf{q}(\tau) = \mathbf{r}' + \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{\tau - t'}(\tau - t')$. При этом формулы (4)-(6) воспроизводят результат эйконального приближения, построенного для нестационарного потенциала в [5].

1. А.И. Франк, П. Гелтенборт, М. Жентшель, Д.В. Кустов, Г.В. Кулин, В.Г. Носов, А.Н. Стрепетов. Ядерная Физика 71, 1686 (2008).
2. А.И. Франк. ЭЧАЯ 47, 1192 (2016).
3. В.Г.Носов, А.И.Франк. Ядерная Физика 61, 686 (1998).
4. М.А. Zakharov, G.V. Kulin, A.I. Frank. Eur. Phys. J. D 75, 47 (2021).
5. Ф.С. Джепаров, Д.В. Львов, А.И. Франк. Ядерная Физика 85, 419 (2022).
6. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Квантовая механика. Физматлит, Москва (2019).
7. В.А. Фок. Начала квантовой механики. Наука, Москва (1976).

НЕСТАНДАРТНЫЕ КВАЗИАДДИТИВНЫЕ ИНТЕГРАЛЫ ДВИЖЕНИЯ И ЗАВИСИМОСТЬ ФОНОННЫХ ЗАСЕЛЕННОСТЕЙ ОТ ДАВЛЕНИЯ

Ф. С. Джепаров

НИЦ «Курчатовский институт» — ККТЭФ, Москва, Россия

*E-mail: dzheparov@itep.ru

Одним из следствий эквивалентности гиббсовых ансамблей для не малых систем является то, что для многих явлений, связанных с ангармонизмом решеточных колебаний, зависимость средних чисел заполнения (заселенностей) $n_k = \langle c_k^+ c_k \rangle$ фононов в кристалле от внешнего давления $P^{(ex)}$ проявляется только через зависимость от давления частот фононов $\omega_k(P^{(ex)})$ [1,2], при этом

$$n_k = n_k^{(0)}(P^{(ex)}) = \left[\exp \left(\beta \omega_k(P^{(ex)}) \right) - 1 \right]^{-1}. \quad (1)$$

Здесь $\beta = 1/T$ обратная температура, а c_k^+ и c_k операторы рождения и уничтожения фонона в состоянии с безразмерным номером k . Формула (5) составляет основу так называемого квазигармонического приближения [1], в области применимости которого колебания малы и могут рассматриваться как гармонические, а влияние ангармонизма решетки сводится к тому, что частоты фононов зависят от объема кристалла, который связан с давлением. Это приближение широко используется, например, для описания теплового расширения и теплопроводности кристаллов.

Прямое измерение зависимости $n_k(P^{(ex)})$ было предпринято в работах [3,4] на основе сравнения интенсивностей стоксовой и антистоксовой компонент при комбинационном рассеянии света. Эти работы продолжили изучение [5] комбинационного рассеяния света в напряженных кристаллических пластинах кремния. Их результаты (достаточно убедительно статистически) описываются не формулой (1), а соотношением

$$n_k(P^{(ex)}) = \left\{ \exp \left[\beta \left(\omega_k(P^{(ex)}) - \Delta_k(P^{(ex)}) \right) \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (2)$$

где $\Delta_k(P^{(ex)}) = \omega_k(P^{(ex)}) - \omega_k(0)$.

Измерения [3,4] выполнены при $|\Delta_k(P^{(ex)})| \leq \omega_k(P^{(ex)})/15$ и при комнатной температуре. Эти условия вполне соответствуют области применимости квазигармонического приближения.

Результат (2) был получен высоко квалифицированным коллективом в одном из крупнейших физических центров. Тем не менее, он не привлек широкого внимания исследователей, по-видимому, потому, что не получил убедительного теоретического обоснования. Существующая статистическая физика ничего, кроме соотношения (1), для квазигармонических условий не предлагает, причем формула (1) получается как во всех канонических ансамблях Гиббса [6,7], так и в т.н. Р-Т-ансамбле [7].

Отметим, что реально измерения [3,4] было проведено в несколько более сложных условиях, чем изотропное растяжение или сжатие, но мы ограничимся здесь только этим случаем для выделения наиболее важной концептуально части проблемы.

В общепринятой трактовке основными квазиаддитивными интегралами движения, на основе которых строятся распределения Гиббса для квазигармонических систем, являются упругая энергия и фоновый гамильтониан. В данной работе показано, что к ним можно добавить новый квазиаддитивный интеграл движения, среднее значение от которого равно произведению давления на объем системы. После этого, в результате стандартного, например, для информационного подхода [7,8], построения равновесного распределения возникает новый статистический оператор. Он впервые приводит к иным фоновым заселенностям для квазигармонических систем, чем канонические распределения Гиббса.

В новом ансамбле получается, что

$$n_k \left(P^{(ex)} \right) \approx \left\{ \exp \left[\beta \left(\omega_k \left(P^{(ex)} = 0 \right) \right) \right] - 1 \right\}^{-1}. \quad (3)$$

Наличие трех противоречивых результатов (1)-(3) указывает как на необходимость поиска путей прямых измерений зависимости фоновых населенностей от давления, так и на желательность новых теоретических исследований по данной проблеме. Были бы чрезвычайно полезны и прямые измерения зависимости от давления магнанных заселенностей.

Более подробная информация о новом ансамбле и методе его построения содержится в [9].

1. Дж. Рейсленд. Физика фононов. М.: МИР (1975).
2. А.Г. Гуревич. Физика твердого тела. С-Петербург: ФТИ им А.Ф.Иоффе (2004).
3. В.Г. Хамдамов. Исследование некоторых ангармонических эффектов в фоновых системах кристаллов методом резонансного комбинационного рассеяния света. Автореферат дисс. на соискание уч. ст. канд. физ.-мат. наук. Ленинград, ФТИ им. А.Ф.Иоффе, 1985.
4. В.Г. Хамдамов, В.И. Веттегрень, И.И. Новак. Изв. АН Уз.ССР, сер. физ.-мат. наук, 1986, №1, с.50.
5. В.Г. Хамдамов, В.И. Веттегрень, И.И. Новак. ФТТ 26, 322 (1984).
6. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Статистическая физика. М.: Наука (1976).
7. Д.Н. Зубарев. Неравновесная статистическая термодинамика. М.: Наука (1971).
8. Е.Т. Jaynes. Phys. Rev. 106, 620 (1957).
9. Ф.С.Джепаров. Оптика и спектроскопия 131, 471 (2023). DOI: 10.21883/OS.2023.04.55550.60-22.

УСТАНОВКА «НЕЙТРИНО» ДЛЯ РК ПИК

*А. П. Серебров, Р. М. Самойлов**

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

*E-mail: samoilov_rm@npri.nrcki.ru

Основная задача приборного комплекса «Нейтрино» – обнаружение стерильных нейтрино через наблюдение эффекта осцилляций. Стерильные нейтрино не взаимодействуют известным образом через калибровочные бозоны, но могут смешиваться с активными нейтрино, и благодаря эффекту осцилляций могут быть обнаружены.

В эксперименте Нейтрино-4 на реакторе СМ-3 на уровне достоверности 2.9σ был обнаружен эффект осцилляций. При этом данные результат очень хорошо согласуется с галлиевой аномалией и экспериментом BEST так, что уровень достоверности гипотезы стерильного нейтрино при совместном анализе составляет 5.8σ .

Тем не менее, ни в одном эксперименте не был с достаточной точностью обнаружен эффект осцилляций нейтрино в стерильное состояние, и более того при попытке согласовать данные всех имеющихся экспериментов по поиску стерильного нейтрино не обнаруживается значимого соответствия результатов. Такая ситуация требует постановки новых экспериментов, которые бы могли надёжно установить существование или отсутствие легких стерильных нейтрино хотя бы в пределах возможных значений параметров осцилляций, которые бы объясняли упомянутые выше аномалии.

Таким образом, задача приборного комплекса «Нейтрино» – проведение измерений спектра реакторных антинейтрино от исследовательского реактора с малым размером активной зоны на различных коротких расстояниях ~ 6 -15 метров в условиях фона на поверхности Земли для выявления искажений в спектрах в следствие осцилляций в стерильное состояние методом относительных измерений. Целью таких измерений является определение параметров осцилляций с достоверностью 5σ и более, либо установление ограничений на них с тем же уровнем достоверности и закрытие таким образом возможности объяснения наблюдаемых аномалий с помощью стерильного нейтрино. Метод относительных измерений заключается в сравнении измеренных в различных условиях величин, за счёт чего из анализа экспериментальных данных исключается сравнение со значениями, полученными в результате расчётов.

УСТАНОВКА «БЕТА-РАСПАД НЕЙТРОНА» ДЛЯ РК ПИК*А. П. Серебров, А. К. Фомин**

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

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

Нейтронный приборный комплекс «Бета-распад нейтрона» будет расположен на пучке поляризованных холодных нейтронов на канале ГЭК-3 Н0. Установка предназначена для измерения асимметрий бета-распада нейтрона с относительной точностью 10^{-3} . Основу установки составляет сверхпроводящий соленоид, создающий магнитное поле в однородной области 0.35 Тл, обладающее хорошей однородностью в области распада $4 \cdot 10^{-3}$. Электроны и протоны, образовавшиеся при распаде нейтрона, движутся в магнитном поле вдоль силовых магнитных линий. Для выделения заданного угла вылета электронов используется эффект магнитного зеркала путем создания области с более сильным магнитным полем величиной индукции 0.88 Тл. Область с высокой однородностью поля выделяется по протонам, которые можно дополнительно ускорить электрическим полем. Для этого служит электростатическая система, которая позволяет поднимать напряжение в области распада до величины 20 кВ. Для регистрации электронов и протонов служат детекторы на входе и на выходе нейтронного пучка. Для детектирования электронов магнитное поле, создаваемое соленоидом, отклоняется вниз с тем, чтобы вывести электроны из области пучка. С этой целью будет использован магнитопровод, который монтируется под соленоидом. Для отклонения протонов используется эффект дрейфа протонов в перекрестных электрических и магнитных полях. Для поляризации нейтронов будет использован многощелевой поляризатора на суперзеркалах. За ним по ходу пучка устанавливается последовательно монохроматор и прерыватель нейтронного пучка. Монохроматор выделяет из потока нейтронов те нейтроны, которые летят с определенной скоростью. Прерыватель формирует порции нейтронов определенной протяженности. Вместе прерыватель и монохроматор позволяют использовать времяпролетную методику. С целью изменения направления спина нейтронов за ними установлен спин-флиппер. На выходе из соленоида для измерения поляризации нейтронного пучка расположен анализатор поляризации, а также для контроля за работой времяпролетной техники - нейтронный детектор, за которым устанавливается ловушка нейтронного пучка.

Круглый стол

ПЕРСПЕКТИВЫ НЕЙТРОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД НА РЕАКТОРЕ ИРТ-Т ТПУ (ТОМСК, РОССИЯ)

*М. Н. Аникин**, А. М. Лидер

Томский политехнический университет, Томск, Россия

*E-mail: amn@tpu.ru

Точное знание атомной структуры материалов является надежной основой для понимания их свойств и дает возможность целенаправленно изменять эти свойства. Особенности взаимодействия нейтронов с веществом делают метод дифракции нейтронов во многих отношениях уникальным и, следовательно, очень востребованным.

Реактор ИРТ-Т – исследовательский реактор бассейнового типа с использованием деминерализованной воды в качестве замедлителя, теплоносителя и верхней биологической защиты. Реактор предназначен для проведения широкого круга научно-исследовательских работ по физике твердого тела, нейтронно-активационному анализу элементного состава веществ, производству радионуклидов, легированию кремния и т.д. С целью расширения экспериментальных возможностей ядерного реактора ИРТ-Т планируется создание и размещение новых исследовательских станций.

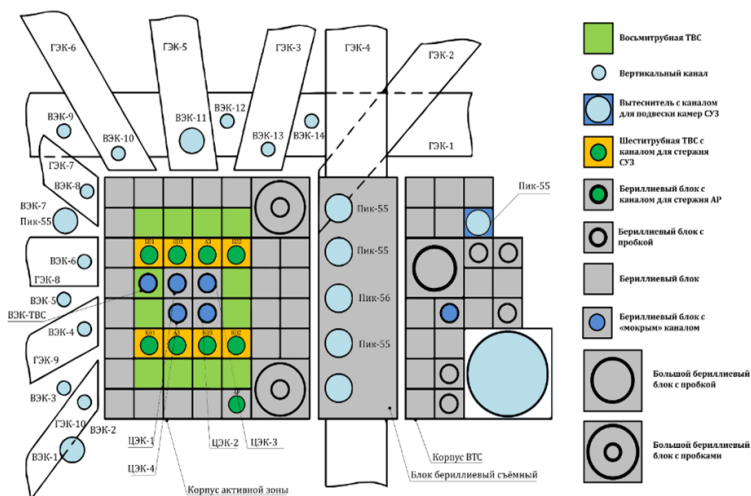


Рис. 1. Картограмма активной зоны реактора

На базе горизонтального экспериментального канала ГЭК-7 планируется размещение Тестового нейтронного рефлектометра (ТНР), основное назначение которого будет заключаться в тестировании нейтронных поляризующих и неполяризующих зеркал для создания нейтронных волноводов и других нейтронно-оптических устройств. [1]. ТНР разработан и создан на базе «Петербургского института ядерной физики им Б.П. Константинова» и в настоящее время планируется его монтаж на горизонтальном экспериментальном канале ГЭК-7 реактора ИРТ-Т.

В ТНР будут реализованы измерения в режимах с «белым» неполяризованным пучком, с «белым» поляризованным пучком, с монохроматическим неполяризованным пучком, с монохроматическим поляризованным пучком.

Максимальный доступный диапазон по переданному импульсу в рефлектометре $q = (0.003 - 0.275) \text{ \AA}^{-1}$. Разрешение по длине волны во времяпролетных режимах $\Delta\lambda = 0.06 \text{ \AA}$, средняя величина поляризующей эффективности поляризатора составляет 0.97-0.99.

На базе горизонтального экспериментального канала ГЭК-8 разрабатывается нейтронный порошковый дифрактометр (НПД) предназначенный для изучения атомной и магнитной структуры кристаллов при различных физических воздействиях, магнитных и структурных фазовых переходов, изменения межатомных длин связи, структурных превращений в материалах любой природы.

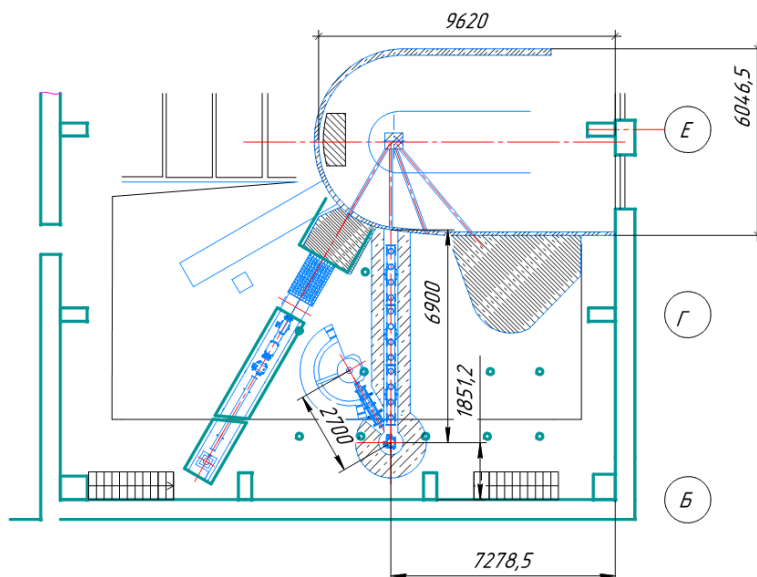


Рис. 2. Схема размещения новых станций в физическом зале реактора

Разрабатываемый НПД будет обладать следующими характеристиками:

- Размеры пучка, $Ш \times В - 15 \times 98 \text{ мм}^2$;
- Угол отклонения монохроматора $2q_M - 150^\circ$;
- Расстояние монохроматор - образец - 2700 мм;
- Расстояние образец - детектор - 1147 мм;
- Число каналов детектора - 1408;
- Диаметр образца - 6 мм;
- Высота образца - 100 мм.

Предлагаемая конфигурация позволяет с оптимизмом говорить, что дифрактометр будет одним из лучших в мире. Сцинтилляционный детектор высокого разрешения [2] (полоски сцинтиллятора шириной 2.2 мм) экономит бюджет по сравнению с гелиевым и позволяет улучшить производительность за счет отказа от движения во время измерений.

1. В.Г. Сыромятников, В.А. Ульянов, Нейтронная рефлектометрия в России: текущее состояние и перспективы, Кристаллография (2022).
2. G. J. Sykora, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record (NSS/MIC). 1567, (2012).

УСТАНОВКИ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ НА РЕАКТОРЕ ПИК

Л. А. Азарова^{1,2*}, Е. В. Алтынбаев^{1,2,3}, Е. Г. Яшина^{1,2}, Д. О. Сканченко^{1,3}
и С. В. Григорьев^{1,2}

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

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт Петербург, Россия

³Институт физики высоких давлений РАН им. Л.Ф. Верещагина, Троицк, Россия

*E-mail: loveazarova@gmail.com

Петербургский институт ядерной физики (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ) приступил к работам по строительству установок малоуглового рассеяния нейтронов на реакторном комплексе ПИК. Малоугловое рассеяние нейтронов (МУРН) является одним из ключевых и наиболее популярных методов, используемых при исследованиях наноструктур и нанообъектов. МУРН это неразрушающий дифракционный метод, при котором рассеяние нейтронов происходит на крупномасштабных неоднородностях (от 1 нанометра до 10 микрометров) и происходит под малыми углами. Этот метод нашел свое применение в широком спектре научных дисциплин: физике, химии, биологии, материаловедении, инженерии и науках о земле [1].

Доклад посвящен разработке и математическому моделированию [2] двух установок малоуглового рассеяния - «TENZOR» и «MEMBRANA». Установка «TENZOR» это классическая высокопоточная монохроматическая малоугловая установка, предназначенная для решения задач, связанных с магнетизмом и материаловедением. Установка «MEMBRANA» разработана как времяпролетная машина для исследований в области биологии, физики полимеров, материаловедения и изучения кинетики в образцах. В докладе будут представлены основные параметры и характеристики упомянутых выше инструментов.

1. Schmatz W. et al. Neutron small-angle scattering: experimental techniques and applications //Journal of Applied Crystallography.1974. Т. 7. №. 2. С. 96-116.
2. Lefmann K., Nielsen K. McStas, a general software package for neutron ray-tracing simulations //Neutron news. 1999. Т. 10. №. 3. С. 20-23.

**НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ $\sin^2\psi$ МЕТОДОМ***И. Д. Карпов^{1*}, В. Т. Эм¹, Р. Mikula²*¹НИЦ «Курчатовский институт, Москва, Россия²Nuclear Physics Institute CAS, 250 68 Řež, Czech Republic*E-mail: Karpov_ID@nrcki.ru

Нейтронный метод измерения напряжений позволяет измерить три главные компоненты тензора деформаций/напряжений внутри материалов и изделий большой толщины (~ 5 см в стали). Однако метод имеет ограничения при измерении напряжений вблизи поверхности. Связано это с тем, что при неполном погружении пробного объёма (gauge volume, GV) в материал, дифракционный пик смещается и необходимо делать поправку на это смещение, не связанное с напряжением. В последние годы была разработана программа расчёта поправок и проведено измерение напряжений до глубины ~ 0.2 мм. Отметим, что измеряется напряжение, усредненное по объёму материала, находящемуся в части пробного объёма, погружённого в материал. Поэтому пространственное разрешение ухудшается с увеличением глубины измерения.

Другой метод измерения напряжений вблизи поверхности основан на использовании узких (~ 0.2 мм) щелей и проведении обычных нейтронных измерений. Недостатком этого метода является то, что щели должны быть расположены близко (~ 10 мм) от пробного объёма (центра дифрактометра), что ограничивает допустимую толщину образца (~ 6 мм).

Минимальная возможная глубина измерений в обоих методах определяется минимальным количеством материала, которое можно измерить на данном приборе. Чем меньше глубина, тем меньше объём отражающего материала и меньше интенсивность дифракционного пика. При нейтронных измерениях одна компонента деформации измеряется в геометрии отражения, а две компоненты в геометрии пропускания, когда нейтронный пучок проходит всю толщину образца. Из-за ослабления нейтронного пучка в материале с уменьшением глубины уменьшается допустимая толщина материала.

В данной работе исследовалась возможность нейтронных измерений напряжений вблизи поверхности хорошо известным рентгеновским $\sin^2\psi$ методом. Обычно этот метод не используется в нейтронных измерениях, поскольку в объёме материала необходимо измерять все три главные компоненты тензора деформации. В рентгеновском методе измеряются напряжения на поверхности, где нормальная компонента напряжений равна нулю и реализуется двухосное напряжённое состояние. Компоненты напряжений в плоскости определяются $\sin^2\psi$ методом.

Можно было предположить, что во многих случаях, на малых глубинах от поверхности нормальная компонента напряжений близка к нулю и можно использовать $\sin^2\psi$ метод. Чем меньше глубина, тем меньше нормальная компонента и тем лучше должен работать этот метод. Как и в случае рентгеновских измерений, критерием применимости $\sin^2\psi$ метода является линейная зависимость деформации, межплоскостного расстояния или угла рассеяния от $\sin^2\psi$.

В работе показано, что в стальных деталях, изготовленных методами аддитивных технологий и стальной пластине, обработанной дробеструйным аппаратом, напряжения на глубине до 1 мм, можно определять $\sin^2\psi$ методом. Метод не имеет ограничений по толщине образца, поскольку все измерения проводятся в геометрии отражения.

Работа выполнена на оборудовании УНУ НИК ИР-8.

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ АДДИТИВНЫХ ПРОИЗВОДСТВ МЕТОДАМИ НЕЙТРОННОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

М. М. Мурашев^{1}, В. Т. Эм¹, В. П. Глазков¹, И. В. Шишковский², К. И. Макаренко²*

¹Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, 123182 Москва

²Сколковский институт науки и технологий, 121205 Москва

*E-mail: mihail.mmm@inbox.ru

В настоящее время аддитивные технологии (АТ) являются одним из наиболее динамично развивающихся направлений современной промышленности. Это объясняется тем, что они позволяют значительно уменьшить материалоемкость, трудоемкость и время изготовления деталей по сравнению с традиционными технологиями, основанными на удалении первичного материала (точение, фрезерование, шлифование, строгание). С помощью АТ можно получить принципиально новые материалы или конструкции, которые трудно или невозможно получить традиционными методами.

АТ изделия создаются путем послойного наплавления металла до нужной толщины. Поскольку создание АТ материала происходит при больших градиентах температур и высоких скоростях нагрева/охлаждения, в изделиях образуются большие (близкие к пределу текучести материала) остаточные напряжения, которые могут сильно изменить прочностные свойства и геометрические параметры материала, а также привести к образованию трещин. Металлические порошки, из которых методами АТ изготавливаются детали, имеют высокую удельную поверхность, что обуславливает перенос адсорбированных на поверхности порошинок загрязняющих веществ в объем готового изделия. Неоптимальный выбор скоростного и температурного режима печати приводит к образованию пор в образце. Количество трещин, пор и включений во многом определяет итоговые механические свойства готового изделия. По этой причине контроль АТ изделий, в том числе неразрушающими методами, является актуальной задачей.

В докладе продемонстрированы возможности экспериментальных установок на реакторе ИР-8 НИЦ «Курчатовский институт» для исследований методами нейтронной визуализации внутренних дефектов размерами от 200 мкм в металлических изделиях, полученных с помощью аддитивных технологий.

Показано, что использование монохроматических (станция ДРАКОН) и полихроматических (томограф ПОНИ) нейтронных пучков позволяет получить взаимодополняющую информацию о внутренней структуре изделий.

Работа выполнена на оборудовании УНУ НИК ИР-8.

НЕЙТРОНОГРАФИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ИЯИ РАН ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД И НАНОДИАГНОСТИКИ НА БАЗЕ ИМПУЛЬСНЫХ НЕЙТРОНОВ ИН06 И РАДЭКС: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ 2023 Г.

Р. А. Садыков^{1,2}, В. С. Литвин¹, Д. Н. Трунов¹, В. Н. Марин¹, С. Н. Аксенов¹,
А. А. Алексеев¹, Ю. Б. Лебедь¹, И. В. Мешков³, Ю. А. Лапушкин³*

¹Институт ядерных исследований РАН, Москва

²Институт физики высоких давлений РАН, Троицк

³Физический институт РАН, Москва

*E-mail: rsadykov@inr.ru

В ИЯИ РАН созданы импульсные источники нейтронов ИН-06 и РАДЭКС на базе ускорителя протонов. Нейтронные каналы ИН-06 расположены таким образом, что они «смотрят» не на мишень, а только на замедлитель, который расположен над мишенью, что позволяет убрать мощную β -вспышку в момент рождения нейтронов и быстрые нейтроны.

В настоящее время в ИЯИ РАН формируется учебно-научное направление нейтронных исследований конденсированных сред и наносистем и в тезисах представлены нейтронографические установки первой очереди, созданные на импульсных источниках тепловых нейтронов ИН06 и РАДЭКС, а также первые спектры.

Созданы первые нейтронографические установки:

1. «МНС» — многоцелевая установка для определения структуры с блоком детектирования методом фокусировки по времени пролета (ФИАН).
2. «Горизонт» — малоугловой спектрометр-рефлектометр с вертикальной плоскостью рассеяния нейтронов для исследования поверхностей и наноструктур (ПИЯФ).
3. «Геркулес» — дифрактометр для исследования веществ при высоком давлении до 100 кбар, включая наводораживания образцов *in situ* (РНЦ-КИ, ИФВД).
4. «Кристалл» -дифрактометр для исследования структуры кристаллов.

Каждая из установок имеет свою схему коллимации и детектирования нейтронов: коллиматоры, нейтронотводы и нейтронные концентраторы прямого пучка, гелиевые детекторы, сцинтилляционные детекторы и газовые ПЧД (ОИЯИ). Получены спектры прямых пучков и нейтронограммы некоторых сплавов (фазовый анализ по методу Ритвельда) на источниках нейтронов ИН-06 и РАДЭКС.

Установки оснащены криостатами, прессами и магнитом при комнат. температуре до 1Т.

НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ НА РЕАКТОРЕ ИР-8

В. Т. Эм, И. Д. Карпов, М. М. Мурашев*

НИЦ «Курчатовский институт, Москва, Россия

* E-mail: Em_VT@nrcki.ru

На реакторе ИР-8 в НИЦ «Курчатовский институт» работы в области материаловедения ведутся, в основном, на стресс-дифрактометре СТРЕСС, станции нейтронной визуализации ДРАКОН и нейтронном томографе ПОНИ.

В дифрактометре СТРЕСС реализована оригинальная схема двойного монохроматора, которая позволила создать компактный и светосильный прибор, сравнимый по своим характеристикам с лучшими стресс-дифрактометрами в мире на более мощных (20 – 30 МВт) реакторах. Прибор позволяет измерять напряжения в материалах большой толщины (50 мм в стали) и распределение напряжений в тонких (несколько миллиметров) деталях с высоким пространственным разрешением (~ 0.2 мм). В основном исследуются напряжения в стальных сварных швах и материалах аддитивных технологий. В докладе приводится обзор этих исследований.

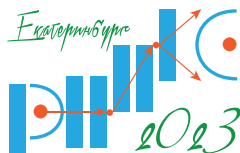
Станция нейтронной визуализации «ДРАКОН» является единственной в России и постсоветском пространстве станцией энергодисперсионной нейтронной радиографии и томографии. Для монохроматизации нейтронов используется двойной монохроматор, позволяющий изменять длину волны монохроматических нейтронов в интервале 1.7 - 5 Å с разрешением $\Delta\lambda/\lambda \approx 3\%$. На станции впервые была показана возможность визуализации контраста между ферритной и мартенситной фазами стали. Проводятся исследования внутренней структуры материалов и изделий, полученных методами аддитивных технологий.

Нейтронный томограф ПОНИ предназначен для проведения экспериментов по нейтронной визуализации высокого разрешения с использованием полихроматического пучка нейтронов. Геометрические параметры станции ($L/D = 600$) позволяют получать пространственное разрешение до 40 мкм. На сегодняшний день пространственное разрешение ограничено детекторной системой и составляет ≈ 180 мкм. Тем не менее, высокая степень коллимации пучка значительно уменьшает вклад размера образца в пространственное разрешение. Для объектов размером до 100 мм в направлении падающего нейтронного пучка пространственное разрешение составляет до 200 мкм, что в случае с металлическими образцами недостижимо для рентгеновских и гамма томографов.

В работе приведены примеры комплексного исследования изделий аддитивных производств методами стресс-дифрактометрии и нейтронной визуализации на монохроматических и полихроматических пучках нейтронов.

Работа выполнена на оборудовании УНУ НИК ИР-8.

Стендовые доклады



IN-SITU SMALL ANGLE NEUTRON SCATTERING UNDER THERMAL-MECHANICAL COUPLED FIELD LOADING

Xie Zhenhua^{1,2}, Ke Yubin^{1,2*}

¹Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China.

²China Spallation Neutron Source, Dongguan 523803, China.

*E-mail: keyb@ihep.ac.cn

The nanoscale microstructures and their evolution under multi-field coupling condition are vital to materials' property and service stability. However, most of the "structure-property" studies were carried out for *ex-situ* condition, because it is difficult to *in-situ* investigate the microstructures evolution under complicated fields. Small angle neutron scattering (SANS) has been widely used to probe the nanoscale structures in different materials. Due to the high penetration of neutrons, it is a powerful technique for *in-situ* experiments with complicated sample environments, such as load frame and furnaces. Based on small angle neutron diffractometer at China Spallation Neutron Sources (CSNS), we build up an *in-situ* stress-temperature loading equipment. Its maximum load capacity is 10 kN, and the available temperature range is from -70 to 400 °C. *In-situ* SANS experiments on composites, polymer networks, hydrogels and alloys under thermal-mechanical coupled field loading conditions were carried out by using this equipment. The SANS 2D scattering pattern was found to evolve from isotropic to anisotropic with stress loading, which reveals the morphology and spatial orientation change of the nanoscale aggregation in the specimen.

ДИФРАКТОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕЩЕСТВ ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ «ГЕРКУЛЕС»

С. Н. Аксенов^{1*}, В. Н. Марин^{1,2}, В. С. Литвин¹, Д. Н. Трунов^{1,2}, Р. А. Садыков¹

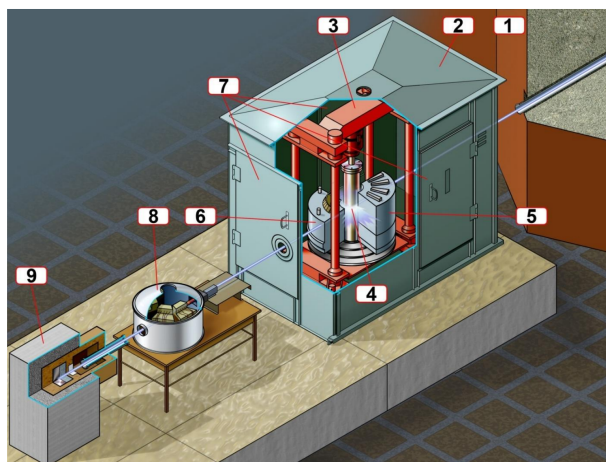
¹Институт ядерных исследований РАН, Москва, Троицк, 108840 Россия

²НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, 188300 Россия

*E-mail: axenov@inr.ru

«Геркулес» — дифрактометр для исследования веществ при высоком давлении до 100 кбар, включая возможность наводороживания образцов (материалов водородной энергетики) *in situ* (совместно с ИФВД, НИЦ КИ). Специальный пресс до 300 тонн и камера высокого давления (КВД) позволят проведение “*insitu*” экспериментов. КВД имеет устройство для заполнения образца (например клатрата) газом (D_2 , Ar, etc) и помещается в криостат.

Установка геркулес расположена на источнике нейтронов ИН-06 ИЯИ РАН[1]. На рисунке 1 представлен внешний вид установки ГЕРКУЛЕС



- 1 – защита источника нейтронов,
- 2 — герметичный сейф с возможностью создания водородной атмосферы,
- 3 — пресс для создания давления,
- 4 — образец в криостате,
- 5 — блок детекторов упругого рассеяния,
- 6 — блок детекторов неупругого рассеяния,
- 7 - двери сейфа,
- 8 — многоцелевой дифрактометр «Диас»,
- 9 — ловушка нейтронного пучка.

Рис. 1. Внешний вид установки геркулес

Детекторная система установки Геркулес после модернизации состоит из 16 сцинтилляционных детекторов размером 10×120 мм [2] размещенных в защите из борсодержащего материала. Детекторы размещены под углами от 30 до 170 градусов относительно падающего пучка.

Также в рамках модернизации на установке используется новая система сбора и накопления данных. Система основана на современной ПЛИС Artu A7 и имеет 20 каналов сбора и накопления гистограмм. Интерфейс для передачи данных USB, управляющая программа написана на языке NI LabView.

1. А. А. Алексеев, Р. А. Садыков, В. С. Литвин [и др.], Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2015. – № 3. – С. 5.
2. В. Н. Марин, Р. А. Садыков, Д. Н. Трунов [и др.], Письма в Журнал технической физики. – 2015. – Т. 41, № 18. – С. 96-101.

СИНТЕЗ, ЭЛЕКТРОННЫЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФАЗ ЖЕЛЕЗА И ПОЛИГИДРИДОВ ЖЕЛЕЗА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ МЕГАБАРНОГО ДИАПАЗОНА

И. С. Любутин¹, В. В. Стружкин⁴, С. Н. Аксёнов², А. Г. Иванова^{1,2}, А. А. Миронович²,
И. А. Троян¹, М. В. Любутина¹, Ю. А. Никифорова¹, А. Г. Гаврилюк^{1,2,3}

¹Институт кристаллографии ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 119333 Москва, Россия

²Институт ядерных исследований РАН, 108840, Троицк, Москва, Россия

³Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 236041, Калининград, Россия

⁴Center for High Pressure Science and Technology Advanced Research (HPSTAR), Shanghai, China

* E-mail: lyubutinig@mail.ru

Магнитные и электронные состояния железа в гексагональной плотноупакованной (ГПУ) ϵ -Fe фазе исследованы методом синхротронной мессбауэровской спектроскопии на ядрах Fe-57 (методика NFS – nuclear forward scattering) [1]. Измерения выполнены при сверхвысоких давлениях до 241 ГПа в диапазоне температур от 4 до 300 К, а также во внешних магнитных полях до 5 Тесла. Вопреки существующим теориям установлено, что во всей $P - T$ области атомы Fe находятся в немагнитном состоянии (Рис. 1с). Предполагаемая теорией магнитная неустойчивость и квантовые спиновые флуктуации, которые могут быть стабилизированы внешним магнитным полем, не подтверждается нашими измерениями NFS спектров во внешнем магнитном поле. На основе подходов Гуденафа [2] мы предположили, что при высоких давлениях коллективизированные s -, p - и d - электроны в ϵ -Fe находятся в парамагнитном состоянии типа Паули, а локализованные d -электроны находятся в низкоспиновом диамагнитном состоянии. Это позволяет объяснить немагнитное состояние фазы ϵ -железа, наблюдаемое экспериментально.

Установлено, что значение изомерного сдвига IS сильно уменьшается с ростом давления (Рис. 1а), и при максимальном давлении 241 ГПа достигает колоссальной отрицательной величины ≈ -0.8 мм/с, указывая на очень высокую электронную плотность на ядре железа. При давлениях 100-240 ГПа обнаружены резкие изменения электронной плотности на ядре железа в области температур 100-200 К (Рис. 1б). Это указывает на фазовые переходы с изменением электронной структуры, что может быть связано с резким увеличением проводимости или даже с возникновением сверхпроводимости.

В условиях высоких давлений до 160 ГПа и высоких температур до 2000 К впервые синтезированы семь различных соединений железа с водородом FeH_x с совершенно разными электронными и магнитными свойствами [3]. Синтез проводился в системе Fe-боразан (NH_3BH_3) в камерах с алмазными наковальнями при лазерном нагреве образца. Обнаружено, что одно из этих соединений FeH_2 имеет тетрагональную кристаллическую структуру $I4/mmm$ и при давлении 82 ГПа является магнетиком до температуры около 174 К (Рис. 2). Также удивительным результатом является обнаружение одной из фаз FeH_x , неизвестного пока состава, которая при давлении 128 ГПа остается магнитоупорядоченной в интервале температур от 4 до 300 К, а экстраполированное значение температуры Нееля может достигать ~ 2100 К! (Рис. 2б справа). Существование магнитных фаз соединений железа при таком рекордно высоком давлении является уникальным и не наблюдалось до настоящего времени. Такие высокие давления характерны для области, находящейся на границе между нижней мантией и внешним ядром Земли, в составе которой преобладает железо. Поэтому полученные экспериментальные данные о магнитном состоянии и электронных свойствах фаз железа очень важны как с фундаментальной точки зрения физики металлов и их магнетизма, а также с точки зрения физики Земли и земного магнетизма.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 21-12-00344, а также Минобр-науки РФ в рамках работ по гранту № 075-15-2021-1362. При подготовке образцов использовалось оборудование ЦКП "Ускорительный центр нейтронных исследований структуры

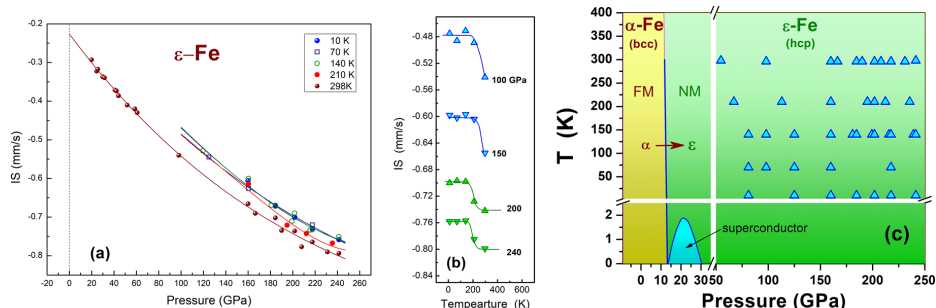


Рис. 1. (а) Зависимость изомерного сдвига в ϵ -Fe железе от давления для различных температур. Сплошные линии – аппроксимация полиномом третьей степени. (б) Температурные зависимости изомерного сдвига для разных давлений. Значения изомерных сдвигов даны относительно α -Fe, находящегося при комнатной температуре и атмосферном давлении. (с) Фазовая Р-Т диаграмма железа: треугольными символами отмечены Р-Т точки, в которых измерялись NFS спектры в нашем эксперименте. Все точки относятся к немагнитному состоянию железа

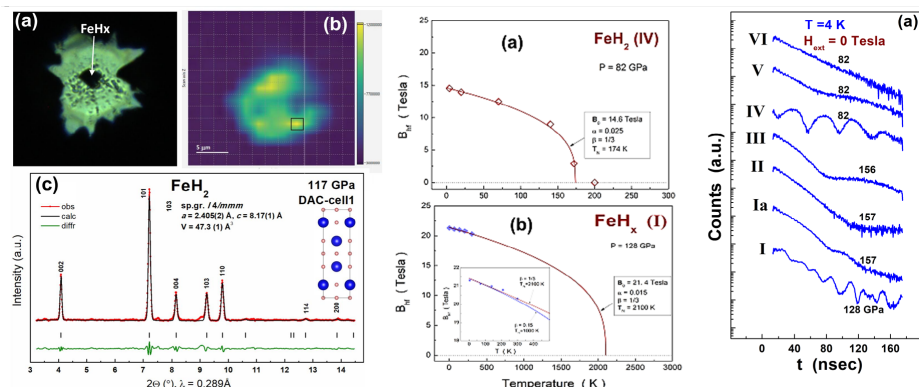


Рис. 2. Фотография образца в камере высокого давления ((а) слева) и распределение фазы FeH_2 по образцу ((б) слева). Дифрактограмма фазы $I4/mmm$ - FeH_2 и её кристаллическая структура. Температурная зависимость магнитного поля B_{hf} на ядрах Fe-57 в фазе $I4/mmm$. FeH_2 при давлении 82 ГПа и в фазе FeH_x (I) при давлении 128 ГПа. Экстраполированное значение температуры Нееля 2100 К. Спектры NFS семи различных фаз полигидридов железа при температуре 4 К (справа)

вещества и ядерной медицины” ИЯФ РАН. Рентгеноструктурные исследования проведены при поддержке Минобр-науки РФ в рамках работ по Госзаданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» с использованием оборудования ЦКП (проект RFMEFI62119X0035).

1. A. G. Gavriluk, V. V. Struzhkin, S. N. Aksenov, A. A. Mironovich, I. A. Troyan, A. G. Ivanova, and I. S. Lyubutin. “Electronic and Magnetic Properties of the ϵ -Fe Phase at High Pressures up to 241 GPa in the Temperature Range of 4–300 K”. JETP Letters 117 (2023) 126–137.
2. J.B. Goodenough, Magnetism and the chemical bond. (Interscience publishers, a division of John Wiley & Sons, New York-London, 1963).
3. A.G. Gavriluk, V.V. Struzhkin, S.N. Aksenov, A.G. Ivanova, A.A. Mironovich, I.A. Troyan, I.S. Lyubutin. “Synthesis and magnetic properties of iron polyhydride phases at megabar pressures”. JETP Letters 116 (2022) 804-816.

MECHANICAL PROPERTIES INVESTIGATION BY UNIAXIAL LOAD CONDITIONS ON SANDSTONE SAMPLE USING NEUTRON TOF DIFFRACTION METHOD

A. Badmaarag^{1,2*}, D. Sangaa¹, V. V. Sikolenko^{2,3}, L. Enkhtur⁴

¹Institute of Physics and Technology, MAS, Ulaanbaatar, Mongolia

²Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR, Dubna, Russia

³Karlsruhe Institute of Technology, IAG, Karlsruhe, Germany

⁴National University of Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia

*E-mail: badmaarag@jinr.ru

The knowledge of the stress and strain state in rock sample is of importance in the understanding of the rock properties for the interpretation of geodynamic processes and for geotechnical applications such as mining and tunneling. Recently, the topic of induced seismicity has become a major issue in geoenergy production (gas production, geothermal). Thus, the role of tectonic stress for the initiation of rock failure is of high scientific but also economic interest. The investigation of deformation with conventional lab scale experiments allows the determination of macro-strain in the cm- to m-range. On the nano to micro-scale, the application of diffraction methods offers the investigation of the strain which is localized in the crystal lattice, the so-called intra-crystalline strain. This localization of strain in a sample with dimensions in cm-range is achieved by strain scanning. Because of the low absorption properties of neutrons in matter, like metals and minerals, neutron diffraction is an excellent method for the investigation of strain in bulk samples, especially in multiphase samples, like rocks.

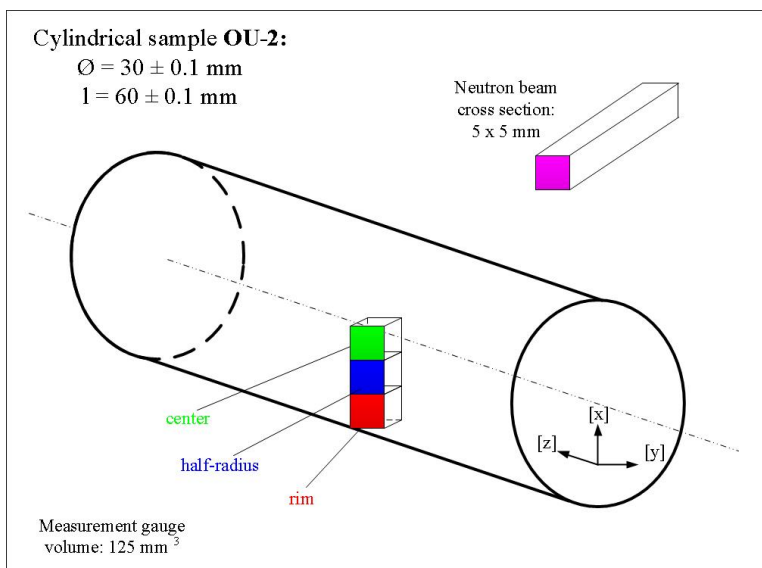


Рис. 1. Geometry and gauge volume for detection residual strain by neutron diffraction in an OU-2 sample

The neutron time-of-flight strain diffractometer EPSILON operated at the pulsed neutron source IBR-2M at the JINR Dubna is designed for the investigation of residual and applied intra-crystalline strain of bulk samples. Because of the large wavelength-range ($\lambda = 7.8 \text{ \AA}$) diffraction pattern with d-spacings up to $d = 5.6 \text{ \AA}$ can be investigated. Using the long flight path of about 107 m a good spectral resolution is achieved. That allows the investigation of multiphase rocks containing minerals with lower crystal symmetry. The diffractometer is equipped with an uniaxial pressure device, allowing load states up to 100 kN, e.g. 150 MPa with sample diameters of 30 mm and 60 mm length.

The investigations concentrated on 3 locations within the sample: in the centre, at the rim and at a location in-between (half-radius). To avoid immediate rock failure a pre-experiment to determine the failure stress has been performed. Sample OU-2 (sandstone) has scanned for 4 load steps (0 MPa, 15.5 MPa, 32.5 MPa, 49.5 MPa axial load). For each load level, the applied intra-crystalline strain has been determined in the direction of σ_1 and σ_3 . A newly developed analysis tool which uses all diffraction peaks for detection of the lattice deformations has been applied to determine the *in situ* modulus of elasticity and the Poisson's ratio at different positions (rim, half-radius, centre) within the sample.

1. D. Cunningham, Geosciences.7(1), 2, (2017).
2. W. Genyao, J. Palaeogeography.2(3), 306-317. (2013).
3. Y.V. Taran, A.M. Balagurov, B. Sabirov, V. Davydov and A. Venter, Materials Science Forum.768-769, 697-704, (2014).
4. Ch. Scheffzük, B.I.R. Müller, S. Breuer, A. Badmaarag and F.R. Schilling, Mongolian J. Phys. 2, 433-441, (2016).
5. Ch. Scheffzük, H. Hempel, A. Frischbutter, K. Walther and F.R. Schilling, J. Phys. Conf. Ser. 340 012038, (2012).
6. H.M. Rietveld, Acta Cryst.22.151, (1967).
7. Ch. Scheffzük, K. Walther and A. Frischbutter, Materials Science Forum.777, 136-141, (2014).
8. A. Badmaarag, Ch. Scheffzük, D. Sangaa, Mongolian J. Phys. 2, 442-448, (2016).
9. F. Stoeckhert, M. Molenda, S. Brenne and M. Alber, J. Rock Mech. and Geotechn. Eng. 7, 237-259, (2015).
10. R. Gast and T. Gundlach, Z. dt. Ges. Geowiss. 157 (1), 41–56, (2006).

ЭФФЕКТИВНОЕ ТОКОИНДУЦИРОВАННОЕ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОСТРУКТУР С ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

А. В. Телегин*, В. Д. Бессонов*, Е. А. Суржииков, В. А. Бессонова

ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, РФ

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

Мультислойные пленки с ультратонкими слоями ферромагнитного металла обладают уникальными топологическими, магнитными и транспортными свойствами, и привлекают внимание исследователей в связи с изучением киральных спиновых текстур и перспективой создания на их основе элементов памяти и сенсорных устройств слабых магнитных полей. В данной работе методами магнетронного распыления подготовлены образцы металлических тонкопленочных наноструктур ферромагнетик/тяжелый металл ТМ(Ru,Tb,W,Pt)/ФМ(Co) на подложке SiO₂. С помощью электронно-лучевой- и фотолитографии на полученных образцах изготовлены контакты холловского типа и сформированы структуры с локально-увеличенной плотностью тока.

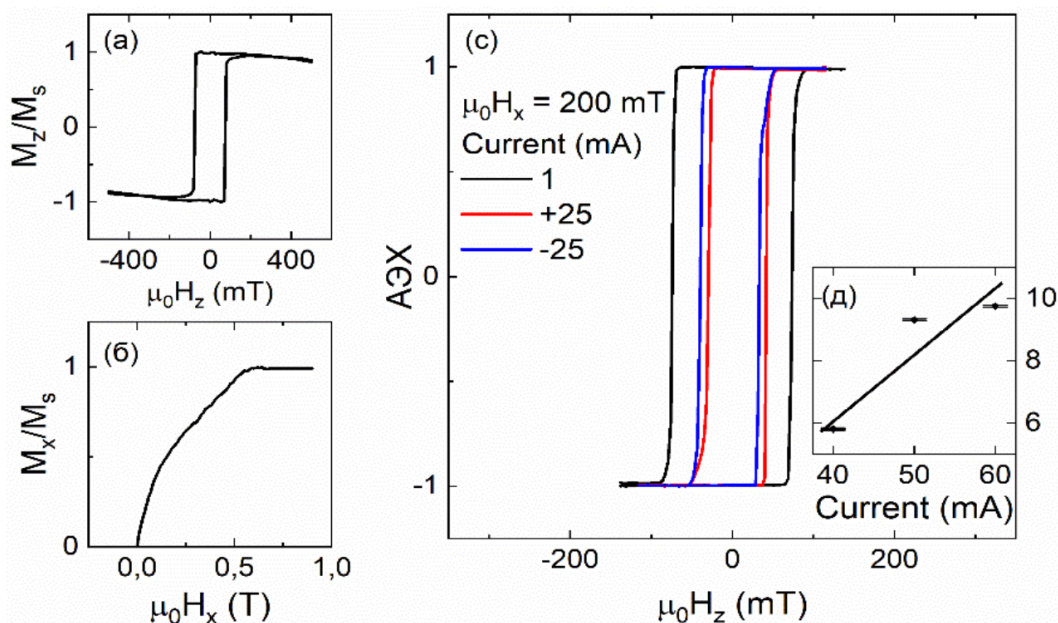


Рис. 1. Кривые намагничивания в перпендикулярном (а) и параллельном (б) магнитном поле, (с) петли гистерезиса структуры Холла в зависимости от величины и ориентации пропускаемого тока. На вставке - зависимость токоиндуцированного поля от тока в образце

Из данных Керр-микроскопии, магнитных и транспортных измерений определена намагниченность насыщения, энергия перпендикулярной магнитной анизотропии и плотность тока, необходимая для перемагничивания структур. Проведено моделирование



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

● → ● → ● → Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

удельного сопротивления и тока, протекающего через слои наноструктур, отвечающие за генерацию спинового тока. Установлено, что во всех структурах наблюдается эффект воздействия постоянного тока на магнитную структуру ФМ слоя вследствие сильной спиновой поляризации в локализованной проводящей области (спинового эффекта Холла). Эффективность этого воздействия может изменяться на два порядка в зависимости от конкретного слоя ТМ. Определена зависимость токоиндуцированного поля и эффективности токоиндуцированного переключения от типа ТМ и толщины ФМ слоя. Изучено влияние процессов переноса спинового момента на величину интерфейсного взаимодействия Дзялошинского-Мория в металлических наноструктурах.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №21-72-20160
(<https://rscf.ru/en/project/21-72-20160>).*

ОСОБЕННОСТИ УКЛАДКИ ХРОМАТИНА КЛЕТОК АДЕНОКАРЦИНОМА ЭРЛИХА ДИКОГО ТИПА И С РАДИОРЕЗИСТЕНТНЫМ ФЕНОТИПОМ

И. А. Кулаков¹, В. С. Бурдаков¹, Л. А. Иванова¹, Ю. Е. Горшкова², Г. П. Капица¹,
Д. В. Лебедев¹, Н. А. Верлов¹

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

²Лаборатория нейтронной физики им. Франка Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия

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

Одной из проблем, возникающих при лучевой терапии злокачественных новообразований (ЗНО) в клинике, является возникновение субпопуляции клеток, обладающих меньшей радиочувствительностью, чем исходная опухоль. В серии облучений, особенно при гиперфракционированном облучении, на относительно небольших интервалах времени субпопуляция клеток с радиорезистентным фенотипом может полностью заместить клетки исходной опухоли. Скоротечное возникновение радиорезистентного фенотипа клеток ЗНО обусловлено изменением экспрессии белков, эпигенетического профиля и, как следствие, изменением укладки хроматина. В эксперименте клетки аденокарциномы Эрлиха (АКЭ, перевивная асцитная опухоль мышей) последовательно облучались в гамма-установке (источник ^{60}Co , мощность дозы 0.87 Гр/мин.), после чего перевивались мышам (самки ICR (CD-1)). Исходная популяция клеток теряла способность к перевивке при дозе облучения 20 Гр и выше, серии облучений удалось выделить субпопуляцию клеток, сохранившую способность к перевивке при дозе 40 Гр. Из исходной субпопуляции клеток и клеток с радиорезистентным фенотипом были выделены ядра по стандартному протоколу. Препараты ядер были исследованы на SAXS-дифрактометре Xepocs Xeuss 3.03.0 (ОИЯИ, Дубна). Анализ данных рассеяния показал, что структура ядер АКЭ практически не меняется вплоть до субпопуляции клеток, перевиваемых после облучения дозой 30 Гр. Однако, клетки АКЭ в последующих облучениях, пережившие облучение дозой 40 Гр, демонстрируют аномально низкую фрактальную размерность в масс-фрактальном режиме (на размерах 40-200 нм). Анализ полученных кривых подтвердил исходное предположение об изменении укладки хроматина, что хорошо согласуется с данными, полученными при биологической характеристике исследованных образцов.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ НА ФОТОКАТАЛИТИЗАТОРЫ ИЗ BiOBrO_3

И. Г. Генев, О. Н. Лис, Т. Н. Вершинина, Д. П. Козленко, С. Е. Кичанов, Е. В. Лукин*

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*E-mail: dedfin45@abv.bg

Фотокаталитическая технология расщепления воды привлекает все больше внимания из-за нехватки энергии [1]. Фотокаталитические полупроводники могут расщеплять органические загрязнители до нетоксичных малых молекул посредством фотоиндуцированных реакций окисления и безвредны для окружающей среды. Слоистые материалы на основе Bi с разными структурами: Силлена BiOX , BiOXO_3 ($X = \text{Br}, \text{I}, \text{Cl}$), Ауривиллиуса Bi_2XO_6 ($X = \text{Mo}, \text{W}$), родственные Силлена $(\text{BiO})_2\text{CO}_3$ и др., показали мощную фотоокислительную способность при разложения различных загрязнителей [2].

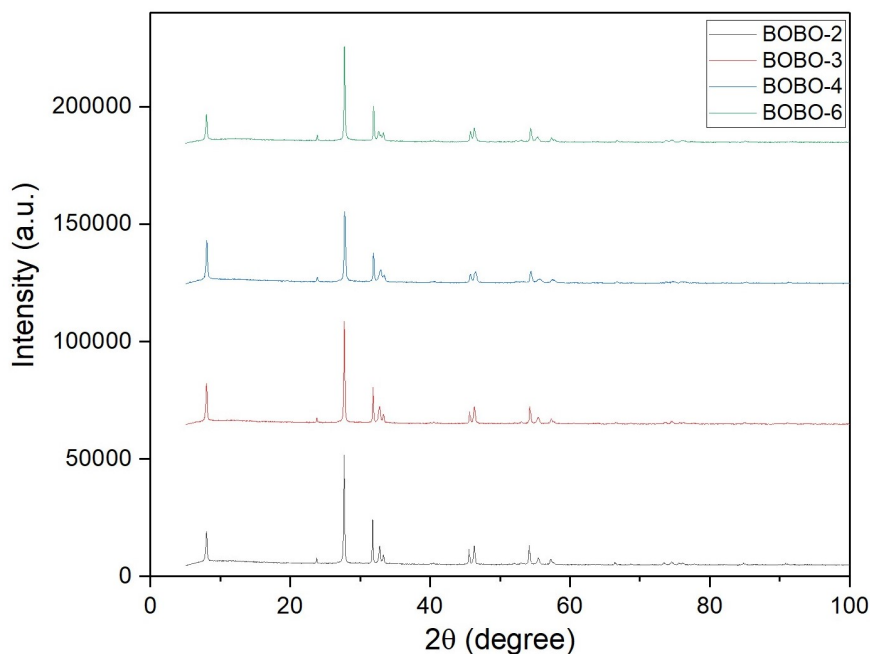
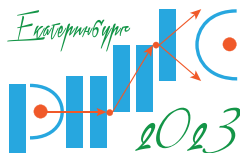


Рис. 1. Рентгеновские спектры для образцов BOVO-2, BOVO-3, BOVO-4 и BOVO-6

В этом исследовании был синтезирован и изучен материал BiOBrO_3 по методам рентгеновской дифракции (XRD) и рамановской спектроскопии. По сравнению с подобными материалами как BiOClO_3 и BiOIO_3 , материал BiOBrO_3 мало исследован и почти не синтезирован [1], поэтому он стал интересным для нас. По простым гидротермальным методам были синтезированы 4 образца из BiOBrO_3 , при температуре 150°C при разные



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

времен задержки: 2-, 3-, 4 и 6 часа поэтому, и полученные образцы, были названы соответственно BOVO-2, BOVO-3, BOVO-4 и BOVO-6.

С целью проверки возможных изменения микроструктуры при разных условиях получения был использован XRD анализ. Для оценки кристаллической структуры образцов BiOBrO_3 была использована модель кристалла BiOIO_3 с пространственной группой $R\bar{3}a21$. Результаты представленные на рис. 1, показывают, что время задержки температуры не оказывает влияния на полученные продукты. Не было обнаружено наличие второй фазы.

Данные XRD были проанализированы с использованием пакета FULLPROF с применением режима сопоставления профилей и последующим уточнением структурной модели по методу Ритвельда для полного профиля. Все дифракционные пики совпадают с положениями наблюдаемых брэгговских отражений. Наблюдаются узкие пики, соответствующих на BiOBrO_3 . Структурные параметры, полученные с помощью рентгеноструктурного анализа подтверждают, что свежеприготовленные образцы BiOBrO_3 , действительно имеют силленитную структуру. По формулу Шеррера был определен размер кристаллитов полученных образцов BiOBrO_3 - 0,188 μm .

Информация о структуре приготовленных образцов была получена через рамановскую спектроскопию. Полученные результаты показывают, что нет смещения между пиками всех образцов, и подтверждают анализы из XRD, что задержки температуры во время синтеза не оказывают влияния.

1. X. Dong, Y. Zhang, and Z. Zhao, Inorg. Chem. 60, 8461 (2021).
2. L. Hao, H. Huang, Y. Guo, and Y. Zhang, ACS Sustainable Chem. Eng. 6, 2, 1848, (2018).

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ГАЗОВАЯ УСТАНОВКА С ФУНКЦИЕЙ ВЫДЕЛЕНИЯ И ОЧИСТКИ ГЕЛИЯ-3

Т. И. Глушкова*, П. А. Кравцов, Л. М. Коченда, А. А. Фетисов

НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, г. Гатчина, Россия

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

Универсальная газовая установка предназначена для получения трехкомпонентных газовых смесей путем статического смешения, выделения и очистки дорогостоящего ^3He из смеси $\text{CF}_4 + ^3\text{He}$, а также компримирование последнего при высоком давлении.

Смешение проводится по величине парциального давления компонент. Процесс смешения происходит в автоматическом режиме с использованием управляющего компьютера [1].

Универсальная газовая установка предназначена для решения нескольких задач:

1. Выделение гелия-3. Процесс извлечения ^3He из смеси $\text{CF}_4 + ^3\text{He}$ происходит при температуре жидкого азота в вымораживателе. CF_4 при этой температуре находится в твердой фазе с очень низким парциальным давлением. С помощью насоса-компрессора ^3He извлекается из вымораживателя и накапливается в 10 литровом буфере при абсолютном давлении до 2 бар. Из буфера ^3He может компримироваться в исходный баллон или в баллон для приготовления смеси, проходя через блок криогенной очистки.

2. Перекачка гелия-3. Установка позволяет проводить перекачку газа или смеси из одного баллона с низким давлением в другой при высоком давлении. Для этого используется пневматический бустер, которым можно управлять автоматически. Гелий-3, выделенный из смеси и собранный в буферный баллон, также может быть перекачан в другой баллон с помощью бустера. При перекачке можно использовать блок криогенной очистки при температуре жидкого азота.

3. Приготовление газовой смеси. Предусмотрена возможность приготовления смеси при комнатной температуре в большом объеме (например, монокамерном детекторе). Приготовление проводится в специальном баллоне максимальным объемом 5 литров, помещенном в термошкаф. Температура смешения составляет 30°C и поддерживается контроллером температуры. Статическое смешение производится по величине парциальных давлений смешиваемых компонент с помощью компьютера в ручном или полуавтоматическом режимах.

Газовая установка оснащена системой автоматического управления на базе программируемого контроллера [2]. Система управления позволяет проводить автоматическое смешение газов с минимальным участием оператора с помощью управляющей программы для газовой системы. Программа обеспечивает как ручное, так и автоматическое управление установкой. Программное окно управления установкой представлено на рис. 1.

В программный комплекс входят средства для локальной и удаленной визуализации актуальных данных в виде графиков, а также для просмотра истории параметров. Все параметры записываются в базу данных.

Универсальная газовая установка разработана при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования, соглашение №075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г. (внутренний номер 15.СИН.21.0021).

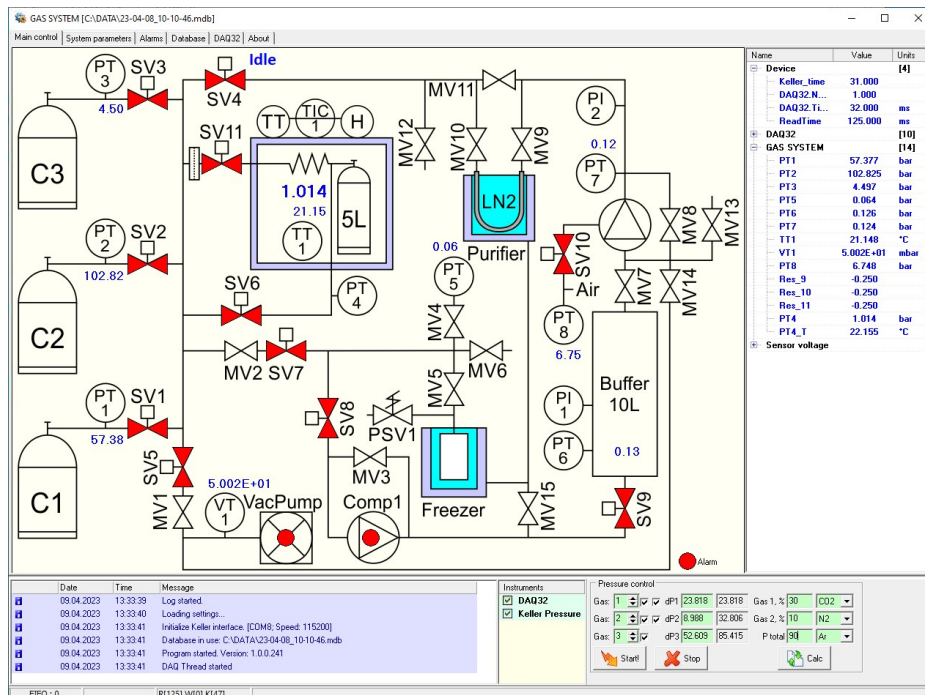


Рис. 1. Окно управления установкой

1. P. Kravtsov and V. Trofimov. Multi-Channel Measuring Instrument for Slow Control Systems. Preprint PNPI-2723, Gatchina (2007).
2. L. Kochenda et al., Final design of the RICH Gas System. CBM Progress report 2012, Darmstadt 2012, p. 47.

НЕЙТРОНОГРАФИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ФАЗОВОГО СОСТАВА ПРОДУКТОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ МОДЕЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

А. Ф. Губкин^{1,2,3*}, А. А. Рубаха^{1,2}, М. А. Семкин^{1,2}, А. Н. Пирогов^{1,2}, И. Ф. Бергер¹,
С. С. Хвостов^{3,4}, Н. В. Глушкова³, П. Н. Мушников^{2,4}, А. В. Шишкин⁴, В. Ю. Шишкин⁴,
Ю. П. Зайков^{2,4}, Ю. С. Мочалов⁵

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

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

³АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный, Россия

⁴Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

⁵АО «Прорыв», г. Москва, Россия

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

Развитие ядерной энергетики напрямую зависит от решения вопросов переработки облученного ядерного топлива (ОЯТ), что необходимо как для эффективного использования делящихся материалов, так и для концентрирования и захоронения радиоактивных отходов. В настоящее время подавляющее большинство АЭС, работающих в России, используют в качестве топлива диоксид урана. Одним из вариантов переработки ОЯТ из диоксида урана является его электролитическое восстановление до металла в расплавах. При этом важно контролировать полноту протекания процесса электролитического восстановления, чтобы уран полностью перешел в металлическую фазу ввиду жестких ограничений на потери делящихся материалов в процессе переработки ОЯТ. Для определения полноты протекания процесса электролитического восстановления был проведен нейтронографический анализ образцов UO_2 и модельного ядерного топлива (МЯТ) $\text{UO}_2 + 5\%(\text{La}_2\text{O}_3, \text{Nd}_2\text{O}_3, \text{CeO}_2) + 2\%\text{Pd} + 2\%\text{Rh}$ до и после электролитического восстановления.

На рисунке 1(а) представлен результат уточнения по методу Ритвельда нейтронограммы порошкового образца UO_2 , спрессованного в виде таблеток. Анализ данных показал, что образец UO_2 является однофазным в пределах чувствительности метода ($\sim 1\%$) и его кристаллическая структура хорошо описывается пространственной группой $Fm - 3m$ [1]. Нейтронограмма продукта, полученного из данного образца UO_2 электролитическим восстановлением, показана на рисунке 1(б). Данный образец также является однофазным и не содержит примесей в количестве, позволяющем однозначно диагностировать их присутствие в образце по пикам когерентного рассеяния нейтронов. Система брэгговских пиков хорошо описывается моделью орторомбической структуры $\alpha\text{-U}$ с пространственной группой $Cmcm$ [2]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что процесс электролитического восстановления прошел полностью по всему объему таблетки, и степень восстановления составляет 100 % в пределах погрешности метода измерения.

На рисунке 1(с) представлена нейтронограмма МЯТ. Моделирование присутствия примесей оксидов редких земель в минимально значимом количестве, позволяющем однозначно диагностировать их присутствие в образце по пикам когерентного рассеяния нейтронов, дает следующие оценки: содержание фазы CeO_2 в образце не выше 0.2 %, фазы La_2O_3 не выше 0.5 %, фазы Nd_2O_3 не выше 1 %. Поскольку на нейтронограмме нет видимых признаков присутствия оксидов редкоземельных металлов, то

можно предположить, что оксиды редких земель формируют твердый раствор в матрице UO_2 . Данный вывод косвенно подтверждается более высоким значением параметра элементарной ячейки у модельного ядерного топлива по сравнению с чистым UO_2 ($a(\text{UO}_2) = 5.4705 \pm 0.0003 \text{ \AA}$, $a(\text{МЯТ}) = 5.4733 \pm 0.0002 \text{ \AA}$). Оценка весовой доли чистых 4d металлов Rh и Pd, содержащихся в образце дает значения 2(0.6) % и 1.4(0.6) % и хорошо согласуется с данными навески прекурсоров, взятых для изготовления образца.

На рисунке 1(d) представлена нейтронограмма образца, МЯТ после процесса электролитического восстановления. Уточнение по методу Ритвельда показывает присутствие в образце моонитрида урана в количестве $9 \pm 1\%$, что свидетельствует о невысокой степени металлизации МЯТ, находящейся на уровне 90 %.

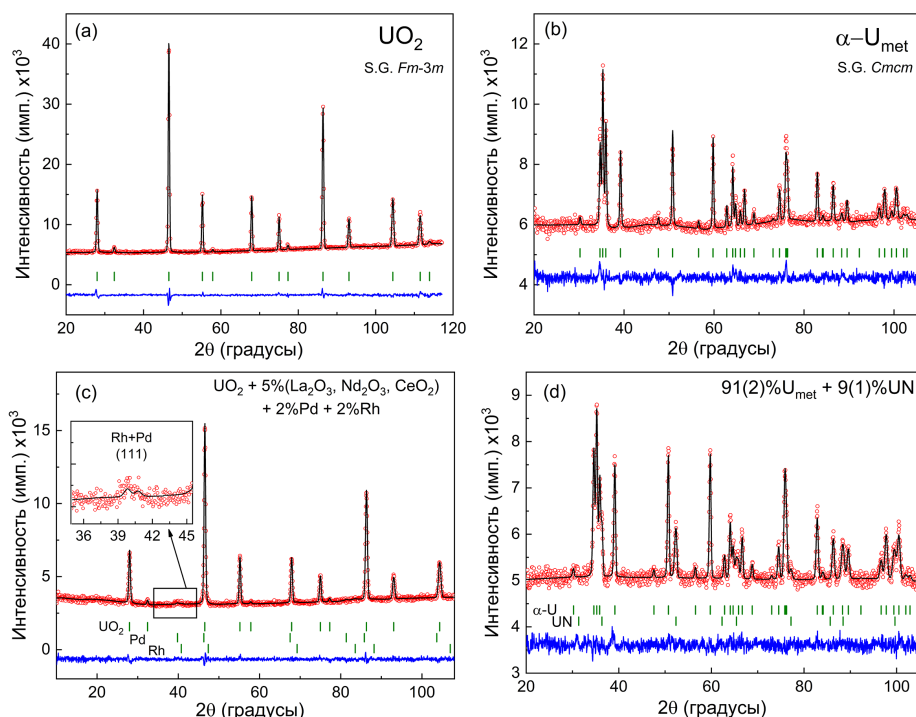
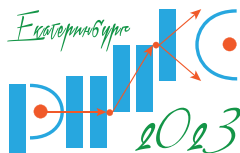


Рис. 1. Результаты уточнения по методу Ритвельда нейтронограмм (a) UO_2 , (b) продукт, полученный из данного образца UO_2 после металлизации, (c) модельное ядерное топливо (МЯТ) на основе UO_2 , (d) продукт, полученный из данного образца МЯТ после металлизации. На вставке к рисунку 1(c) изображен фрагмент нейтронограммы с вкладом от брэгговских пиков типа (111) для металлического Rh и металлического Pd

Результаты исследований выполнены рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «ПОТОК», № 122021000031-8).

1. P. Villars, "UO₂ Crystal Structure: Datasheet from 'PAULING FILE Multinaries Edition – 2012'" 2016, Springer, Heidelberg (ed.).
2. Pierre Villars, "α-U (U rt) Crystal Structure: Datasheet from 'PAULING FILE Multinaries Edition – 2012,'" 2016, Springer, Heidelberg (ed.).

Available: https://materials.springer.com/isp/crystallographic/docs/sd_1834992



СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ LiInSe_2 ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ

О. Даулбаев^{1,2}, Л. И. Исаенко^{3,4}, А. А. Богдзель¹, С. И. Лобанов^{3,4}, П. Г. Криницын^{3,4},
В. М. Милков¹, А. В. Белушкин^{1,5,6*}

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

²Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

³Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

⁴Институт геологии и минералогии, СО РАН, Новосибирск, Россия

⁵Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

⁶Институт физики, Казанский Федеральный Университет, Казань, Россия

*E-mail: olzhas.daulbayev@yandex.ru

ДВ данной работе приведены исследования двух монокристаллов LiInSe_2 , выращенных при различных условиях. Исследованы сравнительные характеристики указанных кристаллов для регистрации нейтронов методами регистрации сцинтилляции вследствие захвата нейтрона ядрами лития и последующего испускания заряженных частиц, а также традиционным методом съема заряда с поверхностей монокристаллов за счет той же ядерной реакции. Сделаны выводы о перспективах использования монокристаллов LiInSe_2 для различных типов нейтронных детекторов.

ФУРЬЕ МОДАЛЬНЫЙ МЕТОД РАСЧЁТА ДИФРАКЦИИ НЕЙТРОНОВ НА БЕГУЩЕЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЕ

М. А. Захаров*, Г. В. Кулин, А. И. Франк

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*E-mail: zakharovmax@jinr.ru

Дифракция нейтронов на бегущей поверхностной акустической волне (ПАВ) является нестационарным квантовым процессом, сопровождающимся передачей кванта энергии нейтрону $\Delta E = m\hbar\Omega$, где m - целое число, $\hbar$ - постоянная Планка, Ω - частота ПАВ. При этом волны различных дифракционных порядков m отличаются не только волновым вектором, но и частотой. Впервые о нагреве нейтронов на ПАВ говорилось в работе [1]. О первом экспериментальном наблюдении явления сообщалось в [2]. Позже был поставлен более детальный эксперимент [3].

Новый эксперимент по изучению дифракции нейтронов на ПАВ был поставлен на времяпролётном рефлектометре D17 в ILL (Гренобль) в режиме времени пролета при фиксированном угле падения на образец. Образцы представляли собой пластинки монокристалла LiNbO_3 . ПАВ возбуждалась при подаче ВЧ напряжения на встречно штыревые преобразователи, нанесенные литографическим методом на поверхность кристалла. Для разных образцов частота ПАВ составляла 35, 70, 117 МГц, что соответствовало величине переданной энергии ± 145 , ± 290 , ± 485 нэВ. Сравнение некоторых результатов эксперимента с теорией приведены на Рисунке 1.

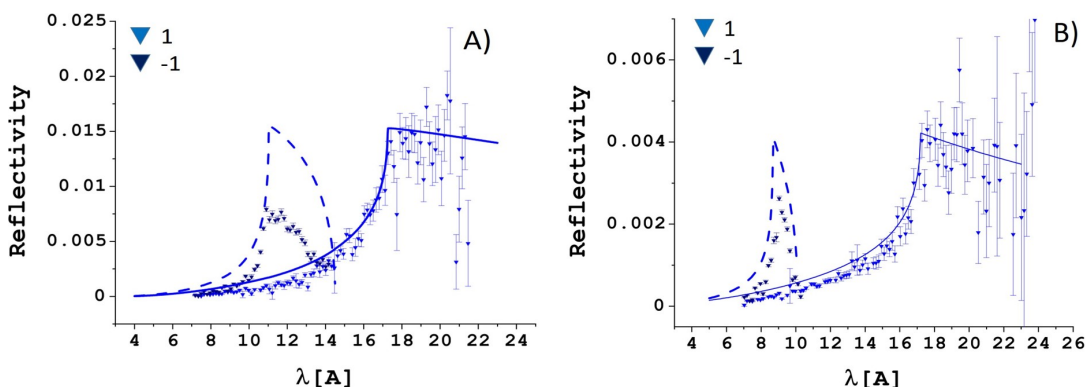


Рис. 1. Сравнение измеренных в эксперименте интенсивностей ± 1 порядков с теорией для двух образцов. А) Частота ПАВ 35 МГц, В) Частота ПАВ 70 МГц

Для величин переданной энергии и импульса дифрагировавших волн было получено хорошее совпадение с расчетом, основанном на том же подходе, что и в работе [3]. В то же время амплитуда минус первого дифракционного порядка во всех измерениях была значительно меньше расчетной. Метод расчета был основан на сшивании волновых функций, падающей и рассеянных волн на синусоидальной поверхности раздела вакуума и вещества [3]. Этот метод не позволяет учитывать некоторые физические

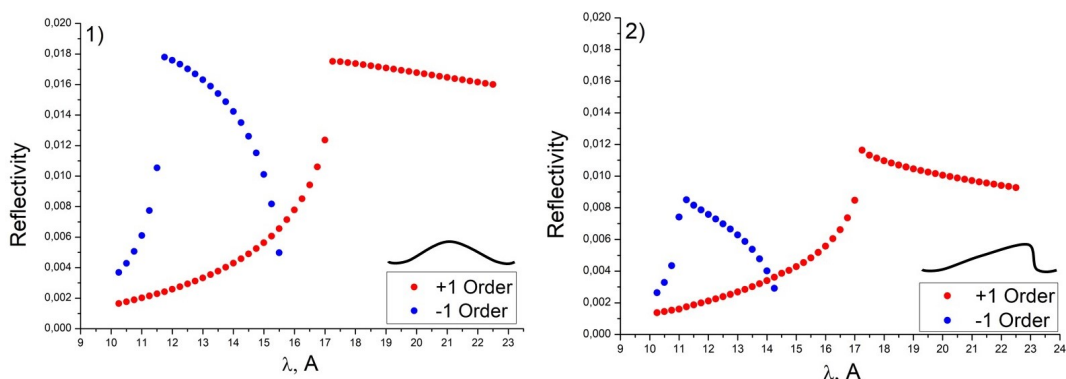


Рис. 2. Рассчитанная величина интенсивности ± 1 порядков в зависимости от длины волны падающих нейтронов: 1) симметричная форма гребня волны, 2) искажённая форма гребня волны

факторы, такие, например, как вариация нормальной к поверхности компоненты волнового числа падающих нейтронов.

В качестве более строго подхода было решено адаптировать для случая нейтронов известный в оптике Фурье-модальный метод или Точный метод связанных волн (ТМСВ) [4, 5]. Задача решалась в системе координат покоя бегущей волны. Ось X была выбрана вдоль направления движения ПАВ. Всё пространство, занимаемое ПАВ, представлялось в виде тонких слоев j с поверхностями, параллельными плоскости XY . Принималось, что в каждом из слоев потенциал взаимодействия нейтрона с веществом зависел только от x .

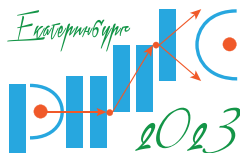
Для каждого слоя решалось уравнение Шредингера

$$\Delta_{x,z} \Psi_j(x, z) + [\tilde{k}^2 - \bar{U}_j(x)] \Psi_j(x, z) = 0, \quad (1)$$

где $\tilde{k}$ - волновое число нейтронов в системе покоя ПАВ, $\bar{U}_j(x)$ - периодическая по x функция потенциала. Общее решение задачи можно представить следующим образом:

$$\Psi(x, z) = \begin{cases} \Psi_{air}(x, z) = T_{out} e^{-ik_{0z}z} e^{-ik_{0x}x} + \sum_m R_{out,m} e^{ik_{out,m,(z)}z} e^{-iq_{m,(x)}x}, & z > 0 \\ \Psi_j(x, z) = \sum_n \sum_m (B_{j,n,m} T_{j,n} e^{-iq_{j,n,(z)}z} + B_{j,n,m} R_{j,n} e^{iq_{j,n,(z)}z}) e^{iq_{m,(x)}x}, & -H < z < 0 \\ \Psi_{sub}(x, z) = \sum_m T_{in,m} e^{-ik_{in,m,(z)}z} e^{iq_{m,(x)}x}, & z < -H \end{cases} \quad (2)$$

Здесь H - высота профиля поверхности, индекс m обозначает номер дифракционного порядка, $q_{m,(x)}$ - x -компонента волнового числа, $k_{out,m,(z)}$ - z -компонента волнового числа отражённого состояния, $k_{in,m,(z)}$ - z -компонента волнового числа прошедшего состояния, $q_{j,n,(z)}$ - z -компонента волнового числа волны внутри слоя j . Неизвестные ам-



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

• → • → • → Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

плитуды $B_{j,n,m}$ находятся из уравнения на собственные значения гамильтониана в слое j . Амплитуды $R_{out,m}$, $T_{j,m}$, $R_{j,m}$, $T_{in,m}$, могут быть найдены из системы уравнений, полученной из условий непрерывности функций на границах слоёв.

Результаты расчёта дифракционной картины Фурье-модальным методом полностью совпал с результатом предшествующих расчетов. Этим же методом были рассчитаны амплитуды дифракционных волн от ПАВ, профиль которой значительно отличался от синусоидальной (см. рис.2).

В случае искажения формы поверхностной волны симметрия максимумов дифракционных порядков нарушается, качественно приближаясь к результатам эксперимента, однако количественное расхождение с результатами эксперимента сохраняется.

1. I. M. Frank JINR Comm. R4-8851 (1975).
2. W. A. Hamilton, A. G. Klein, et al., Phys. Rev. Lett., 58, 2770 (1987).
3. G.V. Kulin, A.I. Frank, et al., Phys. Rev. B, 101, 165419 (2020).
4. M. G. Moharam and T. K. Gaylord, J. Opt. Soc. Am., 71, 7, 811 (1981).
5. Li Lifeng, J. Opt. Soc. Am. A, 13, 5, 1024 (1996).

**СТРУКТУРНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ, ОСАЖДЕННОГО
В ПРОЦЕССЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ БИОМИНЕРАЛИЗАЦИИ,
ИНДУЦИРОВАННОЙ ПЛАНКТОННОЙ КУЛЬТУРОЙ *BACILLUS CEREUS***

Л. А. Иванова¹, Д. А. Головкина¹, Е. В. Журишкина¹, Ю. Е. Горшкова², А. Е. Баранчиков³,
А. Д. Япрынцев³, Н. В. Цвигун⁴, Г. П. Копица¹, А. А. Кульминская¹, Д. В. Лебедев¹

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

²Лаборатория нейтронной физики им. Франка Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия

³Институт общей неорганической химии им. Курнакова РАН, Москва, Россия

⁴Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

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

Биоминерализация это явление образования минералов живыми организмами, которое широко распространено в природе. Например, во время своих метаболических реакций с окружающей средой бактерии, обладающие уреаолитической активностью, часто могут индуцировать осаждение карбоната кальция в почве и горных породах, в то время как другие подобные микроорганизмы могут осаждают CaCO_3 с образованием инкрустированных биопленок, которые закупоривают мочевые катетеры, вызывая значительные проблемы в клинической практике. Таким образом, исследование механизмов биоминерализации важно как для поиска путей ее торможения и решения клинических задач, так и для индукции биоминерализации для создания новых технологий ремонта бетонных конструкций, обеспечения целостности пористых сред и гидравлического контроля почв. Хотя известно, что кристаллизация аморфного CaCO_3 , образующегося *in vitro*, проходит по пути АКК-ватерит-кальцит/арагонит, этот процесс может быть значительно изменен при индуцировании бактериями, особенно при участии внеклеточного матрикса (ВКМ). Мы использовали комбинацию методов SEM, SANS, SAXS, FTIR и XRD для исследования структуры CaCO_3 , образующегося в процессе биоминерализации, индуцированной планктонной культурой *Bacillus cereus*. Образование осадков в присутствии CaCl_2 и мочевины наблюдали как при росте бактерий, так и в среде, лишенной бактерий и ВКМ. Путь полиморфных превращений CaCO_3 из аморфной фазы в ватерит и далее в кальцит подтвержден для бактериальной минерализации и не зависил от концентрации Ca^{2+} и мочевины. Структура осадков CaCO_3 различалась при формировании в бесклеточных и бактериальных системах и менялась в зависимости от времени и состава среды. Скорость преципитации ускорялась в присутствии ДНК, которая мало влияла на структуру твердой фазы в бесклеточной системе, однако сильно влияла на структуру и полиморфный состав преципитатов в бактериальной культуре.

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МОНОКРИСТАЛЛОВ НА НЕЙТРОННОМ ДИФРАКТОМЕТРЕ МОНД С IMAGE PLATE ДЕТЕКТОРОМ MAR345

А. И. Калюканов, Н. Н. Исакова*

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

*E-mail: Kalyukanov_AI@nrcki.ru

Методика исследования структуры монокристаллов реализована на базе нейтронного дифрактометра МОНД, установленного на выведенном пучке тепловых нейтронов реактора ИР-8 НИЦ «Курчатовский институт», и предназначена для проведения исследований кристаллической и магнитной структуры. Для реализации методики использовался четырехкружный гониометр, позиционно-чувствительный image plate детектор MAR345 [1] с чувствительной областью диаметром 345 мм и быстрый шиббер монохроматического пучка нейтронов собственной разработки.

Конфигурация электроники управления детектора позволила реализовать автоматический сбор экспериментальных данных в режиме ω -сканирования с использованием быстрого шибера монохроматического пучка под управлением программного комплекса mar345 [2].

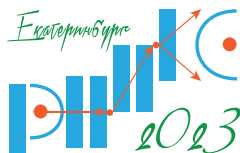
Выбраны оптимальное расстояние образец-детектор и стратегия обследования обратного пространства из четырех ω -сканирований в диапазоне 180° с шагом 1° при различном положении детектора по углу θ .

Первичная обработка экспериментальных данных – поиск и индентификация рефлексов, определение параметров элементарной ячейки и определение интегральной интенсивности брегговских рефлексов – реализована в программе DIRAX [3] и программном комплексе EVAL14 [4]. Дальнейшее уточнение кристаллической структуры может проводиться в любом доступном пакете кристаллографических программ.

Методика протестирована и хорошо подходит для исследования образцов размером $\sim 1 \text{ мм}^3$ с объемом элементарной ячейки $\geq 1000 \text{ \AA}^3$ и дает возможность обследовать большие области обратного пространства за разумное время.

Работа выполнена с использованием уникального научного оборудования «НИК на базе реактора ИР-8».

1. MarResearch, Mar345: Technical Specifications.
2. Claudio Klein, The mar345 Program Manual Version 2.0 (2000).
3. A.J.M. Duisenberg, J. Appl. Cryst. 25, 92-96 (1992).
4. A.J.M. Duisenberg, J. Appl. Cryst. 36, 220-229 (2003).



СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ SONIX+ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЕГО РАЗВИТИЯ

А. С. Кирилов, И. А. Морковников, С. М. Мурашкевич, Т. Б. Петухова, Л. А. Трунтова*

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

* E-mail: akirilov@jinr.ru

Программный комплекс Sonix [1] является основным программным обеспечением для управления измерительными установками на реакторе ИБР-2 ЛНФ. Проект был инициирован в начале 1990-х годов. В настоящее время выполнено порядка 20 его инсталляций. При разработке комплекса мы руководствовались как общемировыми тенденциями, так и спецификой нашей лаборатории. Модульная организация программного обеспечения и использование языка Python для описания экспериментального сценария позволяют относительно легко адаптировать его к специфическим особенностям различных инструментов. Универсальный графический интерфейс пользователя, основанный на наборе виджетов PyQt, может использоваться для управления экспериментом без дальнейшей доработки. Он обеспечивает все необходимые функции, в том числе, подготовку задания к эксперименту, запуск его, мониторинг текущих значений параметров, визуализацию спектров. Кроме того, существуют некоторые программы настройки инструментов и другие полезные компоненты. Помимо средств непосредственного управления, комплекс также включает подсистему дистанционного контроля измерений WebSonix и центральное хранилище результатов измерений. Система Journal обеспечивает автоматическое протоколирование истории измерений. В ближайшие годы все большее распространение на установках реактора ИБР-2 получают контроллеры DAQ, в которых отсутствует аппаратное гистограммирование данных [2], что соответствует глобальной тенденции. При этом первичное представление данных в виде гистограмм заменяется на форму в виде списка отдельных событий. Это повлечет за собой значительную перестройку всего конвейера регистрации и обработки данных и затронет все компоненты комплекса [3].

1. <https://sonix.jinr.ru/wiki/doku.php?id=ru>: индекс.
2. А.С. Кирилов и С.М. Мурашкевич. Письма в ЭЧАЯ, 2023, т. 20, № 2, стр. 126-132.
3. А.С. Кирилов и др. ОИЯИ, Р10-2023-14 (2023).



РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ С ОДНОМЕРНОГО ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ ГЕЛИЕВОЙ РЕЗИСТИВНОЙ ТРУБКИ

А. А. Козляковская*, А. А. Богдзель, В. М. Милков, Л. И. Литвиненко, В. И. Боднарчук

*E-mail: nasta94@jinr.ru

Компания National Instrument в сотрудничестве с CAEN разработала программное обеспечение (ПО) для генерации кода для некоторых аппаратных платформ, созданных фирмой CAEN. SDC SciCompiler основан на графическом программном интерфейсе, состоящем из готовых блоков, специально созданных для приложений ядерной физики.

В стендовом докладе будут представлены основные этапы создания системы сбора данных с газового одномерного позиционно-чувствительного детектора с резистивной нитью на основе SDK SciCompiler, а также дан краткий обзор программного пакета SciCompiler и диджитайзера DT5560SE фирмы CAEN.

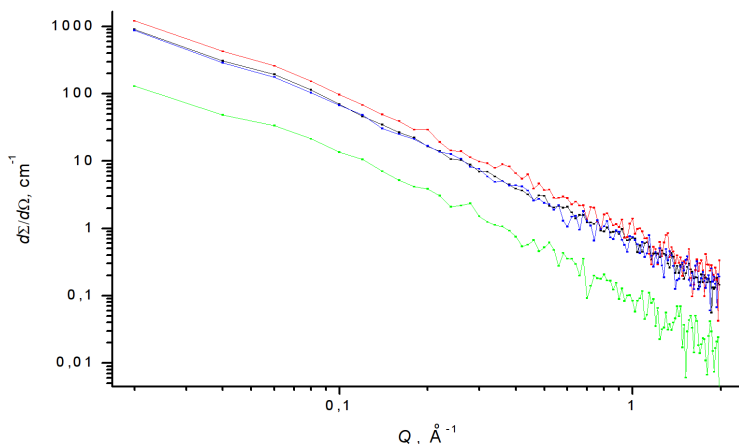


Рис. 1. Спектры МУРН на сплавах 40ХНЮ (красный), TiZr(зеленый), VT-8 (синий) и 38ХН-ВЮ(черный)

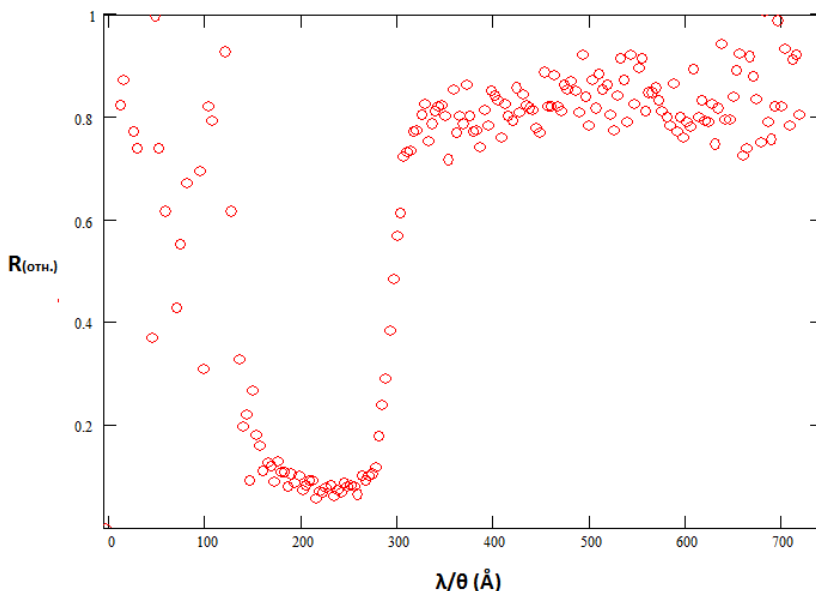


Рис. 2. Нейтронная рафлектметрия суперзеркала NiMo/Ti с $m = 2$

1. В. С. Литвин, Д. А. Бучный, В. А. Ульянов, В. Г. Сыромятников, А. П. Булкин, А. А. Столяров, Д. Н. Трунов, С. Н. Аксенов, С. И. Поташев, Р. А. Садыков, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 7, 3 (2021).
2. С. П. Кузнецов, В. С. Литвин, В. Н. Марин, Д. Н. Трунов, С. Н. Аксенов, Ю. Б. Лебедь, И.В.Мешков, Р. А. Садыков, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 5, 29 (2018).

РАЗЛИЧИЯ В ФОРМИРОВАНИИ ЛИПИДНЫХ БИСЛОЕВ ИЗ СОЕВЫХ ФОСФОЛИПИДОВ И ДМФХ НА КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ

В. А. Маслова, М. А. Киселев*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*E-mail: varvara@jinr.ru

В настоящее время получило широкое распространение использование специальных биodeградируемых систем для переноса биологически активных веществ [1]. Такие системы обладают целым рядом преимуществ: повышение биодоступности препаратов, возможность адресной доставки лекарственных соединений и снижение количества побочных эффектов по сравнению с теми же препаратами, но в обычном виде [2].

Исследования по изучению взаимодействия таких систем с мембраной клетки или липидным бислоем на данный момент проведены в недостаточном количестве [3]. Чтобы лучше понять механизм проникновения, необходимо начать с создания модельной мембраны и изучить процесс взаимодействия нанопрепаратов с модельной мембраной.

Целью эксперимента являлось исследование различий в формировании липидных бислоев из соевых фосфолипидов с различной чистотой (S80 и S100) и димиристоил-фосфатидилхолина (ДМФХ). Эксперимент был выполнен с помощью метода времяпролетной нейтронной рефлектометрии в Объединенном институте ядерных исследований на нейтронном рефлектометре GRAINS. Особенность этой установки в том, что у нее горизонтальная плоскость образца, а также есть возможность использовать ячейку с возможностью промывки. В качестве подложки был выбран кристалл кремния, на который в лаборатории нарастили оксидный слой. Растворы были приготовлены в тяжелой воде с концентрацией фосфолипидов 1 %.

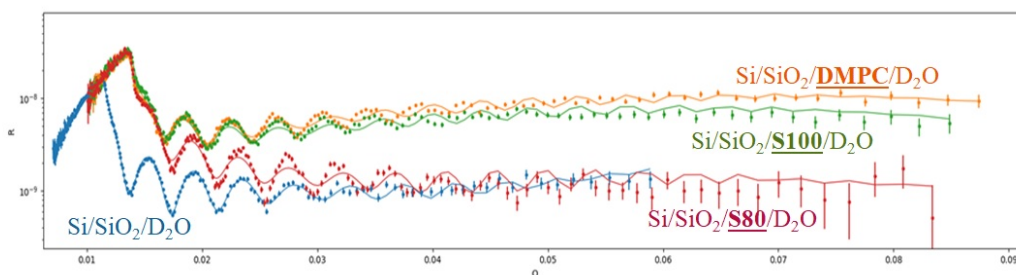


Рис. 1. Кривые рассеяния от образцов и подложки

На графике представлены экспериментальные кривые рассеяния нейтронов на образцах. Из полученных данных можно сделать вывод, что соевые фосфолипиды S100 и ДМФХ совпали. Соевый фосфолипид S80 % осаждался не полностью, можно предположить, что он осел "островками".

Итогом работы являются результаты, которые демонстрируют, что качество образуемого липидного бислоя зависит от чистоты используемых соевых фосфолипидов.

Таблица 1. Параметры сформированных бислоев

Образец	Площадь на молекулу, $\text{\AA}^2$	Толщина области головы, $\text{\AA}$	Толщина области хвоста, $\text{\AA}$	ПДР раствора, $10^{-6} \text{\AA}^{-2}$	ПДР внешнего слоя оксида, $10^{-6} \text{\AA}^{-2}$
ДМФХ	50.8 ± 2.5	6.3 ± 0.2	16.3 ± 3.2	5.76 ± 0.02	3.36 ± 0.01
	50.6 ± 2.7	6.5 ± 1.7	17.7 ± 4.5		
S100	51.7 ± 3.5	6.3 ± 0.3	17.6 ± 0.6	5.88 ± 0.02	3.18 ± 0.01
	57.1 ± 3.8	6.6 ± 1.7	17.8 ± 0.9		
S80	70 ± 1.7	10 ± 1.7	25 ± 1.9	5.83 ± 0.01	3.41 ± 0.01

Также можно сделать вывод, что в дальнейших экспериментах по взаимодействию с модельной мембраной, дорогостоящий ДМФХ может быть заменен на соевый фосфолипид S100.

1. R.M. Mainardes, L.P. Silva, Current drug targets. Т. 5, № 5, С. 449-455 (2004).
2. Н.В. Медведева и др. Биомедицинская химия. Т. 61, № 2, С. 219-230 (2015).
3. T. Gutberlet et al. Journal of Physics: Condensed Matter. Т. 16, №. 26, С. S2469 (2004).

**СТРАТЕГИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ ПЕРЕДОВЫХ
НАУЧНЫХ РАЗРАБОТОК***О. И. Москвина^{1*}, Е. В. Алтынбаев^{1,2}*¹НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*E-mail: moskvina_oi@npfi.nrcki.ru

В докладе будет представлена стратегия внедрения передовых научных разработок на базе платформы-акселератора центра трансфера технологий (далее – ЦТТ) в формате цифровой площадки.

Наиболее эффективным способом внедрения результатов научных исследований и наукоёмких разработок является реализация крупных, от 100 млн рублей, инвестиционных федеральных проектов, таких как НИОКР и НИОКТР в рамках Постановлений Правительства Российской Федерации №951 от 30.06.2020 г. и №218 от 09.04.2010 г. Тем не менее, как правило, низкая мобильность Заказчика в лице Минобрнауки России и существенная трудоёмкость внесения изменений в уже согласованное техническое задание и его адаптация по ходу реализации проекта с учётом текущих результатов НИОКТР и оперативного получения обратной связи от конечных потребителей технологий – Индустриальных партнеров. В результате, полученные к концу реализации ПНИЭР технологии зачастую уже технически и морально «устаревают», и не отвечают нуждам промышленного сектора, требуют модернизации, совершенствования и, соответственно, дополнительных объемов финансирования.

Инжиниринговым инструментом, который позволит быстро адаптировать технологии, доработать их и внедрить в имеющийся производственный цикл Индустриального партнера, с проведением необходимых испытаний может служить создание совместных предприятий - малых инновационных предприятий (далее – МИП), а также развитие инжиниринговых центров на базе научных организаций, оказывающих сервисные работы по технологической упаковке проектов, сертификации и проведению испытаний.

Таким образом, МИП на базе научно-исследовательской организации сублимирует в себе интересы и возможности научной организации, как одного из учредителей и правообладателей патентов на технологии и интересы промышленного сектора в лице Индустриального партнера, как второго учредителя. При этом МИП значительно мобильнее в силу количества персонала и юридической формы образования, что позволяет быстрее реагировать на технологические вызовы общества.

Возможность привлечения как частных инвестиций, так и государственных субсидий делает МИП эффективным инструментом коммерциализации результатов деятельности научно-исследовательских организаций.

Цифровым агрегатором, который позволит объединить все имеющиеся ресурсы научно-исследовательского учреждения, Индустриальных партнеров и МИП, а также сконцентрировать в рамках одного информационного пространства запросы на наиболее востребованную наукоёмкую продукцию и механизмы поддержки инвестиционных проектов, может являться цифровая платформа центра трансфера технологий.

Платформа ЦТТ позволит реализовать цепочку «результат исследования - востребованная рынком научно-техническая продукция - конкурентоспособное производство» Общая модель взаимодействия приведена на Рис. 1



Рис. 1. Модель взаимодействия на базе цифровой платформы

Повышение конкурентоспособности страны за счет достижений науки и техники, высоких темпов освоения новых знаний для создания товаров с высокой добавленной стоимостью является одним из важнейших приоритетов государственной политики, сформированных в Указах Президента Российской Федерации и национальных проектах.

Успешное достижение данных приоритетов неразрывно связано с развитием трансфера технологий, содействующего поиску технологических партнеров и стратегических инвесторов, созданием дополнительных возможностей внедрения и освоения инновационных разработок.

Описанная в докладе стратегия была представлена в качестве дипломной работы в рамках обучения на Президентской программе подготовки управленческих кадров для организаций народного хозяйства Российской Федерации в 2020/21 учебном году и была отмечена как лучший проект.

СТАНЦИЯ ДЛЯ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ И РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ NT1

А. А. Павельева*, Е. В. Алтынбаев, Д. Н. Трунов

НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Гатчина, Россия

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

Методы визуализации, основанные на применении нейтронов, имеют высокую скорость развития и стали универсальными инструментами неразрушающего анализа во многих областях исследований.

Стоит отметить, что особый тип взаимодействия нейтронов с веществом, в сравнении с электронами, протонами и рентгеновским излучением, делает методы нейтронную радиографию и томографию не только уникальными, но и прекрасно дополняющими основанные на других типах излучения методы исследования [1]. Что обеспечивается способностью нейтронов проникать сквозь слои металлов, керамики и органических материалов, сохраняя при этом высокую чувствительность к легким элементам и способность к различию изотопов.

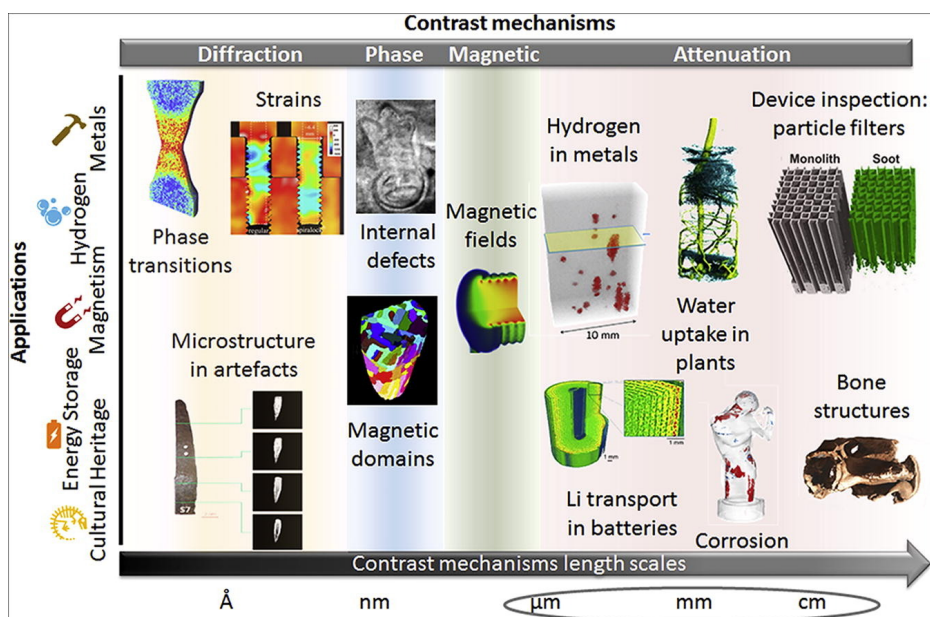


Рис. 1. Соотношение между различными типичными масштабами длины волны, на которых действуют контрастные механизмы [1]

Диапазон текущих и потенциальных приложений данных методов достаточно широк, включая общие исследования материалов и систем, связанных с производством и использованием возобновляемых источников энергии [2], а также примеры из биологии [3], палеонтология [4], культурное наследие [5] и специальные инженерные материалы. В данной работе собраны применения методов нейтронной визуализации, проиллюстрированные примерами, выбранными из области материаловедения.

Нейтронная радиография на непрерывных источниках нейтронов основана на пропускании коллимированного пучка тепловых или холодных нейтронов через образец и регистрации ослабленного пучка позиционно-чувствительным детектором. Ступенчатое вращение образца в пучке позволяет получить набор угловых проекций, которые необходимо использовать на следующем этапе для томографической реконструкции. Таким образом, весь объем может быть представлен в 3D - виде путем восстановления свойства затухания для каждой точки выборки из собранных проекций с применением математических алгоритмов [2].

Соотношение между различными длинами волн, на которых действуют контрастные механизмы, и некоторыми соответствующими приложениями показаны на рис. 1.

Здесь каждое свойство материала (например, микроструктура, внутренние дефекты, коррозионное поведение и т.д.) или процесс (например, фазовый переход, гидратация, транспорт Li и др.) относят к соответствующему контрастному механизму, позволяющему проводить исследование. Применение нейтронных методов визуализации позволяет напрямую визуализировать магнитные домены или различные микроструктурные свойства, такие как распределение фаз (рисунок 2б), поля напряжений и деформаций, текстурные неоднородности (рисунок 2а) и т. д., что является перспективными опциями для применения в области материаловедения.

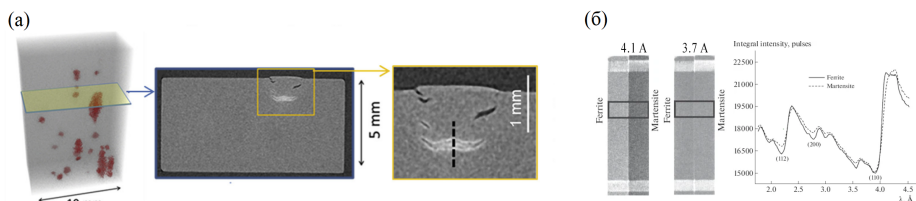


Рис. 2. а) Визуализация наличия и распространения водорода в исследуемом объеме благодаря нейтронной томографии [1]. б) Возможность различать фазовый состав стали в зависимости от используемой длины волны посредством нейтронной радиографии [6].

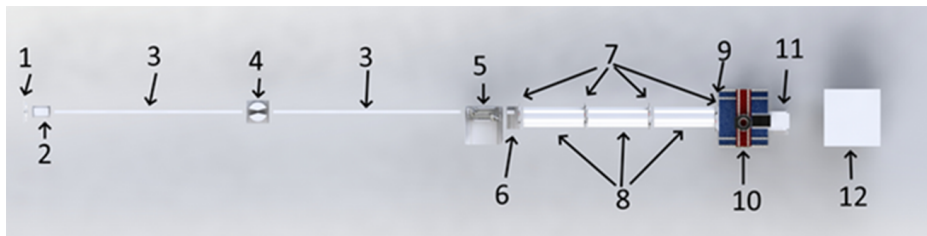
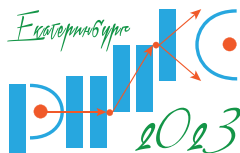


Рис. 3. Принципиальный состав станции NT1. 1 — Дисковый прерыватель, 2 — Шибер 1, 3 — Нейтронновод, 4 — Шибер 2, 5 — Двухкристальный монохроматор, 6 — Затвор-2, 7 — 2D коллимирующая щель, 8 — Вакуумная трубка, 9 — Монитор нейтронов детектор, 10 — Стол образца, 11 — Узел детектора, 12 — ловушка прямого луча

Реактор ПИК — один из самых мощных в мире (100 МВт) высокопоточных источников нейтронов. Предназначен для исследований в области фундаментальной физики, ядерной физики, физики конденсированного состояния, материаловедения, молеку-



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

лярной биофизики и производства изотопов. На базе реакторного комплекса ПИК ведутся работы по реализации станции томографических и радиографических исследований NT1. Ввод в эксплуатацию намечен на 2026 год. Предлагаемая структура станции NT1 представлена на рисунке 3.

Таким образом, можно сделать вывод, что методы нейтронной визуализации не имеют аналогов и становятся прекрасными в отрасли неразрушающих исследований в широких областях применения. Спектр приложений включает в себя самые широкие области исследований.

1. Kardjilov N. et al., Advances in neutron imaging, Materials Today, (2018).
2. R. Woracek et al., Nucl. Instrum, Methods Phys. Res., Sect. A 878 (2018).
3. S. Le Cann et al., J. Mech. Behav, Biomed, Mater, (2017).
4. C. Zanolli et al., Physics Procedia, (2017).
5. M. Laab, B. Schillinger, Physics Procedia, (2015).
6. M.M. Murashev, M.M., Glazkov, V.P., & Em, V.T., Instruments and Experimental Technique, (2021).

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕРОВСКИТА $\text{Ba}_{1.8}\text{Dy}_{1.2}\text{Fe}_{2.1}\text{Co}_{0.9}\text{O}_{9-\delta}$

В. А. Черепанов¹, Н. Е. Волкова¹, Н. В. Проскурнина^{2*}, А. Ф. Губкин^{1,2}, В. Л. Панченко³,
В. И. Пастухов^{1,3}, А. А. Ваулин², Д. А. Шишкин^{1,2}, В. И. Воронин², Е. А. Шерстобитова²,
В. П. Глазков⁴, Е. В. Дюжева-Мальцева⁴, М. А. Сёмкин^{1,2}

¹Институт естественных наук и математики УрФУ, г. Екатеринбург, Россия

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

³АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный, Россия

⁴НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

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

Рассматриваемые образцы – перовскитоподобные оксиды с общей формулой ABO_3 , где в А-позиции находится Ва и редкоземельный элемент (РЗЭ) - Dy или Gd, а в В-позиции - Fe или (Fe/Co). Так как РЗЭ по размеру много меньше бария, то они упорядочиваются по разным плоскостям, в результате образуются тройные перовскиты $\text{LnBa}_2\text{Fe}_3\text{O}_{9-\delta}$. В них слои последовательно чередуются вдоль оси, следующим образом (- Ln - Ba - Ba - Ln -), а железо может частично замещаться на кобальт. Однако, для оксидов, где РЗЭ - Dy, образуются трехслойные оксиды с частичным само-допированием по А-подрешетке $\text{Dy}_{3-x}\text{Ba}_x\text{Fe}_{3-y}\text{Co}_y\text{O}_{9-\delta}$, т.е. диспрозий частично входит в слои бария.

Слоистые перовскиты с дефицитом кислорода, обладают привлекательными физическими свойствами: высокой электронно-ионной проводимостью и высокой подвижностью кислородной подрешетки [1,2]. Благодаря этому их можно использовать в качестве сенсоров, катализаторов или катодных материалов для твердооксидных топливных элементов [3,4]. Широкий диапазон гомогенности по кислороду обеспечивает упорядочение вакансий и образование соответствующих сверхструктур.

Для уточнения структурных особенностей сложного оксида $\text{Ba}_{1.8}\text{Dy}_{1.2}\text{Fe}_{2.1}\text{Co}_{0.9}\text{O}_{9-\delta}$ были проведены рентгеноструктурные и нейтронографические эксперименты. Из результатов рентгеноструктурного анализа установлено, что исследуемое соединение образуется однофазным и кристаллизуется в тетрагональную ячейку $P4/mmm$, с утроенными вдоль оси с параметрами $a = b = 3.903(2) \text{ \AA}$, $c = 11.735(1) \text{ \AA}$, что согласуется с результатами электронной микроскопии. Утроение параметра связано с различием ионных радиусов Ba^{2+} и Dy^{3+} , вследствие чего наблюдается последовательное чередование слоев, содержащих только барий или диспрозий.

Однако при описании нейтронограммы перовскита в рамках предполагаемой модели (рис. 1а) наблюдается запрещенный для $P4/mmm$ рефлекс на углу рассеяния $2\theta \approx 31^\circ$, дополнительный вклад в интенсивность на удвоенном углу. при $2\theta \approx 62^\circ$. Вероятно, эти отражения связаны с позициями атомов, слабо различимых для рентгеновских лучей (например, кислорода). Можно предположить, что это вклады в отражения от одной кристаллографической плоскости двух порядков.

С помощью программы ISODISTORT [5] выполнен симметричный анализ моделей для альтернативного описания кристаллической структуры $\text{Ba}_{1.8}\text{Dy}_{1.2}\text{Fe}_{2.1}\text{Co}_{0.9}\text{O}_{9-\delta}$. Перейдя от примитивной ячейки к увеличенной объемно-центрированной, удалось выполнить описание всех наблюдаемых рефлексов как рентгеновских, так и нейтронографических данных. На рис. 2b приведена уточненная нейтронограмма исследуемого перовскита в модели $I4/mmm$ и параметрами решетки $a = b = 5.5183(6) \text{ \AA}$ и $c = 23.4412(21) \text{ \AA}$.

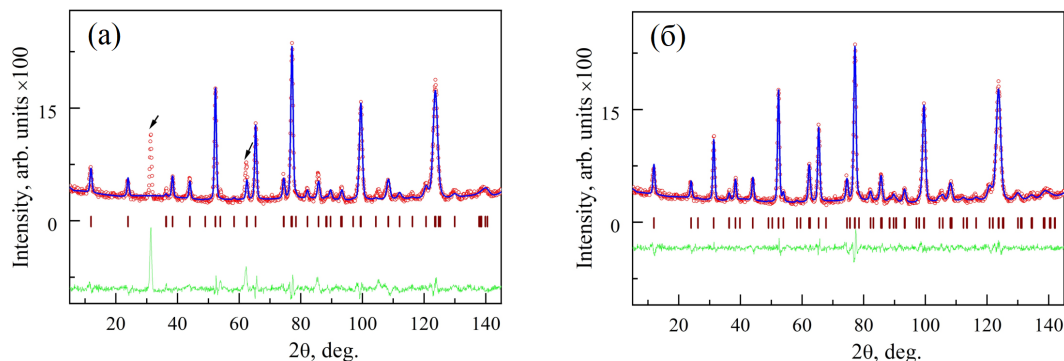


Рис. 1. Экспериментальная и рассчитанные нейтронограммы перовскита $\text{Ba}_{1.8}\text{Dy}_{1.2}\text{Fe}_{2.1}\text{Co}_{0.9}\text{O}_{9-\delta}$ при комнатной температуре в модели $P4/mmm$ (а) и $I4/mmm$ (б)

В уточненной модели кристаллической структуры максимумам отражения на $2\theta \approx 31^\circ$ и $2\theta \approx 62^\circ$ соответствуют рефлексы от плоскостей (103) и (109), соответственно. Были также выполнены дополнительные высокотемпературные нейтронографические измерения, которые показали, что данные рефлексы исчезают при температуре 300°C и соответствующую ей нейтронограмму можно проидентифицировать в рамках пространственной группы $P4/mmm$.

Показано, что при высоких температурах в $\text{Ba}_{1.8}\text{Dy}_{1.2}\text{Fe}_{2.1}\text{Co}_{0.9}\text{O}_{9-\delta}$ происходит структурный фазовый переход второго рода из высоко симметричной пространственной группы $I4/mmm$ в низко симметричную $P4/mmm$.

Результаты исследований выполнены в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «ПОТОК», №122021000031-8).

1. H.Y. Tu, Y. Takeda, N. Imanishi, O. Yamamoto, Sol. St. Ionics 100 (3-4), 283-288 (1997).
2. E.V. Tsipis, V.V. Kharton, J. Sol. St. Electrochem. 12 (11), 1367-1391 (2008).
3. E. Chavez, M. Mueller, L. Moggi, and A. Caneiro, J. Phys. 167, 012043 (2009).
4. Q. Zhou, T. He, and Y. Ji, J. Power Sources 185, 754 (2008).
5. H. T. Stokes, D. M. Hatch, and B. J. Campbell, ISODISTORT, ISOTROPY SoftwareSuite, iso.byu.edu

ВЛИЯНИЕ ДОПИРОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ И МАГНИТНУЮ СТРУКТУРУ ПОЛУГЕЙСЛЕРОВСКИХ СПЛАВОВ $\text{MnNi}_{0.9}\text{M}_{0.1}\text{Sb}$ ($\text{M} = \text{Ti, V, Cr, Fe, Co, Zn}$)

А. В. Руткаускас^{1*}, Г. С. Римский², И. Ю. Зель¹, Н. М. Белозерова¹, Д. П. Козленко¹,
С. И. Кичанов¹

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр Национальной академии наук 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 MnNiSb и $\text{MnNi}_{0.9}\text{M}_{0.1}\text{Sb}$ ($\text{M} = \text{Ti, V, Cr, Fe, Co, Zn}$) методом нейтронной дифракции в диапазоне температур от 10 до 300 К и методом рентгеновской дифракции в диапазоне давлений от 0 до 27 ГПа при комнатной температуре.

Установлено, что исходная кубическая структура $F\bar{4}3m$ и ферромагнитная фаза сохраняются во всём исследуемом диапазоне температур. Обнаружены новые рефлексы, соответствующие антиферромагнитной фазе. Частичная замена никеля другим переходным элементом приводит к уменьшению магнитного момента ионов Mn. При высоком давлении исходная кубическая структура $F\bar{4}3m$ остается стабильной для всех исследованных соединений.

Работа поддержана грантом РФФИ № 20-52-04003 Бел_мол_а. (Белорусский фонд фундаментальных исследований, проект № T21PM-029).

«СЖАТИЕ» ПРОСТОЙ МАГНИТНОЙ СПИРАЛИ В ШПИНЕЛЯХ ZnCr_2Se_4 И $^{114}\text{Cd}_{0.3}\text{Zn}_{0.7}\text{Cr}_2\text{Se}_4$ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Р. А. Садыков^{1,2}, В. П. Глазков³, Е. В. Дюжева-Мальцева³, И. Н. Гончаренко³

¹Институт ядерных исследований РАН, Москва, Троицк, Россия

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

³Национальный исследовательский центр Курчатовский институт Москва, Россия

* E-mail: rsadykov@inr.ru

Детальные нейтронографические измерения проведенные в работе [1], показали, что период спирали уменьшается синхронно с увеличением спонтанной деформации в направлении волнового вектора при понижении температуры. В работе [2] дано теоретическое обоснование линейной зависимости периода магнитной спирали (геликоид) от спонтанной деформации в направлении волнового вектора при понижении температуры.

С целью определения влияния более высокого давления на магнитную спираль в ZnCr_2Se_4 мы провели нейтронографические исследования на дифрактометре G61 (LLB, Saclay, France) при $T = 1.5\text{--}160\text{ K}$ и давлений $P = 0\text{--}56\text{ кбар}$ с использованием вертикально расположенных сапфировых наковален с лункой (the so-called Kurchatov -LLB pressure cells).

На рис.1а представлена нейтронограмма порошка образца ZnCr_2Se_4 , из которого видно, что данный образец чист. Для нейтронных дифракционных картин существует отдельно стоящее отражение $000^\pm$ вблизи нулевого угла. Положение этого отражения (нулевой сателлит) на нейтронограмме зависит от периода спирали и длины волны нейтронов данной нейтронографической установки в соответствии с формулой Вульфа-Брэгга: $2Ls_{(000^\pm)} \sin 2\theta = \lambda n$ (Ls -период спирали, а λn -длина волны нейтронов). При 27 кбар исследовался только порошок ZnCr_2Se_4 без дополнительной среды для создания квазигидростатики, считая что наличие полусферических лунок в сапфировых наковальнях также создаст почти всестороннее (квазигидростатическое) давление. Однако из нейтронограммы на рис 1б видно, что пик $000^\pm$ значительно уменьшился и уширился, что свидетельствует о значительной негидростатике. При давлении $P = 56\text{ кбар}$ образец представлял собой однородную смесь порошков ZnCr_2Se_4 и NaCl . Из рис 1в ясно, что пик 000 значительно сузился, но высота пика уменьшилась по сравнению с чисто структурным пиком 220. Сужение пика произошло, так как порошок NaCl служил квазигидростатической средой.

Однозначно получено, что период (Ls) простой магнитной спирали (SS) уменьшается с давлением, как показано на рис. 2 (угол спирали, соответственно увеличивается с давлением с 42 град при $P = 0$ до 69.5 град при $P = 56\text{ кбар}$).

В свою очередь значительное уменьшение как высоты магнитного пика $000^\pm$ так и интегральной интенсивности может быть связано со следующими причинами:

- отклонения магнитного момента с выходом из плоскости 001 (canted)
- увеличение ковалентности, вызывающая делокализацию спиновой плотности
- появления кристаллической и магнитной текстуры.

Возможно, что магнитная текстура и есть основная причина сильного уменьшения интенсивности пика 000 под давлением в наших нейтронографических измерениях спирали.

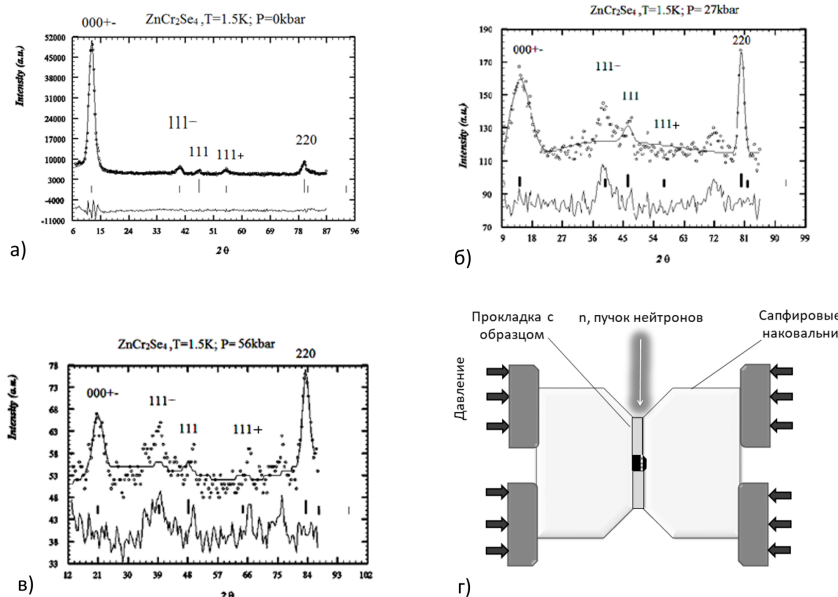


Рис. 1. а) Нейтронограмма порошка ZnCr_2Se_4 при $P = 0$ кбар и $T = 1.5$ К. б) Нейтронограмма порошка ZnCr_2Se_4 при 27 кбар и $T = 1.5$ К, в камере из сапфировых наковалень с лункой. в) Нейтронограмма смеси порошков ZnCr_2Se_4 и NaCl при 56 кбар и $T = 1.5$ К, в камере из сапфировых наковалень с лункой. Длина волны нейтронов $4.74 \text{ \AA}$. г) Радиальная геометрия (вид сверху) ячейки высокого давления с сафир. наковальнями

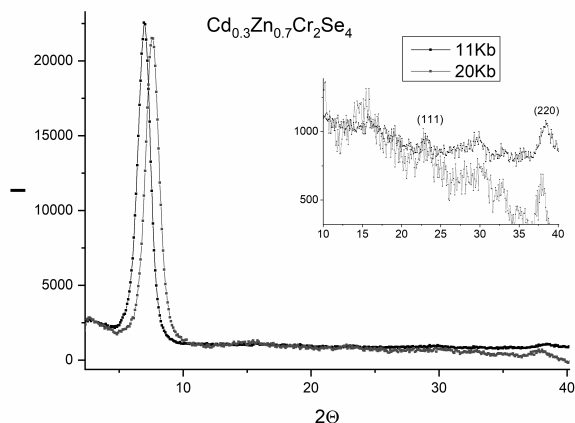


Рис. 2. Нейтронограммы $\text{Cd}_{0.3}\text{Zn}_{0.7}\text{Cr}_2\text{Se}_4$ (радиальная геометрия-11и 20 кбар) при $T = 7 \text{ К}$

Изучения влияния давления на магнитную структуру и образца $^{114}\text{Cd}_{0.3}\text{Zn}_{0.7}\text{Cr}_2\text{Se}_4$ были произведены на дифрактометре ДИСК с длиной волны $\lambda = 2.41 \text{ \AA}$ (РНЦ «Курчатовский институт» ИР8, Москва) с использованием камеры поршень-цилиндр и саффи-

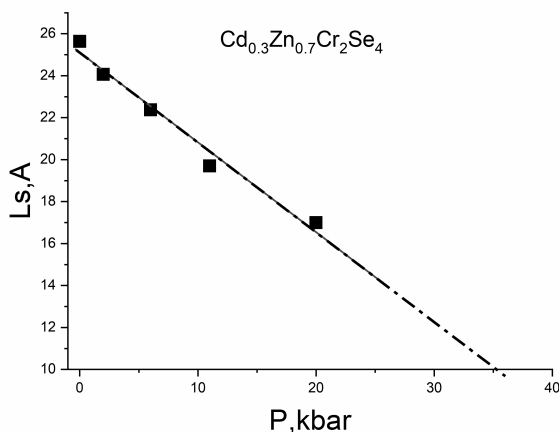


Рис. 3. Зависимость периода спирали $\text{Cd}_{0.3}\text{Zn}_{0.7}\text{Cr}_2\text{Se}_4$ от давления

ровые наковальни в горизонтальной геометрии. Получено, что с увеличением давления период спирали уменьшается, а угол поворота спина увеличивается. Под квазигидростатическим давлением в камере поршень-цилиндр и при низких температурах в образцах шпинелей ZnCr_2Se_4 и $^{114}\text{Cd}_{0.3}\text{Zn}_{0.7}\text{Cr}_2\text{Se}_4$ происходит **сжатие магнитной простой спирали** с уменьшением периода L_s и (соответственно увеличением угла поворота магнитных моментов ионов хрома). Температура Нееля образца ZnCr_2Se_4 растет с давлением линейно $\Delta T_N / \Delta P = 1.05 \text{ K/кбар}$.

Для выяснения, что магнитная текстура и есть основная причина сильного уменьшения интенсивности пика $000^\pm$ под давлением и в наших нейтронографических измерениях спирали в ZnCr_2Se_4 нами проведены измерения в ячейке высокого давления с горизонтально расположенными сапфировыми наковальнями. Измерения проводились в шахтном криостате на основе криокулера замкнутого цикла в широком диапазоне температур 7-300 K. Давление определялось по сдвигу линии люминесценции рубина, расположенного между наковальнями и образцом. На рис.1г показана радиальная геометрия (вид сверху) для проведения нейтронографических экспериментов с ячейкой высокого давления с сапфировыми наковальнями (съёмке при давлениях $p = 11$ кбар и $p = 20$ кбар). На рис 2 для радиальной геометрии при соответствующих давлениях наблюдается **мощный нулевой саттеллит**, и возможно малые сателлиты (111^-) , (111^+) , что подтверждает наличие магнитной текстуры. Температура Нееля увеличилась и составила $T_N = 44 \text{ K}$ при давлении $P = 11$ кбар и $T_N = 50 \text{ K}$ при $P = 20$ кбар. На рис 3 представлена зависимость периода спирали от давления-то есть происходит **сжатие простой магнитной спирали**.

1. Jun Akimitsu et al. J. Phys. Soc. Japan, V.44, No.1, p.172, (1978).
2. Ю.А. Изюмов, УФН, том144,вып.3, стр 439-474, 1984.

MICROMAGNETIC MODELING OF Co/Tb FERRIMAGNETIC STRUCTURES

V. S. Teplov*, V. D. Bessonov, A. V. Telegin

IMP UB of RAS, Yekaterinburg, Russia

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

Ferrimagnets are magnetically ordered media, whose magnetic structure can be represented by two nested magnetic sublattices. In the simplest case, this is an amorphous alloy of two materials, for example, ferromagnetic - FM (Co, Fe) and rare earth metal - RE (Tb, Gd, Dy). Since there is no exchange interaction between the 4f electrons of Tb, AFM ordering occurs between the magnetic sublattices of Co and Tb, and the resulting magnetization is determined by the difference in the contributions between them. Although micromagnetic modeling has been successfully used to analyze the properties of various FM systems, there are only empirical models for calculating ferrimagnetic structures.

A model with two layers, one of which acts as a FM, and the second - as a RE sublattice has been proposed in the work for the numerical simulation of ferrimagnetic structures TbCo.

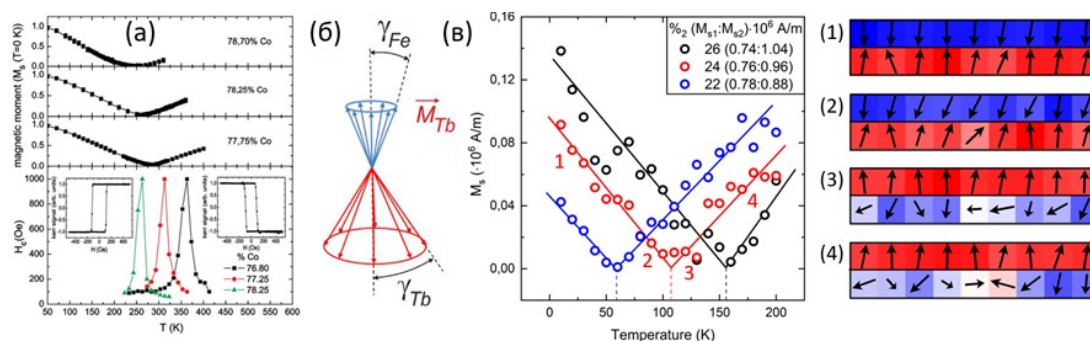
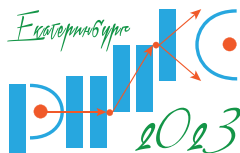


Рис. 1. (a) Schematic representation of the perimagnetic ordering in TbCo alloy, (b) simulated dependences of saturation magnetization on temperature for three different compositions, c) cross sections of the magnetic structure for different temperatures at a fixed composition, in the presence of a magnetizing field in the +z direction.

For the FM layer, the following are set: saturation magnetization, energy of interatomic exchange interaction, energy of perpendicular magnetic anisotropy, energy of DMI. For the RE layer, only the saturation magnetization and the negative energy of the interlayer exchange interaction are set, all other energies are equal to zero. To test the proposed model some dependences characteristic of ferrimagnets are simulated: the effect of temperature change and the effect of external magnetic field. Fig.1 shows the schematic representation of the perimagnetic ordering of TbCo alloy, temperature dependences of saturation magnetization and visualization of magnetic structure for three different compositions. It is obtained that the proposed model provides a qualitative agreement with the results of the experiments conducted on the basis of amorphous ferrimagnetic alloys TbCo: 1) the dependence of the resulting magnetic moment on the mutual concentration of atoms; 2) the change in the resulting magnetic moment of the alloy vs. temperature at different concentrations; 3) the magnetic hysteresis in large fields.

Based on the results, it is assumed about applicability of the developed model for qualitative prediction of the properties of skyrmions in ferrimagnets.

Support of the Russian Science Foundation № 21-72-20160 (<https://rscf.ru/en/project/21-72-20160>) is acknowledged.



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

→ → → → Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

ПРОГРАММА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ SPECTRAVIEWER

Л. А. Трунтова*

Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

* E-mail: ltruntov@jinr.ru

Компонент SpectraViewer программного комплекса Sonix+ — инструмент просмотра экспериментальных данных в формате гистограмм, как уже снятых, так и находящихся в процессе накопления. В программе собраны различные виды и возможности представлений, отвечающие потребностям пользователей. В текущий момент ведётся работа по адаптивированию программы к данным в формате списков событий. Обсуждаются методы связи с модулем сбора данных, а также остальным программным комплексом, технические ограничения и способы их преодоления.

РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА УНИВЕРСАЛЬНОЙ ЛОВУШКИ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

А. П. Серебров*, А. К. Фомин, Г. Н. Ключников, А. О. Коптюхов, А. Н. Мурашкин

НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Гатчина, Россия

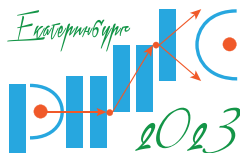
*E-mail: serebrov_ap@npfi.nrcki.ru

Проект направлен на прецизионное измерение времени жизни нейтрона. Сейчас наблюдается расхождение между различными измерительными методами. Все эксперименты можно разделить на три типа: пучковый, метод магнитного хранения и метод хранения в материальных ловушках. При этом результаты, полученные пучковым способом, значительно (около 10 с) отличаются от методов, использующих хранение ультрахолодных нейтронов (УХН), как в магнитных, так и в материальных сосудах. Расхождение между пучковым методом и методом хранения получило название «нейтронной аномалии» и существует уже более 10 лет [1]. Сейчас данная проблема вызывает большой интерес. Существует ряд гипотез, пытающихся ее объяснить. Большинство предположений связано с тем, что в экспериментах с УХН есть неучтенные потери, как например дополнительный канал распада в темную материю. К настоящему моменту с увеличением точности измерений наметился ряд новых расхождений, в том числе между измерениями в материальных и магнитных ловушках. Все это указывает на возможность поиска новой физики за пределами Стандартной модели и необходимость дальнейшего улучшения точности в измерениях времени жизни нейтрона.

В проекте предлагается разработка универсальной ловушки для хранения УХН. В одной установке устанавливается сразу 2 ловушки на одной оси: материальная и магнитная. Материальная ловушка изготавливается из меди и покрывается безводородным маслом фомблин. Магнитная ловушка представляет собой сборку из постоянных магнитов NdFeB. Путем поворота системы ловушек вокруг оси можно осуществить гравитационный захват УХН либо в материальную, либо в магнитную ловушку. Таким образом, на одной установке можно производить измерения и с материальной, и с магнитной ловушкой, т.е. можно сравнить материальное и магнитное хранение УХН в одинаковых условиях. Подобная схема измерений позволит избавиться от ряда систематических неопределенностей при измерениях с разными ловушками и предлагается впервые. Предлагаемый в проекте гравитационный захват УХН в магнитную ловушку является принципиально новым подходом, который до этого никогда не осуществлялся. Одним из факторов, влияющих на систематическую погрешность эксперимента, будет процесс деполяризации нейтронов в магнитном поле. Поэтому важной проблемой, которую необходимо решить в настоящем проекте, является разработка магнитной системы, которая минимизирует вероятность деполяризации нейтрона [2]. Также важно рассмотреть так называемый турбинный эффект, который может проявляться в изменении энергии УХН при повороте из-за взаимодействия с плоскими гранями ловушки [3].

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-22-00169, <https://rscf.ru/project/23-22-00169/>).

1. А.П. Серебров, А.К. Фомин, Physics Procedia 17 (2011) 199.
2. Г.Н. Ключников, А.П. Серебров, ЖЭТФ 164 (2023) 365.
3. А.К. Фомин, А.П. Серебров, Приборы и техника эксперимента, в печати.



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

→ → → → Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

ИНТЕНСИВНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ IV ПОКОЛЕНИЯ РЕАКТОР «НЕПТУН»

А. А. Хассан^{1,2}, Е. П. Шабалин¹

¹Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Московская область, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

*E-mail: ahmed_hamdy842@yahoo.com

Импульсные исследовательские реакторы периодического действия типа ИБР-2 в Дубне являются наиболее эффективными источниками медленных нейтронов на выведенных пучках для исследований структур различного рода материалов с помощью методов дифракции, мало-углового рассеяния, рефлектометрии, неупругого рассеяния и нейтронографии, благодаря короткому импульсу нейтронов и высокому среднему потоку в пике до $10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. В то же время, из-за особенностей кинетики и флуктуации мощности энергии в импульсах в таком реакторе в десятки раз выше, чем в стационарных реакторах, что создаёт проблемы для управления аппаратом. В работе предложен и обоснован оригинальные способы значительного снижения уровня колебаний импульсов мощности таких реакторов на примере проекта импульсного реактора ИБР-3 (НЕПТУН) с пороговым изотопом Np-237 в качестве ядерного топлива.

**МОДУЛЬ ИЗ 8 ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СЧЕТЧИКОВ
ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ С РЕЗИСТИВНЫМ АНОДОМ**

А. В. Чураков^{1,2*}, А. А. Богдзель¹, Е. И. Литвиненко¹

¹Лаборатория Нейтронной Физики им. И.М. Франка, Объединённый Институт Ядерных Исследований, г. Дубна, Россия

²Государственный университет «Дубна»

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

Значительное число экспериментов в ядерной физике и физике конденсированного состояния вещества требуют определения пространственного распределения нейтронных пучков либо определения координаты точки регистрации нейтронов. В зависимости от типа эксперимента к детекторам предъявляются различные требования, связанные с пространственным разрешением, перекрываемой площадью, быстродействием, эффективностью к нейтронам, чувствительностью к гамма-излучению, а так же иные, специфичные для конкретных задач, требования. Важное значение имеет так же стоимость прибора и скорость его разработки. Для решения ряда научных и технических задач, связанных с нейтронным рассеиванием имеет смысл применение позиционно-чувствительных детекторов тепловых нейтронов на основе пропорциональных счетчиков нейтронов с резистивным анодом, кратко называемых позиционно-чувствительными счетчиками (ПЧС) или линейные позиционно-чувствительные детекторы (ЛПЧД).

Такие счетчики достаточно просты в производстве и надежны в эксплуатации. Простота конструкции позволяет производить их в промышленных масштабах. Детекторные системы из ПЧС широко применяются на экспериментальных установках ведущих зарубежных центров. [1], [2], [3] Характеристики отдельного типового счетчика зарубежного производства: диаметр счетчика 6.4 - 8.5 мм (1/4' - 1/3'), длина счетчика 400 мм - 1000 мм), пространственное разрешение 0.5% – 1% от длины счетчика. Часто применяется модульный принцип конструкции детектора, когда несколько счётчиков объединены в одном конструктиве. Это позволяет сократить время сборки детекторной системы, ускорить и упростить ее ввод в эксплуатацию.

На момент начала настоящих работ отечественная промышленность не выпускала готовых ПЧС тепловых нейтронов. Для создания новых и модернизации существующих систем детектирования тепловых нейтронов были сформулированы требования к типовому модулю детекторной системы из позиционно-чувствительных счетчиков, проведены расчёты и подготовлена конструкторская документация на типовой модуль. Детекторная система может состоять из одного или нескольких модулей, закрепленных на жесткой раме. Количество модулей определяется чувствительной площадью детекторной системы, в зависимости от решаемой физической задачи. Крепление модулей к раме осуществляется стандартными крепежными элементами Rexroth.

Модульная конструкция обеспечивает:

- Быструю сборку и разборку детекторной системы.
- Возможность замены отдельного модуля.
- Высокую технологичность и низкую стоимость конструкции.

Модуль может быть размещён вертикально или горизонтально. Имеется возможность работы в режиме времени-пролета.

Измерения проводились с помощью лабораторного источника нейтронов в ЛНФ ОИ-ЯИ, а так же на 5 канале реактора ИР-8 Курчатовского Института, г. Москва. Полученные результаты показали надёжную и устойчивую работу модуля в условиях относительно высокой радиационной загрузки на канале 5 реактора ИР-8. Вместе с тем в ходе работ выявилась необходимость обеспечения надёжного охлаждения системы сбора и накопления данных (диджитайзеров), особенно во время работы при значительных нагрузках.

Результаты измерений показывают возможность применения счетчиков для определения координаты нейтронов на мощных исследовательских источниках.

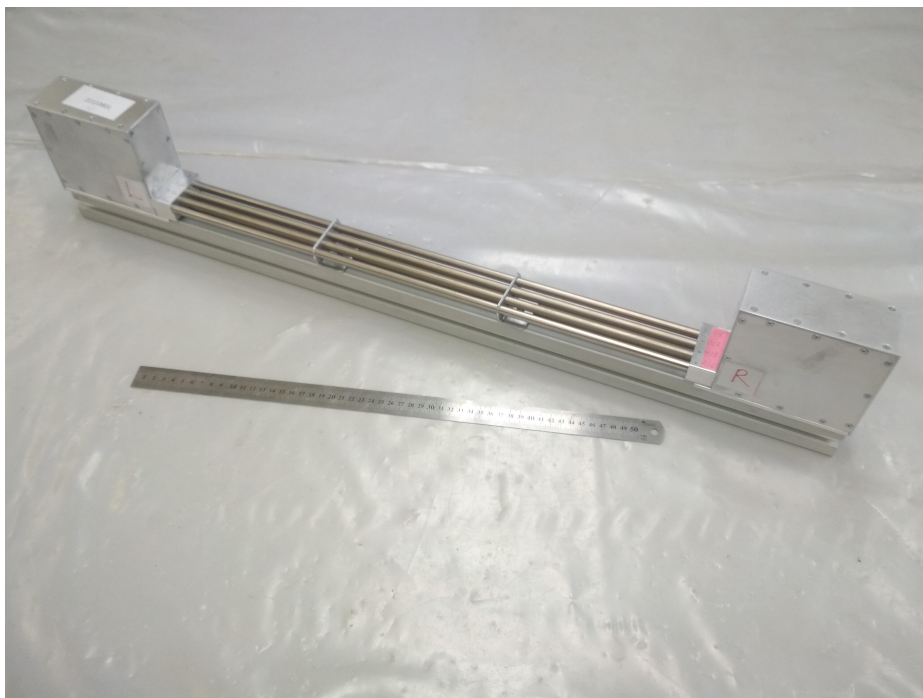


Рис. 1. Модуль из 8 позиционно-чувствительных счетчиков тепловых нейтронов с резистивным анодом

1. G. J. Cuello et al, J. Phys.: Conf. Ser. 746 012020 (2016).
2. S. Mühlbauer et al, NIMA 832, 297–305 (2016).
3. K.D. Berry et al, NIMA 693, 179-185, (2012).

СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ШПИНЕЛЕЙ $\text{Fe}_{3-x}\text{Co}_x\text{O}_4$ ($x = 0, 0.5, 1$), ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

А. Д. Ковалев¹, И. Г. Бордюжин¹, Т. Р. Низамов¹, П. А. Борисова², М. А. Семкин³,
И. В. Щетинин^{1*}

¹ Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

² НИЦ КИ, Москва, Россия

³ Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

* E-mail: ingvar@misys.ru

Первые упоминания об использовании магнетита относятся к 6 в. до н.э. в качестве материала для магнитных компасов, однако и по сегодняшний день наночастицы на основе магнетита находят применения, например, в биомедицине в качестве материалов для гипертермии [1, 2], адресной доставки [3] и контрастных агентов [4]. Для биомедицинских приложений основными методами синтеза наночастиц магнетита являются химические методы, поскольку позволяют получать частицы в диапазоне от единиц до 100 нм с узким распределением, а также контролировать форму частиц (равноосная, кубическая, октаэдрическая и др.) и проводить легирование для получения необходимого комплекса магнитных свойств. Основными недостатками химических методов синтеза наночастиц магнетита является получение небольших количеств (на уровне грамм), отсутствие масштабируемости технологии синтеза и не высокая воспроизводимость. Таким образом, использование только химических методов синтеза ограничивает применение наночастиц магнетита для биомедицинских применений и в качестве альтернативных необходимы масштабируемые методы синтеза, позволяющие получать наночастицы магнетита в большем количестве. Одним из таких масштабируемых методов может являться метод высокоэнергетического измельчения. В связи с этим целью данной работы являлось исследование структуры и магнитных свойств легированных шпинелей $\text{Fe}_{3-x}\text{Co}_x\text{O}_4$, полученных методом высокоэнергетического измельчения, а также установление закономерностей влияния катионного замещения на функциональные свойства, такие как цитотоксичность и эффект гипертермии.

В качестве исходных компонентов для получения легированных шпинелей $\text{Fe}_{3-x}\text{Co}_x\text{O}_4$ (где $x = 0, 0.5, 1$) использовали оксиды Fe_2O_3 , Co_3O_4 и Fe, которые смешивались в определенных пропорциях и подвергались высокоэнергетическому измельчению в планетарной шаровой мельнице «Активатор 2S». Затем полученные микрокристаллические образцы отжигались в воздушной атмосфере в диапазоне 900 – 1400 °С и подвергались повторному измельчению в среде октадецена с добавлением ПАВ (олеиновой кислоты), время измельчения составляло 50 часов. Для стабилизации наночастиц в водном растворе использовался полимер Pluronic F-127. Фазовый анализ проводился на дифрактометре ДРОН-4, мессбауэровские спектры снимались с использованием изотопа ^{57}Co на спектрометре МС1104Ем при комнатной температуре, нейтронные исследования проводились в НИЦ КИ на реакторе ИР-8, магнитные свойства исследовались на установке PPMS (EverCool II) и вибрационном магнетометре VSM-250, исследования морфологии наночастиц проводилось методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), для исследования распределение частиц по размерам использовался метод динамического светорассеяния.

По данным фазового анализа все синтезированные образцы в микрокристаллическом состоянии являлись однофазными и содержали фазу структурного типа $H1_1$ ($Fd3m$). Методами нейтронной дифракции и мессбауэровской спектроскопии установлены кристаллохимические формулы шпинелей для $x = 1 - (\text{Co}_{0.22}^{2+} \text{Fe}_{0.78}^{3+})[\text{Co}_{0.78}^{2+} \text{Fe}_{1.22}^{3+}]\text{O}_4$, для $x = 0.5 - (\text{Co}_{0.06}^{2+} \text{Fe}_{0.95}^{2.5+})[\text{Co}_{0.45}^{2+} \text{Fe}_{1.56}^{2.5+}]\text{O}_4$.

По данным ПЭМ в результате высокоэнергетического измельчения в среде октадецена в течение 50 часов были получены наночастицы с размерами 20 – 50 нм. По данным измерения магнитных свойств наночастиц намагниченность насыщения снижается при увеличении x от 0 до 1, а коэрцитивная сила, наоборот, увеличивается из-за повышения магнитокристаллической анизотропии при легировании Co.

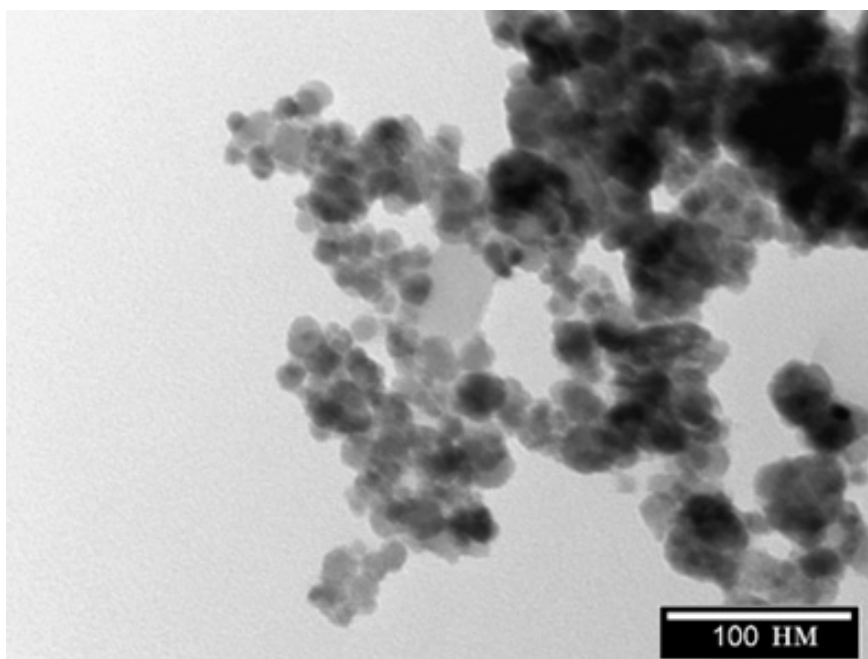


Рис. 1. Фотография наночастиц Fe_2CoO_4 , полученных методом высокоэнергетического измельчения в течение 50 часов

Влияние легирования на эффект гипертермии определяется прежде всего изменениями гистерезисных свойств, а цитотоксичность не зависит от легирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-73-00114.

1. Ziba Hedayatnasab, Faisal Abnisa, Wan Mohd Ashri Wan Daud. Review on magnetic nanoparticles for magnetic nanofluid hyperthermia application. *Materials and Design* 123 (2017) 174–196.
2. A. Nikitin, M. Khramtsov, A. Garanina et al. Synthesis of iron oxide nanorods for enhanced magnetic hyperthermia. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 469 (2019) 443–449.
3. Yen Pin Yew, Kamyar Shameli, Mikio Miyake et al. Green Biosynthesis of Superparamagnetic Magnetite Fe_3O_4 Nanoparticles and Biomedical Applications in Targeted Anticancer Drug Delivery System: A review. *Arabian Journal of Chemistry*. Volume 13, Issue 1, January 2020, Pages 2287-2308.
4. A. Nikitin, M. Fedorova, V. Naumenko. Synthesis, characterization and MRI application of magnetite water-soluble cubic nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 441 (2017) 6–13.

ТРЕХОСНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ НА РЕАКТОРЕ ПИК

М. Х. Юзвюк, Ю. М. Киреенко, И. А. Зобкало*

НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Гатчина, Россия

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

Методика трехосной спектроскопии позволяет исследовать динамику решетки и магнитных возбуждений, изучать природу фазовых переходов, влияние внешних факторов на динамику решетки и другое. Главным преимуществом трёхосной спектроскопии является возможность настройки спектрометра на измерения в любой точке обратного пространства.

В настоящее время активно ведется разработка трехосного спектрометра тепловых нейтронов на реакторе ПИК (Гатчина) - спектрометра IN1. Рабочие энергии спектрометра лежат в диапазоне от 15 до 100 мэВ, что соответствует длинам волн от 0.9 Å до 2.36 Å. Планируется использование трех типов монохроматоров - на основе пиролитического графита PG (002), меди Cu(200) и упруго изогнутых пластин кремния Si(111). Кристаллы PG и Si также будут использоваться и в качестве анализаторов.

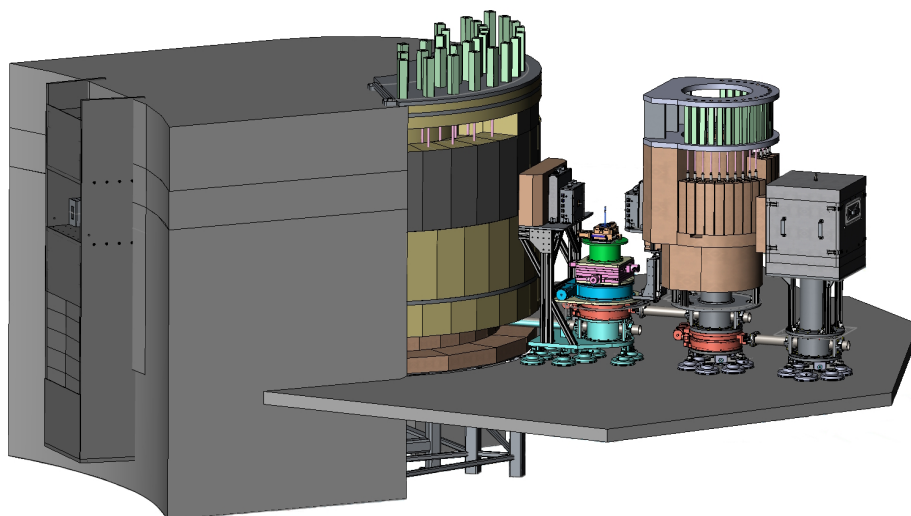


Рис. 1. Трехмерная модель спектрометра тепловых нейтронов IN1

Для наилучшей фокусировки используется геометрия Роуланда, при которой источник нейтронов, монохроматор и образец находятся на одной окружности. Дополнительным условием является равенство расстояний «монохроматор-источник» и «монохроматор-образец». Для того, чтобы достичь такого равенства используется концепция виртуального источника - входной щели [1].

Основными задачами на данный момент являются математическое моделирование и проектирование спектрометра, а также расчет биологической защиты. Посредством

Таблица 1. Основные характеристики спектрометра IN1

Энергии нейтронов (длины волн)	$E = 15\text{--}100 \text{ meV}$ ($\lambda = 0.9 - 2.36 \text{ \AA}$)
Монохроматоры	PG(002), Cu(200), Si(111)
Анализаторы	PG(002), Si(111)
Углы монохроматора	$10^\circ < 2\theta_M < 90^\circ$
Углы образца	$0^\circ < 2\theta_S < 90^\circ$
Углы анализатора	$-40^\circ < 2\theta_A < 110^\circ$
Детектор	^3He
Коллиматор (опционально)	20', 40', 60'

моделирования оценивается поток нейтронов на узле образца при различных условиях, таких как размер щели виртуального источника, его положение, размер рабочей области монохроматоров и другое, что позволяет выбрать оптимальные характеристики. Например, в результате оценки потока были выбраны ширина щели виртуального источника, размеры рабочей области монохроматоров, а также размеры пластин пирографита и меди.

На рисунке 1 представлена трехмерная модель спектрометра с указанием основных узлов, в таблице 1 — основные характеристики.

1. P. Cermak, M. Boehm, J. Kulda, S. Roux, A. Hiess, P. Steffens, J. Saroun, J. Phys. Soc. Jpn, 82, SA026 (2013).

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Asadov A. G., [84](#)

Almásy László, [25](#)

Alsafi H. M., [118](#)

Andersson M. S., [160](#)

Astaf'eva S., [177](#)

Badmaarag A., [235](#)

BalasoIU M., [177](#)

Barilo S. N., [124](#)

Bessonov V. D., [269](#)

Borisova P. A., [118](#)

Bunoiu O. M., [177](#)

Chaboussant G., [134](#)

Dimitrievska M., [160](#)

Dujeva E. V., [118](#)

Enkhtur L., [235](#)

Gerasimov E. G., [118](#)

Glazkov V. P., [118](#)

Hutanu V., [124](#)

Ivankov O., [177](#)

Ke Yubin, [25](#), [30](#)

Kichanov S., [177](#)

Kichanov S. E., [84](#)

Kozlenko D. P., [84](#)

Kuklin A., [177](#)

Lis O. N., [84](#)

Lukin E. V., [84](#)

Lysenko S., [177](#)

Mammadov A., [84](#)

Martin N., [134](#)

Mehdiyeva R., [84](#)

Mikula P., [100](#), [226](#)

Mushnikov N. V., [118](#)

Pirogov A. N., [118](#)

Sangaa D., [235](#)

Schmidt W., [124](#)

Sikolenko V. V., [235](#)

Stavila V., [160](#)

Telegin A. V., [269](#)

Teplov V. S., [269](#)

Terentev P. B., [118](#)

Turchenko V., [177](#)

Udovic T. J., [160](#)

Wu L. S., [148](#)

Xie T., [148](#)

Yubin Ke, [231](#)

Yusuf S. M., [28](#)

Zhenhua Xie, [231](#)

Абашев Р. М., [60](#)

Авдеев М. В., [190](#)

Авдеев М. М., [187](#)

Аверин С. А., [94](#)

Азарова Л. А., [153](#), [225](#)

Аксенов С. Н., [53](#), [58](#), [228](#), [232](#), [254](#)

Аксёнов В. Л., [187](#)

Аксёнов С. Н., [233](#)

Акулов Д. А., [60](#)

Алексеев А. А., [47](#), [228](#)

Алексеев П. А., [144](#), [146](#)

Алтынбаев Е. В., [33](#), [58](#), [134](#), [225](#), [258](#), [260](#)

Алтынов А. В., [77](#)

- Альсафи Х., 126
Аникин М. Н., 223
Антропов Н. О., 155
Арбузов А. В., 162
Афанасьев С. В., 95
Бабанова О. А., 160
Бадреева Д. Р., 178
Байрамуков В., 174
Бакиров Б. А., 204, 213
Балагуров А. М., 96, 98
Баранов Н. В., 112, 116, 119
Баранчиков А. Е., 154, 180, 184, 250
Бедретдинов И. А., 31
Белозерова Н. М., 265
Белушкин А. В., 73, 246
Бергер И. Ф., 244
Бессонов В. Д., 237
Бессонова В. А., 237
Блантер М. С., 164
Бобриков И. А., 91
Бобровский В. И., 95
Богачев А. А., 25, 171
Богданов С. Г., 132
Богдзель А. А., 70, 73, 76, 246, 253, 273
Боднарчук В. И., 57, 62, 64, 73, 77, 253, 254
Бокучава Г. Д., 25, 34
Бокучава Г. Д., 24
Бордюжин И. Г., 275
Борисова П. А., 36, 126, 164, 275
Бредихин И. С., 165
Буздавин А. П., 77
Бурдаков В. С., 239
Бучный Д. А., 53, 254
Бушуев В. А., 215
Быков А. А., 107
Быкова А. А., 191, 193
Валиев Э. З., 167
Варфоломеева Е., 174
Васильев А. Д., 135
Васин Р. Н., 91
Васьковский В. О., 191, 193, 197
Ваулин А. А., 112, 119, 123, 263
Верлов Н. А., 239
Вершинина Т. Н., 96, 128, 240
Виноградов И. И., 128
Волкова Н. Е., 263
Воробьев А. А., 188
Воронин В. И., 92
Воронин В. В., 33
Воронин В. И., 95, 263
Гаврилюк А. Г., 233
Гай Ч., 145
Генов И. Г., 240
Герасимов Е. Г., 126
Геращенко О. В., 154
Гимаев Р. Р., 123, 168
Глазков В. П., 130
Глазков В. П., 104, 126, 227, 263, 266
Глушкова Н. В., 244
Глушкова Т. И., 58, 242
Головин И. С., 96, 98
Головкина Д. А., 250
Голосовский И. В., 37
Гончаренко И. Н., 266
Гончарь Л. Э., 121
Горбунов Н. В., 62, 64
Горшкова Ю. Е., 25, 154, 169, 174, 180, 184, 239, 250
Горьковенко А. Н., 191, 193, 197
Григорьев С., 174
Григорьев С. В., 80, 82, 111, 129, 134, 153, 188, 225
Григорьев С. В., 31
Григорьева Н. А., 188
Губкин А. Ф., 112, 116, 119, 123, 145, 244, 263
Гурьева П. В., 209
Даулбаев О., 73, 246
Десятериков Д. И., 187, 199
Демьянова Н. А., 36
Джепаров Ф. С., 103, 216, 218
Долматов В. Ю., 184
Донец М. Е., 91
Дремов В. В., 108
Дрожжин Н. А., 128
Дрожжов К. А., 37
Дроздов В. А., 73
Дюжева-Мальцева Е. В., 130, 263, 266
Дюжева Е. В., 126
Егоров В. Ю., 63
Ельцов Г. С., 108
Еник Т. Л., 62
Ердаулетов М., 190
Ержанов Б., 98

- Ермакова Е. В., 178
Еров Х. Е., 180
Жакетов В. Д., 77, 128, 187
Жеребцов О.М., 27
Журавлев В. В., 34, 73
Журишкина Е. В., 250
Загрядская Ю. А., 183
Зайков Ю. П., 244
Зайцева И. Е., 209, 212
Залиханов Б. Ж., 63, 64
Залужный А. Г., 171
Зарубин М. П., 183
Захаров М. А., 39, 247
Зверев В. И., 123, 168
Зеленяк Т. Ю., 190
Зель И. Ю., 89, 205, 207, 265
Зисман А. А., 101
Зобкало И. А., 124, 149, 151, 277
Иванкина Т. И., 205
Иванов В. К., 180
Иванова А. Г., 233
Иванова Л. А., 239, 250
Иваньков А. И., 82, 178
Иваньков О. И., 183
Иваньшина О. Ю., 91
Исаенко Л. И., 246
Исакова Н. Н., 88, 251
К.А.Шайхутдинов, 135
Казанцев В. А., 95
Каинов С. Ю., 209
Калинкин М. О., 60
Калюканов А. И., 88, 251
Камкова Т. Н., 135
Капица Г. П., 239
Караваев А. В., 108
Карпов И. Д., 100, 226, 229
Катаева Н. В., 95
Келлерман Д. Г., 60
Киреенко Ю. М., 277
Кирилов А. С., 252
Киселев М. А., 179, 256
Кичанов С. Е., 41, 89, 204, 207, 213, 240
Кичанов С. И., 265
Клауз А. В., 25, 171
Клементьев Е. С., 144
Клюшников Г. Н., 271
Князев Ю. В., 135
Ковалев А. Д., 275
Ковалев Р., 174
Коваленко А. С., 154
Коваленко Е. С., 209, 212
Коваленко Н. А., 81, 107
Коваленко Н.А., 31
Кожевников С. В., 195
Козленко Д. П., 41, 89, 207, 240, 265
Козлов А. В., 106
Козляковская А. А., 253
Колесников А. Г., 57, 62–64, 70, 73
Колесников А. И., 145
Колесников А. О., 62, 73
Кондратьев О. А., 209
Копица Г. П., 154, 180, 184, 250
Коптелов Э. А., 47
Коптюхов А. О., 271
Корнеева Е. А., 91
Котцов С. Ю., 180
Коченда Л. М., 242
Кравцов Е. А., 43, 155, 187, 199
Кравцов П. А., 242
Кравченко Е. В., 183
Кравчук Л. В., 47
Красиков А. А., 135
Кригер В. В., 190
Криницын П. Г., 246
Кротов А. В., 107
Круглов А. А., 34
Кузнецов П. А., 67
Куклин А. И., 82, 178, 182, 210
Кулаков И. А., 239
Кулевой Т. В., 79
Кулеш Н. А., 191
Куликов С. А., 73
Кулин Г. В., 39, 247
Кульвелис Ю. В., 182, 210
Кульминская А. А., 250
Куницына Е. И., 128
Куняева Д. С., 36
Курбаков А. И., 114, 137, 141
Курилкин А. К., 64, 70, 73
Курмаев Э. З., 199
Курылев В. А., 39
Куулар В. И., 210
Кухаренко А. И., 199
Кучерка Н., 178

- Лапушкин Ю. А., 228
Ларичев Ю. В., 172
Лебедев В. Т., 182, 210
Лебедев Д. В., 239, 250
Лебедь Ю. Б., 228
Лепаловский В. Н., 191, 193, 197
Лидер А. М., 223
Лис О. Н., 89, 240
Литвин В. С., 254
Литвин В. С., 53, 71, 228, 232
Литвиненко Е. И., 73, 273
Литвиненко Л. И., 253
Лобанов С. И., 246
Локаицек Т., 205
Лукин Е. В., 41, 89, 240
Лычагина Т. А., 101, 202
Львов Д. В., 103, 216
Любути И. С., 233
Любутина М. В., 233
Лямкин В. А., 42
Магнитская М. В., 134
Макаренко К. И., 104, 227
Макаров Н. А., 209
Макарова И. П., 88
Макарова М. В., 155
Макгуайр М. А., 145
Максимов В. И., 90
Максимов П. А., 145
Максимова Е. Н., 90
Маннинен С. А., 67
Марин В. Н., 53, 58, 71, 228, 232
Мариненко Е. А., 210
Маслова В. А., 256
Матвеев В. А., 48
Меренцов А. И., 139
Мешков И. В., 228, 254
Милков В., 70
Милков В. М., 73, 76, 246, 253
Мирзоев А. А., 108
Миронович А. А., 233
Мистонов А. А., 107
Можайко А. А., 67
Морковников И. А., 252
Москалев М. Е., 191
Москалёв М. Е., 193, 197
Москвин Е. В., 31
Москвина О. И., 33, 258
Мочалов Ю. С., 244
Мурашев М. М., 104, 107, 209, 212, 227, 229
Мурашкевич С. М., 34, 252
Мурашкин А. Н., 271
Муругова Т. Н., 178, 183
Мушников Н. В., 126
Мушников П. Н., 244
Незнахин Д. С., 130
Низамов Т. Р., 275
Никитенко Ю. В., 128, 187
Никитин А. А., 25
Никитин С. Е., 148
Никифорова Ю. А., 233
Никова Е. С., 43
Николаев А. М., 154
Николаев Д. И., 101, 202
Овсянников А. К., 124, 149
Одинокоев А. С., 210
Охрименко И. С., 183
Павельева А. А., 260
Павлов К. А., 82
Павловский М. С., 135
Павлюкойч А., 128
Палачева В. В., 96
Пантина Р., 174
Панченко В. Л., 105, 106, 263
Папушкин И. В., 34
Пархоменко В. Д., 90
Пархоменко В. Д., 95
Пастухов В. И., 263
Пахневич А. В., 202
Петренко А. В., 77
Петрова М. О., 73, 75
Петрузалек М., 205
Петухова Т. Б., 34, 252
Пирогов А. Н., 126, 132, 244
Плешанов Н. К., 32
Подлесный М. М., 70, 73, 76
Подлесняк А., 145
Подлесняк А. А., 148
Подурец К. М., 209, 212
Помякушина Е. В., 148
Пономарева О. Ю., 128
Попов А. А., 39
Портных И. А., 105, 106
Прекул А. Ф., 112, 119
Примаченко О. Н., 182, 210

- Приходько В. И., 73
 Проглядо В. В., 155, 199
 Проскурнина Н. В., 92, 95, 263
 Проявин М. Д., 77
 Пугач Н. Г., 187
 Пунтус В. И., 63
 Пшеничный К., 174
 Пшеничный К. А., 129, 153
 Редхаммер Г., 145
 Рижиков Ю. Л., 183
 Римский Г. С., 265
 Рогожкин С. В., 25, 103, 171
 Ромашко П. Е., 130
 Рубаха А. А., 244
 Рунов В. В., 157
 Руткаускас А. В., 265
 Савенко Б. Н., 41
 Савченков П. С., 146
 Сагарадзе В. В., 95
 Садилов В. В., 190
 Садыков Р. А., 46, 53, 58, 71, 228, 232, 254, 266
 Саламатин Д. А., 134
 Саламатов Ю. А., 43
 Самойлов Р. М., 220
 Самойлов Р. М., 27
 Самойлова Н. Ю., 91, 96
 Сантос А., 145
 Сапрыкина И. А., 204, 213
 Северова С. В., 197
 Селезнева Н. В., 116, 197
 Семенов С. В., 135
 Семкин М. А., 244, 275
 Серебров А. П., 42, 67, 220, 221, 271
 Серебров А. П., 27
 Сидоркин С. Ф., 47
 Сидоров В. А., 134
 Сидоров С. С., 67
 Симоненко Н. П., 180
 Сканченко Д. О., 134
 Сканченко С. В., 225
 Скоробогатов С. А., 135, 148
 Скорюнов Р. В., 160
 Скрипов А. В., 160
 Смирнов И. В., 107
 Смирнова В. С., 204, 213
 Соловей В. А., 33
 Солонинин А. В., 160
 Степанова Е. А., 139
 Стрельцов С. В., 145
 Стружкин В. В., 233
 Сумников С. В., 91, 96, 98
 Суржигов Е. А., 237
 Суркова Т. П., 90
 Суслопарова А. Е., 114, 137, 141
 Сыромятников В. Г., 48, 254
 Сюрдо А. И., 60
 Сёмкин М. А., 92
 Сёмкин М. А., 126, 130, 132, 263
 Тарнавич В. В., 50, 107
 Телегин А. В., 237
 Теплых А. Е., 126, 132
 Терентьев К. Ю., 51
 Терентьев П. Б., 126
 Терещенко В. В., 63
 Терещенко Е. Ю., 209, 212
 Терещенко С. В., 63
 Тропин Т. В., 190
 Троян И. А., 233
 Трунов Д. Н., 53, 58, 71, 228, 232, 254, 260
 Трунтова Л. А., 252, 270
 Тудупова Б. Б., 210
 Тюлюсов А. Н., 55, 103
 Уклеев В., 188
 Ульянов В. А., 254
 Урусова Н. В., 139
 Усманов О. В., 124, 149
 Устинов А. Е., 105, 106
 Устинович К. Б., 180
 Утесов О. И., 153
 Ушаков А. В., 145
 Федорова Н., 174
 Фетисов А. А., 242
 Фещенко А. А., 193, 197
 Фещенко А. В., 47
 Фокин Н. С., 141
 Фомин А. К., 221, 271
 Франк А. И., 39, 215, 216, 247
 Фролов К. В., 154
 Хай К. В., 73
 Хайдуков Ю. Н., 155
 Хамова Т. В., 154, 184
 Хассан А. А., 272
 Хвостов С. С., 244



КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)

● → ● → ● → Екатеринбург, 25 – 28 сентября 2023 г.

Хомич А. А., 25, 171
 Цвигун Н. В., 184, 250
 Цвигун Ю. Н., 154
 Цвященко А. В., 134
 Цыгвинцев В. А., 94
 Черепанов В. А., 263
 Черников А. Н., 77
 Четвериков Ю. О., 107
 Чирков П. В., 108
 Чолах С. О., 199
 Чураков А. А., 254
 Чураков А. В., 73, 273
 Шабалин Е. П., 272
 Шайхутдинов К. А., 148
 Швецов В. В., 73
 Швидченко А. В., 182, 210
 Шерстобитова Е. А., 92, 263
 Шехтман Г. Ш., 92
 Шилова О. А., 154, 184
 Шишкин А. В., 244
 Шишкин В. Ю., 244
 Шишкин Д. А., 263
 Шишковский И. В., 104, 227
 Шмайснер Й., 55, 103
 Шутов А. С., 103
 Щелканова М. С., 92
 Щелкачев Н. М., 134
 Щетинин И. В., 275
 Эм В. Т., 100, 104, 226, 227, 229
 Эм В.Т., 24
 Юзвюк М. Х., 277
 Якунина Е. М., 199
 Япрынцеv А. Д., 250
 Яцишина Е. Б., 209, 212
 Яшина Е., 174
 Яшина Е. Г., 225

**КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЙНИЯ НЕЙТРОНОВ
В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД (РНИКС-2023)**

Екатеринбург, 25 — 28 сентября 2023 г.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Тексты тезисов приведены в авторской редакции.

Оформление — П. А. Заяц

Компьютерная верстка — А. А. Ваулин

Ответственные за выпуск — Е. А. Кравцов, Е. В. Мостовщикова