



XXIV Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества, посвященная 100-летию со дня рождения Е.А. Тuroва (СПФКС–24)

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ



Туров Евгений Акимович — советский и российский физик, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заслуженный деятель науки РСФСР.

**14–20 марта 2025 года
Екатеринбург–Кыштым**

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН
Институт теплофизики УрО РАН
Институт электрофизики УрО РАН
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
Уральское отделение Российской академии наук
ООО «Сигнифика»



Тезисы докладов

XXIV Всероссийской школы—семинара
по проблемам физики конденсированного состояния вещества,
посвященной 100-летию со дня рождения Е.А. Тuroва
(СПФКС–24)

14 марта — 20 марта 2025 года

г. Екатеринбург
2025

УДК 538.9
ББК 22.37я431
В85

В85 XXIV Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества, посвященная 100-летию со дня рождения Е.А. Турова (СПФКС-24), Тезисы докладов, г. Екатеринбург, 14 марта — 20 марта 2025 г., г. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2025, 223 с. (СПФКС-24)

ISBN 978-5-6052052-0-3

В сборник тезисов докладов включены материалы XXIV Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества, посвященной 100-летию со дня рождения Е.А. Турова (СПФКС-24). Место проведения — г. Екатеринбург и санаторий «Дальняя дача», г. Кыштым. Время проведения 14 марта — 20 марта 2025 г.

Ответственные за выпуск — С. А. Гудин, А. Н. Сташков

Технический редактор — П. А. Игошев

ISBN 978-5-6052052-0-3

© Авторы, содержание тезисов, 2025
© ИФМ УрО РАН, оформление, 2025

Организаторы

- * Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН
- * Институт теплофизики УрО РАН
- * Институт электрофизики УрО РАН
- * Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
- * Уральское отделение Российской академии наук
- * ООО «Сигнифика»

Спонсоры



Генеральный директор/основатель компании «Экопак» — Ендальцев Андрей
www.epack66.ru

Оргкомитет

- | | |
|---|---|
| * Гудин Сергей Анатольевич, к.ф.-м.н., ИФМ УрО РАН (председатель оргкомитета) | * Блинова Ю.В., к.ф.-м.н., ИФМ УрО РАН |
| * Меренцов А.И., к.ф.-м.н., ИФМ УрО РАН (зам. председателя оргкомитета) | * Байtimiров Д.Р., к.ф.-м.н., УрФУ |
| * Андбаева В.Н., к.ф.-м.н., ИТФ УрО РАН (ученый секретарь) | * Волосников Д.В., к.ф.-м.н., ИТФ УрО РАН |
| | * Гохфельд Н.В., к.ф.-м.н., ООО «Сигнифика» |
| | * Незнахин Д.С., к.ф.-м.н., УрФУ |

Программный комитет

- | | |
|--|---|
| * Сташков Алексей Николаевич, к.т.н., ИФМ УрО РАН (председатель программного комитета) | * Давыдов Д.И., к.т.н., ИФМ УрО РАН |
| * Игошев П.А., к.ф.-м.н., ИФМ УрО РАН (зам. председателя программного комитета) | * Кругликов Н.А., к.ф.-м.н., ИФМ УрО РАН |
| * Гамзатов А.Г., к.ф.-м.н., Институт физики ДФИЦ РАН | * Павлов Н.С., к.ф.-м.н., ФИАН |
| * Горбачёв И.И., к.ф.-м.н., ИФМ УрО РАН | * Прудников П.В., д.ф.-м.н., ОмГУ им. Ф.М. Достоевского |
| * Гудина С.В., к.ф.-м.н., ИФМ УрО РАН | * Столбовский А.В., к.ф.-м.н., ИФМ УрО РАН |
| | * Шкварин А.С., к.ф.-м.н., ИФМ УрО РАН |

Локальный комитет

- | | |
|--|---------------------------------|
| * Ширинкина И.Г., к.т.н., ИФМ УрО РАН (председатель локального комитета) | * Корзунова Е.И., ИФМ УрО РАН |
| * Хотиенкова М.Н., ИТФ УрО РАН (зам. председателя локального комитета) | * Лобанов А.Д., ИФМ УрО РАН |
| * Беляев Д.В., ИФМ УрО РАН | * Маслова С.А., ИФМ УрО РАН |
| * Гапонцева Н.Н., ИФМ УрО РАН | * Панасенко А.С. ИТФ УрО РАН |
| * Девятериков Д.И., ИФМ УрО РАН | * Постников М.С., ИФМ УрО РАН |
| * Заяц С.В., ИЭФ УрО РАН | * Суворкова Е.В., ИФМ УрО РАН |
| | * Чикунова Н.С., ИФМ УрО РАН |
| | * Радзивончик Д.И., ИФМ УрО РАН |

Сайт СПФКС — spfks.imp.uran.ru
e-mail — spfks@imp.uran.ru

Содержание

Вступительная статья	15
Столетию со дня рождения Е. А. Турова. С. А. Гудин	19
Семейный пазл... О. Е. Турова	29
Аналитический отчет о XXIII Всероссийской школе-семинаре по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-23)	36
Лекции	47
Нелинейная кинетика повреждений в деформируемом твердом теле, <i>Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б.</i>	49
Размышления о симметрии и топологии. И при чем здесь нейтроны?, <i>Белушкин А.В.</i>	50
Высокое гидростатическое давление — новый физический метод обработки пищевых продуктов, <i>Волков А.Ю.</i>	51
Археометалловедческое исследование уральских исторических железных артефактов, <i>Гижевский Б.А., Кругликов Н.А., Наумов С.В.</i>	52
Компактный источник нейтронов DARIA в российской стратегии развития нейтронных исследований, <i>Григорьев С.В.</i>	53
Нейтрон-дифракционные исследования эффектов магнитного упорядочения в антиферромагнетиках, <i>Губкин А.Ф.</i>	54
Обогащение урана на Урале на первом этапе атомного проекта СССР, <i>Гудин С.А.</i>	55
Дизайн магнитных наночастиц для биомедицинского применения: физико-химический аспект, <i>Дёмин А.М.</i>	56
Влияние жидкой фазы на формирование структуры сплавов, <i>Камаева Л.В.</i>	57
Магнитосопротивление в модулированных системах, <i>Кунцевич А.Ю.</i>	58
Транспорт экситонов в полупроводниковых наноструктурах, <i>Манцевич В.Н., Палюлин В.В.</i>	59
Ядерный магнитный резонанс в сильно коррелированных системах и наноструктурах, <i>Михалев К.Н.</i>	60
Постоянные магниты: физика, технологии, применение, <i>Мушников Н.В.</i>	61
Нелинейная модель деформирования цитоскелета клетки при сдвиговом нагружении, <i>Никитюк А.С., Князев Н.А., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б.</i>	62
Твердооксидные топливные элементы. Современное состояние, проблемы, тенденции, <i>Никонов А.В.</i>	63

Изучение термодинамических свойств материалов в ударно-волновых экспериментах, <i>Хищенко К.В.</i>	64
Доменные границы в магнитных цилиндрических проводах: внутренняя структура и динамика, <i>Чичай К.А.</i>	65
Магнитные явления	67
Стабильность магнитокалорического эффекта в сплавах $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{13.7}\text{Si}_{1.3}(\text{H}_8)$ при длительном воздействии циклических магнитных полей, <i>Абдулкадирова Н.З.,</i> <i>Гамзатов А.Г., Алиев А.М., Hu F, Wang J.</i>	69
Прямые измерения адиабатического изменения температуры в сплавах DyCo_2 и TbDyHoErCo_2 в магнитных полях до 8 Тл, <i>Абдулкадирова Н.З., Гамзатов А.Г.,</i> <i>Алиев А.М.</i>	70
Магнитокалорический эффект и фазовое расслоение в рамках обобщенной теории Ландау, <i>Василевский Ф.А., Игошев П.А.</i>	71
Релаксационная теория магнитокалорического эффекта в переменном магнитном поле, <i>Ведерникова А.Г., Игошев П.А., Гамзатов А.Г.</i>	72
Влияние циклических магнитных полей на стабильность гигантского обратного магнитокалорического эффекта в сплавах $\text{Ni} - \text{Co} - \text{Mn} - \text{Ti}$, <i>Гамзатов А.Г.,</i> <i>Кадырбардыев А.Т., Алиев А.М.</i>	73
Влияние структурного беспорядка на магнитные свойства сплавов $\text{Fe} - (\text{Ga}, \text{Ge})$: исследование из первых принципов и моделирования Монте-Карло, <i>Кузнецов А.С.,</i> <i>Маркович И.А., Матюнина М.В., Загребин М.А.</i>	74
Магнитные свойства сплавов Гейслера Mn_2YSn ($Y = \text{Sc}, \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}, \text{Mn}$): Исследования <i>ab initio</i> и моделирование Монте-Карло, <i>Загребин М.А., Обамби М.А.,</i> <i>Соколовский В.В., Бучельников В.Д.</i>	75
Экспериментальный метод исследования влияния температурного воздействия и внешнего магнитного поля на магнитный момент в областях магнитоструктурных фазовых переходов 1-го и 2-го рода в точке Кюри на примере сплава $\text{Ni}_{50.5}\text{Mn}_{33.4}\text{In}_{15.6}\text{V}_{0.5}$, <i>Карпухин Д.А., Морозов Е.В., Коледов В.В., Мусабилов И.И.,</i> <i>Алиев А.М., Гамзатов А.Г., Абдулкадирова Н.З.</i>	76
Кинетические и магнитокалорические свойства в сплаве Гейслера $\text{Ni}_{50.5}\text{Mn}_{33.4}\text{In}_{15.6}\text{V}_{0.5}$ вблизи точки Кюри, <i>Карпухин Д.А., Морозов Е.В., Коледов В.В., Мусабилов И.И.,</i> <i>Алиев А.М., Гамзатов А.Г., Абдулкадирова Н.З.</i>	77
Структурные, электронные и магнитные свойства соединения Mn_5Si_3 : экспериментальные исследования и расчеты из первых принципов, <i>Ерагер К.Р., Кузнецов А.С., Маширов А.В., Соколовский В.В.</i>	78

Влияние облучения электронами с энергией 10 МэВ на структурные и магнитные свойства Ti- и Al-замещенного гексаферрита стронция $\text{SrFe}_{11.3}\text{Ti}_{0.4}\text{Al}_{0.3}\text{O}_{19}$, Корх Ю.В., Лобанов А.Д., Шишкин Д.А., Черкасова Н.А., Живулин В.Е., Гудкова С.А., Винник Д.А., Патраков Е.И., Ирхин В.Ю., Сарычев М.Н., Иванов В.Ю., Кузнецова Т.В.	79
Первопринципные расчеты интегралов обменного взаимодействия для ультратонких магнитных плёнок, Мамонова М.В., Макеев М.Ю., Ковалева А.Ю.	80
Влияние состава на магнитные свойства би-интеркалатов $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}\text{TiSe}_2$, Меренцова К.А., Шкварин А.С., Дьячков Е.Г.	81
Предсказание упругих свойств сплавов Гейслера с использованием машинного обучения, Моисеев Д.М., Байгутлин Д.Р., Соколовский В.В.	82
Влияние толщины на структуру и магнитные свойства пленок высокоэнтропийного сплава GdTbDyHoEr , Русалина А.С., Горьковенко В.Н., Архипов А.В., Юшков А.А., Курляндская Г.В., Свалов А.В.	83
Одиночный спин связанный с цепочкой Изинга, Сеидов С.С.	84
Магнитные свойства образцов, полученных методом прессования и методом селективного лазерного плавления, Сейсембаева В.Р., Шаймарданова Л.Г., Голубятникова А.А., Степанова Е.А., Волегов А.С.	85
Микроструктура и эффект обменного смещения в плёночных композитах на основе антиферромагнетика $(\text{Cr}_{70}\text{Mn}_{30})_{100-x}\text{M}_x$ ($\text{M} = \text{Pt}, \text{Cu}, \text{W}$), Семенова С.В., Фещенко А.А., Лепаловский В.Н., Юшков А.А., Васьковский В.О.	86
Влияние размерных эффектов на магнитные свойства системы наночастиц $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, внедренных в матрицу SiO_2 , Балаев Д.А., Князев Ю.В., Семенов С.В., Дубровский А.А., Ласуков А.И., Скоробогатов С.А., Смородина Е.Д., Кириллов В.Л., Мартьянов О.Н.	87
Влияние добавки Si-содержащих поверхностно-активных веществ при измельчении порошков на гистерезисные свойства магнитов $(\text{Nd}, \text{Pr}) - (\text{Fe}, \text{Co}, \text{Cu}, \text{Al}, \text{Ga}) - \text{B}$, Солтус А.Р., Колодкин Д.А., Платонов С.П.	88
Калориметрические исследования магнитных переходов в системе $\text{GdMn}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$, Сташкова Л.А., Барташевич А.М., Герасимов Е.Г., Мушников Н.В.	89
Кристаллическая структура и магнитные свойства оксибората $\text{NiCr}(\text{BO}_3)\text{O}$, Тарасова А.С., Гохфельд Ю.С., Громилов С.А., Великанов Д.А., Кондратьев О.А., Еремин Е.В., Беляева А.О., Казак Н.В.	90
Топологические объекты в наноразмерной многослойной пленке при воздействии внешнего магнитного поля и наличии взаимодействия Дзялошинского-Мории, Филиппова В.В., Гареева З.В.	91
Особенности воздействия внешнего магнитного поля на скирмионы в ультратонких модифицированных ферромагнитных плёнках, Филиппов М.А., Вахитов Р.М.	92

Частотно-полевая зависимость ФМР наноферрита никеля NiFe_2O_4 , <i>Шохрина А.О., Столяр С.В., Боев Н.М., Ли О.А.</i>	93
Фазовые переходы и критические явления	95
Тепловое расширение троилита FeS из метеорита Calama 022, <i>Айрузов А.Р., Дюндик С.С., Максимова Е.М.</i>	97
Сравнительный анализ кристаллизации сплавов $\text{Al} - \text{Cu} - \text{Ni}$ при нормальном и высоком давлениях, <i>Алтунян А.Л., Камаева Л.В., Бражкин В.В.</i>	98
Исследование критических свойств сложных систем методом энтропического моделирования, <i>Друзьев Д.А., Прудников П.В.</i>	99
Двумерная четырехвершинная модель Поттса на гексагональной решетке в магнитном поле, <i>Мазагаева М.К., Рамазанов М.К., Магомедов М.А., Муртазаев А.К.</i>	100
Эластокалорическое охлаждение на основе твердотельных функциональных материалов с термоупругим мартенситным переходом, <i>Морозов Е.В., Коледов В.В., Калашников В.С.</i>	101
Теоретический подход к описанию кинетики структурного мартенситного фазового перехода, <i>Морозов Е.В., Пойманов В.Д.</i>	102
Термодинамические и магнитные свойства антиферромагнитной модели Гейзенберга при наличии внешнего магнитного поля, <i>Муртазаев К.Ш., Магомедов М.А., Джамалудинов М.Р., Рамазанов М.К., Муртазаев А.К.</i>	103
Кинетика формирования упорядоченной фазы CuAuII в нестехиометрическом сплаве $\text{Cu} - 56 \text{ ат.}\% \text{ Au}$, <i>Подгорбунская П.О., Волков А.Ю., Новикова О.С., Таланцев Е.Ф.</i>	104
Исследование термодинамических свойств трехмерной модели Поттса, <i>Рамазанов М.К., Муртазаев А.К., Магомедов М.А., Рамазанов Р.М., Магомедов А.Р.</i>	105
Фазовые диаграммы ориентационных переходов в хиральной жидкокристаллической суспензии диамагнитных частиц, <i>Соколичик Д.П., Макаров Д.В.</i>	106
Выращивание монокристалла $\text{GdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ из раствора-расплава, <i>Титова В.Р., Гудим И.А., Еремин Е.В.</i>	107
Исследование критических явлений в системе $\text{Ga} - \text{Bi}$, <i>Филиппов В.В., Ягодин Д.А.</i>	108
Проводимость и транспортные явления	109
Критическое поведение проводимости в режиме квантового эффекта Холла в структуре $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ с двойной квантовой ямой, <i>Брусникова А.А., Гудина С.В., Неверов В.Н., Шелушина Н.Г., Якунин М.В., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А.</i>	111
Электротранспортные свойства твёрдого электролита $\text{Ag}_6\text{I}_4\text{WO}_4$, <i>Ватлин Д.А., Истомина А.С., Резницких О.Г., Урусова Н.В., Ярославцева Т.В., Бушкова О.В.</i>	112

Природа подавления проводимости в твердотельных фазах органических ионных пластичных кристаллов, <i>Кушнир Д.С., Хамзин А.А.</i>	113
Межслоевая проводимость в углах Ямаджи в слоистых квазидвумерных проводниках в магнитном поле, <i>Могилюк Т.И., Гудин С.А., Григорьев П.Д.</i>	114
Возникновение разности потенциалов в отсутствие тока через образец в режиме квантового эффекта Холла в образце со случайной неэквивалентностью контактов, <i>Попов С.Д., Неверов В.Н., Гудина С.В., Туруткин К.В., Сандаков Н.С., Васильевский И.С., Виниченко А.Н.</i>	115
Электронная плотность состояний, сопротивление и критическая температура сверхпроводника в соединении с волной зарядовой плотности и неидеальным нестингом, <i>Цветкова А.В., Родионов Я.И., Григорьев П.Д.</i>	116
Резонансные явления	117
Исследование цементита Fe_3C методами резонансной спектроскопии, <i>Суворкова Е.В., Михалев К.Н., Гермов А.Ю., Прокопьев Д.А., Уймин М.А.</i>	119
Структурные и механические свойства твёрдых тел	121
Влияние концентрации азота в среде напыления на структурные параметры тонких пленок NiO , <i>Артемьев М.С., Изюров В.В., Дубинин С.С., Носов А.П.</i>	123
Синтез и свойства системы $(\text{Cu}_2\text{Se})_n\text{TiSe}_2$, <i>Горбов Л.Е., Титов А.А., Шкварина Е.Г.</i>	124
Синтез и кристаллическая структура Fe_xZrSe_2 , <i>Дьячков Е.Г., Шкварин А.С., Титов А.А., Пряничников С.В., Титов А.Н.</i>	125
Влияние параметров печати на плотность образцов сплава $\text{Ti}-6\text{Al}-4\text{V}$, изготовленных методом селективного лазерного сплавления, <i>Казаков И.В., Казанцева Н.В., Ежов И.В., Сахаров Н.А., Ильиных М.В., Плотников М.С.</i>	126
Механические свойства сплава $\text{Ti}-6\text{Al}-7\text{Nb}$ при испытаниях на трехточечный изгиб, <i>Карамышев К.Ю., Ежов И.В., Казанцева Н.В., Давыдов Д.И., Афанасьев С.В., Сахаров Н.А.</i>	127
Кристаллическая структура и морфология $\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{S}_2$, <i>Кузнецова А.Ю., Меренцов А.И., Корх Ю.В., Таркаева Е.В., Титов А.Н.</i>	128
Исследование структуры и свойств сплава АМг5, полученного методом MIG сварки, <i>Курышев А.О., Бродова И.Г., Ширинкина И.Г., Астафьев В.В., Коробов Ю.С., Коротеев А.О., Мельников А.Ю.</i>	129
Анализ неупругих процессов в рамках теории динамического взаимодействия дефектов, <i>Малашенко В.В.</i>	130
Исследование двух моделей кристаллической структуры Fe_2CrSe_4 , <i>Мамонова М.В., Кондрашова К.С.</i>	131

Зависимость механизмов формирования структуры монокристаллических интерметаллидов при мегапластических деформациях от величины энергии АФГ, Мелкозеров Д.И., Сосян Д.А., Пилюгин В.П., Постовалова К.А., Соловьева Ю.В.	132
Синтез и исследование системы железо-дисульфид циркония, Михайлов М.А., Меренцова К.А., Титов А.А.	133
Молекулярно-динамическое моделирование полей напряжений у вершины трещины в анизотропных материалах в условиях пластического деформирования, Мушанкова К.А., Степанова Л.В.	134
Особенности деформационной фрагментации и упрочнения тугоплавких металлов вольфрама и рения, Постовалова К.А., Сосян Д.А., Мелкозеров Д.И., Пацелов А.М., Пилюгин В.П., Панфилов П.Е.	135
Особенности структуры сплава ВЖ159 полученного методом селективного лазерного сплавления, Сахаров Н.А., Давыдов Д.И.	136
Упрочнение и структурные превращения в сильнодеформированном под давлением иридии, Сосян Д.А., Панфилов П.Е., Антонова О.В., Пацелов А.М., Постовалова К.А., Мелкозеров Д.И., Пилюгин В.П.	137
Твёрдые коллоидные растворы слоистых дихалькогенидов переходных металлов, Титов А.Н., Шкварин А.С., Постников М.С., Меренцов А.И.	138
Исследование взаимосвязи структуры меди, подвергнутой интенсивной пластической деформации, с распределением относительных энергий границ зерен, Чикунова Н.С., Столбовский А.В., Блинов И.В.	139
Особенности кристаллической структуры $\text{Fe}_x\text{Ni}_y\text{TiSe}_2$ ($x = 0 - 0.5$; $y = 0 - 0.5$), Шкварина Е.Г., Дьячков Е.Г., Титов А.А., Пряничников С.В., Шкварин А.С., Титов А.Н.	140
Термическая устойчивость би-интеркалатного соединения $\text{Fe}_x\text{Ni}_y\text{TiSe}_2$, Шкварин А.С., Дьячков Е.Г., Титов А.А., Пряничников С.В., Титов А.Н.	141
Неразрушающий контроль	143
Моделирование методом конечных элементов распределения магнитного потока в первичном преобразователе дифференциального магнитного структуроскопа, Гордеев Н.В., Сташков А.Н., Матосян А.М.	145
Влияние деформации и термической обработки на магнитные свойства стали 38ХС, Матосян А.М., Ничипурук А.П., Матосян А.М., Сташков А.Н., Гордеев Н.В., Сажина Е.Ю., Афанасьев С.В.	146
Квантовая диффузия дейтерия в щелочных металлах, Выходец В.Б., Нефёдова О.А., Курённых Т.Е., Обухов С.И.	147
Возможность оценки остаточных механических напряжений в железе и никеле, Сташков А.Н., Ничипурук А.П., Столбовский А.В., Матосян А.М.	148

Теплофизика	149
Воздействие перегретых струй воды на плоскую преграду, <i>Акашев А.А., Решетников А.В., Пастухов В.Г.</i>	151
Термодинамическое подобие капиллярной постоянной и поверхностного натяжения бинарных растворов, <i>Андбаева В.Н., Хотиянкова М.Н.</i>	152
Вязкость и кристаллизация расплавов Al–Mg и Al–Zn, <i>Баталова Е.А., Файзуллина С.В., Камаева Л.В., Рыльцев Р.Е., Щелкачев Н.М.</i>	153
Аппроксимационное уравнение для плотности жидких октана и перфтороктана при атмосферном давлении в интервале температур 288.15 – 333.15 К, <i>Билюкова М.Р., Рукавичникова Е.А., Андбаева В.Н.</i>	154
Уравнение состояния жидкой и газовой фаз никеля при высоких плотностях энергии, <i>Боярских К.А., Хищенко К.В.</i>	155
Поиск перспективных тепло- и энергоносителей: методы исследования локальных высокоинтенсивных процессов, <i>Волосников Д.В.</i>	156
Моделирование микро-фазового разделения бинарного теплоносителя при импульсном локальном нагреве, <i>Губин А.А., Волосников Д.В., Скрипов П.В.</i>	157
Исследование контурной тепловой трубы с медным фитилем и аммиаком в качестве теплоносителя, <i>Панасенко А.С., Майданик Ю.Ф., Вершинин С.В.</i>	158
Кинетика гетерогенного вскипания умеренно перегретого н-пентана в стеклянной трубке при давлениях выше атмосферного, <i>Паршакова М.А., Липнягов Е.В.</i>	159
Теплоотдача к импульсно перегретому раствору рапсовое масло – изопропиловый спирт, <i>Поволоцкий И.И., Волосников Д.В., Шангин В.В., Губин А.А., Скрипов П.В.</i>	160
Измерение температуры спонтанного вскипания и критических параметров лактатов, <i>Романов И.С., Попов А.П.</i>	161
Поверхностное натяжение гептана и перфторгексана при атмосферном давлении в интервале температур 288.15 – 333.15 К, <i>Рукавичникова Е.А., Билюкова М.Р., Андбаева В.Н.</i>	162
Уравнение состояния смеси золото—свинец при высоких давлениях и температурах, <i>Середкин Н.Н., Хищенко К.В.</i>	163
Коэффициент теплоотдачи к импульсно перегретым растворам борной кислоты, <i>Волосников Д.В., Ситдыков А.А., Поволоцкий И.И., Скрипов П.В.</i>	164
Кристаллизация пористого аморфного льда, насыщенного пропаном, <i>Томин А.С., Файзуллин М.З., Виноградов А.В., Коверда В.П.</i>	165

Сравнительное исследование скейлинговых уравнений, описывающих плотность вещества на линии насыщения, <i>Устюжанин Е.Е.</i>	166
Уравнение состояния раствора пропан–метан, <i>Хотиенкова М.Н., Андбаева В.Н.</i>	167
Дилатометрический метод измерения плотности металлических расплавов, <i>Ягодин Д.А., Филиппов В.В.</i>	168
Электрофизика	169
Исследование стойкости к сильным импульсным магнитным полям нанокompозита Cu-Nb, легированного переходными металлами, <i>Заяц С.В., Спирин А.В., Зайцев Е.Ю., Паранин С.Н.</i>	171
Исследование диэлектрической проницаемости никель-цинковых ферритов для мощных импульсных устройств, <i>Патраков В.Е., Рукин С.Н.</i>	172
Нanomатериалы	173
Влияние способа подачи газа в камеру на диэлектрические свойства пленок оксида гафния-циркония, <i>Александрович П.А., Потылкин А.Н., Голосов Д.А.</i>	175
Модель графена в атомноподобном базисе: подбор параметров базиса в пакете SIESTA, <i>Переходюк А.А., Аникина Е.В.</i>	176
Структурные и магнитные свойства пленочных наноструктур, обогащенных ^{57}Fe , <i>Блинов И.В., Столбовский А.В., Корх Ю.В., Кузнецова Т.В., Максимова И.К., Гермов А.Ю., Голобородский Б.Ю., Фалахутдинов Р.М., Акрамов Д.Ф.</i>	177
Исследование структурных и магнитных свойств окисленных пленок пермаллоя с эффектом обменного смещения, <i>Блинов И.В., Корх Ю.В., Кузнецова Т.В., Максимова И.К., Фалахутдинов Р.М., Акрамов Д.Ф.</i>	178
Синтез, магнитные и магниторезистивные свойства нанопроволок $3d$ -переходных металлов в толстых фольгах алюминия, <i>Верясова А.А., Дрягина А.Е., Горьковенко А.Н., Кулеш Н.А., Кудюков Е.В., Юшков А.А., Васьковский В.О.</i>	179
Распределение геометрических характеристик нанотрубок на поверхности плёнки $\text{CN}_x : \text{Eu}_y\text{O}_z$, <i>Лавренюк А.С., Недёркин В.В., Шемченко Е.И.</i>	180
Зависимость структурных характеристик эпитаксиальных феррит-гранатовых пленок от температуры, <i>Максимов Г.С., Стругацкий М.Б., Максимова Е.М.</i>	181
Электронная структура тонких пленок гематита, <i>Меренцова К.А., Дубинин С.С., Шкварин А.С., Носов А.П.</i>	182
Особенности морфологии поверхности пленки $\text{CN}_x : \text{Eu}_y\text{O}_z$, полученной с помощью ДС-магнетрона, <i>Недёркин В.В., Лавренюк А.С., Шемченко Е.И.</i>	183
Топография сколотой поверхности монокристаллов $\text{Ti}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{Ch}_2$ ($\text{Ch} = \text{S, Se, Te}$), <i>Постников М.С., Кузнецова А.Ю., Меренцов А.И., Корх Ю.В., Таркаева Е.В., Титов А.Н.</i>	184

Кинетические параметры термостимулированной люминесценции в коллоидных квантовых точках InP/ZnS, <i>Савченко С.С., Voxминцев А.С., Вайнштейн И.А.</i>	185
Сверхпроводимость и физика низких температур	187
Пленки $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ на стекле с примесью CeO_2 , <i>Петров А.В., Снигирев О.В., Блинова Ю.В., Маресов А.Г.</i>	189
Спин-волновые возбуждения в гибридных структурах сверхпроводник/ферромагнитный изолятор с динамическим эффектом близости, <i>Туркин Я.В., Пугач Н.Г.</i>	190
Оптика и спектроскопия	191
Спектроскопия высокого разрешения перспективных для фотовольтаики свинцово-галогенидных перовскитов, <i>Аникеева В.Е., Семенова О.И., Попова М.Н.</i>	193
Низкотемпературные люминесцентные криотермометры на основе кристаллов двойных фторидов калия-иттрия, легированных ионами Er^{3+} или Ho^{3+} , <i>Диаб М., Попова М.Н.</i>	194
Оптические нанокерамики с углеродными квантовыми точками, <i>Кирыков А.Н., Дьячкова Т.В., Тютюнник А.П., Бакланова И.В.</i>	195
Синтез и оптические свойства двойного бората $\text{DyCr}_3(\text{BO}_3)_4$, <i>Кузьмин Н.Н., Мальцев В.В., Морозов И.А.</i>	196
Особенности электронной структуры твёрдых растворов $\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{Ch}_2$ ($\text{Ch} = \text{S}, \text{Se}$), <i>Меренцов А.И., Шкварин А.С., Постников М.С., Кузнецова А.Ю., Титов А.Н.</i>	197
Анализ температурных зависимостей ИК-спектров квазидвумерных сегнетоэлектрических кристаллов TlGaSe_2 , <i>Молчанова А.Д., Аллахвердиев К.Р.</i>	198
Динамика кремниевых центров окраски в алмазе под воздействием отжига, <i>Сектаров Э.С., Хомич А.А., Большаков А.П., Хмельницкий Р.А., Седов В.С., Ральченко В.Г., Болдырев К.Н.</i>	199
Люминесцентные свойства стекол $\text{Bi}_2\text{O}_3 - \text{GeO}_2 - \text{Na}_2\text{O}$, солегированных Tm_2O_3 и Er_2O_3 , <i>Серкина К.С., Степанова И.В., Король А.В., Князькова О.В., Сектаров Э.С.</i>	200
Электронная структура $\text{Fe}_x\text{Ti}(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)_2$, <i>Шкварин А.С., Титов А.А., Шрамков Е.А., Чумаков Р.Г., Титов А.Н.</i>	201
Теория конденсированного состояния	203
Теоретическое исследование полуметаллических свойств Gd_4Sb_3 , <i>Байдак С.Т., Лукоянов А.В.</i>	205
Ток Вигнера и его связь с квантово-классическим переходом, <i>Бурков И.Д., Сеидов С.С.</i>	206
Волновая природа пластичности металлов и ее модельное описание, <i>Власова А.М.</i> .	207

Особенности поведения намагниченности топологического антиферромагнитного изолятора в магнитном поле, обусловленные квантовыми эффектами, <i>Вальков В.В., Злотников А.О., Гамов А.</i>	208
Квантовый алгоритм опорных векторов с использованием кудитов, <i>Глазкова Е.В., Сеидов С.С.</i>	209
Структура и свойства $ZrO_2 : R^{3+}$: <i>ab initio</i> расчет, <i>Глухов К.И., Чернышев В.А., Заяц П.А.</i>	210
Плоско-симметричная капиллярная турбулентность: пятиволновые взаимодействия, <i>Кочурин Е.А., Русских П.А.</i>	211
Эффекты электронных корреляций при миграции ионов цинка в V_2O_5 : исследование методом DFT + U, <i>Плотников Я.М., Коротин Д.М.</i>	212
Проблема выбора растворов-расплавов для выращивания монокристаллов $NdGa_3(BO_3)_4$, <i>Ситников К.А., Еремин Е.В., Гудим И.А.</i>	213
Определение фазовой диаграммы основного состояния слоистых перовскитов, <i>Чижов Д.Е., Игошев П.А.</i>	214
Биофизика	215
Фотокаталитическая активность наночастиц оксида церия, <i>Берняева Т.В., Киреева А.В.</i>	217
Влияние сжиженных газов и других физико-химических факторов на прорастание семян и последующее развитие сеянцев клевера лугового, <i>Беляев А.Ю., Кругликов Н.А., Быструшкин А.Г.</i>	218
Влияние величины ионизирующего излучения и гидростатического давления на выживаемость дрожжей, <i>Кругликов Н.А., Крылова Д.А., Бажукова И.Н.</i>	219
Авторский указатель	221

ВСТУПИТЕЛЬНАЯ СТАТЬЯ XXIV ВСЕРОССИЙСКОЙ ШКОЛЫ-СЕМИНАРА
ПО ПРОБЛЕМАМ ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ВЕЩЕСТВА, ПОСВЯЩЕННАЯ 100-ЛЕТИЮ
СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Е. А. ТУРОВА

*За посев ли, за покос ли —
Надо взяться, поспешать!
А прохлопав, сами после
Локти будете кусать.*
В. С. Высоцкий «Проложите,
проложите...», 1972 г.

СПФКС-24 посвящена столетию со дня рождения Е.А. Турова. Про то, кто такой Евгений Акимович, про его жизненный путь и вклад в науку рассказывают следующие за этой статьей материалы: «К 100-летию со дня рождения Е.А. Турова» и «Семейный пазл или маленькие воспоминания близких о большом человеке». Ну а на школе-семинаре будет организована специальная секция, посвященная этому событию. Какие изменения произошли по сравнению с прошлой СПФКС? Прежде всего мы были вынуждены чуть ли не в последний момент поменять дислокацию. Начиная с СПФКС-15, мы проводили школы в одном месте - на базе отдыха «Солнечный остров» село Мостовское. Собирались там же провести и очередную, десятую, школу на одном и том же месте, но администрация базы отдыха практически в последний момент создала условия, которые заставили нас отказаться от проведения там школы — семинара. Найти за короткий срок место проведения, удовлетворяющее нашим требованиям (наличие зала, достаточного количества мест для проживания, приемлемых условий и цены) достаточно непросто. Цены же за проживание на базах отдыха за прошедшие 1,5 года увеличились более чем на 50%. В этот раз школа-семинар пройдет в санатории «Дальняя дача», находящемся недалеко от г. Кыштым. Из видимых минусов нового места проведения: 1) большое расстояние от г. Екатеринбурга (156 км от ИФМ), что затрудняет и удорожает логистику и 2) состояние санатория (видно, что его лет 15-20 назад великолепное состояние (санаторий относился к Росатому), стараются бережно сохранить, не вкладывая в него дополнительные деньги, но годы берут свое). Из плюсов – великолепная природа и очень интересные места. Этим мы попытаемся преодолеть минусы. Запланированы 3 экскурсии (столько экскурсий еще не было ни на одной школе). Это посещение горы Сугомак и сугомакской пещеры, посещение Слюдорудника с его живописными штольнями и экскурсии в город Касли с посещением музея каслинского литья. Чтобы облегчить логистику для приезжающих только на свой доклад, а среди стендовиков таких обычно большинство, мы в этот раз первый день проведения школы полностью проводим в Институте физики металлов, где и проведем стендовую секцию.

Число зарегистрированных участников на СПФКС-24 — 177, а число поданных тезисов докладов — 146. Если посмотреть на графики на рис. 1, то можно заметить, что тенденция уменьшения числа участников и количества докладов продолжается третью СПФКС. Мы попытались сломать эту тенденцию, перенеся время проведения СПФКС с ноября на март, но тут кроме неблагоприятного влияния уменьшения количества ученых, которые получают гранты и резкого подорожания проживания (см. рис. 2), добавилось одновременное прохождение с марта по май большого числа родственных конференций. Будем считать, что эксперимент с переносом школы на весну оказался неудачным, а резкое возрастание числа участников на СПФКС-21, проходившей весной 2021 года, связано с тем, что во время эпидемии ковида многие школы перешли в онлайн формат. Уменьшение числа участников

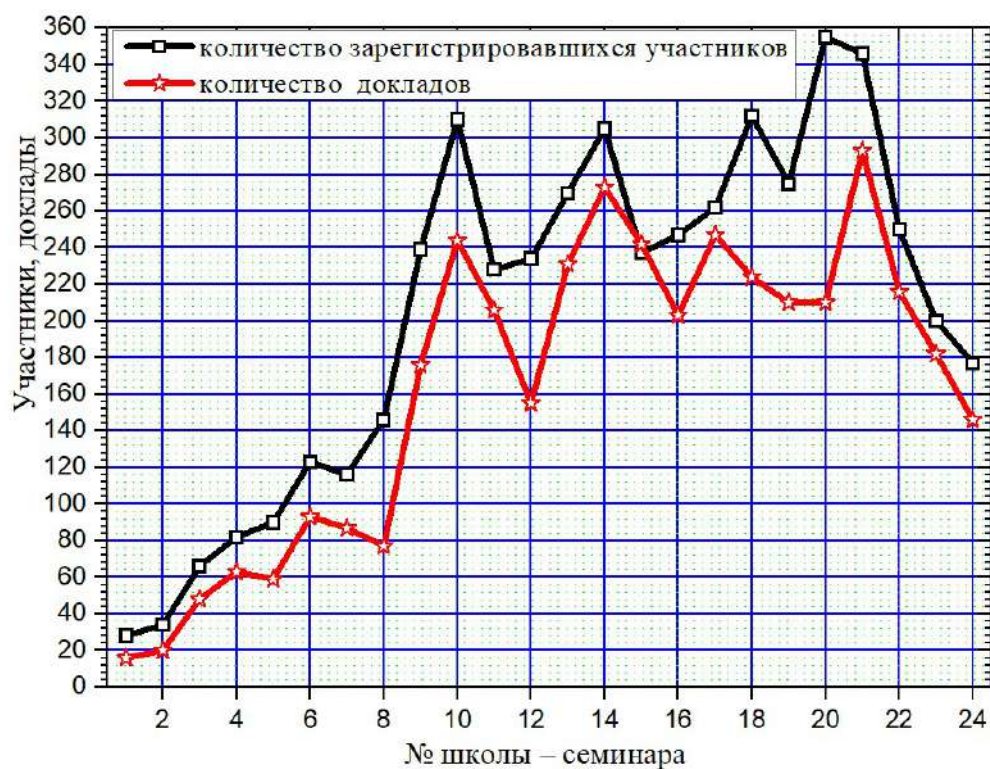


Рис. 1. Динамика изменения числа участников и докладов на СПФКС.

связано так же с тем, что участие в конференциях теперь никак не влияет на оплату труда ученых.

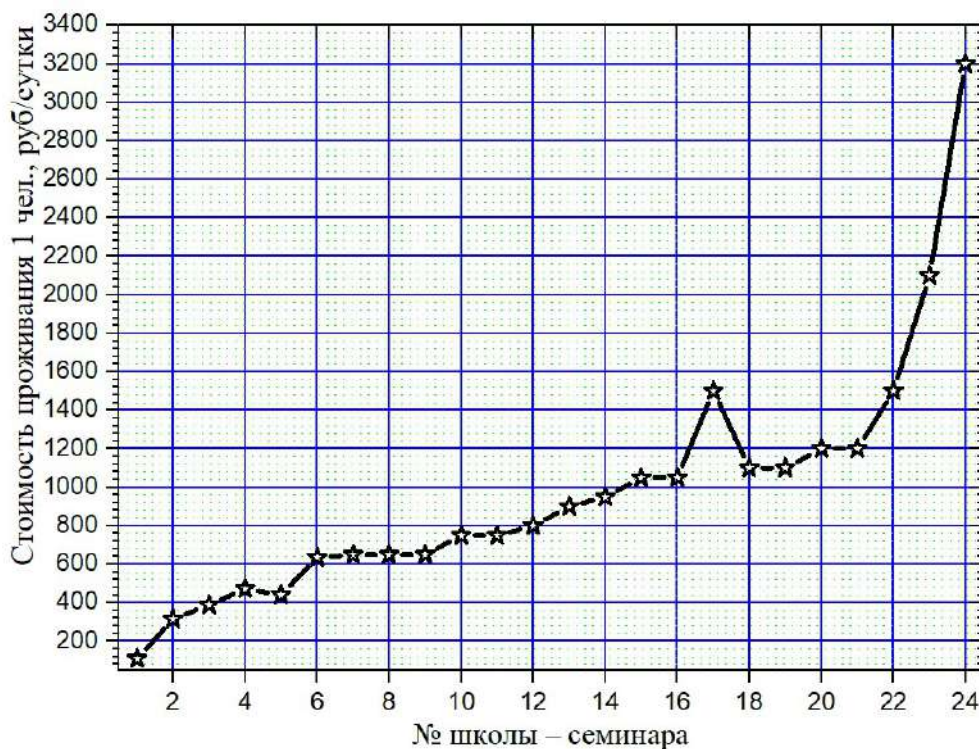


Рис. 2. Стоимость проживания 1 человека за 1 сутки на СПФКС.

Если проанализировать рис. 1, то можно заметить, что падение числа участников было уже неоднократно, но тенденция уменьшения продолжалась не более трех школ подряд. И это позволяет надеяться на лучшее. Следующая школа будет юбилейной и одна из задач, которая будет перед нами стоять — преодолеть спад, получив новую восходящую тенденцию. Из рисунка 1 видно, что если число зарегистрировавшихся участников уменьшилось на 13% по сравнению с СПФКС-23, то вот число поданных докладов уменьшилось на 25%. Это говорит о том, что основное влияние на уменьшение числа участников оказали цены (заявки на участие подавались раньше, чем были оглашены цены за проживание и люди, которые предварительно планировали участвовать, зарегистрировавшись и узнав, что цены возросли, и стали для них неприемлемыми, не стали посылать тезис доклада).

Если анализировать динамику изменения числа участников на СПФКС по категориям (см. графики на рис. 3), то можно заметить, что число участников во всех категориях уменьшилось по сравнению с 2023 годом примерно одинаково, а наибольшее уменьшение произошло в категории студенты. Довольно неизменно число участников — докторов и членов РАН. Связано это с тем, что на СПФКС читается примерно одинаковое количество лекций. Похожая динамика за последние 11 лет наблюдается и среди участников-студентов.

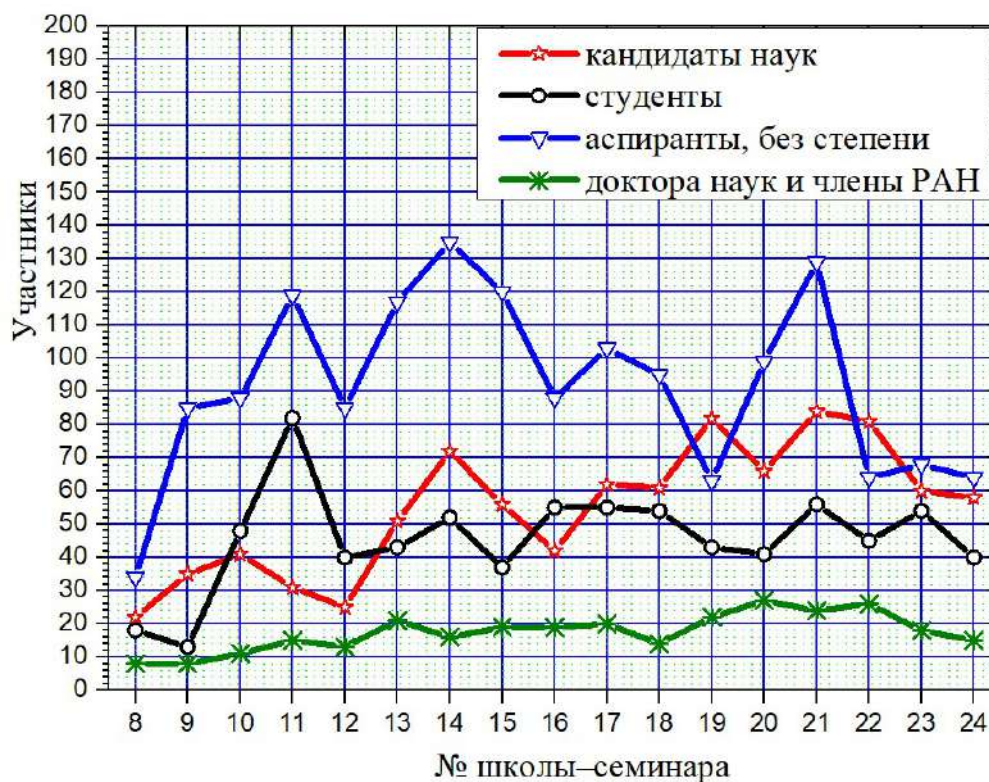


Рис. 3. Динамика изменения числа участников на СПФКС.

Традиционно я хочу поблагодарить всех, кто приложил руку к организации этого Дела — школы-семинара СПФКС. СПАСИБО ВАМ! Хочется выделить всех до одного и поблагодарить всю дружную команду оргкомитета за самоотверженный труд, неугасающий энтузиазм и преданность Делу! Ну а участникам СПФКС хочу сказать: «Двери оргкомитета открыты для всех! Если вам нравится СПФКС, если хотите повариться в этом котле, если хотите прочувствовать, что такое организация Всероссийской школы-семинара СПФКС, приходите, мы будем рады новым людям!»

Цели, поставленные перед школой-семинаром:

- 1) обучение участников, повышение их профессионального уровня, расширение научного кругозора;
- 2) объединение молодежи, создание нового круга общения, установление научных связей;
- 3) приобретение опыта научного общения, участия и организации конференций;
- 4) создание определенного психологического климата, помогающего молодым участникам лучше раскрыть свои личность и талант, почувствовать свою научную значимость.

*Председатель оргкомитета
школы-семинара СПФКС-24
к.ф.-м.н. С.А. Гудин*



Евгений Акимович Туров (27.01.1924–17.11.2007)

Туров Евгений Акимович — крупный специалист в области физики твердого тела, хорошо известен своими выдающимися трудами в области теоретической физики и магнетизма. Внес значительный вклад, заложил основополагающие идеи в такие разделы физики, как квантовая многоэлектронная теория переходных металлов и сплавов, магнитоакустика ферро- и антиферромагнетиков, кинетические и рентгеноспектральные свойства переходных металлов и др. Предсказал существование новых эффектов, получивших впоследствии экспериментальное подтверждение.

Монографии Е.А. Тулова «Ферромагнитный резонанс» (1961), «Физические свойства магнитоупорядоченных кристаллов» (1963), «Ядерный магнитный резонанс в ферро- и антиферромагнетиках» (1969), «Материальные уравнения электродинамики» (1983), «Динамические и кинетические свойства магнетиков» (1986), «Кинетические, оптические и акустические свойства антиферромагнетиков» (1990), «Основы электродинамики материальных сред в переменных и неоднородных полях» (2000), «Симметрия и физические свойства антиферромагнетиков» (2001) до сих пор являются востребованными специалистами.

Столетию со дня рождения Е. А. Турова

27 января 2024 г. исполнилось 100 лет со дня рождения известного физика-теоретика, специалиста в области физики твердого тела и магнетизма, члена-корреспондента РАН Евгения Акимовича Турова, а 4 апреля 2024 г. в ИФМ УрО РАН прошел вечер, посвященный Е.А. Турову. Было много выступающих, которые с теплом и любовью вспоминали Евгения Акимовича. Среди выступающих было четыре аспиранта Турова, ставших в последствии докторами наук, это Шавров Владимир Григорьевич, Гребенников Владимир Иосифович, Скрябин Юрий Николаевич, Дякин Вильям Вячеславович. После вечера Розенфельд Евгений Владимирович передал для музея ИФМ УрО РАН программируемый калькулятор на магнитной памяти Casio pro fx-1, произведенный в Японии (первый программируемый калькулятор фирмы Casio), который, вместе со вторым программируемым калькулятором, производства США, был привезен в 1976 году Евгением Акимовичем из командировки в США, где он читал лекции по магнетизму. Эти первые программируемые калькуляторы были отданы им для пользования в отдел теоретической физики. Примечательно, что калькуляторы были куплены Е. А. Туровым за собственные деньги. Попав в теорлабораторию после окончания института, я, в основном, видел Евгения Акимовича на семинарах и выступлениях с докладами. Он к тому времени уже передал бразды правления лабораторией в руки своего ученика Куркина Михаила Ивановича и в это время заканчивал писать вместе со своими единомышленниками книгу «Симметрия и физические свойства антиферромагнетиков», в которой физические свойства описывались, основываясь на теории групп. Надо сказать, что на четвертом курсе я прослушал годовой курс по теории групп, но обсуждения глав книги на семинарах лаборатории были для меня, да и, скорее всего, для многих других участников семинара, не занимающихся теорией групп, довольно нудны, так как это совсем другой подход к описанию магнетизма, опирающийся на огромное число специализированных терминов и теорем, которые остальные магнитчики не чувствуют и недопонимают. Но и из такого соприкосновения с Е. А. Туровым, я довольно быстро понял, что Евгений Акимович большой ученый. Как я позже узнал, такое же отношение к нему было у многих, кто его знал. Характерный факт рассказал на вечере памяти Москвин Александр Сергеевич. Когда в 1991 г. проходили выборы в Академию наук, то среди кандидатов в члены — корреспонденты было много хороших ученых. Глава комиссии считал, что Туров Е.А. уже староват и нужно избрать кого-нибудь моложе, но большинство членов комиссии были уверены, что из рассматриваемых кандидатов наиболее подходящая кандидатура — Евгений Акимович. Туров никогда не был на школе-семинаре СПФКС, так как в то время, когда она образовалась, он по состоянию здоровья уже никуда не ездил. Но в 2011 году на СПФКС-12 Анатолий Петрович Танкеев сделал часовую лекцию о своем учителе — Турове Е. А. (записанную на видео лекцию можно посмотреть в архиве на сайте школы). Многие ученики Е.А. Турова выступали на СПФКС. На протяжении всего времени проведения школы — семинара фамилия Турова много раз упоминалась докладчиками, ссылавшимися на его работы и книги. Приведу еще один факт. Когда я еще молодым ученым приехал на конференцию и стал общаться с такими же молодыми аспирантами из других городов, то меня спросили: «А кто у вас в институте работает из известных?» Называемые мной фамилии им ничего не говорили, пока я не произнес фамилию Туров. Меня сразу спросили: «Это не тот который книжку про ЯМР написал?» После этого авторитет нашего института в глазах московских аспирантов значительно вырос. В 2024 году (год столетия со дня рождения Турова Е.А.) школа-семинар не проходила, но подготовка к ней уже началась, и СПФКС-24 было решено посвятить Евгению Акимовичу.

Евгений Акимович родился 27 января 1924 года в Пермской области в деревне Мало-Турово. В декабре 1932 г. его отец устраивается на работу слесарем на Уралмашзавод, и вся семья



Рис. 1. Туров Е.А. Из стенгазеты: а ты записался в научное студенческое общество?

Туровых (отец, мать, пятеро детей) переезжает в город Свердловск. После окончания в 1941 г. с отличием средней школы N68, Евгений Акимович поступает в Уральский государственный университет. По призыву горкома ВЛКСМ 4 ноября 1941 г. в возрасте 17 лет добровольцем вступает в Красную Армию. После окончания в январе 1942 г. в Свердловске курсов радиотелеграфистов он попадает на Волховский фронт в 28-ой гвардейский минометный полк, на вооружении которого находились реактивные миномёты БМ-13 «Катюша», и до 1944 г. находится в рядах действующей армии. В январе 1943 г. вступает в члены коммунистической партии. 19 января 1944 года при штурме Новгорода командир отделения радиосвязи, комсорг дивизиона, гвардии сержант Е.А. Туров был контужен и получил множественные осколочные ранения ноги и плеча. В 1944 г. за участие в боях под Новгородом был награжден медалью «За отвагу». В прифронтовом госпитале в г. Боровичи (Новгородская обл.) Турову 5 раз делали переливание крови, так как у него начался общий сепсис (заражение крови). Встал вопрос об ампутации ноги, около месяца он находился на грани жизни и смерти, неоднократно на несколько дней теряя сознание. После 3 месяцев без движения, произошла атрофия мышц, так что ему даже пришлось заново учиться сидеть и стоять. Контузия привела к частичной потере памяти, так что Евгений даже сперва не узнал, приехавшую к нему в госпиталь в Казань летом 1944 г. мать — Феклу Антипьевну, которая перевезла сына долечиваться в госпиталь в г. Свердловск. После выписки Евгений Акимович был демобилизован из Советской армии по инвалидности, еще несколько лет передвигаясь на костылях (раны на ноге в первый раз затянулись в 1947 г., но нога беспокоила всю жизнь, на ней открывались язвы, развился остеомиелит). Из госпиталя Туров Е.А. был выписан в сентябре 1944 г. «*по настойчивому требованию ранбольного*» (так указано в справке при выписке), так как он не хотел пропускать учебный год в университете, и с октября 1944 г. продолжает учебу в г. Свердловске на физико-математическом факультете Уральского Госуниверситета

им. А.М. Горького, закончив его с отличием в 1949 г. по специальности «Теоретическая физика». Школьные знания по физике и математике пришлось восстанавливать после амнезии практически с нуля. Во время учебы ему пришлось несколько раз ложиться в госпиталь инвалидов Великой отечественной войны.

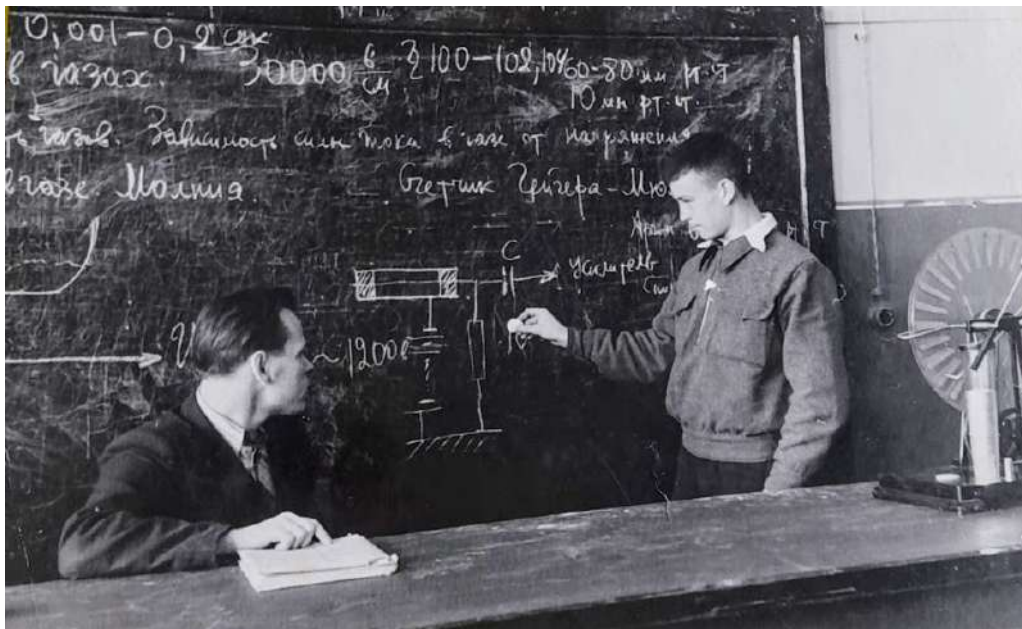


Рис. 2. Учитель физики в мужской средней школе №27 в 1951-54 гг.

Весь дальнейший научный путь Евгения Акимовича связан с Институтом физики металлов, начиная от поступления в аспирантуру (август 1949 г.) и работы в должности лаборанта, и заканчивая должностью заведующего отделом теоретической физики и заместителя директора ИФМ УрО РАН. Когда я только попал в теоретический отдел, то узнал, что старшие сотрудники делят историю отдела на 2 этапа — до второго прихода Турова в ИФМ и после второго прихода. Связано это с тем, что в январе 1951 г. Туров был вынужден «по собственному желанию» отчислиться из аспирантуры и пойти работать преподавателем физики в школу №27 г. Свердловска, продолжая заниматься наукой под руководством С.В. Вонсовского. Тогда стало известно, что в начале 1931 г. семья Туровых, узнав, что им грозит раскулачивание, уехала из деревни. Евгению на тот момент только исполнилось 7 лет. Его отец Туров Аким Михайлович на паях с братом владел мельницей, которая была ими отдана в колхоз в 1930 г. На обсуждении парткома института было решено, что такой поступок (скрыл, что он сын кулака) не красит члена партии, и ему было вынесено партийное взыскание (строгий выговор с предупреждением и занесением в личное дело с формулировкой «за сокрытие социального положения») и, по-видимому, Турову было предложено добровольно поработать в школе. Отработав в школе 3 года в 1954 г., по ходатайству зав. теор. отделом член-корр. АН СССР С. В. Вонсовского Евгений Акимович переводится на работу старшим лаборантом в Институт физики металлов и защищает в 1955 г. кандидатскую, а в 1963 г. — докторскую диссертации.

Карьерный путь Турова Е.А. выглядит так: 27.04.1954 зачисление старшим лаборантом (оклад 980 руб.), 10.08.1954 перевод на должность инженера (оклад 980 руб.), 31.12.1954 перевод в распоряжение Президиума Уральского филиала Академии наук СССР на должность ученого секретаря комиссии по магнетизму с окладом 1800 руб. (ходатайство председателя комиссии по магнетизму УФАИ С.В. Вонсовского), увеличение оклада 27.06.1955 до 3000 руб., в связи с



Рис. 3. Е. А. Туров в молодости

защитой кандидатской диссертации, 6.03.1963 утверждение на должность заведующего отделом теоретической физики, 1966 г. утверждение в ученом звании профессора, с 1.01.1977 зам. директора института по научной работе, с 1972 по 1978 г. член комиссии по магнетизму в Международном союзе чистой и прикладной физики при ЮНЕСКО, в 1986 г. Государственная премия Украинской ССР («За разработку физических основ высокочастотной магнитоакустики ферро- и антиферромагнетиков»). По истечению пятилетнего срока в 1982 г. Туров пишет заявление с просьбой освободить его от должности зам. директора в связи с тем, что ему необходимо много работать по науке. Оставляя эту должность, в своем заявлении об уходе предлагает на этот пост Талуца Германа Германовича, еще одного ученика С.В. Вонсовского. Проработав 25 лет на посту заведующего теоротдела, в 1988 г. Туров Е.А. переходит на должность главного научного сотрудника, рекомендуя назначить вместо себя своего ученика Куркина М.И. Надо сказать, что Евгений Акимович Туров не держался за посты. Так заступая на пост заместителя директора, он поставил условие, что административной работе будут посвящены определенные дни недели, а в остальные он будет заниматься наукой,

иначе он отказывается от этой должности. Евгений Акимович неоднократно был в научных командировках за границей: Франция (1961, 1969, 1983), Англия (1968), США (1967, 1970, 1973, 1976, 1985), Чехословакия (1965), Польша (1970, 1974), Венгрия (1975), Голландия (1976), Канада (1977, 1978), ФРГ (1979), Япония (1982), ГДР (1983). Я уже упоминал, что Туров ездил туда не просто как турист, а чтобы быть на переднем крае науки и принести пользу институту и отделу теоретической физики. Он старался понять, какие направления исследований в магнетизме наиболее перспективны, рассказывая об этом своим сотрудникам. Так из поездки в США он привез новую тему для исследований — создание и развитие теории флуктуаций электронной спиновой плотности и предложил заняться ею своему ученику Гребенникову В.И., который впоследствии защитил по этой теме докторскую диссертацию. Еще позже аспирант Гребенникова, далее развил эту тему и защитил по ней кандидатскую диссертацию, а другому его аспиранту защита по этой теме еще предстоит. Такое большое количество поездок за границу заставило задуматься, а какие языки знал Туров? В его анкете записано: «Английский — читаю и могу объясняться, немецкий и французский — читаю и перевожу».



Рис. 4. Картина Е. А. Тулова, сделанная из собранных листьев растений и деревьев.

Так почему же вскрылся факт «сокрытия социального положения»? Об этом можно только гадать, но версия А.П. Танкеева, что какой-то бдительный сотрудник ИФМ обнаружил этот факт, не выдерживает критики. Чтобы вскрыть этот факт, необходимо было пройти по всей цепочке мест проживания, делая запросы, откуда и когда прибыла семья Туровых с возвращенными характеристиками их деятельности. Провести такую усиленную проверку могло только КГБ. Перед переездом в Свердловск при бегстве из деревни семья Туровых несколько раз поменяла местожительство (Кыштым, Ачинск, Еманжелинск). В 1950 г. в ИФМ появляется справка из сельсовета деревни Мало-Турово, в которой было указано, что Туровы — кулаки, бежавшие от раскулачивания. Евгений Акимович не считал это справедливым, указывая, что его отец был рабочим «с 1916 по 1920 г. работал слесарем на Казанском пороховом заводе», после возвращения в деревню и женитьбы, часто «уезжал зимой на зара-

ботки на ближайшие заводы и мастерские», что в семье была «одна лошадь и одна корова», намекая на то, что никакого избыточного достатка в семье не было. Отец с 1932 г. 21 год работает слесарем в одном и том же цехе Уралмашзавода, «не имеет никаких взысканий, зато имеет много поощрений и премий за рационализацию производства». Все вышеприведенные цитаты этого абзаца взяты из автобиографии Е.А. Турова, написанной в 1954 г. В автобиографии, написанной в 1963 г., Туров Е.А. пишет более категорично о своем партийном взыскании в 1951 г.: «*Как тогда, так и сейчас это обвинение считаю незаслуженным. Через год взыскание снято*». Выскажу свою версию причины усиленной проверки личного дела. Е.А. Туров поступает в аспирантуру в 1949 г. и в это же год был привлечен очередной десант сотрудников Института физики металлов в Атомный проект СССР, ряд научных сотрудников института в 1949 г. были отправлены в г. Свердловск-44 на Уральский электрохимический комбинат заниматься задачей по разделению изотопов урана, а сам институт дополнительно привлекается к решению ряда задач, связанных с Атомным проектом. Так, Юрий Павлович Ирхин, д.ф.-м.н., физик-теоретик, поступивший на работу в ИФМ в 1953 г. после окончания Саратовского университета, вспоминал, что тогда теоретический отдел института привлекали к расчетам, связанным с ядерной тематикой (из сообщения его ученика Е.В. Розенфельда) [1]. В сентябре 1949 г. для восполнения острой нехватки специалистов, необходимых для атомного проекта, в Уральском политехническом институте был создан физико-технический факультет, учебный план для которого, по утверждению ректора Уральского университета Паригория Евстафьевича Суетина — студента первого выпуска физтеха, «составил тогда профессор С.В. Вонсовский. Он же и приглашал преподавателей из числа научных сотрудников Института физики металлов Уральского филиала Академии наук (ИФМ УФАН). ...Во втором семестре нас направили на практику в ИФМ УФАН СССР для монтажа одного из первых на Урале, да и в стране, ускорителя — бетатрона» [2]. Ясно, что Вонсовского и работающих с ним сотрудников усиленно проверяло КГБ. Что важного сделал в аспирантуре Туров, что даже попав в жернова административной машины, смог вернуться обратно в институт в апреле 1954 г. на должность лаборанта, а через 8 месяцев, защитить кандидатскую диссертацию, стать ученым секретарем комиссии по магнетизму УФАН? Как мне видится, причина в том, что в 1953 г. выходит статья С.В. Вонсовский, Е.А. Туров «Об обменном взаимодействии валентных и внутренних электронов в кристаллах ($s - d$ — обменная модель переходных металлов)» [3], которая стала завершающей третьей работой знаменитой $s - d$ модели Вонсовского-Шубина. Фамилия Евгения Акимовича незаслуженно не упоминается, зато в результате этой работы сложилась его научная судьба. А вот что об этом пишет С.В. Вонсовский: «Гамильтониан $s - f$ обмена в формуле (20.111) впервые был получен для $s - d$ обмена в работе Вонсовского и Турова, а затем независимо в работах...» — (с. 575 в [4]). Ю. А. Изюмов и Ю. Н. Скрябин отмечают, что в работе [3] получен важный физический результат «подмагничивание электронов проводимости в ферромагнитном металле» — (с. 13 в [5]). В.Ю. Ирхин пишет: «В последнее время в зарубежной физической литературе $s - d$ - модель часто именуется моделью решеток Кондо. Такая историческая несправедливость связана с исключительной важностью эффекта Кондо — пожалуй, самого красивого явления в физике твердого тела. Тем не менее сам Кондо, исследуя аномалии магнитного $s - d$ - рассеяния, исходил из гамильтониана в представлении вторичного квантования, который был предложен Вонсовским и Туровым» в [3]» — (с. 40 в [6]).

Среди учеников Евгения Акимовича 20 кандидатов и 10 докторов наук, каждый из которых сам является величиной в физике конденсированного состояния. Деятельность Е.А. Турова охватывала все основные направления в теории магнетизма. Им были получены результаты, оказавшие и продолжающие оказывать существенное влияние на развитие современных



Рис. 5. В кабинете слева направо Туров Е.А., Танкеев А.П., Николаев В.В., Куркин М.И.

представлений в этой области физики: разработка симметричного подхода к исследованию свойств магнитоупорядоченных веществ; развитие квантовомеханической теории магнитного резонанса в магнетиках и его использования для изучения свойств магнитных материалов; детальное теоретическое исследование кинетических явлений в магнитных средах; изучение динамики доменных границ и других солитоноподобных объектов. В заключительной части я хотел бы поговорить про Турова — творца. Евгений Акимович писал стихи, рисовал картины, собирал гербарии. Делал он это для души, понимая, что тут у него талант не так велик, как у ученого, но все же его работы трогают душу своей искренностью. На обложке сборника тезисов помещена абстрактная картина Е.А. Турова, написанная им во Франции при помощи специальной машины, разбрызгивающей краску, см. рис. 4.

У меня в кабинете висит доставшаяся мне в подарок от М.И. Куркина картина (рис. 3), сделанная Е.А. Туровым с помощью собранных в находящемся по соседству с институтом дендрарии растений. На обратной стороне картины есть стихотворение:

*Красота в цветочке каждом,
В каждом листике изящном,
И алмазный блеск росинки,
Грациозный строй снежинки —
Это все лишь порожденье,
Варианты, отраженья
Красоты Великих формул —
Содержанья их и формы.*

(Е.А. Туров, октябрь 1983 г.)



Рис. 6. Туров Е.А., Барьяхтар В.Г.



Рис. 7. Вонсовский С.В., Туров Е.А., неизвестный.

Закончить эту статью хочу жизнеутверждающими стихами Евгения Акимовича, написанными им в санатории имени Горького в Кисловодске.

*Утром рано вставать,
Здравствуй, Солнце! — кричать,
И избежать — по тропинке крутой.
На лужайке лежать,
Ароматом дышать,
Наслаждаться здесь мыслью простой:
Ни докладов писать,
И ни лекций читать —
Ну не надо совсем ничего.
Просто так дикарем
Быть — с природой вдвоем
И смеяться, не зная с чего.
Ни друзей, ни врагов
Ни хвалить, ни роптать.
Что ж до женщин? (Ни-ни) —
Лишь мечтать.
От свободы пьянеть,
Песни радости петь,
В облака запустить посошок.
Кисловодску, Ура! —
Отзовется в горах
Хорошо, хорошо, хорошо!
(Е.А. Туров, 20 мая 1977 г.)*

1. С. А. Гудин УФН **194** (7), 765 (2024).
2. П. Е. Суетин «У истоков атомной проблемы» Известия УрГУ **12**, 86, (1999).
3. С. В. Вонсовский, Е.А. Туров ЖЭТФ **24**, 419 (1953).
4. С. В. Вонсовский «Магнетизм» Москва: Наука 1032 с. (1971).
5. Ю. А. Изюмов, Ю. Н. Скрябин «Базовые модели в теории магнетизма» Екатеринбург: УрО РАН 259 с. (2002).
6. «Физика металлов на Урале. История Института физики металлов в лицах». Екатеринбург: РИО УрО РАН 496 с. (2012)

*Сотрудник лаборатории теоретической физики ИФМ УрО
РАН С.А. Гудин*

СЕМЕЙНЫЙ ПАЗЛ ИЛИ МАЛЕНЬКИЕ ВОСПОМИНАНИЯ БЛИЗКИХ О БОЛЬШОМ ЧЕЛОВЕКЕ



Папа с сестрой Любой, с нами с братом и нашими двоюродными братьями и сестрами на Уралмаше в доме их родителей. Примерно 1958 год.

Здравствуйте, я — Турова Ольга, дочка Турова Евгения Акимовича, или деды Жени, как называли его в нашей семье. Когда мне предложили написать о папе заметку, я несколько растерялась, т.к. совсем недавно подробно рассказывала о нём на вечере в ИФМ, посвящённом его столетию. Повторяться не хотелось и мне пришла в голову идея попросить близких поделиться своими ассоциациями и воспоминаниями, связанными с дедой Женей. И вот какой пазл сложился.

Фёдор (младший брат)

У меня был старший брат, Туров Евгений. По жизни он был простой и душевный человек. Я любил его, уважал, но не завидовал. Мне нравилось его отношение к работе, семье, жизни вообще.

Вспоминаю, когда совсем трудно, как он по ночам занимался в своей маленькой комнате, вспоминая школьную науку, забытую после контузии, и обнимал, и качал-качал свою бесконечно болящую раненую ногу. Я до сих пор часто обращаюсь мысленно к нему, когда думаю, как поступить в том или ином случае.

Люба (младшая сестра)

Мой брат был всегда очень целеустремлённым. Когда я была совсем маленькой девочкой, то часто видела, как он пешком шёл на занятия в университет на костылях после ранения,



Папа с братом Фёдором и сестрой Любой в квартире на ул. Мамина-Сибиряка примерно 2008 год.

шёл до трамвайной остановки около 40 минут. Это тоже героизм. И никогда не терял веры в себя и в жизнь. Учился только на отлично и был сталинским стипендиатом.

А в мои зрелые годы всегда отмечала, какой он был заботливый, любящий, верный. А ещё был очень сдержанного характера. Трудно ему было, т.к. фронтовые раны отдавались болью многие годы. Горжусь, что у меня был такой брат, и он многие годы был для меня примером.

Лев (зять)

Помню, как он, чрезвычайно занятый научной работой и руководством отделом, находил интерес и, главное, время на фотографии и любительское кино. Он устраивал показы слайдов для родных и друзей-коллег, делаясь впечатлениями о местах и событиях своих поездок.

Тетя Таня (тётя внуков)

Хорошо помню, как мы ходили к ним в гости на 9 мая. Это был самый главный праздник в доме. Е. А. надевал все свои награды, был сосредоточен и серьёзен. Мой папа брал с собой мандолину, и они на пару пели песни военных лет, а мы все дружно подпевали. Собирались все дети и внуки в этот день.

Борис (внук)

Вспомнил как вдвоём с дедом ходили гулять в парк Маяковского. Он кормил меня бутербродами с маслом и мёдом. И мы с ним катались на финских санях! Это было событие!



Празднование дня рождения папы. Брат Виктор показывает фото нашего деда, папиного отца, Акима Михайловича в задуманном папой и изготовленном мамой альбоме, посвящённом семейству Туровых. Примерно 2005 год.



Папа, брат Фёдор Акимович и второй дед внуков, Борис Михайлович, поют старые песни на праздновании 9 мая.

Женя (внучка)

Деда правильно питался: овсянка с курагой, салат из овощей.

Ещё я всегда старалась тихо-тихо ходить мимо его кабинета, и там внутри всё было таинственное, и много ручек и карандашей в такой деревянной подставке с просверленными дырками.

А ещё деда откуда-то знал, что нужно маленьким девочкам, и привозил из зарубежных командировок какие-то сказочные вещи, типа фиолетовых джинсов и кроссовок на липучках.



Дед и все внуки (стоят: слева направо, Борис, Леонид, Алексей, сидят: слева Евгения, справа Мария)
9го мая примерно 2001 года.



Прогулка с внуком Борисом. Около 1979 года.

Маша (внучка)

В целом, для меня дед это пример того, чего может добиться человек, несмотря на все обстоятельства. Это помогает справляться со своими трудностями.

Валентин (зять)

Сначала Евгений Акимович был строг ко мне. Он хотел понять, гожусь ли я в мужа его дочери. Обо всём подробно расспросил и вроде одобрил. А потом просто было его бесконечно жаль в его непростой старости и хотелось помочь.



На дне города мои родители Евгений Акимович и Валентина Андреевна с внучками Машей и Женей. Около 1986 года.

Оля (дочь)



Семья на Южном Урале. Около 1969 года.

Вспоминается сразу очень многое. Например, как папа научил нас плавать и кататься на велике и лыжах. А в годы тотального дефицита покупал нам, детям, какие-то штанишки и курточки, а однажды привез нам с мамой из США кучу всякой прекрасной одежды и ворох модных журналов. Когда я заканчивала школу, он готовился целый день и написал краткий конспект по школьной физике на 3 листах и рассказал мне весь курс за пару часов. Однажды остался на целые сутки с совсем маленьким внуком Борей, кормил из бутылочки, стирал подгузники...

Нежно и романтично любил нашу маму, и она всегда оставалась для него той гордой и весёлой красавицей Валюшей, которая полюбила его когда-то, хромого, замученного, но такого хорошего. И вообще, он был большой романтик.

Если задуматься, то многому из того, что мы умеем, как мы живём, как относимся к жизни, как решаем проблемы, мы научились у них, деды Жени и бабы Вали.

О. Е. Турова

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ О XXIII ВСЕРОССИЙСКОЙ ШКОЛЕ-СЕМИНАРЕ ПО ПРОБЛЕМАМ ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

1. Общая статистическая информация

XXIII Всероссийская школа - семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-23) проводилась с 23 ноября по 30 ноября 2023 г. на б/о «Солнечный остров» в с. Мостовское Верхнепышминского района Свердловской области. Организаторами СПФКС-23 являлись Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН (ИФМ УрО РАН), Институт теплофизики УрО РАН, Институт электрофизики УрО РАН, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Уральское отделение Российской Академии наук, ООО «Сигнифика».

Школа-семинар СПФКС-23 проводилась в формате научной конференции с элементами образовательной направленности. Большинство участников СПФКС-23 составили молодые сотрудники, студенты и аспиранты институтов РАН и высших учебных заведений России. С целью повышения квалификации, расширения кругозора молодых специалистов, а также привлечения молодых ученых к исследованиям по актуальным научным тематикам были организованы лекции, посвященные широкому спектру проблем фундаментального, технологического и прикладного характера. В качестве лекторов (приглашенных докладчиков) выступили ведущие ученые РАН, университетов и институтов Москвы, Черноголовки, Томска, Екатеринбурга, Махачкалы, Казани, Перми, Ижевска. Общее количество зарегистрированных участников школы-семинара составило 203 человека. Состав участников: 3 член - корреспондентов РАН, 15 докторов наук, 60 кандидатов наук, 125 учёных без степени. В 2023 г. в сборник тезисов вошло 174 тезиса доклада. Всего в ходе проведения школы-семинара было сделано 204 доклада, из них: лекций (приглашенных докладов и круглых столов) — 25, устных докладов (кратких сообщений) — 72, стендовых докладов — 63. В СПФКС-23 приняли участие докладчики из 22 городов РФ, представляющие 40 научных и образовательных учреждений.

Использование оргкомитетом электронной системы онлайн регистрации и обработки заявок на участие в конференции позволяет существенно улучшить процессы учета и обработки статистических данных. Результаты обработки этой информации можно сопоставлять с данными за предыдущие годы, прослеживая временную динамику различных показателей (см. таблицы 1-4, все цифры приведены согласно фактической программе конференции и сборнику тезисов докладов). Дополнительная информация, включающая научную программу, а также видеозаписи лекций и фотоархивы СПФКС-23 и предыдущих конференций, размещена в сети Интернет на сайте Совета молодых ученых ИФМ УрО РАН по адресу <https://spfks.imp.uran.ru>.

Как следует из вышеприведенных данных, большая часть участников конференции является молодыми учеными. В ходе конференции были проведены конкурсы студенческих и аспирантских докладов, победители конкурса награждены дипломами СПФКС-23, а его результаты выложены на сайте школы-семинара. Как количественное, так и процентное соотношение лекций, устных и стендовых докладов за последние несколько лет меняется незначительно, что объясняется стабильным форматом мероприятия и общим временем сессий.

Благодаря многолетнему плодотворному взаимодействию оргкомитета с администрацией ИФМ УрО РАН и Уральского федерального университета (включая дополнительную финансовую поддержку), учащиеся и сотрудники этих организаций в 2022 г. составляли 50.9% от об-

Таблица 1. Категории докладов.

Год	Всего	Лекции	Устные	Стендовые	Заочные
2007	77	19 (25%)	39 (51%)	19 (25%)	н/д
2008	176	19 (10.8%)	73 (41.5%)	49 (27.8%)	35 (19.9%)
2009	244	27 (11.1%)	83 (34.0%)	119 (48.8%)	15 (6.1%)
2010	206	24 (11.7%)	63 (30.6%)	95 (46.1%)	24 (11.7%)
2011	155	19 (12%)	46 (29.3%)	55 (35%)	35 (22.3%)
2012	231	27 (11.7%)	73 (31.6%)	86 (37.2%)	42 (18.2%)
2013	273	27 (10%)	78 (28.6%)	106 (38.8%)	62 (22.7%)
2014	223	20 (9%)	76 (33%)	59 (26%)	68 (30.0%)
2015	203	23 (11%)	60 (29%)	55 (27%)	65 (32.0%)
2016	240	26 (10%)	71 (29%)	87 (36%)	56 (23.0%)
2017	224	27 (12%)	89 (40%)	91 (41%)	17 (7.0%)
2018	210	29 (14%)	108 (51%)	73 (35%)	0
2019	230	30 (13%)	102 (44%)	98 (43%)	0
2021	293	32 (11%)	94 (32.1%)	110 (37.5%)	57 (19.4%)
2022	220	25 (11.3%)	91 (41.4%)	78 (35.5%)	26 (11.8%)
2023	204	25 (12.3%)	72 (35.3%)	63(30.9%)	44 (21.5%)

Таблица 2. Персональный состав докладчиков.

Год	Члены РАН	Доктора наук	Кандидаты наук	Аспиранты и уч. без степени*	Студенты
2007	3 (4%)	5 (6%)	22 (29%)	34 (44%)	13 (17%)
2008	3 (1.7%)	5 (2.8%)	35 (19.9%)	85 (48.3%)	48 (27.3%)
2009	3 (1.2%)	8 (3.3%)	41 (16.8%)	88 (36.1%)	82 (33.6%)
2010	3 (1.5%)	12 (5.8%)	31 (15%)	119 (58%)	40 (19.4%)
2011	2 (1.3%)	11 (7%)	25 (16%)	85 (54%)	32 (20.4%)
2012	4 (1.7%)	17 (7.4%)	51 (22.1%)	117 (50.6%)	43 (18.6%)
2013	2 (1%)	14 (5.1%)	72 (26.4%)	135 (49.5%)	52 (19%)
2014	3 (1.3%)	16 (7%)	56 (24.5%)	120 (52.4%)	37 (16.2%)
2015	2 (1%)	17 (8%)	42 (20%)	88 (43%)	55 (27%)
2016	4 (1.7%)	16 (6.7%)	62 (25.8%)	103 (43%)	55 (22.8%)
2017	1 (0.5%)	13 (5.8%)	61 (27%)	95 (42%)	54 (24%)
2018	3 (1.4%)	19 (9%)	82 (39%)	63 (30%)	43 (20.5%)
2019	7 (3%)	20 (8.7%)	66 (28.7%)	99 (43%)	41 (17.8%)
2021	1 (0.3%)	23 (7.9%)	84 (28.7%)	129 (44%)	56 (19.1%)
2022	7 (3.2%)	19 (8.6%)	81 (36.8%)	66 (30%)	47 (21.4%)
2023	4 (2%)	15 (7.4%)	60 (29.5%)	100 (49.3%)	24 (11.8%)

* Колонка с обозначением «Аспиранты и уч. без степени» включает в себя всех докладчиков, не вошедших в другие колонки.

щего количества докладчиков. Процентный состав участников из других регионов России в 2022 составил 38.4%. Таким образом, оргкомитетом созданы условия для развития межрегионального и международного научного сотрудничества, а молодые российские ученые имеют возможности для обмена результатами исследований.

Таблица 3. Географический состав докладчиков (2021 г.) и участников (2007 – 2019 гг.) (организации, страны, города).

Год	ИФМ	ИТФ	ИЭФ	УрФУ	Россия*	Ин. уч.**	Екатеринбург
2007	33 (43%)	6 (8%)	н/д	25 (32%)	8 (10%)	н/д	69 (90%)
2008	41 (23%)	12 (7%)	н/д	31 (18%)	70 (40%)	4 (2.3%)	94 (53.4%)
2009	59 (24%)	15 (6%)	12 (5%)	53 (22%)	78 (32%)	3 (1.2%)	150 (61%)
2010	52 (25%)	14 (7%)	8 (4%)	51 (25%)	76 (37%)	3 (1.5%)	127 (61%)
2011	51 (32%)	11 (7%)	3 (2%)	39 (25%)	50 (32%)	2 (1.3%)	105 (67%)
2012	71 (31%)	15 (7%)	8 (3.5%)	41 (18%)	86 (37%)	2 (0.9%)	144 (62%)
2013	67 (25%)	12 (5%)	8 (3%)	73 (27%)	99 (36%)	4 (1.5%)	173 (61%)
2014	60 (26%)	11 (5%)	15 (7%)	50 (22%)	84 (37%)	7 (3%)	145 (63%)
2015	56 (27%)	13 (6%)	12 (6%)	72 (35%)	49 (24%)	2 (1%)	155 (75%)
2016	54 (22%)	14 (6%)	16 (7%)	84 (35%)	67 (28%)	3 (1.2%)	176 (72%)
2017	63 (20%)	15 (5%)	12 (4%)	76 (24%)	94 (31%)	16 (5%)	202 (64%)
2018	77 (28%)	16 (6%)	12 (4%)	62 (23%)	90 (33%)	8 (3%)	185 (67%)
2019	88 (30%)	20 (7%)	14 (5%)	62 (21%)	101 (34%)	1 (0.5%)	196 (66%)
2021	46 (15.7%)	20 (6.8%)	3 (1%)	53 (18%)	155 (53%)	6 (2%)	132 (45%)
2022	62 (28.2%)	10 (4.5%)	8 (3.6%)	42 (19.1%)	86 (39%)	8 (3.6%)	126 (57.2%)
2023	71 (34.9%)	8 (3.9%)	8 (3.9%)	33 (16.3%)	78 (38.4%)	0 (0%)	25 (61.6%)

* Колонка «Россия» в таблице 3 не включает участников из Екатеринбурга.

** В колонку с обозначением «Ин. уч.» включены зарегистрированные участники из других стран.

2. Анализ тематики научной программы конференции

Научная программа СПФКС-23 включала следующие разделы: Магнитные явления, Фазовые переходы и критические явления, Проводимость и транспортные явления, Оптика и спектроскопия, Резонансные явления, Структурные и механические свойства твёрдых тел, Неразрушающий контроль, Теплофизика, Электрофизика, Наноматериалы, Биофизика, Теория конденсированного состояния, Сверхпроводимость и физика низких температур.

В научной программе представлен широкий спектр основных проблем современной физики конденсированного состояния вещества. Отметим, что на семинаре существует традиция приглашать нескольких докладчиков из смежных областей физики, представителей различных высокотехнологичных отраслей промышленности, а также биологии или медицины. Такая политика способствует расширению кругозора молодых специалистов и представляется полезной в плане развития междисциплинарного научного сотрудничества и прикладных исследований. Распределение тематики докладов по секциям приведено в таблице 4.

Как следует из таблицы 4, популярность секции «Магнитные явления» на СПФКС традиционно превосходит все остальные направления — 23.6% в 2023 г. Это близко к значениям процентного содержания количества докладов секции «Магнитные явления» в 2018, 2019 и 2022 гг. Такой большой процент докладов в первую очередь связан с преобладанием данной тематики как в ИФМ УрО РАН, так и в других организациях уральского региона. Доклады в данной секции затрагивали фундаментальные основы магнетизма, а также касались прикладных аспектов.

Открытие XXIII Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-23) было проведено 23 ноября 2023 года в Институте физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН. С приветственными словами выступил замести-

Таблица 4. Распределение тематики докладов по секциям за последние 4 года.

Секция / Год	2019	2021	2022	2023
Магнитные явления	46 (20%)	84(28.6%)	43 (19.5%)	39 (23.6)
Фазовые переходы и крит. явления	31 (13.5%)	44(15%)	33 (15%)	20 (12.1%)
Проводимость и ТЯ	26 (11.3%)	12(4%)	16 (7.3%)	13 (7.9%)
Оптика и спектроскопия	9 (3.9%)	35 (12%)	20 (9.1%)	8 (4.8%)
Резонансные явления	3 (1.3%)	2(0.7%)	2 (0.9%)	3 (1.8%)
Структурные и механические св-ва	29 (12.6%)	35(12%)	23 (10.5%)	15 (9.1%)
Неразрушающий контроль	7 (3%)	4(1.4%)	5 (2.3%)	6 (3.6%)
Теплофизика	22 (9.7%)	14(4.8%)	12 (5.5%)	12 (7.3%)
Электрофизика	6 (2.6%)	5(1.7%)	6 (2.7%)	3 (1.8%)
Нanomатериалы	13 (5.7%)	27(9.2%)	22 (10%)	18 (10.9%)
Биофизика	10 (4.3%)	4(1.4%)	10 (4.5%)	6 (3.6%)
Теория КС	20 (8.7%)	23(7.8%)	17 (7.7%)	19 (11.5%)
Сверхпроводимость и ФНТ	8 (3.5%)	4(1.4%)	7 (3.2%)	3 (1.8%)

тель директора Института Александр Павлович Носов. Научную часть школы открыл лектор Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова Манцевич Владимир Николаевич. В своем выступлении на тему «Индукцированная током спиновая поляризация в квантовой точке» он рассказал о теоретических расчетах и экспериментальных наблюдениях нанообъектов - полупроводниковых квантовых точек. Методом неравновесных функций Грина показано, что многочастичные корреляции между квантовой точкой и квантовым проводом могут увеличить спиновую поляризацию в квантовой точке при низких температурах почти на два порядка. Предложенный эффект может быть реализован в современных наноструктурах с двумерным электронным или дырочным газом и использоваться для эффективного управления локализованными электронными спинами в квантовых точках.

Вторую лекцию на тему «Спин-флуктуационные переходы» прочитал Демишев Сергей Васильевич из Института физики высоких давлений РАН. Он пояснил, что под спин-флуктуационным переходом понимается изменение характеристик спиновых флуктуаций в магнетике под воздействием управляющих параметров (например, температуры или состава материала), не связанное непосредственно с образованием фаз с дальним магнитным порядком. В докладе рассматривалось современное состояние проблемы спин-флуктуационных переходов с точки зрения теории и эксперимента, в том числе на примере спиральных магнетиков $MnSi$ и $Mn_{1-x}Fe_xSi$, магнитных полупроводников $Hg_{1-x}Mn_xTe$, легированных компенсированных полупроводников $Ge:As(Ga)$ и сильно коррелированного металла со скрытым порядком SeV_6 . Были рассмотрены основные методы исследования переходов (рассеяние нейтронов и электронный парамагнитный резонанс). Отмечалось, что в настоящее время спин-флуктуационные переходы изучены недостаточно подробно и дальнейшие исследования в этом направлении могут оказаться одной из точек роста в современной физике магнитных явлений.

После переезда на базу отдыха «Солнечный остров» состоялось вечернее заседание школы-семинара. Лекцию на тему «Формирование новых стабильных и метастабильных фаз в сплавах алюминия при термических и барических воздействиях» прочитала представитель Удмуртского федерального исследовательского центра УрО РАН Меньшикова Светлана Геннадьевна. Она рассказала об исследованиях аморфных и нанокристаллических сплавов на основе алюминия с переходными и редкоземельными металлами. Отмечалось, что в результате исследований температурных и временных зависимостей вязкости жидких сплавов Al-Ni-

(Y/La/Ce) обнаружены длительные релаксационные процессы. Показано, что релаксационные процессы наблюдаются только в расплавах, содержащих редкоземельные металлы. Релаксационные процессы в расплавах возникают только после фазового перехода твердое состояние — жидкость. Для перехода неравновесного расплава в состояние равновесия достаточно длительной изотермической выдержки вблизи температуры ликвидуса, при этом повышение температуры расплава приводит к снижению времени его релаксации к состоянию равновесия. Длительные релаксационные процессы в изученных сплавах обусловлены реализацией в расплаве сразу после плавления неравновесного микрогетерогенного состояния и его релаксацией к равновесию. В докладе акцентировалось внимание, что такое неравновесное микрогетерогенное состояние возникает вследствие наследования при плавлении неравновесных атомных микрогруппировок, упорядоченных по типу химических соединений Al_x (Y/La/Ce), присутствующих в твердых сплавах.

Приглашенный доклад Григорьева Андрея Андреевича из Института экологии растений и животных УрО РАН был посвящен дендрохронологии. В докладе приводились многочисленные примеры изучения деревьев, произрастающих в разных климатических зонах России. Изучение годовых колец позволяет понять особенности изменения климата и зафиксировать экологические катастрофы (засухи, пожары, извержения вулканов).

В 2023г. теплофизическая секция проходила как в очном формате, так и с использованием режима видеоконференции для лектора из Перми. Всего заслушано 10 докладов, из них два являлись приглашенными. Начало заседания открыл представитель Объединенного института высоких температур РАН — Хищенко Константин Владимирович (г. Москва). Он выступил с приглашенным докладом «Простые модели термодинамики материалов при высоких давлениях и температурах», где затронул вопросы использования полуэмпирических моделей, в которых функции термодинамических величин задаются согласно теоретическим представлениям, а константы в этих функциях находятся с привлечением экспериментальных данных. Его ученики и аспиранты Боярских К.А. и Середкин Н.Н. выступили с докладами «Простейшие уравнения состояния жидкого титана» и «Моделирование ударной сжимаемости сплава ниобий-тантал в широкой области давлений и температур». После кофе-брейка заслушана лекция в режиме он-лайн «О некоторых актуальных проблемах оценки ресурса материалов авиационного моторостроения» заведующего лабораторией Института механики сплошных сред УрО РАН (г. Пермь) — Наймарком Олегом Борисовичем. В лекции были озвучены результаты экспериментальных и теоретических исследований стадийности развития разрушения сплавов авиационного моторостроения в условиях сверхмногоциклового усталости, в том числе в условиях комбинированного динамического и циклического нагружения, результаты исследований закономерностей разрушения керамических и композитных материалов в широком диапазоне интенсивностей нагружения. Кроме теоретических докладов на теплофизической секции было сделано шесть (всего представлено 8) устных докладов с результатами экспериментов, проведенных в Институте теплофизики УрО РАН (г. Екатеринбург), Удмуртском федеральном исследовательском центре УрО РАН (г. Ижевск), Уральском федеральном университете им. Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург), Московском институте сталей и сплавов (г. Москва).

На вечернем заседании секцию открыл Богомаз Вячеслав Михайлович (ООО МГК «ГЕОЛАБ», г. Екатеринбург) с приглашенным докладом на тему «Методы и технологии геотехнического мониторинга для предотвращения разрушения зданий». В своем докладе Вячеслав Михайлович рассказал о важности непрерывного сбора данных высотных зданий и сооружений, средствах контроля. Было заострено внимание на физических принципах, на которых базируются существующие методики контроля напряжений в железобетонных конструк-

циях и наклона от вертикали. Курышев А.О. сделал доклад о разработке технологии получения порошка для селективного лазерного плавления нового алюминиевого сплава «никалин». Представители ИФМ УрО РАН Щапова Е.А. и Сташков А.Н. сделали доклады по неразрушающему контролю, рассказав об оценке механических напряжений в ферромагнетиках с разными знаками магнитострикции и особенностях контроля качества пайки токоведущих соединений погружного нефтяного электрооборудования вихретоковым методом. Студент УрФУ Гордеев Н.В. сделал доклад о результатах исследований магнитных свойств и фазового состава коррозионностойкой стали GP1, изготовленной на лазерном 3D принтере. Фатталова Д.Р. рассказала о влиянии ультразвука на процесс кристаллизации металлических материалов в процессе 3D печати. В завершении рабочего дня с приглашенным докладом в онлайн формате выступил Губкин Андрей Федорович из ИФМ УрО РАН. Тема доклада — «Рассеяние нейтронов: бесценный метод диагностики материалов в арсенале экспериментальных методик современного материаловедения». В своем докладе Андрей Федорович на многочисленных примерах рассказал о результатах исследований твердых тел на синхротронных и нейтронных установках. Особо подчеркивались возможности отечественных ускорителей, их характеристики и особенности применения.

В пятницу 24 ноября, помимо основной, параллельно проходила теоретическая секция. На ней выступили с устными докладами представители института Металлургии УрО РАН Балякин И.А. и Хазиева Е.О., рассказав о результатах компьютерного моделирования расплавов GdT_bDyHoEr и Al-Cu. Представительница Омского государственного университета им. Ф.М. Достоевского Мамонова М.В. сообщила результаты первопринципных расчетов обменных интегралов пленки железа на поверхности хрома в зависимости от ее толщины. После перерыва доклады сделали Бурков И.Д. (о решении уравнения движения функции Вигнера частицы в двумерной квантовой яме), Мутайламов В.А. (о фазовой диаграмме и основном состоянии декорированной модели Изинга на простой кубической решетке) и Мухачев Р.Д. (доклад о зонной структуре интерметаллида GdNiSb под давлением). В субботу 25 ноября на утреннем заседании были заслушаны доклады секций «Фазовые переходы и критические явления», «Наноматериалы», «Структурные и механические свойства твердых тел». Докладчиками выступили Рыжова А.А., Ашуров Г.Г., Бронникова Ю.И., Карамышев К.Ю., Корзунова Е.И., Гусейнов Т.З., Аникеев С.Г., Акрамов Д.Ф. Представитель Томского государственного университета Аникеев Сергей Геннадьевич сначала сделал доклад на тему «Особенности структуры и свойства поверхности монолитного никелида после электронно-пучковой обработки», а позже выступил с лекцией на более общую тему «Биосовместимые сплавы на основе никелида титана». В этой лекции Сергей Геннадьевич рассказал, что никелид титана обладает памятью формы при изменении температуры, сверхэластичностью при температуре тела, коррозионной стойкостью в условиях длительной знакопеременной деформации, высокими параметрами проницаемости и смачиваемости. Протезы на основе NiTi в настоящее время все больше применяются на практике. Еще одним приглашенным докладчиком была представительница Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск) Пещерова Светлана Михайловна. В своем докладе на тему «Новейшие подходы к экспериментальным и теоретическим исследованиям поликристаллического кремния» она рассказала об экспериментальных исследованиях структуры кремния, а также о подходах к моделированию структуры методами машинного обучения.

На вечернем заседании с устными докладами о результатах структурных исследований выступили участники из Новосибирска, Москвы и Екатеринбурга Беккер Т.Б., Шевцова Л.И., Самарин А.Н., Кругликов Н.А., Беляев А.Ю. После всех устных докладов была проведена стендовая секция, на которой были представлены доклады по разделам биофизика, наномате-

риалы, неразрушающий контроль, структурные свойства твердых тел, теория конденсированного состояния, теплофизические свойства веществ, фазовые переходы и критические явления.

Утреннее заседание 26 ноября началось с докладов представителей ИФМ УрО РАН, занимающихся исследованиями системами на основе CuZrCrSe , CuZrSe , ZrTiSe . С устными докладами выступили Суслов Е.А., Шкварин А.С., Меренцов А.И., Постников М.С., Кузнецова А.Ю., Титов А.А., Титов А.Н. Представительница лаборатории диффузии ИФМ УрО РАН Чикуннова Н.С. сделала доклад о применении сканирующей туннельной микроскопии для составления карт относительной энергии границ зерен ультрамелкозернистых материалов. С приглашенными докладами выступили д.ф.-м.н. Смирнов Александр Михайлович (МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва) и член-корр. РАН Заякин Олег Вадимович (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург). Александр Михайлович в своем докладе на тему «Нелинейно-оптические свойства коллоидных растворов нанокристаллов CdSe разной морфологии» рассказал о новых оптических, нелинейно-оптических и электрооптических свойствах нанокристаллов, о перспективах их применения в оптоэлектронных устройствах, таких как солнечные батареи, сверхчувствительные сенсоры, дисплеи, лазерные системы и компоненты, системы освещения, биосенсоры, широкополосные оптические телекоммуникационные системы, оптические переключатели, оптические ограничители и т.д. Олег Вадимович Заякин в своем докладе на тему «Технологический суверенитет России в металлургической отрасли: состояние и развитие производства и минерально-сырьевой базы» рассказал о тех реалиях, в которых оказалась металлургическая промышленность нашей страны в условиях санкций Запада, а также о путях выхода из зависимости от импортных элементов (таких как Nb) для производства качественной стали. После перерыва Захарова Елена Владимировна рассказала о Российской научной периодике: ее истории, настоящем и ближайшем будущем. Представитель Института органического синтеза им. академика И.Я. Постовского (г. Екатеринбург) Демин Александр Михайлович прочитал лекцию на тему «Наноразмерные препараты для терапии и диагностики рака, одобренные для клинического использования: современное состояние». В ней Александр Михайлович сделал обзор принципов создания современных наноразмерных материалов для терапии и диагностики рака, одобренных для клинического использования в мировой практике. Отмечалось, что в настоящее время для повышения эффективности терапевтических и диагностических препаратов с содержанием металлических наночастиц используют ряд подходов, заключающихся в создании новых наноматериалов с контролируемым способом высвобождения лекарственных препаратов под действием переменного магнитного поля, лазерного излучения, pH среды и т.д. После приглашенного доклада Демина А.М. была проведена стендовая секция, на которой были сделаны доклады по магнитным явлениям, оптике и спектроскопии, проводимости и транспортным явлениям, сверхпроводимости.

Во вторник 27 ноября утреннюю программу СПФКС-23 открыли представители Института физики им. Х.И. Амирханова ДагНЦ РАН (г. Махачкала) Абдулкадирова Н.З. и Гамзатов А.Г. с устными докладами по магнитокалорическим исследованиям соединений системы LaFeCoSi и NiMnSnCo . Представитель ИФМ УрО РАН Заворницын Р.С. рассказал о продольном магнитосопротивлении слоистых наноструктур для спинтроники Ta/Dy/Ta. Голубятникова А.А. сделала доклад о методе уменьшения константы межзеренного обменного взаимодействия в магнитотвердых материалах для постоянных магнитов системы NdFeB . Комарова В.А. рассказала о влиянии замещения в катионной подрешетке на физические свойства соединения Fe_3Se_4 . Тимофеева А.В. из ИФМ УрО РАН рассказала о результатах исследования наведенной магнитной анизотропии в аморфных лентах с магнитоимпедансным эффектом.

Аспирант Фещенко А.А. из УрФУ имени Б.Н. Ельцина сделала доклад о влиянии особенностей кристаллической структуры и микроструктуры на магнитные свойства пленок системы Cr-Mn/FeNi, а аспирант Чернов Е.Д. из ИФМ УрО РАН — о магнитных свойствах сплава Гейслера Mn₂NiAl. Перед перерывом выступили приглашенные докладчики — д.ф.-м.н. Москвин Александр Сергеевич (УрФУ имени Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург) и к.ф.-м.н. Гудин Сергей Анатольевич (ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург). В своем докладе Москвин А.С. рассказал об Ян-теллеровских (JT) магнетиках: широком классе материалов с различной кристаллической и электронной структурой от квази-2D нетрадиционных сверхпроводников (купраты, никелаты, ферропниктиды/халькогениды, рутенаты Sr₂RuO₄ и RuO₂), 3D-систем типа манганитов LaMnO₃, ферратов (CaSr)FeO₃, никелатов RNiO₃, до оксидов и фторидов серебра AgO и AgF₂, основан на ян-теллеровских 3*d*- и 4*d*-ионах. Эти магнетики характеризуются чрезвычайно богатым разнообразием фазовых состояний от необычных немагнитных и магнитных изоляторов до необычных (strange, bad) металлических и сверхпроводящих состояний. Были рассмотрены особенности реакции анти-JT-диспропорционирования, свойства электронно-дырочных димеров, эффективные гамильтонианы для одно- и двухзонных JT-магнетиков, возможные фазовые состояния, включая специфическое фазовое расслоение, представлен краткий обзор физических свойств реальных JT-магнетиков. Гудин С.А. в своей лекции на тему «К вопросу о развитии понятия магнитосопротивления» рассказал об истории экспериментов, проведенных Уильямом Томсоном в XIX веке, первом использовании эффекта магнитосопротивления (создании датчиков магнитного поля) и отличии понятий гигантского и колоссального магнитосопротивлений. Подчеркнул, что в недавних работах соавторов (в том числе при активном участии докладчика) из ИФМ УрО РАН проведены теоретические исследования магниторезистивных свойств допированных манганитов в магнитных полях от 0 до 90 кЭ и в диапазоне температур от 4 до 400 К, предложены механизмы проводимости, определяющие большую величину магнитосопротивления, разработан метод разделения вкладов в магнитосопротивление от нескольких механизмов проводимости.

В программе понедельника 27 ноября после перерыва были заслушаны устные доклады теоретической секции, на которой выступили Шалагинов А.Н., Русалина А.С., Кадырбардеев А.Т., Могилюк Т.И., Расковалов А.А., Султанов А.С. Помимо устных докладов, в онлайн формате была прочитана лекция Ларионовым Игорем Александровичем (Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань) на тему «Бабочка Хофштадтера: фрактальная структура уровней энергии блоховских электронов в магнитном поле, перпендикулярном плоскости двумерной решетки». Было рассказано о фрактальной структуре уровней энергии блоховских электронов в магнитном поле, перпендикулярном плоскости двумерной (2D) (изначально квадратной) решетки как функция доли магнитного потока через элементарную ячейку, которая была открыта Дугласом Хофштадтером в 1976 году. Упомянулось, что экспериментально фрактальные спектры Хофштадтера можно наблюдать в гетероструктуре графена на гексагональной решетке бор-азот.

Программу вторника 28 ноября открыла Сушникова А.А. с устным докладом «Синтез фотокатализаторов на основе гетероструктуры TiO₂/g-C₃N₄, активных по видимым светом». Далее с докладами выступили специалисты по ЯМР Оглобличев В.В. и Садыков А.Ф. Иванов М.С. сообщил об исследованиях электрофизических свойств монокристаллов системы BiSbTe, а Иванова А.С. — о сверхбыстром получении скуттерудитов *n*-типа с элементами *p*-группы методом спиннингования расплава и роли предела заполнения в этих материалах. С приглашенными докладами выступили д.ф.-м.н. Михалев Константин Николаевич (ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург) и д.ф.-м.н. Овчинников Александр Сергеевич (УрФУ имени Б.Н. Ельцина,

г. Екатеринбург). Михалев К.Н. рассказал о резонансной спектроскопии сильно коррелированных систем и наноструктур. Был сделан обзор работ по ЯМР в манганитах, мультиферроиках и наноструктурах, включая оригинальные результаты, полученные в ИФМ УрО РАН. Было отмечено, что в последнее время метод ЯМР является более эффективным при анализе фазового состава наночастиц и нанокompозитов, чем дифракция рентгеновских лучей. Овчинников А.С. прочитал лекцию на тему «Обобщенное взаимодействие Дзялошинского-Мория в кристаллах и связанные с ним явления». Он пояснил термин «хиральность» и показал примеры хиральности для магнитных (где присутствует взаимодействие Дзялошинского-Мория) и оптических систем. Сформулировал требования к симметрии рассматриваемой системы, чтобы была возможна хиральность.

Во второй половине рабочего дня 28 ноября 2023 г. было заслушано 3 устных и 2 приглашенных докладов. С устными сообщениями выступили Банных П.А., Василевский Ф.А. и Загребина М.А. Лекции прочитали представитель Института физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна (г. Черногоровка) заведующий лабораторией электронной кинетики к.ф.-м.н. Храпай Вадим Сергеевич и заведующий лабораторией неупорядоченных систем д.ф.-м.н. Рыльцев Роман Евгеньевич (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург). Храпай В.С. рассказал о том, что скрывает токовый шум в электронных проводниках. Вначале лекции шла речь о базовых сведениях электронного шума, что он бывает нескольких видов. Потом на примерах рассказывалось, как анализ токового шума в электронных проводниках может позволить определить микроскопические характеристики проводника, такие как длина электрон-фононной релаксации. Рыльцев Р.Е. рассказал о вязкости металлургических расплавов на эксперименте, в теории и при моделировании с использованием машинного обучения. В своём рассказе он показал, почему важно изучать вязкость металлургических расплавов, что имеет прикладное значение в металлургии. Затем о способах вычисления вязкости и новых подходах для её вычисления при использовании потенциалов машинного обучения в методе молекулярной динамики.

В последний рабочий день проведения школы-семинара 29 ноября 2023 г. была проведена секция по электрофизике, на которой были представлены доклады об электрофизических способах получения объемных высокоэнтропийных сплавов, о джоулевом нагреве цилиндрического проводника с дефектной поверхностью, и доклад об анатомии зонной структуры потенциального новейшего комнатнотемпературного сверхпроводника $\text{LuH}_3\text{-xNy}$. Лекции в этот день прочитали представители Института электрофизики УрО РАН (г. Екатеринбург) д.ф.-м.н. Музюкин Илья Львович, к.ф.-м.н. Кочурин Евгений Александрович, вместо чл.-корр. РАН Некрасова Игоря Александровича лекцию прочитал его соавтор к.ф.-м.н. Павлов Никита Сергеевич. Павлов Н.С. рассказал о теории функционала плотности и сверхпроводимости, о тех современных достижениях теории, которые позволили в 2014 году предсказать сверхпроводник H_3S . Музюкин И.Л. рассказал о особенности диагностики неравновесной плазмы. Он продемонстрировал методы определения плотности и скорости частиц в плазме, что необходимо учитывать и как конструировать установку для диагностики плазмы, чтобы получить достоверный результат. Лекция Кочурина Е.А. была посвящена турбулентности и ее видам. Он рассказал об основных моментах теории Захарова для описания турбулентности, как экспериментально исследуется турбулентность, и также о результатах моделирования волновой магнитогидродинамической турбулентности поверхности жидкости.

После лекций состоялось закрытие школы-семинара СПФКС-23, на котором выступили председатель оргкомитета Гудин Сергей Анатольевич и председатель программного комитета Сташков Алексей Николаевич. Были подведены итоги школы и проведено награжде-

ние аспирантов и студентов, чьи доклады были признаны лучшими экспертной комиссией из состава программного комитета школы-семинара. По итогам проведения СПФКС-23 было принято решение о проведении следующей, двадцать четвертой Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-24) весной 2025 года.

*Отчёт составлен С.А. Гудиным, А.Н. Сташковым, С.В. Гудиной
Д.В. Волосниковым, П. А. Игошевым, Н.С. Павловым
И.Г. Ширинкиной, Ю.В. Блиновой, Е.И. Корзуновой*

Лекции

НЕЛИНЕЙНАЯ КИНЕТИКА ПОВРЕЖДЕНИЙ В ДЕФОРМИРУЕМОМ ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

Ю.В. Баяндин*, О.Б. Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

*e-mail: buv@icmm.ru

В процессе эксплуатации конструктивные элементы силовых установок самолетов и промышленных газотурбинных установок испытывают воздействия в широком диапазоне температуры и интенсивностей как циклических, так и случайных статических и динамических нагрузок. Для оценки эксплуатационных характеристик необходимы теоретические и экспериментальные подходы к физическому (натурному) и математическому моделированию поведения деталей конструкций из современных конструкционных материалов в условиях, приближенных к планируемой эксплуатации. В частности, для численного моделирования деформирования и разрушения элементов конструкций из современных материалов необходимы верифицированные определяющие соотношения и математические модели на их основе, способные адекватно описывать поведение материалов с учетом внешних факторов – скорости нагружения, температуры, вида напряженно-деформированного состояния и других факторов, в том числе структурных изменений, обусловленных накоплением поврежденности. Целью работы является исследование закономерностей процессов деформирования, накопления поврежденности и разрушения твердых тел с дефектами при квазистатических и динамических воздействиях в широком диапазоне изменения интенсивности нагружения и скорости деформации. Сформулированы нелинейные определяющие соотношения для описания деформирования твердого тела с учетом кинетики накопления повреждений и разрушения в металлах, сплавах, керамиках и композиционных материалах. Идентификация модели деформируемого твердого тела с дефектами проводилась по данным стандартных испытаний на растяжение, сжатие и сдвиг как при квазистатическом, так и при динамическом деформировании. Для ряда металлов и сплавов верификация проводилась по данным ударно-волновых экспериментов, включающих плоский удар, динамическое нагружение с использованием разрезного стержня Гопкинсона-Кольского и модифицированный тест Тейлора. Для композиционных материалов верификация проводилась по данным измерений скорости звука и акустической эмиссии.

Предложены нелинейные определяющие соотношения для металлов и сплавов, в том числе с учетом анизотропии упругих свойств. Решены задачи идентификации параметров для ряда конструкционных материалов, используемых в авиационной промышленности. На основе полученных определяющих соотношений твердого тела с дефектами реализованы математические модели для описания закономерностей деформирования и разрушения металлов, сплавов и керамик. Разработанные модели позволили описать ключевые эффекты, наблюдаемые экспериментально при плоском ударно-волновом нагружении.

Для композиционных материалов реализована отдельная математическая модель, учитывающая слоистую структуру и анизотропию упругих свойств. Решена задача моделирования эффективных упругих свойств представительного объема ортотропного композиционного материала с учетом накопления повреждений. Проведены исследования по определению влияния накопления повреждений в процессе деформации угле- и стеклопластиков на акустические свойства с целью определения эффективных модулей упругости и верификации развиваемых моделей деформирования и разрушения композитов с повреждениями по данным измерения скорости звука, получено хорошее соответствие деградации продольного модуля Юнга при одноосном растяжении образцов из стекло- и углепластиков.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 21-79-30041).

РАЗМЫШЛЕНИЯ О СИММЕТРИИ И ТОПОЛОГИИ. И ПРИ ЧЕМ ЗДЕСЬ НЕЙТРОНЫ?

А.В. Белушкин

Лаборатория нейтронной физики ОИЯИ, Дубна, Россия

e-mail: belushk@nf.jinr.ru

В теоретической физике поведение физической системы описывается некоторыми уравнениями. Если эти уравнения обладают какими-либо симметриями, то часто удаётся упростить их решение путём нахождения сохраняющихся величин (интегралов движения).

Симметрия научила классифицировать кристаллы и элементарные частицы, решать уравнения, вычислять вероятности квантовых переходов, выводить законы сохранения, объединять бозоны с фермионами, заглядывать в пространства высоких размерностей, делать более головокружительные обобщения.

Теорема Нётер или первая теорема Нётер утверждает, что каждой дифференцируемой симметрии действия для физической системы с консервативными силами соответствует закон сохранения. Спонтанное нарушение симметрии — способ нарушения симметрии физической системы, при котором исходное состояние и уравнения движения системы инвариантны относительно некоторых преобразований симметрии, но в процессе эволюции система переходит в состояние, для которого инвариантность относительно некоторых (в том числе всех) преобразований начальной симметрии нарушается.

Сегодня симметричный подход доминирует, и предпринимаются попытки построения физики элементарных частиц на основе некоторой большой группы симметрии. Однако данная парадигма подвергается и критике, поскольку было обнаружено, что целый ряд свойств материи и фазовых переходов в ней не может быть понят в рамках симметричного подхода и требует привлечения топологических подходов. Лекция представляет попытку исторического анализа вышеприведенных представлений на основе экспериментов с нейтронами в области ядерной физики и физики конденсированных сред.

1. David J. Gross, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **93**,14256 (1996).
2. F. Wilczek, Nature reviews | Physics Vol.1 January 2019
3. F. Wilczek, Particle physics and condensed matter 2016 Phys. Scr. 2016 014003
4. David S Simon Topology and physics: a historical overview In: Tying Light in Knots. Applying topology to optics. Morgan & Claypool Publishers 2018
5. It's topology, naturally Physics World 5 June 2021
6. H. Watanabe, Y. Yanase, J. Phys.: Condens. Matter **36**, 373001 (2024).

ВЫСОКОЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ — НОВЫЙ ФИЗИЧЕСКИЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

А.Ю. Волков

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия
e-mail: volkov@imp.uran.ru

Отдел физики высоких давлений был образован в Институте физики металлов УрО РАН в 80-х годах прошлого столетия. Одним из достижений отдела было создание так называемых «гидростатов» — аппаратов по прессованию различных порошковых материалов путем всестороннего сжатия жидкостью высокого давления. Разработанные и воплощенные в металле гидростаты явились прорывом в области порошковой металлургии: ранее порошки прессовали только путем одноосного сжатия, что не позволяло избавиться от пор. Гидростаты широко экспонировались, их конструкция была отмечена несколькими золотыми медалями на зарубежных выставках. Гидростаты пользовались спросом, и институт выпускал их мелкой серией для различных заказчиков, всего было выпущено порядка 40 штук. Эти гидростаты эксплуатируются в ИФМ до сих пор, рабочий объем контейнера составляет 4 литра, максимальное давление 250 МПа, рабочая среда — машинное масло. Вплоть до настоящего времени на этих гидростатах проводились эксперименты по компактированию металлических порошков, гранул, а также прессовались наноразмерные порошки различных окисных соединений.

В настоящее время в мире бурно развивается новый физический метод обработки пищевых продуктов жидкостью высокого давления с целью их стерилизации (так называемая технология НРР, от английского “high pressure processing”). Многочисленными зарубежными исследованиями установлено, что барообработка давлением в 600 МПа позволяет ликвидировать в мясопродуктах возбудителей листериоза (*Listeria monocytogenes*), а также инактивировать кишечную палочку (*E. coli*), сальмонеллу (*Salmonella*) и большинство плесневых грибов. Причем сам процесс обработки занимает несколько минут и происходит при комнатной температуре. Таким образом, барообработка способствует происходящему сейчас в мире повороту к «органической пище» (т.е. без добавок и консервантов): в таких странах как США, Германия и Япония уже происходит изменение стандартов и технических требований для внедрения этой технологии в пищевую промышленность.

С использованием наших лабораторных гидростатов были проведены эксперименты на различных пищевых продуктах и полуфабрикатах (колбасах, сосисках, курином фарше, молочных продуктах, соусах и т.д.). Было выявлено существенное (от 3 до 5 раз) увеличение сроков хранения. Установлено, что предлагаемые зарубежными фирмами и патентами уровни давления при барообработке значительно завышены: возрастание сроков хранения достигается и при давлении 250 МПа, но при увеличенной продолжительности воздействия.

В настоящее время коллектив проводит эксперименты на современном гидростате, который развивает давление до 600 МПа (рабочая жидкость — вода) и имеет емкость контейнера 30 литров. Новые экспериментальные возможности позволяют получать результаты мирового уровня. Показано, что барообработка давлением 600 МПа в течение 5 минут повышает срок годности свежевыжатых соков и смузи с 2-3 дней до 2 недель. Установлено, что при высоком давлении происходит деструкция белка в мясе птицы и рыбы, что приводит к получению совершенно нового, готового к употреблению пищевого продукта. Результатами исследований заинтересовались различные предприятия. К примеру, один из крупных российских производителей пиццы планирует резко увеличить объемы производства, для чего требуется производить заготовки мясоовощных начинок с увеличенным сроком хранения.

Таким образом, от лабораторных физических экспериментов по барообработке до практического использования результатов — один шаг.

АРХЕОМЕТАЛЛОВЕДЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УРАЛЬСКИХ ИСТОРИЧЕСКИХ
ЖЕЛЕЗНЫХ АРТЕФАКТОВ

Б.А. Гижевский*, Н.А. Кругликов, С.В. Наумов

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

*e-mail: gizhevskii@imp.uran.ru

Изучением исторических металлических артефактов занимаются такие междисциплинарные области науки как археометалловедение, археометаллургия. Материаловедческие характеристики исторических объектов необходимы для атрибуции артефактов, выяснения особенностей их изготовления и, в целом, для понимания технологического развития народа. Важным требованием при исследовании исторических и культурных артефактов является сохранность объекта, оценка его состояния. Манси (вогулы) относятся к древнейшим народам Урала. Среди мансийских артефактов имеется большое число железных и медных орудий охоты и труда: наконечники стрел и копий, ножи, украшения. Однако происхождение металла, его характеристики, технологии получения остаются неизвестными. Настоящая работа посвящена этим вопросам. Прежде всего, изучался поверхностный коррозионный слой. По данным РФА (рентгенофазового анализа) более половины состава коррозионного слоя относится к гидроксидам, что свидетельствует о длительном пребывании предметов во влажной среде. Остальную часть составляют оксиды железа разной степени окисления FeO , Fe_3O_4 , Fe_2O_3 . Более высокое содержание оксидов с высокой степенью окисления может указывать на «древность» артефакта. В коррозионных слоях обнаружены в незначительных количествах соединения кремния, алюминия, фосфора, что также характеризует среду пребывания предмета. Железные мансийские наконечники отличаются содержанием углерода: от 0,01 до 0,6 %, что указывает на различные способы получения металла. Кроме этого, в ряде образцов обнаружено повышенное содержание микропримесей меди (это типично для уральских месторождений) и никеля, что характерно для некоторых азиатских руд. Сплавы железа с низким содержанием углерода (сотые доли процента) относятся к мягкому железу. Твердость при этом составляет 100 – 120 HV. Такой металл можно получить в простейшей сыродутной печи ямного типа. Это преобладающий вид металла наконечников в нашей выборке. Содержание углерода 0,6 % характеризует углеродистую сталь с высокой твердостью порядка 280 – 300 HV, наиболее подходящую для орудий труда и охоты. Микроструктуру металла, характер дефектов и примесей изучали методами оптической и сканирующей электронной микроскопии. Для мансийских железных артефактов типична высокая дефектность в виде пор, трещин, включений разного рода, что указывает на низкий уровень металлургических технологий. Для изучаемых наконечников характерна ферритно-перлитная структура. Встречается как грубопластинчатый перлит, так и высокодисперсный. В образце с высоким содержанием углерода отмечено присутствие бейнита, а также цементита. РФА выявил следы Fe_3O_4 . Размер зерна металлической основы составляет 50 – 100 мкм. Выделения представляют собой как равноосные частицы, так и цепочки и скопления частиц. Выделения шлаков отличаются по составу для разных наконечников, что также указывает на различное происхождение металла. Они представляют собой силикаты, алюмосиликаты, карбонаты. Отмечаются примеси титана, марганца, ванадия, фосфора, калия. Отметим, что не обнаружено присутствие серы, что указывает на использование древесного угля. В заключение можно сказать, что манси широко применяли железные и стальные орудия охоты, однако остаются вопросы происхождения металла и технологий его обработки.

Авторы благодарны Д. Балакину за предоставленный материал, М.В. Дегтяреву за содействие в работе. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

КОМПАКТНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ DARIA В РОССИЙСКОЙ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ НЕЙТРОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С.В. Григорьев

Петербургский Институт Ядерной Физики, НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина, Россия
e-mail: grigoryev_sv@npi.nrcki.ru

К настоящему времени разработаны научные и технологические основы российского компактного источника нейтронов DARIA (Dedicated for Academic Research and Industrial Applications) на основе линейного протонного ускорителя [1,2]. Источник DARIA предназначен для создания пучков тепловых и холодных нейтронов, обеспечивающих максимально возможные потоки нейтронов для порошкового дифрактометра, рефлектометра поляризованных нейтронов и установки малоуглового рассеяния нейтронов. Параметры всего комплекса — ионного источника, ускорителя протонов, мишенной сборки и экспериментальных нейтронных установок — оптимизированы по частоте повторения и длительности нейтронных импульсов, по диапазону переданных импульсов, инструментальному разрешению и геометрическим размерам. Выделяют три естественных направления в развитии источников нейтронов на базе проекта DARIA. Одно — мультиплицирование источника DARIA в части углубленной специализации нейтронных установок при соответствующей реконструкции мишенной сборки, но сохранении параметров протонного ускорителя с энергией 13 МэВ. Другое — увеличение мощности источника DARIA за счет увеличения энергии протонов до 70 МэВ, при смене материала мишени на тантал и расширения числа и специфики нейтронных установок. Третье — разработка высокопоточного импульсного источника нейтронов на базе высокоточного, высокоэнергетичного (до 1 ГэВ) ускорителя протонов. Третье направление требует глобального пересмотра всех технологических решений, особенно в части протонного ускорителя и мишенной сборки, при сохранении общей идеологии в проектировании, строительстве и эксплуатации нейтронных станций. В работе обсуждаются варианты разработки новых импульсных нейтронных источников.

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).

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 **87**, 1526 (2023).
2. T. V. Kulevoy, G. N. Kropachev, A. L. Sitnikov, A. I. Semennikov, V. S. Skachkov, I. V. Kilmetova, R. P. Kuibeda, A. V. Kozlov, E. R. Khabibullina, A. A. Malyshev, S. N. Andreev, A. O. Grebeshkov, S. V. Grigoriev, N. A. Kovalenko, M. V. Bulavin, K. A. Mukhin, E. V. Moskvina, K. A. Pavlov, N. A. Grigoryeva, V. A. Skalyga, I. V. Izotov, A. Yu. Goikhman, E. A. Kravtsov, S. A. Gavrilov, Instrum. Exp. Tech. **67**, S16 (2024).

НЕЙТРОН-ДИФРАКЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТОВ МАГНИТНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ В АНТИФЕРРОМАГНЕТИКАХ

А.Ф. Губкин

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия
e-mail: agubkin@imp.uran.ru

Экспериментальное доказательство существования антиферромагнетизма в соединении MnO , полученное в середине XX века К. Шаллом и Дж. Смартом в эксперименте по упругому рассеянию медленных нейтронов, дало начало новому направлению в физике магнитных явлений: нейтрон-дифракционным исследованиям эффектов магнитного упорядочения в твердых телах. В настоящее время нейтронная дифракция является основным прямым методом получения количественных данных о магнитных структурах твердых тел. Установление и количественное описание магнитных упорядочений, реализующихся в твердых телах при изменении внешних параметров (*давление, температура, магнитное поле*), критически важно для понимания и объяснения закономерностей поведения различных макроскопических свойств магнитных материалов. Поэтому одновременно с развитием экспериментальной техники нейтрон-дифракционного эксперимента, существенный прогресс достигнут и в теоретических подходах к описанию магнитных структур. В XX веке были сформулированы два альтернативных подхода к анализу и описанию магнитных структур: (i) формализм магнитных пространственных групп (Шубниковских групп) и (ii) формализм волнового вектора и аппарат неприводимых представлений кристаллографических пространственных групп. Тем не менее, по мере накопления экспериментальных данных стало понятно, что оба подхода имеют ряд существенных недостатков. Поэтому в последние годы активно развивается гибридный подход к анализу и описанию магнитных структур. В данной лекции мы кратко осветим введение в теорию и практику магнитного рассеяния нейтронов, а также обсудим существующие теоретические подходы к описанию магнитных упорядочений. Кроме того, в лекции будет показан пример решения задачи по определению и количественному описанию сложной несоизмеримой магнитной фазы из данных нейтронной дифракции.

ОБОГАЩЕНИЕ УРАНА НА УРАЛЕ НА ПЕРВОМ ЭТАПЕ АТОМНОГО ПРОЕКТА СССР

С.А. Гудин

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия
e-mail: gudin@imp.uran.ru

В работе освещается вклад сотрудников научных и образовательных учреждений г. Екатеринбурга в первый этап Атомного проекта СССР [1]. Вклад этот малоизвестен, в основном в связи с переводом привлекаемых в Атомный проект на работу в такие специально создаваемые учреждения, как Лаборатория № 2 АН СССР, Уральский электрохимический комбинат (г. Новоуральск), КБ-11 (РФЯЦ-ВНИИЭФ) г. Саров. Основная часть доклада посвящена описанию разрешения одной из труднейших задач, вставших перед разработчиками атомного щита СССР, — промышленное разделение изотопов урана. Так в Екатеринбурге в 1943 г. под руководством И.К. Кикоина начались первые работы по разделению изотопов при помощи методов диффузии и центрифугования. И.К. Кикоин был назначен заместителем И.В. Курчатова и являлся основным ответственным за разработку промышленного метода получения урана-235. Поставленная задача была решена. Диффузионный завод по обогащению урана на Уральском электрохимическом комбинате был запущен, и группа, возглавляемая И.К. Кикоиным, в 1951 г. была награждена Сталинской премией 1 степени. Весной 1954 года академик И.К. Кикоин был назначен научным руководителем по созданию промышленной центрифужной технологии, и за следующие 10 лет эта труднейшая задача была также успешно решена.

Важность перехода на новый метод разделения, можно прокомментировать двумя фактами. 1 факт. Всемирная ядерная ассоциация (англ. World Nuclear Association) утверждает, что в разгар холодной войны три газодиффузионных завода США в период наибольшей мощности потребляли 7% электроэнергии, производимой в США [2]. 2 факт. Опытный центрифужный завод Уральского электрохимического комбината в 1958 г. *«вышел на расчетный режим и показал, что при таком методе как минимум в двадцать раз (!) сокращается энергопотребление на единицу разделения»* по сравнению с газодиффузным методом разделения изотопов урана (С.10 [3]).

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ «Квант» No 122021000038-7.

1. С.А. Гудин, УФН **194** (7), 765 (2024).
2. <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/uranium-enrichment.aspx>
3. А.Ф. Емельяненко «Соло на центрифуге». — АНО «Информационный центр атомной отрасли» (2013).

ДИЗАЙН МАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ: ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

А.М. Дёмин

Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия
e-mail: demin@ios.uran.ru

Магнитные наночастицы (МНЧ) металлов (Fe, Co, Ni, Mn), их оксидов (в первую очередь γ – Fe_2O_3 и Fe_3O_4), ферритов ($M\text{Fe}_2\text{O}_4$, где M — 2-х валентный катион группы переходных металлов: Co^{2+} , Ni^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} и др.) или сплавов (FePt) в настоящее время рассматриваются как платформа для создания на их основе перспективных материалов для применения в медицине и биологии: терапия (гипертермия, магнитоуправляемая платформа для доставки лекарственных средств и др. подходы) и диагностика рака с использованием магниторезонансной томографии (MRI) или магнитного имиджинга частиц (MPI), маркировка клеток (в целях их отслеживания в организме, визуализации, сортировки) и др. подходы биологической инженерии [1-3].

Эффективность применения таких материалов определяются магнитными свойствами использованными в их составе МНЧ. Поэтому важнейшей задачей является синтез исходных МНЧ с требуемыми магнитными свойствами, которые в значительной степени определяются целым рядом факторов.

В докладе рассмотрены закономерности изменения основополагающих магнитных свойств (намагниченность, коэрцитивная сила, блокирующая температура) частиц от их размеров, формы, химического состава, наличия магнитно-мёртвого слоя, природы покрытия и степени агрегированности. Особое внимание уделено особенностям поведения МНЧ в переменных магнитных полях для реализации явления магнитной гипертермии [4,5], а также их МРТ-контрастным свойствам [6]. В связи с этим будет рассмотрено влияние на данные эффекты размеров (в том числе, гидродинамических), формы, природы покрытия МНЧ и др.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания (тема № гос. рег.124020500044 – 4).

1. S. Wang, Y. Hou, Adv. Sci. **11**, 2305459 (2024).
2. M. Xie, F. Meng, P. Wang *et al.*, Int. J. Nanomed. **19**, 8437 (2024).
3. A.G. Pershina, L.V. Efimova, O.Ya. Brikunova *et al.*, Nano Today **56**, 102300 (2024).
4. E. Myrovali, K. Papadopoulos, G. Charalampous *et al.*, ACS Omega **8**, 12955 (2023).
5. H. Gavilarn, S.K. Avugadda, T. Fernandez-Cabada *et al.*, Chem. Soc. Rev. **50**, 11614 (2021).
6. Z. Zhou, L. Yang, J. Gao, Adv. Mater. **31**, 1804567 (2019).

ВЛИЯНИЕ ЖИДКОЙ ФАЗЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СПЛАВОВ

Л.В. Камаева

Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия
e-mail: lara_kam@mail.ru

Одна из основных задач науки о материалах — это получение материалов с заданными структурой и технологическими параметрами. Большинство эксплуатационных металлических сплавов и прекурсоров для композитных материалов получают из жидкой фазы или с ее участием. Поэтому исследование структурных связей между высокотемпературным — жидким и низкотемпературным — твердым состояниями, сохраняют свою актуальность. Всплеск исследований в этой области в последнее время связан с интенсивным развитием новых подходов в численных методах изучения неупорядоченных состояний в т.ч. и жидкой фазы, которые позволили существенно продвинуться в понимании как структурного состояния расплава и его эволюции при изменении внешних параметров таки в участи структуры при образовании сложных твердых фаз (кристаллических, аморфных, квазикристаллических).

В данной работе экспериментально и теоретически исследовано жидкое и твердое состояние сплавов ряда бинарных и тройных систем на основе Fe и Al в широких областях концентраций, включающих эвтектические, перитектические и инвариантные равновесия, а также стехиометрии икосаэдрических и декагональных квазикристаллических фаз. Показано, что границы различных областей твердых фаз в концентрационном пространстве коррелируют с экстремумами на кривых переохладения и вязкости, что указывает на иерархическую связь (наследственность) между твердым и жидким состояниями. Комплексный подход с последовательным применением *ab initio* расчетов, машинного обучения и классической молекулярной динамики позволил провести исследования концентрационных изменений химического ближнего порядка в жидком состоянии при высоких температурах и в переохлажденной области, а также оценить эволюцию температур стеклования. Показано, что особенности в концентрационном пространстве дескрипторов локального атомного порядка наблюдаются при значениях, при которых вязкость, переохладение и другие экспериментально наблюдаемые величины имеют максимумы, минимумы или точки перегиба на соответствующих концентрационных зависимостях. Полученные результаты впервые позволяют установить и объяснить связь между межатомным взаимодействием, структурно-чувствительными свойствами, температурами плавления, первой стадией кристаллизации и температурами стеклования ряда расплавов, что делает возможным прогнозирование образующихся при затвердевании твердых фаз необходимое при разработке новых функциональных материалов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00370, <https://rscf.ru/project/24-22-00370/>.

МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ В МОДУЛИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

А.Ю. Кунцевич

Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, Москва
e-mail: akuntsevich@hse.ru

Проводящие двумерные (2D) системы реализуются в гетероструктурах, на интерфейсах между полупроводниками, а также в широком классе двумерных материалов и на поверхностях топологических изоляторов. В магнитном поле из-за отсутствия движения в перпендикулярном плоскости направлении, спектр двумерной системы идеально квантуется (квантование Ландау), что приводит к магнитоосцилляциям и таким явлениям как циклотронный резонанс, осцилляции Шубникова де Гааза, квантовый эффект Холла. Для параболического закона дисперсии уровни Ландау находятся на одинаковом расстоянии друг от друга, для других законов дисперсии — нет. Явления, связанные с квантованием спектра, становятся существенными, когда магнитная длина становится меньше длины свободного пробега. Если двумерная система периодически модулирована, то задача о движении в магнитном поле усложняется и спектр уровней Ландау должен становиться фрактальным [1]. При движении вокруг отверстия в магнитном поле возникает интерференционный вклад в проводимость (эффект Аронова-Бома).

Сочетание вышеприведенных эффектов определяет богатство физики двумерных систем в магнитных полях, в зависимости от чистоты образца (длины свободного пробега), температуры, магнитного поля, концентрации электронов, периода и геометрии модуляции. Возможности литографии, например паттернирования массивов наноотверстий не позволяли реализовать периодическую структуру с высокой точностью. Такая возможность появилась сравнительно недавно в «закрученных» структурах на основе графена [2] и должна наблюдаться в широком классе материалов.

В докладе обсуждается современное состояние эксперимента в данной области науки и показывается обоснованность методик измерений в сильных магнитных полях для исследования модулированных систем.

1. D. R. Hofstadter, Phys. Rev. B **14**, 2239 (1976).
2. C.R. Woods *et al.*, Nature Physics, **10**, 451 (2014).

ТРАНСПОРТ ЭКСИТОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУРАХ

В.Н. Манцевич^{1*}, В.В. Палюлин²¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия²Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия*e-mail: vmantsev@gmail.com

Предложена и проанализирована теоретическая модель для описания транспорта экситонов в двумерных полупроводниковых наноструктурах, основанная на формировании двух взаимодействующих подсистем экситонов: быстрых (свободных) и медленных (захваченных) [1-3]. На основе предложенной модели проведен анализ особенностей транспорта экситонов, объяснено появление режима отрицательной диффузии экситонов, о которой сообщалось в экспериментальных исследованиях в квазидвумерных полупроводниковых системах. Эффект отрицательной диффузии возникает из-за первоначального захвата свободных экситонов и последующего высвобождения захваченных экситонов из ловушек в области, близкой к исходному месту возбуждения облака экситонов. Наличие ловушек обусловлено существованием дефектов или примесных состояний в полупроводниковой матрице. Сигнал фотолюминесценции, регистрируемый в эксперименте, формируется в результате рекомбинации свободных экситонов и учитывает высвобождение захваченных экситонов, происходящее с временным запаздыванием. В экспериментах это проявляется, как сужение профиля плотности экситонов или уменьшение среднеквадратичного смещения, которое затем интерпретируется как отрицательная диффузия. Следует также отметить, что эффект отрицательной диффузии может усиливаться за счет наличия в системе экситон-экситонного взаимодействия.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-12-00020.

1. A.A. Kurilovich *et al.*, Phys. Chem. Chem. Phys. **26**, 922 (2024).
2. A.A. Kurilovich *et al.*, Phys. Chem. Chem. Phys. **24**, 13941 (2022).
3. A.A. Kurilovich *et al.*, Phys. Chem. Chem. Phys. **22**, 24686 (2020).

ЯДЕРНЫЙ МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В СИЛЬНО КОРРЕЛИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ И НАНОСТРУКТУРАХ

К.Н. Михалев

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия
e-mail: mikhalev@imp.uran.ru

Среди локальных методов исследования систем с дальним магнитным порядком и с сильными электрон-электронными корреляциями важное место занимает ядерный магнитный резонанс (ЯМР), который эффективно используется в последнее время для изучения магнитных и зарядовых неоднородностей в соединениях и наноструктурах на основе переходных металлов [1]. ЯМР позволяет анализировать на наноскопическом уровне, с одной стороны — спиновое и зарядовое распределение в ближайшем окружении различных ионов, формирующих кристаллическую решетку этих соединений, а с другой — низкочастотную спиновую динамику избирательно на позиции каждого атома в структуре исследуемого соединения. В последнее время было показано, что этот метод является более эффективным при анализе фазового состава наночастиц и нанокompозитов, чем традиционные методы анализа, например, дифракция рентгеновских лучей.

В предлагаемом докладе дается обзор работ по ЯМР в манганитах и наноструктурах, включая оригинальные результаты, полученные в ИФМ УрО РАН. В докладе будут затронуты следующие темы:

- история открытия ЯМР;
- особенности метода ЯМР при изучении соединений с сильными электронными корреляциями и дальним магнитным порядком;
- наноскопическое фазовое расслоение и магнитные поляроны в манганитах по данным ЯМР ^{55}Mn , ^{87}Sr , ^{17}O [1,2];
- резонансная спектроскопия наночастиц и нанокompозитов: фазовый анализ и новые размерные эффекты [3,4].

Основные работы, обсуждаемые в данном докладе, выполнены в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

1. К.Н. Михалев, З.Н. Волкова, А.П. Геращенко, ФММ **115**, 204 (2014).
2. A. Trokiner *et al.*, Phys. Rev. B **93**, 174413 (2016).
3. A.Yu. Germov *et al.*, Mater. Today Commun. **27**, 102382 (2021).
4. K. Mikhalev *et al.*, J. Magn. Magn. Mater. **563**, 169837 (2022).

ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ: ФИЗИКА, ТЕХНОЛОГИИ, ПРИМЕНЕНИЕ

Н.В. Мушников

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия
e-mail: mushnikov@imp.uran.ru

Постоянные магниты сегодня прочно вошли в нашу жизнь и используются в различных устройствах, таких как компасы, электродвигатели, генераторы, устройства записи и считывания информации, магнитно-резонансные томографы, мобильные телефоны и др. Они играют большую роль в техническом развитии человечества и их совершенствование в значительной степени определяет технический прогресс.

В обзорном докладе рассмотрена история применения постоянных магнитов начиная с древних времен до настоящего времени и обсужден рост производства и потребления высокоэнергоемких постоянных магнитов на основе редкоземельных интерметаллидов.

Основное внимание в докладе уделено физике магнитотвердых материалов. Сформулированы требования к фундаментальным свойствам, которыми должен обладать материал постоянного магнита. Показано, что перспективными для создания постоянных магнитов могут быть ферро- или ферритмагнитные материалы, обладающие высокой намагниченностью, большим значением температуры Кюри, кристаллической решеткой одноосной симметрии и сильной одноосной магнитной анизотропией.

Рассмотрены элементы технологии производства постоянных магнитов. Показаны современные пути улучшения их функциональных магнитных свойств — повышения коэрцитивной силы, расширения температурного интервала работы, увеличения температурной стабильности магнитной индукции. Обсуждены составы и технологии производства постоянных магнитов для специальных приложений — высокотемпературные и низкотемпературные, механически прочные, коррозионно стойкие и др.

В завершающей части доклада представлены основные направления научных исследований в области совершенствования функциональных свойств постоянных магнитов и обсуждены перспективы создания постоянных магнитов с рекордными значениями удельной магнитной энергии.

НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЦИТОСКЕЛЕТА КЛЕТКИ ПРИ СДВИГОВОМ НАГРУЖЕНИИ

А.С. Никитюк*, Н.А. Князев, Ю.В. Баяндин, О.Б. Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

*e-mail: nas@icmm.ru

Ряд важных клеточных процессов, в том числе ведущих к развитию патологических заболеваний, связан с изменением фенотипа клеток, а именно, клеточной структуры, механических свойств, характера взаимодействия клеток с межклеточной окружающей средой. Для описания механического поведения клеток при различных условиях нагружения в настоящее время существует множество экспериментальных методов исследования механических свойств клеток. Современные методы изучения ответной реакции клеток на внешние воздействия позволяют измерять механические свойства и наблюдать за структурой клеток в нанометровом и пиконьютоновском масштабах. Изучение закономерностей механического отклика клеток возможно также методами математического моделирования, которые должны давать результат, коррелирующий с экспериментальными подходами. Наиболее значимым классом моделей в механобиологии являются вязкоупругие модели. При этом основная сложность разработки и исследования математических моделей данного типа заключается в учёте эволюции внутренней структуры клетки, оказывающей прямое влияние на механическое поведение клетки, описании структурных механизмов и формулировке определяющих соотношений с внутренними переменными.

В данной работе проведено численное моделирование процесса мгновенного нагружения клетки с последующей выдержкой при помощи статистико-термодинамической модели, учитывающей ориентационные механизмы, связанные с упорядочиванием актиновых филаментов. Предложенная модель сформулирована для случая малых деформаций и позволяет описывать ориентационные механизмы, связанные с поведением актиновых филаментов, в представительном объёме клетки. Выполнено сопоставление численных результатов с экспериментальными данными количественной фазовой микроскопии клеток культуральной линии MCF-7, находящихся в условиях сдвигового воздействия. Показано хорошее количественное соответствие численных и экспериментальных результатов. Для идентификации параметров модели методом Нелдера-Мида была решена задача оптимизации. С использованием идентифицированных параметров построены графики зависимости полных напряжений, деформаций и их составляющих от времени нагружения. Проиллюстрированы эволюция профиля объёмной плотности свободной энергии цитоскелета. Установлены зависимости величины потенциального барьера, влияющего на величину вязкости ориентационного элемента, от времени нагружения при различных значениях приложенных напряжений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-24-00165, <https://rscf.ru/project/24-24-00165/>.

ТВЕРДООКСИДНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ, ТЕНДЕНЦИИ

А.В. Никонов

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия
e-mail: nikonov@iep.uran.ru

Топливные элементы (ТЭ) – электрохимические источники тока, напрямую преобразующие химическую энергию топлива, высвобождающуюся в результате протекания окислительных и восстановительных реакций на электродах, в электрическую. Поскольку топливные элементы не подпадают под ограничение цикла Карно, их эффективность выше чем у традиционных источников тока. Другим важным преимуществом топливных элементов является экологичность, так как отсутствуют выбросы, образующиеся в результате сжигания топлива (углекислый газ, пылевые частицы различного состава, оксиды серы, оксиды азота, фтористые соединения, и т.д.).

В настоящее время известны несколько типов топливных элементов, отличающихся используемым в них электролитом, которые можно условно разделить на два класса: низкотемпературные и высокотемпературные. К низкотемпературным ТЭ относятся щелочные, фосфорнокислые и ТЭ на протонообменных мембранах; к высокотемпературным — расплавкарбонатные и твердооксидные. Каждый тип ТЭ имеет свои преимущества и недостатки. Низкотемпературные ТЭ очень чувствительны к примесям (СО, соединения серы), содержащимся в топливе и окислителе, а также требуют использования платинового катализатора. С другой стороны, при низких температурах не так остро стоят проблемы термомеханического характера и деградационные процессы идут медленнее, чем при высоких температурах. Высокотемпературные ТЭ не нуждаются в дорогостоящем катализаторе. Расплавкарбонатные ТЭ чувствительны к примесям серы в топливе и характеризуются высокими скоростями коррозии электродов.

Твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ) могут использовать в качестве топлива практически любое углеводородное топливо и менее всех остальных типов ТЭ чувствительны к примесям серы. Кроме того, при утилизации тепла вырабатываемого в процессе работы (режим когенерации) КПД ТОТЭ может достигать 90 %. Однако высокие температуры препятствуют развитию данной технологии, так как являются причинами ряда проблем: медленный запуск, чувствительность к циклам нагрев-охлаждение, жесткие требования к выбору материалов, ускорение деградационных процессов.

В докладе будет представлен обзор современного состояния технологии ТОТЭ и освещены следующие вопросы:

1. Основы функционирования ТОТЭ.
2. Конструкции ТОТЭ и их особенности.
3. Материалы, используемые в ТОТЭ.
4. Проблемы, возникающие при создании и эксплуатации ТОТЭ.
5. Тенденции развития ТОТЭ.
6. Примеры генераторов ТОТЭ и области их применения.

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ В УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

К.В. Хищенко

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия
Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия
e-mail: konst@ihed.ras.ru

Для гидродинамического моделирования процессов в конденсированном веществе при интенсивных импульсных воздействиях необходимо знать функциональную взаимосвязь между термодинамическими характеристиками (уравнение состояния) этого вещества в обширной области на фазовой диаграмме. Уравнения состояния материалов в широком диапазоне давлений и температур обычно строятся на основе полуэмпирических моделей, в которых значения констант в термодинамических функциях определяются из условия оптимального описания имеющихся экспериментальных данных. В настоящей работе рассматриваются методы изучения свойств конденсированного вещества при высоких плотностях энергии с помощью ударных волн. Уделяется внимание опытам по ударному сжатию сплошных и пористых образцов, а также по изоэнтропическому расширению ударно-сжатых образцов. Даются примеры построения уравнений состояния разных материалов (таких как алюминий, медь, диоксид кремния) по данным ударно-волновых экспериментов.

ДОМЕННЫЕ ГРАНИЦЫ В МАГНИТНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРОВОДАХ: ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА И ДИНАМИКА

К.А. Чичай

Физический факультет, ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
e-mail: ks.chichay@gmail.com

Влияние геометрической кривизны на магнетизм в низкоразмерных системах все больше привлекает внимание магнитного сообщества [1]. Так магнитные системы с цилиндрической симметрией (например, нано- и микропровода) представляют особый интерес для современной спинтроники и предлагают новые альтернативы плоским системам [2]. Форма таких систем определяет ряд интересных свойств и преимуществ по сравнению с планарными структурами с точки зрения быстродействия устройств, использующих движение доменных стенок. Например, наличие сильной анизотропии формы и цилиндрической симметрии позволяет стабилизировать осесимметричные магнитные состояния; более того, благодаря цилиндрической геометрии, подавляется так называемый предел Уокера [3], что позволяет ожидать быстрых скоростей доменных границ [4, 5]. Малый пространственный размер таких систем увеличивает роль поверхностных и интерфейсных эффектов, а также дает возможность существенно изменять магнитные характеристики под действием механических напряжений или наведенной анизотропии, что оказывается очень энергоэффективным подходом [6].

В своем докладе я расскажу о типах доменных границ, процессах нуклеации и трансформации внутренней структуры, а также динамике доменных границ в магнитных цилиндрических нано- и микропроводах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-10028, <https://rscf.ru/project/23-72-10028/>.

1. R. Streubel *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **49**, 363001 (2016).
2. J. Alam *et al.*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials **513**, 167074 (2020).
3. M. Yan, Phys. Rev. Lett. **104** (2010).
4. R. Hertel, J. Phys.: Condens. Matter. **28**, 83002 (2016).
5. K. Chichay *et al.*, Journal of Alloys and Compounds **835**, 154843 (2020).
6. K. Chichay, I. Lobanov, V. Uzdin, Nanosystems: Phys., Chem., Math. **15**, 55 (2024).

МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

СТАБИЛЬНОСТЬ МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В СПЛАВАХ $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{13.7}\text{Si}_{1.3}(\text{H}_5)$ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ЦИКЛИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Н.З. Абдулкадирова^{1*}, А.Г. Гамзатов¹, А.М. Алиев¹, F. Hu², J. Wang²

¹Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

²Institute of Physics Chinese Academy of Sciences, Beijing, P. R. China

*e-mail: nnurizhat@mail.ru

Существует множество требований к материалам, которые будут использоваться в технологии магнитного охлаждения. Основное из них заключается в том, что материал должен обладать гигантским значением магнитокалорического эффекта (МКЭ) в области комнатных температур. Однако, созданные к настоящему времени прототипы магнитных холодильных машин работают на сравнительно низких частотах 0.1 – 20 Гц. Следовательно вышеописанные требования должны быть дополнены, а именно, МКЭ должен быть гигантским и стабильным при длительном воздействии циклического магнитного поля и слабо зависеть от частоты изменения магнитного поля. Поэтому одной из основных проблем, сдерживающих начало массового производства магнитных холодильников, является отсутствие экспериментальной базы для изучения свойств магнитных материалов в условиях длительного циклического воздействия магнитного поля. Кроме того, подобные исследования представляют большой интерес с фундаментальной точки зрения.

В данной работе представлены результаты прямых исследований влияния частоты (до 20 Гц) магнитного поля 0.62 Тл и долговременного воздействия циклических магнитных полей (0.62 и 1.8 Тл) на величину и стабильность адиабатического изменения температуры (ΔT_{ad}) в сплавах $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{13.7}\text{Si}_{1.3}\text{H}_5$ ($x = 0, 0.2, 0.3$) с богатым содержанием железа. Показано, что все исследуемые композиции имеют сильную частотную зависимость ΔT_{ad} в магнитном поле 0.62 Тл. В циклическом магнитном поле 1.8 Тл изучена деградация ΔT_{ad} при долговременном воздействии циклических полей (более 1000 циклов вкл/выкл магнитного поля) для композиций $\text{La}_{0.8}\text{Pr}_{0.2}\text{Fe}_{13.7}\text{Si}_{1.3}$ и $\text{La}_{0.8}\text{Pr}_{0.2}\text{Fe}_{13.7}\text{Si}_{1.3}\text{H}_5$. Результаты показали, что в поле 1.8 Тл после 1044 циклов величина ΔT_{ad} незначительно ухудшается на $\delta T = 0.13$ и 0.57 К для $\text{La}_{0.8}\text{Pr}_{0.2}\text{Fe}_{13.7}\text{Si}_{1.3}$ и $\text{La}_{0.8}\text{Pr}_{0.2}\text{Fe}_{13.7}\text{Si}_{1.3}\text{H}_5$ соответственно, а максимум ΔT_{ad} равен 5.6 К и 4.3 К при $H = 1.8$ Тл. Выключение поля на 30 минут, а также перегрев и охлаждение образца не привели к восстановлению эффекта. Это указывает на долговременные релаксационные процессы в этих образцах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-43-00156, <https://rscf.ru/project/24-43-00156/>.

ПРЯМЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ АДИАБАТИЧЕСКОГО ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В СПЛАВАХ DyCo_2 И TbDyHoErCo_2 В МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ ДО 8 Тл

Н.З. Абдулкадирова*, А.Г. Гамзатов, А.М. Алиев

Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

*e-mail: nnurizhat@mail.ru

Магнитокалорический эффект (МКЭ) имеет перспективы не только для практического использования в технологии твердотельного охлаждения, но и является важным параметром с точки зрения изучения природы магнитных фазовых переходов. Особенно эффективным с точки зрения изучения фазовых переходов является исследование МКЭ в слабых магнитных полях ($H < 0.1$ Тл). В настоящее время прямые измерения МКЭ в основном проводятся в умеренных (до 2 Тл) или сильных полях ($H > 5$ Тл), для оценки перспектив материалов для технологии твердотельного охлаждения. Прямые исследования МКЭ в слабых магнитных полях ранее проводились редко, в силу имеющихся ограничений классического прямого метода измерения. При этом измерения в слабых магнитных полях могут дать обширную информацию о магнитных фазовых переходах.

Нами для проведения исследований МКЭ в слабых полях использован разработанный в лаборатории высоко чувствительный модуляционный метод измерения МКЭ, который позволяет провести измерения в магнитных полях в десятки эрстед. В настоящем исследовании представлены результаты прямых измерений адиабатического изменения температуры ΔT_{ad} в интерметаллических сплавах DyCo_2 и TbDyHoErCo_2 в слабых магнитных полях до 3 кЭ. Были проведены измерения температурных и магнитополевых зависимостей ΔT_{ad} , а также сдвига фазы между приложенным магнитным полем и температурным откликом образца. Исследование сдвига фазы в слабых полях позволяет определять род фазовых переходов. Было обнаружено, что в данных соединениях наблюдается фазовый переход первого рода. Проведен также скейлинговый анализ полученных результатов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-12-00362, <https://rscf.ru/en/project/24-12-00362/>.

МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ И ФАЗОВОЕ РАССЛОЕНИЕ В РАМКАХ ОБОБЩЕННОЙ ТЕОРИИ ЛАНДАУ

Ф.А. Василевский, П.А. Игошев*

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

*e-mail: igoshev_pa@imp.uran.ru

Магнитокалорический эффект (МКЭ) — это изменение температуры (или энтропии) магнитного материала при изменении внешнего магнитного поля в условиях фиксированной температуры (или энтропии). МКЭ наблюдается во многих магнитоупорядоченных системах и его величина максимальна вблизи критической температуры магнитного фазового перехода. Актуальность исследования МКЭ определяется необходимостью разработки экологически чистых, энергоэффективных и компактных систем охлаждения.

Фазовое расслоение (ФР) — это состояние, когда образец пространственно разделяется на фазовые области с различными физическими свойствами. При этом электронное ФР соответствует фазам с различной зарядовой плотностью электронов проводимости в металлах, но одинаковой кристаллической структурой. Возникновение электронного ФР соответствует скачку параметра порядка (намагниченности) при фазовом переходе первого рода, который приводит к скачку параметра электронной плотности n .

МКЭ и ФР могут быть тесно связаны в магнитных материалах с фазовыми переходами первого рода. Расчет, выполненный в рамках модели Хаббарда для ГЦК решетки с гигантской сингулярностью ван Хофа электронного спектра для фазового перехода ферромагнетик-парамагнетик, показал что ФР существенно влияет на МКЭ, делая его температурную зависимость необычной: например — обратный МКЭ, когда при приложении магнитного поля энтропия материала увеличивается ($\Delta S > 0$), а температура снижается ($\Delta T < 0$) [1]. Это связано с тем, что у ферромагнитной фазы, участвующей в ФР, вблизи трикритической точки (ТКТ) магнитная восприимчивость будет отрицательна.

Мы полагаем, что указанное поведение МКЭ имеет весьма общий характер и может быть описано в рамках обобщенной на случай переменного числа частиц теории Ландау [2].

Стандартная теория Ландау не может быть использована для описания ФР, поскольку, оперируя свободной энергией $F(T, n, h|m)$ (где T — абсолютная температура, h — внешнее магнитное поле, m — намагниченность), невозможно отследить скачок параметра n . Мы разлагаем большой термодинамический потенциал $\Omega(T, \mu, h|m)$, где μ — химический потенциал, что позволяет учесть перераспределение носителей заряда между фазами. В рамках такого подхода разложение Ландау будет иметь вид

$$\Omega(T, \mu, h|m) = \Omega_0(T, \mu) + a_2(T, \mu)m^2 + a_4(T, \mu)m^4 + a_6(T, \mu)m^6 - h m, \quad (1)$$

где $a_i(T, \mu)$ — коэффициенты разложения зависящее от T и μ , которые могут быть получены из микроскопических моделей, либо введены феноменологически. Введенный функционал (1) может последовательно описать МКЭ с учетом фазового расслоения.

Предложенный подход может в перспективе широко применяться для описания магнито-структурных переходов первого рода магнитокалорических материалов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ для ИФМ УрО РАН.

1. P.A. Igoshev, I.A. Nekrasov, Phys. Rev. B **110**, 134406 (2024).
2. П. А. Игошев, Физика металлов и металловедение **124**, 1065 (2023).

РЕЛАКСАЦИОННАЯ ТЕОРИЯ МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А.Г. Ведерникова^{1*}, П.А. Игошев^{1,2,3}, А.Г. Гамзатов³¹Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия²Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия³Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия*e-mail: igoshchev_pa@imp.uran.ru

В последние годы большой интерес представляют исследования магнитокалорического эффекта (МКЭ) в переменном магнитном поле h в условиях максимально приближенных к рабочим характеристикам магнитных холодильников с рабочими частотами 0.1 – 20 Гц. Недавние исследования показали, что для большинства магнитокалорических материалов величина адиабатического изменения температуры T_{ad} уменьшается с ростом частоты f циклического магнитного поля, см., например, [1]. Кроме этого, наблюдается деградация МКЭ при долговременном воздействии циклических полей, что напрямую препятствует их практическому применению. Характер затухания МКЭ с увеличением f до сих пор не получил надлежащего теоретического описания.

Теория Ландау широко и успешно применяется для описания равновесных магнитных свойств магнитных материалов в окрестности критической точки для переходов второго рода, что особенно актуально для материалов, демонстрирующих значительный магнитокалорический эффект. Однако для магнитных материалов, демонстрирующих фазовый переход первого рода, могут быть существенны формирование доменов, поверхностные эффекты и фазовое расслоение.

Описание динамического отклика на переменное магнитное поле с учетом эффектов гистерезиса до сих пор не получило надлежащего объяснения. В настоящей работе рассматривается динамическое расширение теории Ландау для исследования релаксации намагниченности $m(t)$ в переменном магнитном поле на основании релаксационного уравнения $dm/dt = -\Gamma \partial F / \partial m$ [2], где $F(T, m, h) = F_0(T) + \frac{1}{2}A_2(T)m^2 + \frac{1}{4}A_4(T)m^4 + \frac{1}{6}A_6(T)m^6 - hm$ — функционал свободной энергии, Γ — коэффициент релаксации. Мы рассматриваем также обобщение на случай эффектов неоднородности релаксационного уравнения: $\mu d^2m/dt^2 + dm/dt = -\Gamma \partial F / \partial m$, где μ — коэффициент, пропорциональный эффективной «массе» фазовых границ, см. обсуждение в [3]. Значения коэффициентов $A_2(T)$, $A_4(T)$, $A_6(T)$ выбирались так, чтобы обеспечить метамангнитный фазовый переход первого рода в температурном интервале $196\text{ K} < T < 236\text{ K}$ для $\text{LaFe}_{11.7}\text{Si}_{1.3}$ и полевые зависимости намагниченности в равновесном случае.

Рассматривались два типа временной зависимости магнитного поля: линейный рост и синусоидальную зависимость с частотой f . Теория применяется для вычисления характеристик МКЭ, в частности, изменения энтропии $\Delta S(t) = S_h(t) - S_0$ как функции времени и температуры, где S_0 — энтропия образца в равновесии в отсутствие магнитного поля, $S_h(t)$ — энтропия образца в магнитном поле в момент времени t .

Предлагаемая теория применяется к описанию МКЭ для циклического магнитного поля в сплаве $\text{LaFe}_{11.7}\text{Si}_{1.3}$.

Работа частично поддержана средствами Российского научного фонда № 24-43-00156, <https://rscf.ru/project/24-43-00156/>.

1. A. M. Aliev *et al.*, Applied Physics Letters **109**, 202407 (2016).
2. Costa R. M. *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **56**, 155001 (2023).
3. A.G. Gamzatov *et al.*, Applied Physics Letters **125**, 112401 (2024).

Влияние циклических магнитных полей на стабильность гигантского обратного магнитокалорического эффекта в сплавах Ni – Co – Mn – Ti

А.Г. Гамзатов*, А.Т. Кадырбардеев, А.М. Алиев

Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

*e-mail: gamzatov_adler@mail.ru

В последние годы новую волну интереса вызывали сплавы Гейслера, состоящие полностью из переходных металлов (*d – d* сплавы или «all-d meta»), которые являются менее хрупкими и более пластичными, что обеспечивает их механическую стабильность при динамическом воздействии внешних полей. Кроме того, в них обнаружены гигантские значения магнитокалорического эффекта вблизи фазового перехода мартенсит-аустенит.

Данная работа посвящена исследованию влияния циклических магнитных полей на стабильность адиабатического изменения температуры (ΔT_{ad}) в системе $Ni_{36.5}Co_{13.5}Mn_{50-x}Ti_x$ ($x = 15, 15.5$ и 16). В частности, проведены прямые измерения ΔT_{ad} в циклических магнитных полях различной интенсивности: 1.8 Тл с частотой 0.2 Гц, 8 Тл с частотой 0.12 Гц, а также изучена стабильность величины прямого и обратного магнитокалорического эффекта в циклических магнитных полях 0.62 и 1.2 Тл при частотах 1 – 20 Гц. Результаты прямых измерений ΔT_{ad} в поле 1.8 Тл (с $f = 0.2$ Гц) для образцов $Ni_{36.5}Co_{13.5}Mn_{50-x}Ti_x$ ($x = 15, 15.5$ и 16) приведены на рис. 1 (а). Как видим, увеличение концентрации Ti приводит к смещению температуры мартенситного перехода в сторону низких температур, при этом величина обратного эффекта в циклическом поле уменьшается с ростом концентрации Ti, то есть $\Delta T_{ad} = -1.67, -1.15$ и -0.89 К для $x = 15, 15.5$ и 16 соответственно. Однако, при однократном приложении магнитного поля 1.8 Тл максимальная величина обратного эффекта наблюдается для образца с $x = 16$ и равна -4.18 К (см. рис.1 (b, c)). В циклическом магнитном поле 1.8 Тл наблюдается постепенное уменьшение обратного эффекта с переходом на положительные значения ΔT_{ad} после третьего цикла вкл/выкл магнитного поля 1.8 Тл, то есть наблюдается кроссовер обратный — прямой магнитокалорический эффект в поведении ΔT_{ad} .

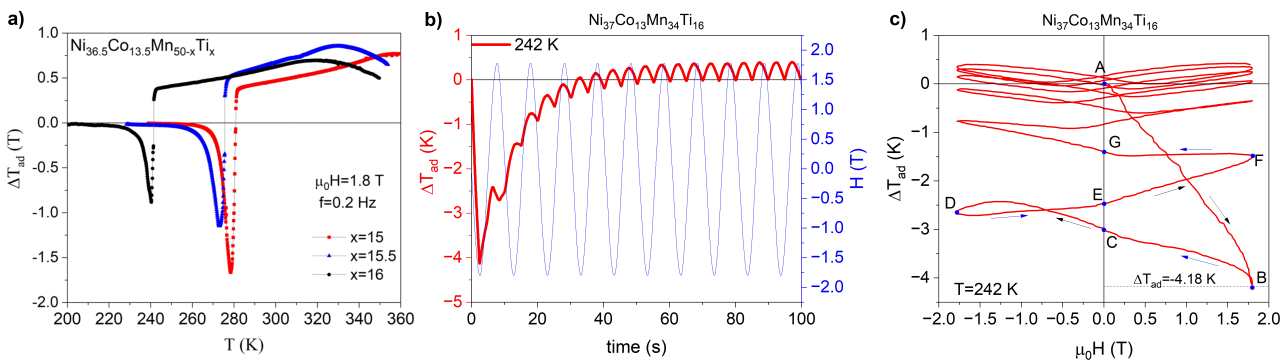


Рис. 1. а) Зависимость $\Delta T_{ad}(T)$ для $Ni_{36.5}Co_{13.5}Mn_{50-x}Ti_x$ ($x = 15, 15.5$ и 16) в режиме нагрева в циклическом магнитном поле 1.8 Тл; б) Временная зависимость ΔT_{ad} в циклическом поле 1.8 Тл; в) Зависимость $\Delta T_{ad}(H)$ при $T = 242$ К для образца с $x = 16$.

Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда (проект № 24-43-00156, <https://rscf.ru/en/project/24-43-00156/>).

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОГО БЕСПОРЯДКА НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ Fe – (Ga, Ge): ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ И МОДЕЛИРОВАНИЯ МОНТЕ-КАРЛО

А.С. Кузнецов¹, И.А. Маркович², М.В. Матюнина¹, М.А. Загребин^{1*}

¹Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

²Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

*e-mail: miczag@mail.ru

Многофункциональные соединения на основе железа такие как Fe–Me ($Me = \text{Ga, Ge}$) представляют интерес благодаря своим необычным механическим, магнитным, и магнито-стрикционным свойствам [1-3].

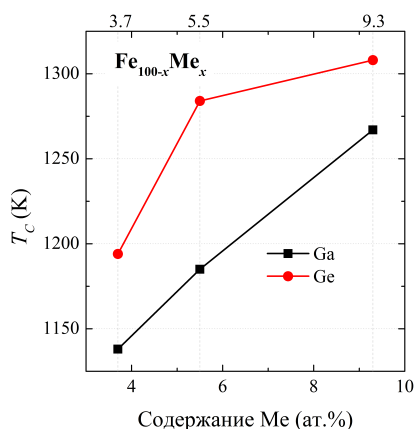


Рис. 1. Концентрационная зависимость температуры Кюри кристаллической структуры A2 сплавов $\text{Fe}_{100-x}\text{Me}_x$ ($Me = \text{Ga, Ge}, x < 10$ ат.%).

В диапазоне содержания немагнитных атомов до 10 ат.%, фазовые диаграммы сплавов Fe-Ga и Fe-Ge характеризуются наличием неупорядоченной структуры A2 (группа симметрии $Im\bar{3}m$), в которой температура Кюри T_c постепенно уменьшается. В работе [4] такое поведение объясняется значительным вкладом косвенного обменного взаимодействия между магнитными атомами железа, реализуемого через коллективизированные электроны проводимости. Другая точка зрения обсуждается в работе [5]. Авторы предполагают, что спиновые флуктуации вносят значительный вклад в концентрационную зависимость температуры Кюри в сплавах Fe–Me ($Me = \text{Ga, Ge}$). Однако обе эти гипотезы на сегодняшний день не подтверждены. Целью данной работы является исследование влияния концентрации и расположения немагнитных атомов Ga и Ge в кристаллической структуре A2 сплавов $\text{Fe}_{100-x}\text{Me}_x$ ($Me = \text{Ga, Ge}, x < 10$ ат.%) на структурные и магнитные свойства.

Расчеты были выполнены в рамках теории функционала плотности, реализованной в пакетах VASP [6,7] и SPR-KKR [8]. Для учета обменно-корреляционных эффектов использовалось приближение обобщенного градиента. Полученные из первых принципов значения параметров магнитного обменного взаимодействия были использованы в моделировании Монте-Карло температурных зависимостей намагниченности в рамках трехмерной модели Гейзенберга. В результате получены концентрационные зависимости температур Кюри для сплавов $\text{Fe}_{100-x}\text{Me}_x$ ($Me = \text{Ga, Ge}$). Как видно из Рис. 1, температура Кюри увеличивается с ростом концентрации атомов Ga и Ge.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-20086, <https://rscf.ru/project/24-22-20086/>.

1. A.E. Clark *et al.*, J. Appl. Phys. **93**, 8621 (2003).
2. J.B. Restorff *et al.*, J. Appl. Phys. **111**, 023905 (2012).
3. E.M. Summers *et al.*, J. Mater. Sci. **42**, 9582 (2007).
4. G.P. Huffman, AIP Conf. Proc. **5**, 1310 (1972).
5. A.K. Arzhnikov *et al.*, J. Exp. Theor. Phys., **83**(3), 623 (1996).
6. G. Kresse, J. Furthmüller, Phys. Rev. B **54**, 11169 (1996).
7. G. Kresse, D. Joubert, Phys. Rev. B **59**, 1758 (1999).
8. H. Ebert *et al.*, Rep. Prog. Phys. **74**, 096501 (2011).

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ ГЕЙСЛЕРА Mn_2YSn ($Y = Sc, Ti, V, Cr, Mn$): ИССЛЕДОВАНИЯ *ab initio* И МОДЕЛИРОВАНИЕ МОНТЕ-КАРЛО

М.А. Загребин*, М.А. Обамби, В.В. Соколовский, В.Д. Бучельников

Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

*e-mail: miczag@mail.ru

В настоящее время изучение новых твердотельных соединений и сплавов с многофункциональными свойствами становится все более популярным в научном сообществе по всему миру. Этот интерес обусловлен потенциальным применением в качестве материала для спинтроники, где спиновая степень свободы электрона играет значительную роль в кодировании, более быстрой передаче и обработке данных по сравнению с эквивалентным транзистором на основе заряда [1]. Одним из таких соединений являются сплавы Гейслера, которые обладают многофункциональными свойствами, такими как обменное смещение, магнитокалорический эффект и сплавы с магнитной памятью формы. Среди сплавов Гейслера сплавы на основе Mn_2YZ (Y является $3d$ или $4d$ переходным элементом, а Z — sp -элементом) представляют значительный интерес из-за высокой степени спиновой поляризации и больших T_C , что делает их перспективным материалом для будущих спинтронных устройств [5], в качестве спиновых инжекторов для магнитной оперативной памяти, а также устройств переноса спинового магнитного момента [1–4]. Таким образом, данная работа посвящена исследованиям *ab initio* и моделированию Монте-Карло магнитных свойств сплавов Mn_2YSn ($Y = Sc, Ti, V, Cr, Mn$) в зависимости от приложенного внешнего давления.

Вычисления *ab initio* были проведены с помощью метода проекционных присоединенных волн (Projector augmented wave method), реализованного в пакете VASP [6, 7]. Для учета обменно-корреляционных эффектов использовалось приближение обобщенного градиента согласно параметризации Пердью-Бурке-Эрнцерхофа (Perdew-Burke-Ernzerhof) [8]. Расчет констант магнитного обменного взаимодействия J_{ij} проведен с использованием метода функций Грина [9], и максимально локализованных функций Ванье [10]. Параметры магнитного обменного взаимодействия были взяты в качестве входных параметров при моделировании температурных зависимостей намагниченности в рамках классической модели Гейзенберга и моделирования Монте-Карло. Полученные зависимости были использованы для оценки температур Кюри.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-00186-25-00).

1. S.A. Wolf *et al.*, Science **294**, 1488 (2001).
2. K. Nikolaev *et al.*, Appl. Phys. Lett. **94**, 222501 (2009).
3. S. Tsunegi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **93**, 112506 (2008).
4. T. Ishikawa *et al.*, Appl. Phys. Lett. **89**, 192505 (2006).
5. M. Ram *et al.*, RSC Adv. **10**, 7661 (2020).
6. G. Kresse, J. Furthmüller, Phys. Rev. B. **54**, 11169 (1996).
7. G. Kresse, D. Joubert, Phys. Rev. B. **59**, 1758 (1999).
8. J.P. Perdew *et al.*, Phys. Rev. Lett. **77**, 3865 (1996).
9. A.I. Liechtenstein *et al.*, J. Magn. Magn. Mater. **67**, 65 (1987).
10. G. Pizzi *et al.*, J. Phys. Condens. Matter **32**, 165902 (2020).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ В ОБЛАСТЯХ МАГНИТОСТРУКТУРНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ 1-ГО И 2-ГО РОДА В ТОЧКЕ КЮРИ НА ПРИМЕРЕ СПЛАВА $\text{Ni}_{50.5}\text{Mn}_{33.4}\text{In}_{15.6}\text{V}_{0.5}$

Д.А. Карпухин^{1*}, Е.В. Морозов¹, В.В. Коледов¹, И.И. Мусабилов², А.М. Алиев³, А.Г. Гамзатов³,
Н.З. Абдулкадирова³

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

²Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия

³Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

*e-mail: Interceptor1986@mail.ru

Цель настоящей работы заключается в экспериментальном изучении зависимостей термодинамических параметров температуры и намагниченности для решения уравнений состояния и кинетики в магнитных полях порядка 1 Тл в сплаве Гейслера $\text{Ni}_{50.5}\text{Mn}_{33.4}\text{In}_{15.6}\text{V}_{0.5}$. Температура Кюри была измерена экспериментально и составила 286.5 К. Для исследования кинетики МКЭ использована методика, описанная в [1], для исследования кинетики намагниченности вблизи магнитного фазового перехода образца сплава $\text{Ni}_{50.5}\text{Mn}_{33.4}\text{In}_{15.6}\text{V}_{0.5}$ в импульсных полях была создана оригинальная установка.



Рис. 1. Фото экспериментальной установки

Экспериментальная установка (см. Рис. 1) включает блок питания (1) (не указан на фото), который обеспечивает подачу напряжения от 0 до 300 В на катушку, создающую магнитное поле, образец магнитного материала (2) в виде бруска, помещенный на его торце быстродействующий датчик Холла для измерения магнитного момента и термопару для измерения его температуры. Для поддержания необходимой температуры используется блок термостатирования. Для усиления сигнала от датчика Холла используется операционный малошумящий быстродействующий усилитель (3). С помощью блока управления (4) происходит

генерация прямоугольного импульса магнитного поля с напряжённостью до 1 Тл переменной длительности от 1 сек до 10 мкс. Для снятия и обработки сигнала применяется плата ЦАП/АЦП L-Card (5). Окончательный анализ, обработка и вывод данных производится при помощи ПК (6).

Созданная установка позволяет применить метод определения точки Кюри в сплаве $\text{Ni}_{50.5}\text{Mn}_{33.4}\text{In}_{15.6}\text{V}_{0.5}$. Разработан метод нахождения константы γ уравнения Ландау-Халатникова, показывающей минимальный предел для максимальной скорости фазового перехода.

Настоящая работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

КИНЕТИЧЕСКИЕ И МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА В СПЛАВЕ ГЕЙСЛЕРА $\text{Ni}_{50.5}\text{Mn}_{33.4}\text{In}_{15.6}\text{V}_{0.5}$ ВБЛИЗИ ТОЧКИ КЮРИ

Д.А. Карпухин^{1*}, Е.В. Морозов¹, В.В. Коледов¹, И.И. Мусабилов², А.М. Алиев³, А.Г. Гамзатов³,
Н.З. Абдулкадирова³

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

²Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия

³Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

*e-mail: Interceptor1986@mail.ru

На сегодняшний день большое количество работ посвящено изучению физических эффектов при фазовых переходах (ФП) в твердотельных материалах [1-6]. Среди огромного разнообразия твердотельных материалов с ФП можно выделить магнетики, в которых магнитные ФП часто сочетаются и взаимодействуют со структурными ФП [1-3]. Изучение материалов в неустойчивом состоянии, вблизи ФП затруднено отсутствием стандартных методов изучения термодинамических параметров вещества *in situ*, то есть в динамике, непосредственно в процессе ФП.

Целью настоящей работы является экспериментальное и теоретическое изучение временных зависимостей магнитокалорического эффекта (МКЭ) и намагниченности в нестационарных магнитных полях величиной ~ 1 Тл в сплаве Гейслера $\text{Ni}_{50.5}\text{Mn}_{33.4}\text{In}_{15.6}\text{V}_{0.5}$. Экспериментально с применением оригинальной методики и теоретически с применением уравнения Ландау-Халатникова исследуется кинетика намагниченности при ФП в точке Кюри в чистом гадолинии и в сплаве Гейслера $\text{Ni}_{50.5}\text{Mn}_{33.4}\text{In}_{15.6}\text{V}_{0.5}$ с магнитоструктурным ФП. Предварительные результаты позволяют сделать оценку для нахождения константы уравнения Ландау-Халатникова γ , показывающей минимальный предел для скорости изменения намагниченности при возбуждении импульсами магнитного поля до 200 кА/м в чистом гадолинии $\gamma < 3 \cdot 10^3$ 1/с.

Уравнения состояния вблизи ФП имеют аномалии, описывающие калорический эффект (КЭ). Недавно в работе [7] обнаружен эффект резкой зависимости магнитокалорического эффекта от частоты переменного сильного магнитного поля. Наблюдается эффект деградации МКЭ при увеличении частоты внешнего магнитного поля, получивший название «коллапс МКЭ»

Для исследования кинетики намагниченности вблизи магнитного ФП, т.е. снятия кривых зависимости $M(T, H, t)$ (где T — температура, H — магнитное поле, t — время), в импульсных полях $H(t)$ была создана оригинальная установка — τ -магнитометр, включающая в себя блок генерации прямоугольного импульса магнитного поля до 1 Тл переменной длительности от 1 с до 10 мкс, и быстродействующие датчики магнитного момента и температуры, а также блок термостатирования и управления.

Настоящая работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН.

1. A. M. Tishin, Y. I. Spichkin, International journal of Refrigeration **37**, 223 (2014).
2. A. M. Tishin *et al.*, International Journal of Refrigeration **68**, 177 (2016).
3. S. Puri, Phase Transitions **77**, 407 (2004).
4. V. Basso *et al.*, Physica status solidi (b) **255**, 170 (2018).
5. V. Franco *et al.*, Progress in Materials Science **93**, 112 (2018).
6. M. S. Reis, Coordination Chemistry Reviews **417**, 213 (2020).
7. A.M. Aliev *et al.*, J. Al. Com. **676**, 601 (2016).

СТРУКТУРНЫЕ, ЭЛЕКТРОННЫЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЯ Mn_5Si_3 : ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТЫ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ

К.Р. Ерагер¹, А.С. Кузнецов^{2*}, А.В. Маширов², В.В. Соколовский¹

¹Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

²Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

*e-mail: kuznetsovalserg@gmail.com

Проведено экспериментальное и численное исследование структурных, электронных и магнитных свойств соединения Mn_5Si_3 . Численное исследование выполнено в рамках теории функционала плотности, реализованной в программном пакете VASP [1] с учетом обменно-корреляционных взаимодействий в приближении обобщенного градиента PBE [2]. Конфигурации исследуемого сплава моделировались на основе 16-ти атомной гексагональной и орторомбической элементарных ячеек пространственной группы симметрии $P6_3/mcm$ и $Pnma$ соответственно (рис. 1).

Все расчеты выполнены для ферро- (ФМ) и антиферромагнитного (АФМ) упорядочения атомов Mn. Геометрическая оптимизация структур проводилась в рамках ионной релаксации с изменением позиций атомов, формы и объема ячейки. Энергия отсечки плоских волн составляла 520 эВ, а критерий сходимости по полной энергии 10^{-7} эВ/атом.

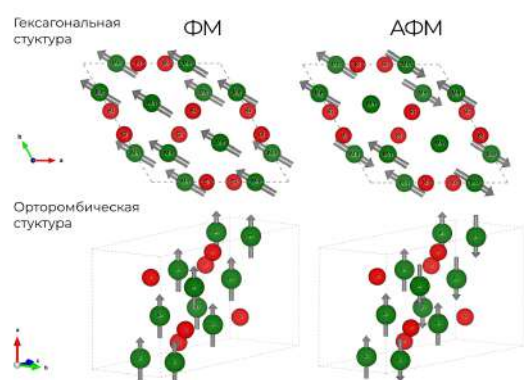


Рис. 1. Конфигурации кристаллической структуры исследуемого соединения Mn_5Si_3 для расчета из первых принципов.

По результатам расчетов электронных свойств наблюдается металлическое поведение как в гексагональной, так и в орторомбической конфигурациях кристаллической структуры. В качестве основного состояния рассматриваемых решеток предсказывается ФМ упорядочение магнитных моментов. Разница с АФМ фазой составляет ~ 0.3 и 9.7 мэВ/атом для гексагональной и орторомбической ячеек соответственно, т.е. ~ 3.5 и 112.6 К. Используя решеточную часть экспериментальной кривой теплоемкости температура Дебая была найдена равной $\Theta = 362$ К. Представленные результаты вычислительных методов качественно воспроизводят результаты экспериментальных данных Mn_5Si_3 [3].

Интегрирование по зоне Бриллюэна реализовано на Γ -центрированной k -сетке с плотностью ~ 6500 точек на атом обратной решетки. В качестве PAW потенциалов использовались электронные конфигурации $3p^63d^54s^2$ для Mn и $3s^23p^2$ для Si. Используя экспериментальные данные теплоемкости C_p , получена зависимость решеточной части $C_L(T)$ линейной комбинацией функций Зоммерфельда и Дебая, выполнен анализ и сравнение ее вклада с результатами C_L при расчете из первых принципов. Выполнена оценка электронной K_e и решеточной K_L частей теплопроводности.

1. G. Kresse, J. Furthmüller, Phys. Rev. B. **54**, 11169 (1996).
2. J. P. Perdew, K. Burke, M. Ernzerhof, Phys. Rev. Let. **77**, 3865 (1996).
3. M. Gottschilch *et al.*, J. Mat. Chem. **22**, 15275 (2012).

Влияние облучения электронами с энергией 10 МэВ на структурные и магнитные свойства Ti- и Al-замещенного гексаферрита стронция $\text{SrFe}_{11.3}\text{Ti}_{0.4}\text{Al}_{0.3}\text{O}_{19}$

Ю.В. Корх¹, А.Д. Лобанов^{1*}, Д.А. Шишкин^{1,2}, Н.А. Черкасова³, В.Е. Живулин³, С.А. Гудкова^{4,5}, Д.А. Винник^{3,4,5}, Е.И. Патраков¹, В.Ю. Ирхин¹, М.Н. Сарычев², В.Ю. Иванов², Т.В. Кузнецова¹

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

²Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

³Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

⁴Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

⁵Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: lobaleks1999@mail.ru

Гексаферрит стронция $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ вызывает интерес из-за его большой магнитной анизотропии, высокой температуры Кюри, большой намагниченности насыщения, высокой коэрцитивной силы, химической стабильности и коррозионной стойкости [1,2]. Он используется в датчиках, постоянных магнитах, суперконденсаторах, настраиваемых фильтрах, печатных дисплеях, фазовращателях, спинтронных устройствах, телекоммуникационном оборудовании, в качестве материала для поглощения микроволнового излучения в микроволновых устройствах, в том числе микроэлектромеханических системах [3]. Важным фактором для работоспособности данных устройств является воздействие ионизирующего излучения, поскольку данные устройства могут функционировать в условиях воздействия больших доз радиации.

В данной работе исследуется влияние электронного облучения на структурные и магнитные свойства Ti- и Al-замещенного гексаферрита стронция $\text{SrFe}_{11.3}\text{Ti}_{0.4}\text{Al}_{0.3}\text{O}_{19}$. Образцы $\text{SrFe}_{11.3}\text{Ti}_{0.4}\text{Al}_{0.3}\text{O}_{19}$ были выращены методом спонтанной кристаллизации из флюса [4]. Гексаферриты до и после облучения исследовались методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), энергодисперсионного рентгеновского спектрального микроанализа (ЭДС), атомно-силовой микроскопии (АСМ), магнитно-силовой микроскопии (МСМ), вибрационной магнитометрии образца (ВМО) и рамановской спектроскопии (РС). Образцы были облучены электронами с энергией 10 МэВ. Флюенсы электронов 10^{14} и $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Обнаружены значительные изменения частот и интенсивностей пиков комбинационного рассеяния после облучения электронами с флюенсом $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. При этом частота фононной моды A_{1g} колебания связей Fe–O в октаэдрическом узле $4f_2 \text{ SrM}$ изменяется с облучением незначительно. Данная мода является наиболее радиационно-устойчивой. Установлено, что фрактальная размерность иерархической магнитной доменной структуры в $\text{SrFe}_{11.3}\text{Ti}_{0.4}\text{Al}_{0.3}\text{O}_{19}$ непрерывно уменьшается с ростом флюенса облучения. Отмечается увеличение коэрцитивной силы и значительное уменьшение величины производных кривой намагничивания dM/dH с ростом флюенса облучения. Однако намагниченность насыщения практически не изменяется после облучения электронным пучком [5].

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 23-72-00067 (<https://rscf.ru/project/23-72-00067/>).

1. H. Joshi *et al.*, J. Mater. Sci. Mater. Electron. **32**, 4331 (2021).
2. C. Tejera-Centeno *et al.*, Sci. Rep. **11**, 1964 (2021).
3. F. Bibi *et al.*, Ceram. Int. **49**, 15990 (2023).
4. A. Y. Starikov *et al.*, Russian Internet Journal of Industrial Engineering **7**, 30 (2020).
5. Y. V. Korkh *et al.*, J. Alloys Compd. **1008**, 176672 (2024).

ПЕРВОПРИНЦИПНЫЕ РАСЧЕТЫ ИНТЕГРАЛОВ ОБМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЛЯ УЛЬТРАТОНКИХ МАГНИТНЫХ ПЛЁНОК

М.В. Мамонова*, М.Ю. Макеев, А.Ю. Ковалева

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

*e-mail: mamonovamv@omsu.ru

Экспериментальное определение константы обменного взаимодействия представляет собой сложную задачу. Исследований, посвященных оценке этой величины для тонких магнитных пленок, крайне мало. В теоретических расчетах обычно используются косвенные методы оценки константы обменного взаимодействия, основанные на предположениях о специфических моделях магнитного упорядочения.

В рамках первопринципного подхода с использованием двух подходов: метода функционала спиновой плотности (SDFT) и спин-поляризованного метода Корринги-Кона-Ростокера (KKR) проведены расчеты структурных, энергетических и магнитных характеристик, а также значений интеграла обменного взаимодействия для ближайших соседей и следующих за ближайшими. Для выполнения SDFT расчетов применялся лицензионный программный комплекс VASP [1] с использованием набора псевдопотенциалов и метода проекционно-присоединенных волн. Это позволило получить энергетические и магнитные параметры, на основе которых были рассчитаны значения интегралов обменного взаимодействия, с применением разработанной программы.

Сравнительный анализ рассчитанных нами значений J для объемного железа [2] методами VASP и KKR показал, что результаты, полученные методом KKR, ближе к данным, полученным в приближении среднего поля. Значения, найденные с помощью VASP, оказались примерно в 1.5 раза выше. Тем не менее, при расчете характеристик тонкопленочных структур метод KKR демонстрирует худшие результаты.

С помощью программного комплекса VASP проведено исследование пленок FeNi и CoNi, осажденных на подложки из меди и хрома. Было установлено, что намагниченность атомов никеля в значительной степени определяется магнитным упорядочением системы, а обменное взаимодействие никелевых сплавов носит ферромагнитный характер, независимо от подложки.

В последнее время в качестве высокоперспективных материалов для применения в устройствах спинтроники были выделены кобальт-содержащие сплавы Гейслера $\text{Co}_2\text{FeAl}_x\text{Si}_{1-x}$ (CFAS), характеризующиеся высокими значениями температуры Кюри и высокой степенью спиновой поляризации носителей заряда, т.к. были выявлены их полуметаллические свойства в магнитоупорядоченном состоянии [3].

В рамках исследования были выполнены расчёты обменного взаимодействия для кристаллической структуры Co-содержащего полуметаллического сплава Гейслера. Анализировались как объёмные структуры CFAS, так и плёночные образцы данного сплава, нанесённые на подложку из серебра.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (соглашение 23-22-00093). Для проведения расчетов были использованы вычислительные ресурсы ЦКП «Центр данных ДВО РАН».

1. P. G. Kresse, J. Furthmuller, Phys. Rev. B **54**, 11169 (1996).
2. М. Ю. Макеев, М. В. Мамонова, Journal of SibFU **16**, 773 (2023).
3. Н. С. Kandpal, S. Wurmehl, G.H. Fecher, Appl. Phys. Lett. **88**, 032503 (2006).

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА БИ-ИНТЕРКАЛАТОВ $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}\text{TiSe}_2$

К.А. Меренцова*, А.С. Шкварин, Е.Г. Дьячков

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

*e-mail: merencovak@imp.uran.ru

Слоистые дихалькогениды переходных металлов, с формулой MX_2 , где M — представляет собой переходный металл (например Mo, W, Ti, V, Nb и др.), X — халькоген (S, Se, Te) [1], характеризуются уникальной трехслойной структурой. В этой структуре атомы металла располагаются между слоями атомов халькогена. Эти материалы демонстрируют такие выдающиеся свойства, как прямая запрещенная зона и сильное спин-орбитальное взаимодействие, что делает их перспективными для применения в электронике и оптоэлектронике. Их потенциал охватывает широкий спектр областей, включая создание постоянных магнитов и топологическую сверхпроводимость.

В рамках исследований была впервые синтезирована и изучена би-интеркалатная система $\text{Fe}_x\text{Ni}_y\text{TiSe}_2$. В данной работе рассмотрены два изоконцентрационных разреза этой системы: $\text{Ni}_x\text{Fe}_y\text{TiSe}_2$ и $\text{Fe}_y\text{Ni}_x\text{TiSe}_2$ с различными значениями x и y . Исследования показали, что влияние содержания железа в соединениях $\text{Ni}_{0.1}\text{Fe}_{0.1}\text{TiSe}_2$ и $\text{Ni}_{0.1}\text{Fe}_{0.25}\text{TiSe}_2$ незначительно отличается по намагниченности. Однако в случае $\text{Ni}_{0.1}\text{Fe}_{0.33}\text{TiSe}_2$ наблюдается резкое увеличение намагниченности $M(T)$, что может быть связано с более высокой концентрацией железа, способствующей упорядочению атомов Fe [2] и усилению магнитных взаимодействий, а также возможным образованием дополнительной фазы $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$ [3].

В $\text{Ni}_{0.1}\text{Fe}_{0.5}\text{TiSe}_2$ намагниченность значительно уменьшается, вероятно из-за магнитной фрустрации или конкуренции между магнитными взаимодействиями при высокой концентрации железа. Уменьшение намагниченности в $\text{Fe}_{0.1}\text{Ni}_{0.1}\text{TiSe}_2$ при увеличении содержания никеля объясняется замещением атомов железа атомами никеля в кристаллической решетке, что ослабляет магнитные взаимодействия. Атомы никеля имеют меньший вклад в магнитный момент по сравнению с атомами железа из-за меньшего числа неспаренных электронов, что снижает средний магнитный момент на атом в твердом растворе.

Установлено также, что при выделении фазы $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$ магнитные свойства материала полностью определяются его свойствами. Поэтому особый интерес представляют составы, в которых не наблюдается фаза $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$ (например, составы с 0.1 по любому компоненту). Уменьшение намагниченности в $\text{Fe}_{0.1}\text{Ni}_x\text{TiSe}_2$ при увеличении содержания никеля также объясняется замещением атомов железа атомами никеля в кристаллической решетке и меньшим вкладом атомов никеля в магнитный момент по сравнению с атомами железа. Магнитная восприимчивость, измеренная на таком монокристалле, имеет вид, характерный для систем $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и правительства Свердловской области (проект № 24-23-20029, соглашение 5-24-МГ). Автор благодарит центр ЦКП ИФМ УрО РАН за предоставленную возможность использования приборной базы и консультаций специалистов.

1. W. Li *et al.*, Nano Today **29**, 100799 (2019)
2. Y. Arnaud *et al.*, Solid State Chem. **18**, 9 (1976)
3. Членова А. А. Электронный научный архив УрФУ (2020)

ПРЕДСКАЗАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ ГЕЙСЛЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Д.М. Моисеев*, Д.Р. Байгутлин, В.В. Соколовский

Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

*e-mail: danil174821@gmail.com

Традиционные методы оптимизации свойств материалов зачастую оказываются чрезмерно трудоемкими и ресурсозатратными. В связи с этим в последние годы машинное обучение (МО) активно внедряется в материаловедение, открывая новые возможности для ускорения исследований и повышения их эффективности. В частности, методы машинного обучения уже успешно применяются для изучения сплавов Гейслера [1], полностью состоящих из металлических элементов — перспективных материалов с уникальными магнитными и магнитокалорическими свойствами.

Среди наиболее востребованных алгоритмов МО в материаловедении можно выделить регрессию случайного леса (RFR), нейронные сети (NN) и др. Эти подходы позволяют не только предсказывать ключевые параметры материалов, такие как механические, термоэлектрические и магнитные свойства, но и значительно сокращают время, необходимое для проведения экспериментов и анализа данных.

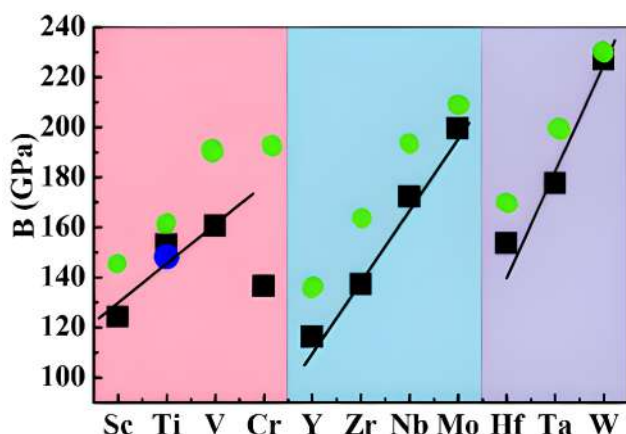


Рис. 1. Сопоставление предсказанных (кружки) и рассчитанных значений модуля всестороннего сжатия B для сплавов Ni_2MnZ . Расчётные значения взяты из [3]. Использован алгоритм RFR.

сопоставление между предсказанными и рассчитанными данными. В работе также произведены попытки по улучшению предсказательной способности модели путем оптимизации ее гиперпараметров, влияющих на «конструкцию» модели.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда РНФ (№ 24-12-20016).

1. D.R. Baigutlin *et al.*, J. Appl. Phys. **136**, 183903 (2024).
2. A. Jain *et al.*, APL Mater. **1**, 011002 (2013).
3. G. Li *et al.*, Phys. Rev. B **107**, 134440 (2023).

В данной работе представлены исследования предсказательной способности отмеченных выше алгоритмов машинного обучения в прогнозировании механических свойств (модулей упругости, коэффициента Пуассона, температуры Дебая) для сплавов Гейслера, полностью состоящих из металлических элементов. Обучение модели проводилось на стандартном наборе данных Matminer, а также на опубликованных данных 3 123 соединений, взятых из базы The Materials Project [2].

В качестве примера на рис. 1 представлено сопоставление предсказанных значений модуля всестороннего сжатия для сплавов Ni_2MnZ с опубликованными данными расчетов [3] в рамках теории функционала плотности. В целом, можно видеть хорошее

Влияние толщины на структуру и магнитные свойства пленок высокоэнтروпийного сплава GdTbDyHoEr

А.С. Русалина*, В.Н. Горьковенко, А.В. Архипов, А.А. Юшков, Г.В. Курляндская, А.В. Свалов

Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*e-mail: anastasia.rusalina@urfu.ru

В последнее время разработка новых эффективных магнитокалорических материалов проводится с учетом концепции высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) — однофазных

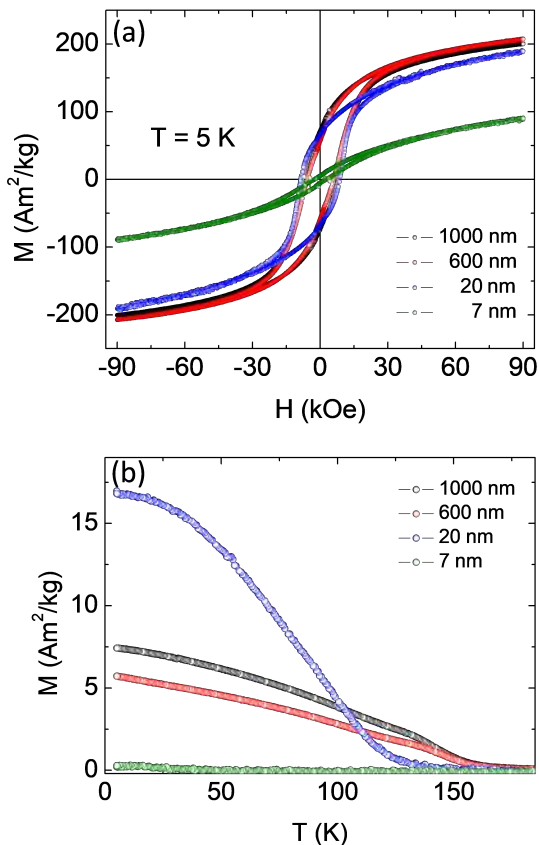


Рис. 1. Петли гистерезиса при $T = 5$ К (а) и температурные зависимости намагниченности, измеренные при $\Delta\mu_0 H = 0.01$ Тл (б) для пленок GdTbDyHoEr разной толщины.

меньше, чем для пленки Gd, но величина хладоемкости не уступает аналогичному параметру для пленки Gd.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00199, <https://rscf.ru/project/24-29-00199/>.

1. Y. Yuan *et al.*, Acta Mater. **125**, 481 (2017).
2. A.V. Svalov *et al.*, Phys. Met. Metallogr. **125**, 1315 (2024).
3. А.В. Свалов *и др.*, ФТТ **66**, 2214 (2024).

кристаллических сплавов, содержащих пять и более металлических компонентов, взятых в равных мольных долях. В настоящей работе представлены результаты исследования структуры, магнитных и магнитокалорических свойств высокоэнтропийного сплава GdTbDyHoEr в пленочном состоянии.

Пленки GdTbDyHoEr были осаждены методом магнетронного распыления мишени данного сплава на монокристаллические пластины Si и стеклянные подложки и защищены слоями Ta толщиной 10 нм. Толщина пленок изменялась от 7 нм до 1000 нм.

Обнаружено, что уменьшение толщины сопровождалось снижением среднего размера кристаллитов от 15 нм до 3 нм, а также понижением намагниченности и температуры возникновения магнитного упорядочения (Рис. 1), причём активное уменьшение перечисленных параметров наблюдалось при толщине менее 100 нм.

Характерный для объемных образцов сплава GdTbDyHoEr магнитный фазовый переход из парамагнитного состояния в состояние геликоидального антиферромагнетика [1-3] в пленочных образцах практически исчезает (рис. 1(b)).

Полученное для пленки толщиной 1000 нм изменение магнитной части энтропии $|S_M^{\max}| = 5.9$ Дж·кг⁻¹К⁻¹ при $\Delta\mu_0 H = 7$ Тл на четверть

Одиночный спин связанный с цепочкой Изинга

С.С. Сеидов

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия
e-mail: alikseidov@yandex.ru

В работе рассмотрена задача об одиночном спине, взаимодействующим с цепочкой Изинга. Задача представляет фундаментальный интерес, например, для изучения динамики открытых систем, а также возникает при описании систем связанных кубитов. Так, в первом случае цепочка Изинга играет роль термостата для одиночного спина [1]. Во втором же случае, если поставить в соответствие каждому спину кубит, данная конфигурация позволяет осуществлять квантовую операции над цепочкой, используя одиночный кубит, как связующий. В частности, если в цепочке Изинга содержится три спина, то возможно провести так называемую CCZ-операцию [2].

Система описывается гамильтонианом

$$\begin{aligned} H &= \frac{\omega}{2} \tau_z + \frac{\Delta}{2} \tau_x + H_{\text{chain}} + H_{\text{int}} \\ H_{\text{chain}} &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (\tilde{\omega} \sigma_z^i + \tilde{\Delta} \sigma_x^i) + \frac{J}{2} \sum_{i \neq j}^N \sigma_z^i \sigma_z^j \\ H_{\text{int}} &= \frac{\tilde{J}}{2} \tau_z \sum_{i=1}^N \sigma_z^i. \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь $\tau_{x,z}$ — матрицы Паули, описывающие одиночный спин, $\sigma_{x,z}^i$ — матрицы Паули, описывающие спины в цепочке Изинга. В результате выполнения работы был получен эффективный гамильтониан одиночного спина в зависимости от состояния цепочки Изинга. Таким образом, удалось вычислить влияние на собственные энергии одиночного спина его связи с цепочкой. Или, в обратную сторону, найдены поправки к энергии цепочки, вызванные её связью с одиночным спином.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда — Соглашение № 23-72-01067 от 08.08.2023 г.

1. H. Krovi, O. Oreshkov, M. Ryazanov, D. A. Lidar, Phys. Rev. A **76**, 052117 (2007).
2. I. A. Simakov, G. S. Mazhorin, I. N. Moskalenko, S. S. Seidov, I. S. Besedin, Phys. Rev. Applied **21**, 044035 (2024).

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПРЕССОВАНИЯ И МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

В.Р. Сейсембаева^{1*}, Л.Г. Шаймарданова¹, А.А. Голубятникова¹, Е.А. Степанова¹, А.С. Волегов^{1,2}

¹Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

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

*e-mail: ruslanovna.vika@bk.ru

Магнитомягкие материалы имеют широкое применение в электрических машинах, где необходимо при минимальных затратах энергии достигнуть наибольшей индукции [1]. Один из методов изготовления магнитомягких материалов – метод порошковой металлургии. В настоящее время активно исследуется возможность изготовления магнитомягких материалов с помощью аддитивных технологий (АТ), например, метод селективного лазерного плавления (СЛП). Была поставлена цель – сравнить свойства образцов, полученных СЛП и методом порошковой металлургии (прессовки и спекания).

Для исследования были изготовлены образцы из порошка железа в форме колец методом прессования и последующего отжига при температуре 1110°C и методом СЛП с помощью 3D принтера «3DLAM Mini PRO» (Россия) при мощности лазера 300 Вт и скорости сканирования лазерного пучка 1000 мм/с (образец, изготовленный СЛП прошел термообработку (ТО) при температуре 1170°C). Для измерения кривых намагничивания была использована измерительная установка на основе флюксметра EF-5 с погрешностью измерения магнитного потока 0.1%. Результаты исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные характеристики образцов, полученных методами прессовки и СЛП при $H = 3$ кА/м.

Характеристика	Метод прессовки	Метод СЛП
B_{3000} , Тл	0.48	0.59
B_r , Тл	0.30	0.45
H_c , А/м	220	420
P_r , Вт/кг	0.09	0.21
ρ , кг/м ³	5045	4720

Из представленных результатов видно, что образцы, изготовленные методом прессовки и спекания, имеют меньшую коэрцитивную силу H_c , потери на гистерезис P_r и остаточную индукцию B_r . Однако, магнитная индукция в поле 3 кА/м B_{3000} выше для образцов, полученных методом СЛП, хотя их плотность ρ ниже. Поскольку в настоящее время исследование магнитных свойств образцов, полученных методом СЛП, находится на начальном этапе, последний результат требует дополнительных исследований. Можно сделать вывод, что образцы, полученные методом спекания имеют лучшие магнитомягкие свойства, однако метод СЛП является достаточно перспективным для получения магнитопроводов с магнитными свойствами требуемого уровня.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, проект №FEUZ-2024-0060.

1. В.О. Васьковский, Г.В. Курляндская, Н.В. Мушников, П.А. Савин, Ю.Н. Стародубцев, Физика, технологии и техника магнитных материалов — Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2010.

МИКРОСТРУКТУРА И ЭФФЕКТ ОБМЕННОГО СМЕЩЕНИЯ В ПЛЁНОЧНЫХ КОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКА $(\text{Cr}_{70}\text{Mn}_{30})_{100-x}\text{M}_x$ ($M = \text{Pt}, \text{Cu}, \text{W}$)

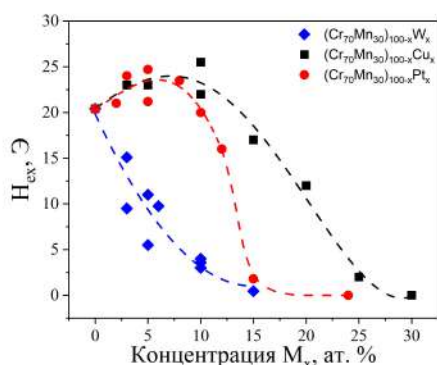
С.В. Семенова*, А.А. Фещенко, В.Н. Лепаловский, А.А. Юшков, В.О. Васьковский

Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*e-mail: severova.sveta.severova@yandex.ru

Исследование пленочных композитов, демонстрирующих эффект обменного смещения, является актуальной научной тематикой в связи использованием подобных функциональных сред в магнитной сенсорике и спинтронике.

Как правило, такие композиты содержат антиферромагнитный слой, который способен индуцировать однонаправленную анизотропию в примыкающем к нему ферромагнитном слое [1]. Сплав Cr-Mn-Pt относится к числу антиферромагнетиков, потенциально подходящих на роль источника обменного смещения в структуре антиферромагнетик/ферромагнетик. Известно, что наличие Pt приводит к повышению магнитной анизотропии и усилению эффекта обменного смещения, за счет модификации кристаллической структуры бинарного сплава Cr-Mn [2]. Данная работа ориентирована



на поиск альтернативы Pt и состоит в исследовании влияния легирования антиферромагнитного слоя Cr-Mn элементами W или Cu, имеющими, как и Pt, повышенный орбитальный момент, на гистерезисные свойства обменно связанного с ним слоя пермаллоя.

Образцы для исследования представляли собой многослойные плёнки $\text{Ta}(5\text{ нм})/(\text{Cr}_{70}\text{Mn}_{30})_{100-x}\text{M}_x(L)/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}(10\text{ нм})/\text{Ta}(5\text{ нм})$ и были получены методом магнетронного распыления на покровных стеклах Corning. В качестве легирующих элементов (M) выступали Pt, W, Cu, содержание которых варьировалось в диапазоне $0 \leq x \leq 30$ ат.%. Толщина слоёв $(\text{Cr}_{70}\text{Mn}_{30})_{100-x}\text{M}_x$ также варьировалась в диапазоне $0 \leq L \leq 100$ нм. Структурная аттестация образцов выполнялась просвечивающим электронным микроскопом JEOL 2100, и атомно-силовым микроскопом Ntegra Prima. Для измерения магнитных свойств полученных пленок использовались Керр-магнитометр EvicoMagnetics.

В результате проведенного исследования были определены зависимости параметров микроструктуры и петель гистерезиса слоя $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ в пленках, отличающихся составом и толщиной слоя $(\text{Cr}_{70}\text{Mn}_{30})_{100-x}\text{M}_x(L)$. На рисунке в качестве примера приведены концентрационные зависимости поля обменного смещения, которые демонстрирует, что добавление Pt и Cu, в отличие от W, оказывает положительное влияние на эффект обменного смещения в исследуемых пленках. В работе выполнен анализ установленных закономерностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ, проект № FEUZ 2024 -0060.

1. I. Žutić *et al.*, Reviews of Modern Physics **76**, 323 (2004).
2. S. Soeya *et al.*, Journal of Applied Physics **80**, 1006 (1996).

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СИСТЕМЫ
НАНОЧАСТИЦ ϵ -Fe₂O₃, ВНЕДРЕННЫХ В МАТРИЦУ SiO₂Д.А. Балаев¹, Ю.В. Князев¹, С.В. Семенов¹, А.А. Дубровский¹, А.И. Ласуков^{1,2},
С.А. Скоробогатов¹, Е.Д. Смородина^{1,2*}, В.Л. Кириллов³, О.Н. Мартыанов³¹Институт физики им. Л.В. Киренского, Федеральный исследовательский центр «КНЦ СО РАН»,
Красноярск, Россия²Сибирский Федеральный университет, Красноярск, Россия³Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия*e-mail: zmorobina@gmail.com

Целью данного исследования было выяснение роли мелких (менее 6 нм) и крупных (более 6 нм) наночастиц ϵ -Fe₂O₃ в матрице SiO₂ в формировании статических и динамических магнитных свойств систем, а также выявление и детектирование размерных эффектов, влияющих на магнитные свойства систем. В данной работе были синтезированы и исследована серия образцов, состоящая из мелких наночастиц ϵ -Fe₂O₃, равномерно распределенных по матрице SiO₂ с содержанием оксида железа 5 – 33 мас.% [1]. С помощью рентгеновской дифрактометрии и электронной микроскопии высокого разрешения было показано, что с увеличением концентрации оксида железа средний размер частиц $\langle d \rangle$ увеличивается с 4 до 11 нм. По данным рентгеновской дифрактометрии и мёссбауэровской спектроскопии, образцы с оксидом железа с содержанием 5 – 20 мас. % является однофазным, в то время как при самой высокой концентрации Fe₂O₃ (33 мас. %) образуются фазы β -Fe₂O₃ и α -Fe₂O₃ [2,3]. С увеличением среднего размера частиц $\langle d \rangle$ наблюдается монотонное увеличение коэрцитивной силы H_C и остаточной намагниченности M_R синтезированных систем при комнатной температуре, что свидетельствует о наличии магнитного гистерезиса. Магнитный переход, который, как известно [4], происходит в оксиде ϵ -Fe₂O₃, проявляется во всех исследованных образцах в виде резкого изменения значений H_C и M_R при 150 – 75 К [5]. Было установлено, что размерные эффекты, возникающие в наночастицах ϵ -Fe₂O₃, оказывают серьезное влияние на макроскопические магнитные свойства высокодисперсных систем на их основе.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда и Красноярского краевого фонда поддержки науки, проект № 24-12-20011.

1. S. S. Yakushkin, *Ceram. Int.* **44**, 17852 (2018).
2. J. Tucek, *Chem. Mater.* **22**, 6483 (2010).
3. S. S. Yakushkin, *J. Supercond. Nov. Magn.* **31**, 1209 (2018).
4. M. Gich, *J. Magn. Magn Mater.* **527**, 167730 (2021).
5. D.A. Balaev, *J. Appl. Phys.* **117**, 063908 (2015).

Влияние добавки Si-содержащих поверхностно-активных веществ при измельчении порошков на гистерезисные свойства магнитов (Nd, Pr) – (Fe, Co, Cu, Al, Ga) – B

А.Р. Солтус*, Д.А. Колодкин, С.П. Платонов

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

*e-mail: soltusa@list.ru

Постоянные магниты на основе соединения $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ имеют широкое применение в различных областях техники и науки. Известным подходом, применяемым при изготовлении постоянных магнитов Nd-Fe-B, является технология, исключаяющая стадию прессования измельченных порошков сплавов, получившая название «pressless process» (PLP) [1]. Одной из основных причин снижения гистерезисных свойств магнитов является образование оксидной пленки на поверхности частиц порошков сплавов, измельченных до среднего размера 3 – 4 мкм, из-за его высокой химической активности к атмосферному кислороду. Для повышения защитных свойств тонко помолотых порошков к воздействию кислорода при измельчении используют инертные газы, защитные среды органических жидкостей, добавки поверхностно-активных веществ (ПАВ). Перспективными являются Si-содержащие добавки, образующие на поверхности частиц порошков плотный слой цепочек молекул, обеспечивающий защитные свойства от окисления и гидратации.

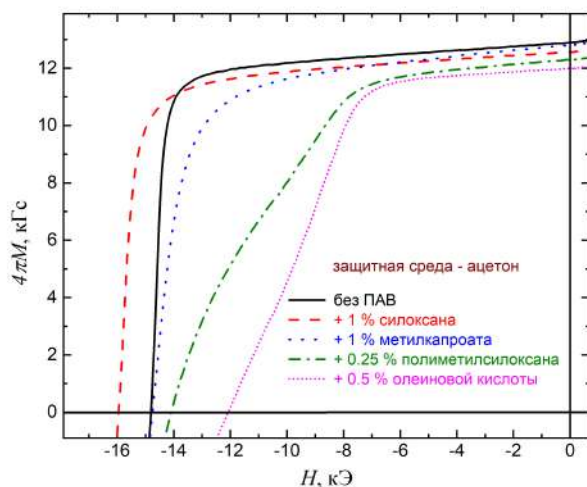


Рис. 1. Кривые размагничивания постоянных магнитов из сплава (Nd,Pr)-(Fe,Co,Cu,Al,Ga)-B, изготовленных по технологии PLP.

В работе проведено исследование влияния различных добавок ПАВ на гистерезисные свойства измельченных в шаровой вибрационной мельнице порошков сплава (Nd,Pr)-(Fe,Co,Cu,Al,Ga)-B и изготовленных с применением технологии PLP на их основе постоянных магнитов. Установлено, что наилучшими защитными свойствами обладает порошок, измельченный с добавками Si-содержащих ПАВ (силиксан и полиметилсилоксан). Повышение значения коэрцитивной силы по намагниченности постоянного магнита до $M H_c = 16$ кЭ (рис. 1), достигнутое в результате добавки силиксана, сопровождается незначительным снижением

остаточной индукции B_r и параметра прямоугольности кривой размагничивания.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-12-20025, <https://rscf.ru/project24-12-20025/>) и Правительства Свердловской области.

1. M. Sagawa, Y. Une, Proc. 20th Int. Workshop on Rare Earth Permanent Magnets and their Applications (Greece), 103 (2008).

КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДОВ В СИСТЕМЕ $\text{GdMn}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$

Л.А. Сташкова^{1*}, А.М. Барташевич^{1,2}, Е.Г. Герасимов^{1,2}, Н.В. Мушников^{1,2}

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

²Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*e-mail: lshteder@imp.uran.ru

Интерметаллические соединения RMnX_2 (R – редкоземельный элемент или Y; X – Si или Ge) обладают естественной слоистой структурой с объемно-центрированной тетрагональной решеткой типа ThCr_2Si_2 (пространственная группа $I4/mmm$). В этой структуре моноатомные слои различных элементов расположены вдоль кристаллографической оси с в строгой последовательности $-\text{Mn}-X-R-X-\text{Mn}-$. Считается, что слоистая структура ответственна за широкое разнообразие физических свойств, наблюдаемых в этих соединениях [1]. Межслоевые и внутрислоевые обменные взаимодействия Mn–Mn очень чувствительны к расстоянию Mn–Mn внутри слоя. Антиферромагнитное упорядочение подрешетки Mn сохраняется при комнатной температуре, в то время как подрешетка R является неупорядоченной. Температуры Нееля подрешетки Mn в GdMn_2Si_2 и GdMn_2Ge_2 составляют 465 и 365 К, соответственно [3]. Ранее нами было показано, что дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) является легко доступным методом, который может быть использован для точного определения температур магнитных фазовых переходов, наблюдаемых в интерметаллидах RMn_2Si_2 [4].

В настоящей работе синтезированы интерметаллиды $\text{GdMn}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ ($x = 0 - 1$). Полученные образцы аттестованы методом рентгеновской дифракции на дифрактометре высокого разрешения PANalytical Empyrean, в $\text{Cu}-K_\alpha$ излучении с шагом сканирования 0.013° . С помощью прибора синхронного термического анализа STA 449 F3 Jupiter (Netzsch) в атмосфере аргона при нагреве в интервале температур 300 – 500 К со скоростью $5^\circ\text{C}/\text{мин}$ проведен ДСК анализ серии образцов $\text{GdMn}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ в интервале температур перехода магнитного разупорядочения.

Согласно рентгенофазовому анализу все исследуемые соединения имеют структуру типа ThCr_2Si_2 пространственная группа $I4/mmm$. Рассчитаны параметры решетки и длины связей Mn–Mn вдоль оси a $d_{(\text{Mn}-\text{Mn})}^a$. Установлено, что $d_{(\text{Mn}-\text{Mn})}^a$ увеличивается с ростом содержания Ge, что связано большей величиной ионного радиуса Ge по сравнению с Si. Кроме того, $d_{(\text{Mn}-\text{Mn})}^a$ для соединений всех составов меньше критического значения $2.87 \text{ \AA}$, при котором происходит изменение типа межслоевого Mn–Mn магнитного упорядочения.

На всех кривых ДСК зарегистрирован эндотермический пик при температуре T_N фазового перехода антиферромагнетик-парамагнетик. Температура перехода T_N уменьшается с ростом концентрации Ge от 465 К при $x = 0$ до 367 К при $x = 1$. Уменьшение значений T_N связано с ослаблением обменного взаимодействия Mn–Mn в результате увеличения расстояния $d_{(\text{Mn}-\text{Mn})}^a$.

Результаты измерений и расчетов обобщены на магнитной фазовой диаграмме.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00265, <https://rscf.ru/project/23-12-00265/>. Рентгеновские дифракционные и калориметрические исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП «Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов» ИФМ УРО РАН.

1. A. Szytuła Handbook of Magnetic Materials **6**, Elsevier, Amsterdam (1991).
2. G. Venturini *et al.*, J. Magn. Magn. Mater. **150**, 197 (1995).
3. I. Dincer *et al.*, J. All. Com. **385**, 59 (2004).
4. Л.А. Сташкова *и др.*, Физика металлов и металловедение **125**, 412 (2024).

КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ОКСИБОРАТА $\text{NiCr}(\text{BO}_3)\text{O}$

А.С. Тарасова^{1*}, Ю.С. Гохфельд², С.А. Громилов³, Д.А. Великанов², О.А. Кондратьев⁴,
Е.В. Еремин², А.О. Беляева⁴, Н.В. Казак²

¹Сибирский Федеральный Университет, Красноярск, Россия

²Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

³Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия

⁴Национальный Исследовательский центр «Курчатовский Институт», Москва, Россия

*e-mail: black.tao2002@gmail.com

Методом спонтанной кристаллизации из раствора-расплава впервые выращены монокристаллы оксибората $\text{NiCr}(\text{BO}_3)\text{O}$, которые представляли собой прозрачные призмы зеленого цвета, сильно вытянутые вдоль одного из направлений (рис. 1). Атомное отношение $\text{Ni} : \text{Cr} = 0.92 : 1.00$, полученное из измерений рентгено-флуоресцентного анализа (M4 TORNADO X-ray spectrometer, Bruker), подтверждает стехиометрию образца.

Исследование кристаллической структуры выполнено при температурах 100 и 300 К с использованием монокристалльного дифрактометра BRUKER X8 (MoK_α -излучение, графитовый монохроматор, CCD-детектор ApexII). Соединение обладает ромбической симметрией, пространственная группа $Pnma$ (№ 62), параметры решетки при $T = 300$ К $a = 9.0908$ Å, $b = 3.0507(4)$ Å, $c = 9.3438(13)$ Å. При охлаждении фазовых переходов не обнаружено. Атомы Ni и Cr распределены по двум кристаллографически неэквивалентным октаэдрическим позициям $M1$ (4c) и $M2$ (4c). Проведены измерения намагниченности в поле $H = 1$ кЭ в интервале $T = 4.2 - 300$ К (PPMS, Quantum Design), типичные размеры монокристалла $1 \times 0.1 \times 0.1$ мм³. Дивергенция кривых намагниченности, измеренных в режимах FC и ZFC, может указывать на формирование состояния спинового стекла при низких температурах (рис. 1). FC и ZFC соответствуют режиму охлаждения во внешнем магнитном поле и в отсутствии поля, соответственно. Магнитокристаллическая анизотропия проявляется в увеличенном магнитном моменте вдоль b -оси. Впервые определены параметры магнитной подсистемы и установлена температура магнитного перехода ~ 45 К, которая является рекордно высокой среди известных изоструктурных магнетиков.

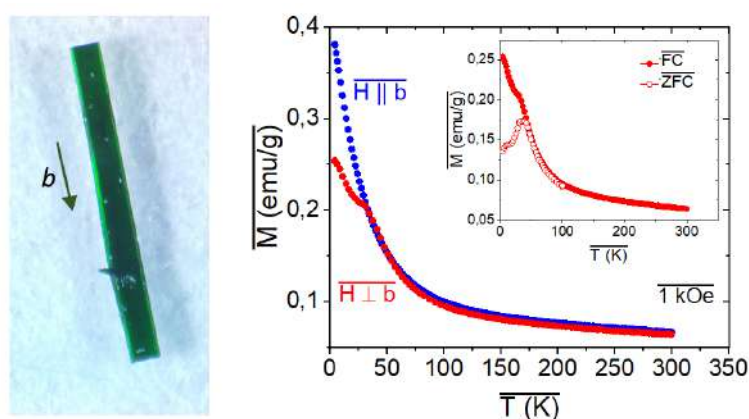


Рис. 1. Фото монокристалла $\text{NiCr}(\text{BO}_3)\text{O}$ (слева) и температурные зависимости намагниченности $\text{NiCr}(\text{BO}_3)\text{O}$ (справа), измеренные в двух направлениях $H \perp b$, $H \parallel b$. Вставка: FC и ZFC намагниченности для $H \parallel b$, ($H = 1$ кЭ).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Красноярского краевого фонда науки в рамках проекта 24-12-20012.

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ В НАНОРАЗМЕРНОЙ МНОГОСЛОЙНОЙ ПЛЕНКЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И НАЛИЧИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЗЯЛОШИНСКОГО-МОРИИ

В.В. Филиппова*, З.В. Гареева

Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, Уфа, Россия

*e-mail: mukhamadeeva.vika@mail.ru

В последние десятилетия наблюдается рост работ на тему, связанную с материалами и наноструктурами, в которых наблюдается более одного типа упорядоченности, главным образом из-за интереса к корреляции двух или более параметров порядка, которые могут стать основой для новых электронных устройств [1, 2].

Целью данной работы является изучение условий, необходимых для реализации магнитных структур нетривиальной топологии в наноразмерных ферромагнитных пленках с различным типом магнитной анизотропии и наличием взаимодействия Дзялошинского-Мории (вДМ).

Моделирование проводилось с использованием программы OOMMF, основой алгоритма является решение уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -|\gamma| \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} + \frac{\alpha}{M_s} (\mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt}), \text{ где } \mathbf{H}_{\text{eff}} = \frac{\partial F}{\partial \mathbf{M}},$$

$$F = \alpha^2 \sum_{i=1}^N \int_0^d dz \left(A_i \sum_{\mu, \alpha=1}^3 (\partial_{\mu} m_{i\alpha})^2 + \mathbf{D}_{\text{inner}} ((\mathbf{m}_{\text{inner}} \nabla) \mathbf{m}_{\text{inner}} - \mathbf{m}_{\text{inner}} (\nabla \mathbf{m}_{\text{inner}})) - K_i m_{iz}^2 - \frac{1}{2} M_s \mathbf{m}_i \cdot \mathbf{H} - J_i \mathbf{m}_i \mathbf{m}_{i+1} \right),$$

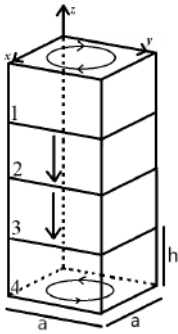


Рис. 1. Схематическое изображение используемой модели.

где $\mathbf{M} = M_s \cdot \mathbf{m}$, A_i — константа неоднородного обменного взаимодействия; K_i — константа магнитной анизотропии, J_i — константа межслойного обменного взаимодействия между соседними слоями, $N = 4$ — количество слоев в нанопленке, $\alpha, \mu = x, y, z$, $\mathbf{D}_{\text{inner}}$ — вектор Дзялошинского, M_s — намагниченность насыщения.

В данной работе рассматривалась ферромагнитная структура с чередующимися слоями с различным типом магнитной анизотропии вида «легкая плоскость (1, 4)»–«легкая ось (2, 3)». В качестве материала были выбраны пленки феррито-гранатов с параметрами: $M_s = 50$ кА/м, $A_{1,4} = 2.9 \cdot 10^{-12}$ Дж/м, $A_{2,3} = 4 \cdot 10^{-12}$ Дж/м, $K_{1,4} = -7 \cdot 10^5$ Дж/м³, $K_2 = 2 \cdot 10^5$ Дж/м³, $K_3 = 2 \cdot 10^3$ Дж/м³, $J_{12,34} = 3.5 \cdot 10^{-12}$ Дж/м, $J_{23} = 0.2 \cdot 10^{-12}$ Дж/м, $a = 200$ нм, $h = 24$ нм (для одного слоя) или 96 нм (для всей пленки), $|\mathbf{D}_{\text{inner}}| = (1 \div 9) \cdot 10^{-4}$ Дж/м², $J_{12,34}$ — обозначение межслойного обменного взаимодействия между 1 и 2, 3 и 4 слоями.

Исследование показало, что вДМ оказывает существенное влияние на процессы намагничивания и формирование топологических структур в многослойных ферромагнитных системах: в процессе намагничивания и перемагничивания таких систем образуются состояния вида «точек Блоха» и «магнитный фужер» — конусных скирмионов. Вид и структура топологических объектов зависит от величины и знака константы вДМ (D): при малых величинах константы вДМ наблюдаются состояния вида «точек Блоха» и конусных скирмионов; при больших величинах константы вДМ величины полей существования состояния вида конусного скирмиона увеличивается.

1. M. T. Birch *et al.*, Nature Communications **13**, 3630 (2022).
2. Z. Guo *et al.*, Proceedings of the IEEE **8**, 109 (2021).

ОСОБЕННОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СКЕРМИОНЫ В УЛЬТРАТОНКИХ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЁНКАХ

М.А. Филиппов*, Р.М. Вахитов

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

*e-mail: mikhail.filippov.99@mail.ru

Магнитные скирмионы представляют собой топологически защищённые вихреподобные неоднородности, которые стабилизируются в киральных магнетиках и многослойных магнитных плёнках за счёт взаимодействия Дзялошинского-Мория (ВДМ) [1]. Они обладают рядом уникальных свойств (наномасштабные размеры, высокие скорости движения, возможность манипулирования ими с помощью электрического тока малой плотности и т.д.), что создаёт предпосылки их использования в устройствах памяти и логики нового поколения. Воздействуя магнитным полем можно реализовать процессы зарождения, перемещения и аннигиляции скирмионов, что имеет значение для разработки методики их практического использования.

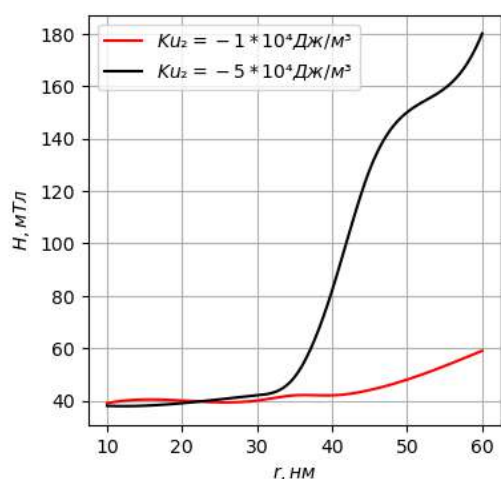


Рис. 1. График зависимости критического поля от радиуса дефекта при разных значениях анизотропии дефекта.

В данной задаче рассматривается диск конечных размеров с колумнарным дефектом типа «потенциальная яма», в области которого константа одноосной анизотропии $K_{u2} < 0$, а вне дефекта $K_{u1} > 0$ при наличии в плёнке изотропного ВДМ. Исследование возможных типов магнитных скирмионов, структура и их устойчивость в таком магнетике было проведено методом микромагнитного моделирования в пакете программ открытого доступа OOMMF [2]. Полученные ранее устойчивые структуры и условия их стабилизации были представлены в [3].

В этой работе исследовалось воздействие внешнего магнитного поля, направленного перпендикулярно плоскости плёнки против намагниченности ко-ра, стабилизированного в центре диска на дефекте скирмиона. Рассматривались скирмионы, зарождающиеся на дефектах разного радиуса при величинах плоскостной анизотропии на дефекте $K_{u2} = -1 \cdot 10^4$ и $-5 \cdot 10^4$ Дж/м³.

В итоге с помощью микромагнитного моделирования было показано, что, начиная примерно с радиуса дефекта $r \approx 25$ нм, критическое поле аннигиляции скирмиона значительно возрастает при увеличении глубины потенциальной ямы магнитной анизотропии, что показано на рис. 1.

Отсюда можно сделать вывод, что наличие дефекта типа «потенциальная яма» оказывает существенное влияние на величину критического магнитного поля уничтожения скирмиона, направленного перпендикулярно плоскости плёнки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания на выполнение научных исследований лабораториями ((FRRR-2024-0001)).

1. K. Everschor-Sitte *et al.*, J. Appl. Phys. **124**, 240901 (2018).
2. M.J. Donahue, D.G. Porter, OOMMF User's Guide Version 2.0 (2019).
3. R.M. Vakhitov *et al.*, JPCM **37**, 5 (2024).

ЧАСТОТНО-ПОЛЕВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ФМР НАНОФЕРРИТА НИКЕЛЯ NiFe_2O_4

А.О. Шохрина^{1,2*}, С.В. Столяр^{1,2,3}, Н.М. Боев³, О.А. Ли¹

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

²Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, Россия

³Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

*e-mail: anna.shohrina152@gmail.com

Одним из перспективных биомедицинских приложений магнитных наноматериалов является терапия опухолевых заболеваний с применением наночастиц в качестве тепловых агентов. Известно, что нагрев магнитных наночастиц может быть усилен в условиях ферромагнитного резонанса (ФМР) [1-2]. Средняя мощность высокочастотного поля, поглощаемая единичным объёмом суперпарамагнитной частицы и впоследствии преобразуемая в тепло, определяется частотой переменного поля и мнимой частью магнитной восприимчивости материала [3]:

$$P = \frac{1}{2} \omega h_0^2 \chi'' \quad (1)$$

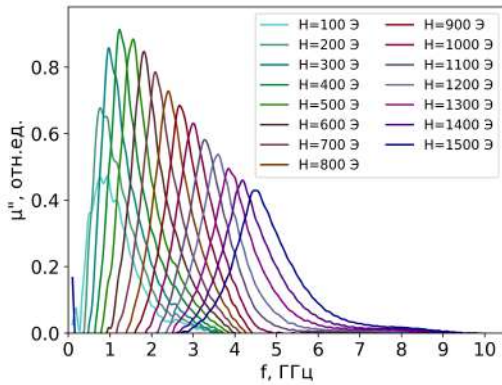
где ω — частота переменного поля, h_0 — напряженность переменного поля, χ'' — мнимая часть магнитной восприимчивости.

В высокочастотном линейно-поляризованном поле χ'' имеет вид [4]:

$$\chi'' = \frac{ML\eta\omega\gamma[\gamma^2 H^2(1+\eta^2) + \omega^2]}{[\gamma^2 H^2(1+\eta^2) + \omega^2]^2 - 4\gamma^2 H^2 \omega^2} \quad (2)$$

где L — функция Ланжевена с аргументом $\sigma = MVHk^{-1}T^{-1}$, V — объём частицы, γ — гиромагнитное соотношение электрона, $\eta = \xi(L^{-1} - \sigma^{-1})$ — эффективный параметр релаксации, ξ — параметр релаксации, входящий в уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта, M — намагниченность частицы, H — напряженность постоянного поля.

Рис. 1. Мнимая часть магнитной проницаемости.



пряженности постоянного поля.

Нагрев наночастиц феррита никеля NiFe_2O_4 при частоте СВЧ поля 8.9 ГГц в резонансном поле составляет 5 К [3]. Цель данной работы — изучение частотно-полевого зависимости порошка феррита никеля для определения оптимальных условий поглощения частицами СВЧ поля в условиях ФМР. Мнимую часть магнитной проницаемости μ'' измеряли с помощью широкополосного спектрометра ферромагнитного резонанса при комнатной температуре в диапазоне частот от 100 МГц до 10 ГГц и полей до 1500 Э. Результат представлен на рис. 1. Экспериментальные кривые анализировали с учетом формул (1) и (2). Максимальные значения μ'' и соответственно χ'' , обуславливающие наибольшее поглощение энергии СВЧ поля для наночастиц феррита никеля, наблюдаются в диапазоне частот 1 – 2 ГГц и полей 400 – 600 Э. Полученные диапазоны характеристик полей потенциально могут обеспечить более эффективные условия нагрева наночастиц.

1. J.-H. Lee *et al.*, Sci. Rep. **12**, 5232 (2022).
2. J.-H. Lee *et al.*, Sci. Rep. **11**, 4969 (2021).
3. С.В. Столяр *и др.*, ФТТ **65**, 1006 (2023).
4. Р.С. Гехт *и др.*, ЖЭТФ **70**, 1300 (1976).

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ И КРИТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ТРОИЛИТА FeS из МЕТЕОРИТА Calama 022

А.Р. Айрузов, С.С. Дюндик, Е.М. Максимова*

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Россия

*e-mail: maksimovaem@cfuv.ru

Возросший в последнее время интерес к минералам космического происхождения связан, прежде всего, с экстремальными условиями их образования. Многие из них в чистом виде встречаются только в метеоритах, в том числе и троилит, FeS, являющийся индикатором ударного и теплового метаморфизма, произошедшего с веществом метеорита за время его космической эволюции.

В настоящей работе исследовалось тепловое расширение троилита, выделенного методом магнитной сепарации из метеорита Calama 022 (L6, S1, W1). Метеорит был найден в 2017 году в пустыне Чили экспедицией Уральского федерального университета.

Троилит, является крайним представителем ряда пирротинов Fe_{1-x}S с $0 \leq x \leq 0.125$, где x — среднее число вакансий, приходящееся на один атом железа (плотность вакансий). Кристаллическая структура стехиометрического пирротина, или троилита, является слоистой гексагональной структурой типа никелина (NiAs). Широкий нестехиометрический диапазон этих соединений значительно влияет на их магнитные свойства. Известно, что в структуре пирротина реализуется ферромагнитное спиновое упорядочение в базисных плоскостях и антиферромагнитное спиновое упорядочение в соседних плоскостях. В отличие от пирротина троилит имеет практически стехиометрический состав $0 \leq x \leq 0.005$ и иное направление спина (у троилита вдоль оси c , у пирротина — перпендикулярно к этой оси) [1]. При нагревании пирротина выше критической температуры $\sim 330^\circ\text{C}$ наблюдается структурный переход типа порядок-беспорядок, связанный с разупорядочением вакансий в металлических слоях, при этом структура соединения стремится к структурному типу NiAs, характерной для троилита. Эта же температура является температурой перехода от антиферромагнитного состояния к парамагнитному [2].

Целью настоящей работы было определение температурных зависимостей ряда структурных характеристик и температуры магнитного упорядочения в структуре троилита из метеорита Calama 022. Исследования проводились методом порошковой высокотемпературной рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре Bruker D8 Advance с использованием Co (K_α) излучения в интервале температур от 20 до 450°C . Диапазон съемки по углу составлял $2\theta = 22 - 55^\circ$ с шагом 0.001° . Скорость нагрева была $5^\circ/\text{мин}$. Точность поддержания температуры $\pm 1^\circ\text{C}$.

В результате были установлены температурные зависимости параметров элементарной кристаллической ячейки и плотностей вакансий в исследованном троилите. Определены величины коэффициентов его теплового расширения и значение критической температуры. Отличие полученных значений от соответствующих параметров аналогичных по составу соединений, изученных в работе [3], может быть обусловлено как различающейся степенью их нестехиометрии, так и наличием примеси Cu в троилите метеорита Calama 022.

1. В.В. Онуфриенко, А.В. Чжан, Г.В. Бондаренко, Г.Ю. Юркин, Неорганические материалы **56**, 948 (2020).
2. F. Ricci, E. Bousquet, Phys. Rev. Lett. **116**, 227601 (2016).
3. C. Tenailleau, B. Etschmann, H. Wang, A. Pring, B. Grguric, A.J. Studer, Mineralogical magazine **69**, 205 (2005).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СПЛАВОВ Al – Cu – Ni
ПРИ НОРМАЛЬНОМ И ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИЯХА.Л. Алтунян^{1*}, Л.В. Камаева², В.В. Бражкин³¹Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия²Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия³Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина РАН, Троицк, Москва, Россия*e-mail: pi31415@mail.ru

Сплавы системы Al-Cu-Ni в области, богатой алюминием, применяются как упрочняющиеся алюминиевые сплавы с высокой жаропрочностью, которая обеспечивается образованием интерметаллидных фаз с заданной морфологией кристаллов. Одним из возможных способов управления структурой таких сплавов, для улучшения их служебных свойств, является использование структурной наследственности между жидким и твердым состояниями и высокого давления для расширения набора фаз-упрочнителей.

Для исследования сплавов Al-Cu-Ni было выбрано два концентрационных сечения при 20 ат.% Cu от 17.5 до 40 ат.% Ni и при 30 ат.% Ni от 5 до 30 ат.% Cu, а также 5 сплавов из эвтектической области, относящиеся к термически упрочняющимся сплавам: Al₉₄Cu₅Ni₁, Al_{92.5}Cu₅Ni_{2.5}, Al₉₀Cu_{7.5}Ni_{2.5}, Al₈₉Cu₁₀Ni₁, Al_{87.5}Cu₁₀Ni_{2.5}.

Методом термического анализа были определены температуры фазовых превращений выбранных сплавов, а также построены соответствующие концентрационные сечения диаграммы состояния и концентрационные зависимости переохлаждения при кристаллизации расплавов в тиглях Al₂O₃ в условиях охлаждения от различных температур со скоростями 20, 50, 100 град/мин. Концентрации, при которых наблюдается изменение типа кристаллизации или характера концентрационного изменения переохлаждения, соответствуют экстремумам на изотермах вязкости расплавов Al-Cu-Ni, а также особенностям на линии ликвидус. Сопоставление концентрационных зависимостей вязкости и переохлаждения расплавов Al-Cu-Ni между собой, а также с видом концентрационных срезов тройной диаграммы состояния позволило установить выраженное влияние химического взаимодействия в расплаве на условия образования твердых фаз на первых этапах кристаллизации при нормальном давлении. Анализ данных металлографического и рентгеноструктурного исследований образцов, полученных при контролируемом охлаждении в условиях нормального давления и 5 – 8 ГПа, показывает, что увеличение давления смещает область инвариантных равновесий в область меньших концентраций Cu и больших Ni. Увеличение давления до 5 ГПа не приводит к принципиальному изменению характера кристаллизации сплавов Al-Cu-Ni, изменения последовательности фазообразования по сравнению с нормальным давлением не происходит, и в результате образуются смешанные протектические и эвтектические структуры сплавов. Однако, сплавы, затвердевающие в условиях высоких давлений, менее дефектны и имеют высокие значения микротвердости, такая структура остается стабильной при нагреве до 500 – 800 град. В сплавах с содержанием 1 – 2.5 ат.% Ni влияние давления на микроструктуру выражается в изменении размера, состава и морфологии эвтектических структур. При высоком давлении образуются мелкодисперсные сферолитные колонии тройной эвтектики, которые окружены более грубыми двойными эвтектическими колониями.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00370, <https://rscf.ru/project/24-22-00370/>.

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ЭНТРОПИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Д.А. Друзев^{1*}, П.В. Прудников^{1,2}

¹Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

²Центр новых химических технологий ИК СО РАН, Институт катализа СО РАН, Омск, Россия

*e-mail: druzevl@mail.ru

Вопросы исследования свойств спиновых систем посредством алгоритма Ванга-Ландау [1] являются хорошо изученными, однако его применение к сложным моделям с непрерывной симметрией [2] таким, как модель Гейзенберга, становится нетривиальной задачей.

Алгоритм позволяет напрямую вычислить плотность вероятности состояний $g(E, M)$ — относительное число возможных конфигураций для уровня с энергией E и намагниченностью M , при блуждании по пространству состояний, что позволяет, единожды проведя моделирование, получить значение статистической суммы:

$$Z(T, H) = \sum_E \sum_M g(E, M) e^{-(E-HM)/k_B T}, \quad (1)$$

далее обрабатывая статистические данные, рассчитывать средние значения термодинамических величин для любого набора температур:

$$\langle f(T, H) \rangle = \frac{\sum_E \sum_M f(E, M) g(E, M) e^{-(E-HM)/k_B T}}{Z(T, H)}, \quad (2)$$

где $f(E, M)$ — среднее значение термодинамической величины для энергии E и намагниченности M .

Нами проведено подробное Монте-Карло исследование трехмерной анизотропной модели Гейзенберга на кубической решетке спинов с применением модифицированного $1/t$ алгоритма Ванга-Ландау [3] для расчета двупараметрической плотности состояний $g(E, M)$ (рис. 1). С ее использованием построены двумерные зависимости термодинамических величин для ферромагнетика в поле H_z . Представленные температурные зависимости во внешнем поле хорошо сходятся с результатами, полученными известным алгоритмом Метрополиса.

С учетом широкого использования модели Гейзенберга в исследованиях свойств реальных магнетиков, энтропийное моделирование позволит существенно расширить возможности получения значимых результатов.

С учетом широкого использования модели Гейзенберга в исследованиях свойств реальных магнетиков, энтропийное моделирование позволит существенно расширить возможности получения значимых результатов.

1. F. Wang, D. P. Landau, Phys. Rev. E **64**, 056101 (2001).
2. C. Zhou *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, 120201 (2006).
3. R. E. Belardinelli, V. D. Pereyra, Phys. Rev. E **75**, 046701 (2007).

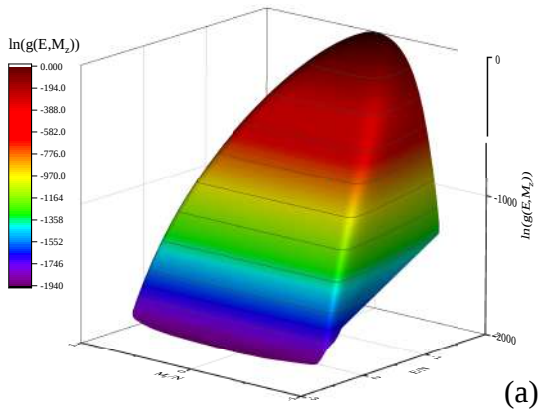


Рис. 1. Двупараметрические зависимости плотности состояний $g(E, M)$ изотропной модели Гейзенберга с линейным размером $L = 10$.

ДВУМЕРНАЯ ЧЕТЫРЕХВЕРШИННАЯ МОДЕЛЬ ПОТТСА НА ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ РЕШЕТКЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

М.К. Мазагаева*, М.К. Рамазанов, М.А. Магомедов, А.К. Муртазаев

Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

*e-mail: mazagaeva86@mail.ru

В последние годы значительное количество работ посвящено исследованию фазовых переходов (ФП), магнитных и термодинамических свойств магнитных систем. Для описания физических свойств магнитных систем, определения типов ФП используют решеточные модели. Модель Поттса является одной из таких решеточных моделей [3]. Модель Поттса интересна тем, что описывает большой класс реальных физических систем. Примером могут быть SrTiO_2 , $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$, KOs_2O_6 и многие другие.

На сегодняшний день влияние внешних факторов, таких как внешнее магнитное поле и обменное взаимодействие ближайших соседей, является наиболее актуальным вопросом [1,2]. Актуальность вызвана тем, что учет этих факторов приводит к изменению типа ФП, магнитных и термодинамических свойств спиновых систем.

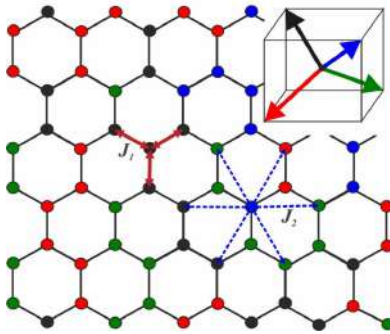


Рис. 1

В данной работе представлены результаты исследования двумерной ферромагнитной и антиферромагнитной моделей Поттса с числом спиновых состояний $q = 4$ на гексагональной решетке с учетом внешнего магнитного поля и обменного взаимодействия вторых ближайших соседей. Схематическое изображение модели представлено на рисунке 1. Гамильтониан модели представлен в следующем виде:

$$H = -J_1 \sum_{i,j} \mathbf{S}_i \mathbf{S}_j - J_2 \sum_{i,k} \mathbf{S}_i \mathbf{S}_k, \quad (1)$$

где J_1 и J_2 — параметры обменных взаимодействий первых и вторых ближайших соседей соответственно. Полагаем $J_2 < 0$. Для ферромагнитной (антиферромагнитной) модели $+J_1 > 0 (< 0)$. $\theta_{i,j}$, $\theta_{i,k}$ — углы между векторами взаимодействующих спинов $\mathbf{S}_i - \mathbf{S}_j$ и $\mathbf{S}_i - \mathbf{S}_k$ первых и вторых ближайших соседей соответственно. Возможное направление спинов указано на вставке рисунка 1. При таком расположении векторов угол между взаимодействующими спинами равен 109° . Суммирование производится согласно условию: если вектора взаимодействующих спинов имеют одинаковое направление, то $\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j$ и $\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_k$ равно 1, иначе — $-1/3$, что соответствует $\cos 109^\circ$. Соотношение взаимодействий вторых ближайших соседей $|J_2/J_1| = 1$, магнитное поле h приводится в единицах J_1 . Внешнее магнитное поле направлено вдоль одного из спинов. Исследование проведено на основе репличного обменного алгоритма метода Монте-Карло.

Получены магнитные структуры основного состояния в широком интервале величины магнитного поля. Показано, что для ферромагнитной модели реализуются четыре типа магнитного упорядочения, а для антиферромагнитной модели — шесть.

Получены гистограммы распределения вероятности по энергиям при критической температуре. Показано, что в ферромагнитной модели в интервале поля $0.0 \leq h \leq 3.5$ ($0.328 \leq T \leq 0.456$) реализуется ФП первого рода, однако для антиферромагнитной модели ФП первого рода реализуется в интервалах $0.0 \leq h \leq 3.0$ ($0.553 \leq T \leq 0.589$) и $6.0 \leq h \leq 6.5$ ($0.325 \leq T \leq 0.418$).

1. K. Murayama, Y. Ozeki, Phys. Rev. B **101**, 184427 (2020).
2. Р. С. Гехт, Успехи физических наук **159**, 261 (1989).
3. F. Y. Wu, Rev. Mod. Phys. **54**, 235 (1982).

ЭЛАСТОКАЛОРИЧЕСКОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ТЕРМОУПРУГИМ МАРТЕНСИТНЫМ ПЕРЕХОДОМ

Е.В. Морозов*, В.В. Коледов, В.С. Калашников

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

*e-mail: evgmorozov@gmail.com

В докладе дан обзор современных работ в области поиска новых материалов для создания твердотельных альтернативных энергетических систем: холодильников и тепловых насосов на основе эластокалорического эффекта (ЭКЭ), который возникает за счет структурного фазового перехода в материале, вызванного внешним механическим напряжением. Предполагается, что новые твердотельные калорические системы на ЭКЭ послужат основой высокоэффективной, экологичной и простой технологией твердотельного охлаждения для применения в приборостроении и других областях [1-3].

Для создания твердотельных охлаждающих систем важными параметрами являются величина ЭКЭ — ΔT в материале при максимальном возможном механическом внешнем напряжении — σ , изменение энтропии ΔS , максимальная частота термодинамических циклов в системе — f , максимальная удельная мощность рабочего тела с ЭКЭ — W . Наилучшие достигнутые значения этих параметров, которые на сегодняшний день можно найти в литературе: максимальный ЭКЭ наблюдается в сплаве $(\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{31.5}\text{Ti}_{18.5})_{99.8}\text{B}_{0.2}$, $\Delta T = 31.5$ К при напряжении $\sigma = 700$ МПа; рекордное изменение энтропии наблюдается в сплаве $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{44}\text{Cu}_5\text{Al}_1$, $\Delta S = 53.5$ Дж/(кг·К), но при этом максимальный ЭКЭ составляет $\Delta T = 25$ К при механическом напряжении $\sigma = 700$ МПа. Наибольшее значение максимальной частоты циклов $f = 50$ Гц и удельной мощности $W = 150$ кВт/кг для рабочего тела с ЭКЭ в виде быстрозакаленной ленты Ti_2NiCu продемонстрированы в [3]. С 2010 года было представлено множество прототипов систем охлаждения на основе ЭКЭ, однако разница температур между холодным и горячим резервуарами не превышает 5 К, а частота теплопередачи от холодного к горячему резервуару не превышает 1 Гц. В статье [4] 2022 года описан прототип холодильной системы на основе проволоки NiTi . Адиабатическое изменение температуры составляет 6.6 К при деформации 4.8%. Предлагаемый холодильник может вырабатывать температурный диапазон до 9.2 К, и имеет мощность охлаждения до 3.1 Вт. В докладе приводится сравнение различных схем твердотельных холодильников на основе ЭКЭ, включая предложенную авторами схему «теплового сепаратора» [5]. В докладе дан прогноз достижения перспективными калорическими системами на ЭКЭ параметров, необходимых для их широкого внедрения, включая практически достижимые значения коэффициента идеальности системы с ЭКЭ по сравнению с циклом Карно.

Работа выполнена по государственному заданию ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

1. J. Chen, L. Lei, G. Fang, Mater. Today Commun. **28**, 102706 (2021).
2. S. Wang *et al.*, Renew Sustain Energy Rev. **187**, 113762 (2023).
3. E. V. Morozov *et al.*, PhSS. **62**, 972 (2020).
4. Y. Chen *et al.*, The Innovation. **3**, 1 (2022).
5. Е. В. Морозов и др., Известия РАН. Серия физическая. **81**, 1542 (2017).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ КИНЕТИКИ СТРУКТУРНОГО МАРТЕНСИТНОГО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

Е.В. Морозов*, В.Д. Пойманов

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

*e-mail: evgmorozov@gmail.com

В качестве модели рассматривается одномерная структура вблизи температуры термоупругого перехода мартенсит-аустенит T_c . Образец ориентирован вдоль оси x и неограничен в перпендикулярной плоскости так, что поток тепла направлен только вдоль оси x . Начальная температура во всех точках одинакова и равна температуре окружающей среды.

Аустенитная (высокотемпературная) фаза имеет ячейку кубической сингонии с постоянной a_0 , мартенситная (низкотемпературная) фаза — тетрагональной симметрии.

Кинетика релаксации параметра порядка (ПП) описывается уравнением Ландау-Халатникова (УЛХ), имеющему вид:

$$\frac{\partial f}{\partial \epsilon} + \tau \frac{\partial \epsilon}{\partial \tau} = 0, \quad (1)$$

где τ — характерное время релаксации к равновесному состоянию, ϵ — деформация (параметр порядка), f — плотность свободной энергии.

Для рассмотрения кинетики структурного фазового перехода недостаточно использования УЛХ из-за движения доменных границ.

Рассмотрим кинетику переноса, используя уравнения теплопроводности. Рассмотрим произвольную плоскость $x = x_n$ внутри образца в момент времени t . Увеличение энергии вследствие теплопереноса в слое толщиной d определяется разностью температур с соседними слоями:

$$\frac{dE}{dt} = \nu_d (C_{n-1}(T_{n-1} - T_n) - C_n(T_n - T_{n+1}))\Omega, \quad (2)$$

где $\nu_d = d/\tau_0$, τ_0 — среднее время свободного пробега молекул между плоскостями, переносящих энергию, Ω — площадь поперечного сечения образца, ρ — плотность ($\rho d = \text{const}$ при ФП), где $C = c\rho$ — теплоемкость единицы объема, c — теплоемкость единицы массы.

Поток тепла вместе с выбросом энергии из-за изменения ПП и, вследствие этого, энтропии, а также распределенного тепла мощностью на единицу площади p , подводимого к точке $x = 0$, равен увеличению внутренней энергии:

$$\nu_d (C_{n-1}(T_{n-1} - T_n) - C_n(T_n - T_{n+1}))\Omega - T_n \frac{\partial s_n}{\partial t} \Omega d + p_n \Omega = \frac{\partial}{\partial t} (C_n T_n) \Omega d \quad (3)$$

(знак минус во втором слагаемом в левой части связан с выделением тепла при уменьшении энтропии), $s = -\partial f / \partial T$ — энтропия единицы объема.

Введем коэффициент диффузии $D = d\nu_d$, зависящий от температуры ($\sim \sqrt{T}$). Пренебрежем фазовой и температурной зависимостью теплоемкости и коэффициента диффузии. Тогда, переходя к континуальному пределу, получаем:

$$C \left(\frac{\partial T}{\partial t} - D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) = T \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial f}{\partial T} + T p(x). \quad (4)$$

Комбинация этого уравнения и уравнения (1) может объяснить кинетику мартенситного перехода.

Работа выполнена по государственному заданию ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА АНТИФЕРРОМАГНИТНОЙ МОДЕЛИ ГЕЙЗЕНБЕРГА ПРИ НАЛИЧИИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

К.Ш. Муртазаев*, М.А. Магомедов, М.Р. Джамалудинов, М.К. Рамазанов, А.К. Муртазаев

Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

*e-mail: 5kurban@mail.ru

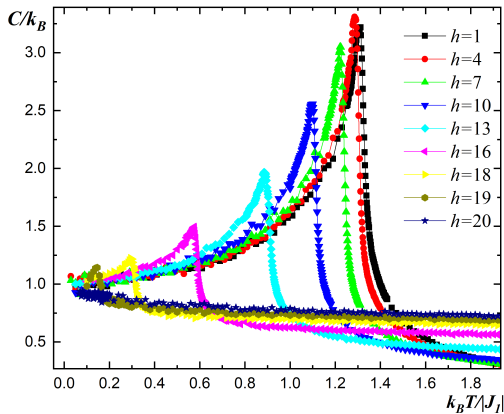


Рис. 1. Зависимость теплоемкости C/k_B от температуры $k_B T/|J_1|$ для разных значений h .

Исследование фазовых переходов систем с конкурирующими обменными взаимодействиями в настоящее время является актуальной и сложной задачей в физике конденсированных сред [1, 2]. Репличный алгоритм метода Монте-Карло является мощным инструментом для решения таких задач, которую используется нами в данном исследовании [3].

Гамильтониан антиферромагнитной модели Гейзенберга с учетом взаимодействия первых, вторых ближайших соседей и внешнего магнитного поля имеет следующий вид:

$$H = -J_1 \sum_{i,j} (\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j) - J_2 \sum_{i,l} (\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_l) - \mathbf{h} \cdot \sum_i \mathbf{S}_i, \quad (1)$$

где $\mathbf{S}_i (S_i^x, S_i^y, S_i^z)$ — трехкомпонентный единичный вектор. Первый член в формуле учитывает обменное взаимодействие ближайших соседей с $J_1 < 0$, второй — следующих за ближайшими соседей с $J_2 < 0$. h — величина магнитного поля (приводится в единицах $|J_1|$). Магнитное поле менялось в интервале $0.0 \leq h \leq 20.0$ и направлено вдоль оси z . В данной работе рассмотрим случай, когда $J_2 = J_1 = -1.0$.

Расчеты проводились для систем с периодическими граничными условиями и линейными размерами $N = 2 \times L \times L \times L$, $L = 12 \div 24$, где L измеряется в размерах элементарной ячейки. Для анализа фазовых переходов использовался метод кумулянтов Биндера четвертого порядка. Температурные зависимости для теплоемкости приведены на рисунке 1. Отметим, что рост значения h сопровождается сдвигом максимумов в сторону более низких температур, одновременно с этим наблюдается спад абсолютных значений максимумов теплоемкости. Очевидно, что это связано с подавлением флуктуаций с увеличением магнитного поля.

Получены температурные зависимости теплоемкости, восприимчивости, намагниченности для антиферромагнитной модели Гейзенберга на объемно-центрированной кубической решетке для разных значений величины магнитного поля.

Построена фазовая диаграмма зависимости критической температуры от величины магнитного поля для рассматриваемой модели. Получены структуры основного состояния.

1. А. З. Паташинский В. Л. Покровский. Флуктуационная теория фазовых переходов. Наука, М. (1982).
2. Ш. Ма. Современная теория критических явлений. Мир, — М.(1980).
3. A. Mitsutake, Y. Sugita, Y. Okamoto, Peptide Science **60**, 96 (2001).

КИНЕТИКА ФОРМИРОВАНИЯ УПОРЯДОЧЕННОЙ ФАЗЫ CuAuII В НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКОМ СПЛАВЕ Cu – 56 ат.% Au

П.О. Подгорбунская^{1,2*}, А.Ю. Волков¹, О.С. Новикова¹, Е.Ф. Таланцев¹

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

²Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*e-mail: polina.podgorbunskaya@yandex.ru

Сплав Cu-56 ат.% Au, известный под промышленной маркой ЗлМ-80, широко применяется в приборостроении при изготовлении прецизионных деталей. При этом, несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию превращения беспорядок→порядок в золотомедных сплавах, сняты еще далеко не все вопросы. В связи с этим представляется важным подробно изучить границы существования длиннопериодной атомно-упорядоченной фазы CuAuII, определить температурные интервалы двухфазных областей (Al + CuAuII) и (CuAuII + CuAuI), установить температуру фазового перехода «беспорядок — порядок», а также исследовать кинетику формирования фазы CuAuII в образцах, разупорядоченных закалкой от высоких температур или пластической деформацией. Целью данной работы является уточнение температурных границ формирования длиннопериодной упорядоченной фазы CuAuII в нестехиометрическом сплаве Cu-56 ат.% Au.

Для получения исследуемого сплава Cu-56 ат.% Au (Cu-80Au, масс.%) использовались медные и золотые пластины с чистотой 99.95% и 99.99% соответственно. После гомогенизации при температуре 850°C в течение 3 часов и закалки в воде полученный слиток подвергался механо-термической обработке. Для анализа фазового состава изготавливались пластинки толщиной 0.3 мм. Все эксперименты проводились на образцах, разупорядоченное состояние в которых формировалось двумя способами: закалкой от температуры 600°C или пластической деформацией на 90%. Отжиги предварительно деформированных и закаленных образцов исследуемого сплава проводились в температурном интервале 275-375 °C (через 25°), их продолжительность составляла от 1 часа до 1440 часов (2 месяца). Основным методом исследования в данной работе являлся рентгеноструктурный анализ, который проводили на дифрактометре PANalytical Empyrean Series 2 в Cu-K α излучении. Для оценки соотношения фаз в двухфазных состояниях выполнялась математическая обработка ряда пиков в программном пакете «OriginPro».

Исследование показало, что в сплаве Cu-56 ат.% Au при 325–350°C формируется однофазное состояние, упорядоченное по типу CuAuII. При температуре 275°C наблюдается образование фазы CuAuI, что несколько расходится с данными общепринятой фазовой диаграммы системы золото-медь. При 300°C в сплаве сосуществуют две упорядоченные фазы — CuAuI и CuAuII, тогда как при 375°C происходит переход к двухфазному состоянию, включающему разупорядоченную (Al) и упорядоченную (CuAuII) структуры [1]. Анализ рентгеновских пиков с применением математической обработки позволил определить соотношение фаз в двухфазных состояниях. Установлено, что формирование длиннопериодной фазы CuAuII проходит через стадию формирования более простой сверхструктуры CuAuI.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

1. О.С. Новикова, Е.Ф. Таланцев, П.О. Подгорбунская, А.Ю. Волков, ФТТ **66**, 1662 (2024).

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ПОТТСА

М.К. Рамазанов^{1,2*}, А.К. Муртазаев¹, М.А. Магомедов¹, Р.М. Рамазанов², А.Р. Магомедов¹

¹Институт физики Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Махачкала, Россия

²Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

*e-mail: sheikh77@mail.ru

Для исследования фазовых переходов (ФП), магнитных, термодинамических и критических свойств магнитных материалов в современной физике конденсированных сред используются различные решеточные модели. Наиболее широко для изучения физических свойств магнитных материалов используют модели Изинга, Гейзенберга, Поттса и др. [1].

Особый интерес представляют исследования, посвященные изучению магнитных спиновых систем с фрустрациями. Такие системы обладают богатой природой ФП и имеют особенности магнитного, термодинамического и критического поведения. Включение возмущений различной природы, таких как внешнее магнитное поле, взаимодействие следующих за ближайшими соседями, немагнитные примеси и др. в магнитных спиновых системах с фрустрациями может привести к совершенно новому физическому поведению таких систем.

В данной работе нами изучаются термодинамические свойства трехмерной трехкомпонентной модели Поттса на гексагональной решетке. Эта модель довольно уникальна и до сих пор малоизучена. Модель Поттса может быть использована для описания поведения некоторых классов адсорбированных газов на графите [2]. Анализ результатов, полученных при исследовании двумерной модели Поттса с числом состояний спина $q = 4$ на гексагональной решетке [3,4], показывает, что в данной модели наблюдается ФП второго рода, имеющий признаки ФП первого рода. Вопрос о роде ФП для трехмерного случая до сих пор является дискуссионным. В связи с этим нами проведено исследование трехмерной ферромагнитной и антиферромагнитных моделей Поттса с $q = 3$. Гамильтониан модели Поттса с учетом взаимодействия ближайших соседей имеет следующий вид:

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle, i=j} \mathbf{S}_i \mathbf{S}_j = -J \sum_{\langle i,j \rangle, i=j} \cos \theta_{i,j}, \quad (1)$$

где J — параметр обменных ферро- ($J > 0$) и антиферромагнитного ($J < 0$) взаимодействий, $\theta_{i,j}, \theta_{i,k}$ — углы между взаимодействующими спинами $\mathbf{S}_i - \mathbf{S}_j$ и $\mathbf{S}_i - \mathbf{S}_k$. В настоящее время такие системы на основе микроскопических гамильтонианов успешно изучаются на основе метода Монте-Карло (МК) [5]. В последнее время разработано много новых вариантов алгоритмов метода МК. Одним из наиболее эффективных для исследования подобных систем является репличный обменный алгоритм метода МК. Поэтому нами в данном исследовании был использован этот алгоритм. Получены магнитные структуры основного состояния. Построены температурные зависимости основных термодинамических и магнитных параметров. На основе гистограммного метода проведен анализ характера ФП.

1. H.T. Diep, Frustrated Spin Systems, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore (2004).
2. E. Domany, M. Schick, J.S. Walker, Phys. Rev. Lett. **38**, 1148 (1977).
3. А.К. Муртазаев, М.К. Рамазанов, М.К. Мазагаева, М.А. Магомедов, ЖЭТФ, **156**, 502. (2019).
4. М.К. Рамазанов, А.К. Муртазаев, М.А. Магомедов, М.К. Мазагаева, ФТТ, **62**, 442 (2020).
5. М.К. Ramazanov, A.K. Murtazaev, M.A. Magomedov, Phys. A. **521**, 543 (2019).

ФАЗОВЫЕ ДИАГРАММЫ ОРИЕНТАЦИОННЫХ ПЕРЕХОДОВ В ХИРАЛЬНОЙ
ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СУСПЕНЗИИ ДИАМАГНИТНЫХ ЧАСТИЦД.П. Соколыч^{*}, Д.В. МакаровФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», Пермь,
Российская Федерация^{*}e-mail: dsokolchik@rambler.ru

Жидкие кристаллы (ЖК) — это вещества, сочетающие в себе свойство текучести жидкостей и макроскопическую анизотропию твердых кристаллических тел [1]. Они образованы анизометричными (вытянутыми или сплюснутыми) молекулами, имеющими дальний порядок в ориентации своих осей, но не обладающими порядком в расположении центров масс. Отличительной особенностью холестерического жидкого кристалла (ХЖК) является наличие спиральной ориентационной структуры, связанной с закручиванием молекул в направлении, перпендикулярном их длинным осям. В работе теоретически исследовано поведение ориентационной структуры неограниченного образца ХЖК-сuspензии диамагнитных [2] частиц в магнитном поле, приложенном ортогонально оси спиральной структуры сuspензии.

Предложено континуальное описание рассматриваемой сuspензии в рамках модельного функционала свободной энергии ХЖК [3], учитывающего малую долю примеси диамагнитных частиц в образце. Путём минимизации полной свободной энергии получена система уравнений ориентационного равновесия ХЖК-сuspензии с учетом мягкого сцепления между диамагнитными частицами и ЖК-матрицей. Изучено поведение сuspензии во внешнем магнитном поле при различных значениях энергии сцепления между ЖК-матрицей и примесными частицами, а также параметра, характеризующего отношение удельных анизотропий диамагнитной восприимчивости подсистем.

Исследованы фазовые переходы в сuspензии с однородным распределением примеси в образце при учёте конечного гомеотропного сцепления между подсистемами. В приближении бесконечного (жесткого) сцепления получены численно и проанализированы критические поля перехода при наличии сегрегации диамагнитной примеси. Для случая мягкого сцепления проанализировано поведение углов ориентации директоров ХЖК и диамагнитных частиц в раскрученной ориентационной фазе сuspензии при различных значениях материальных и управляющих параметров. Найдены критические значения параметров, отвечающие границам между различными фазами: двумя гомеотропными, угловой и планарной. Построены и проанализированы фазовые диаграммы критических полей перехода в раскрученное состояние сuspензии в зависимости от значений параметров анизотропии и сцепления. Обнаружено значительное влияние энергии сцепления между диамагнитными частицами и ЖК-матрицей на то, в какую ориентационную фазу — гомеотропную, угловую или планарную — раскрутится спираль сuspензии.

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ №FSNF-2024-0001.

1. L. M. Blinov, Structure and properties of liquid crystals. – Dordrecht: Springer (2011).
2. S. P. Yadav, S. Singh, Progress in Material Science **80**, 38 (2016).
3. D. A. Petrov, P. K. Skokov, A. N. Zakhlevnykh, D. V. Makarov, Beilstein Journal of Nanotechnology **10**, 1464 (2019).

ВЫРАЩИВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛА $\text{GdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ ИЗ РАСТВОРА-РАСПЛАВА

В.Р. Титова*, И.А. Гудим, Е.В. Еремин

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

*e-mail: bb1995@mail.ru

Ферробораты, такие как $\text{GdFe}_3(\text{BO}_3)_4$, обладают уникальными магнитными и магнито-электрическими свойствами, что делает их перспективными материалами для исследования и применения в разнообразных областях, включая спинтронику, устройства для хранения информации и датчики [1].

Целью исследования являлась разработка технологий выращивания монокристаллов $\text{GdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ из растворов-расплавов на основе Li_2WO_4 методами спонтанной кристаллизации и групповым на затравках. Раствор — 88% вес. $\{\text{Li}_2\text{WO}_4 + 3\text{B}_2\text{O}_3 + 0.3\text{Gd}_2\text{O}_3\}$ + 12% вес. $\text{GdFe}_3(\text{BO}_3)_4$, готовился при $T = 1050^\circ\text{C}$ в платиновом цилиндрическом тигле последовательным сплавлением окислов $[\text{Li}_2\text{O}_3 + \text{WO}_3]$, $[\text{B}_2\text{O}_3 + \text{Gd}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3]$.

Предварительный поиск температуры насыщения $T_{\text{нас}}$ проводился по наблюдениям за образованием на кристаллодержателе спонтанных кристалликов. После повторной гомогенизации $T_{\text{нас}}$ уточнялась в пределах $\pm 3^\circ\text{C}$ с помощью уже полученных кристалликов по температурам их роста и растворения.

Наиболее выгодным с точки зрения управления процессом роста монокристаллов является режим выращивания их на затравках. После перегрева раствора-расплава кристаллодержатель с затравками погружался в раствор-расплав на глубину, температура понижалась до стартовой $T = T_{\text{нас}} - 7^\circ\text{C}$, что соответствует середине метастабильной зоны. Далее температура раствора-расплава плавно снижалась по программе.

Выращенные в температурном интервале $1 - 2^\circ\text{C}$ монокристаллы $\text{GdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ с размерами до $5 - 7$ мм и общей массой $3 - 4$ г, имели выраженный темно-зеленый оттенок. В [2,3] приведены результаты исследований магнитных свойств выращенного монокристалла.

В данной работе были разработаны растворы-расплавы, в которых искомые кристаллы являются единственной и высокотемпературной фазой. Определены параметры кристаллизации и условия устойчивого роста. Выращены качественные монокристаллы спонтанным и групповым методом из растворов-расплавов на основе Li_2WO_4 для дальнейших исследований.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта РНФ № 22-12-20019.

1. L.N. Bezmaternykh *et al.*, Crys. Rep. **50**, S1, 97 (2005).
2. И.А. Гудим *и др.*, ФТТ, **65**, 2 (2023).
3. Е.В. Еремин *и др.*, ФТТ, **65**, 11 (2023).

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В СИСТЕМЕ Ga – Bi

В.В. Филиппов*, Д.А. Ягодин

Институт металлургии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: vvfilippov@mail.ru

Диаграмма состояния системы Ga–Bi относится к монотектическому типу и имеет область расслаивания от 8.5 до 61.5 ат.% Bi с критической точкой при температуре равной 535 K и сплаве состава, содержащем Ga–30 ат.% Bi [1]. В настоящей работе вязкость расплавов Ga–Bi измерена методом крутильных колебаний на автоматизированной установке [2]. Сплавы были приготовлены из галлия марки 6N с содержанием основного вещества 99.9999% и висмута марки ВИ-000 (99.999%). Температурные зависимости динамической вязкости получены при охлаждении расплавов Ga–Bi от 600 K до температуры расслаивания со скоростью 0.5 K/мин.

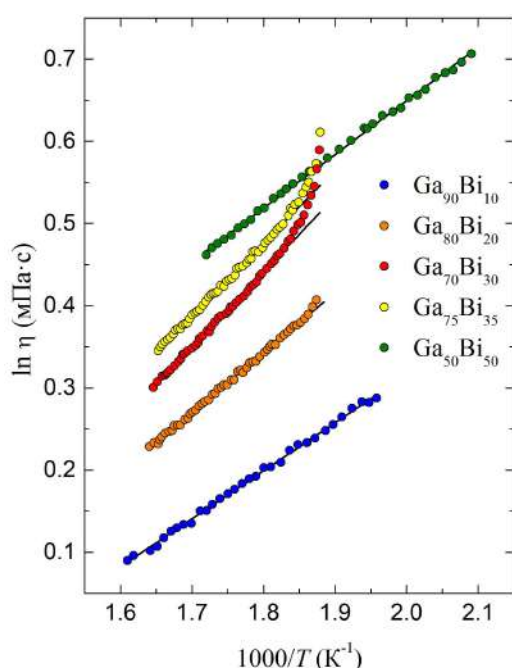


Рис. 1. Зависимость натурального логарифма вязкости $\ln \eta$ от обратной температуры $1/T$ для расплавов $\text{Ga}_{100-x}\text{Bi}_x$ (x — ат.% Bi). Сплошная линия — вязкость, рассчитанная по уравнению Аррениуса.

При $z_\eta = 0$ формула (1) переходит в уравнение Аррениуса.

Установлено, что концентрационная зависимость z_η имеет куполообразный вид с максимумом при критическом составе. Полученное нами максимальное значение $z_\eta \approx 0.056$ хорошо согласуется с теоретическим значением $8/18\pi^2 = 0.054$ и экспериментальными результатами (0.052 – 0.066) [3].

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИМЕТ УрО РАН.

1. B. Predel. Bi-Ga (Bismuth-Gallium). B-Ba-C-Zr. — Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag (1992).
2. V.V. Filippov *et al.*, Instrum. Exp. Tech. **59**, 305 (2016)
3. J.V. Sengers, Int. J. Thermophys. **6**, 203 (1985).

На рис. 1 приведена логарифмическая зависимость вязкости от обратной температуры для расплавов Ga–Bi. Функция $\ln \eta(1/T)$ для расплавов $\text{Ga}_{90}\text{Bi}_{10}$ и $\text{Ga}_{50}\text{Bi}_{50}$ имеет линейную зависимость. Для расплавов близких к критическому составу $\text{Ga}_{70}\text{Bi}_{30}$ эта функция отклоняется от линейной зависимости при приближении к температуре расслаивания. Экспериментальные значения динамической вязкости η расплавов Ga–Bi описаны уравнением [3]

$$\eta = \eta_0 \exp \left(\frac{E_a}{RT} \right) (Q \xi_0 \epsilon^{-\nu})^{z_\eta}, \quad (1)$$

где η_0 — динамическая вязкость при $T = \infty$, E_a — энергия активации вязкого течения, R — универсальная газовая постоянная, T — абсолютная температура, Q — эффективное волновое число, z_η — критический показатель вязкости, ξ — корреляционная длина, которая является функцией приведенной температуры $\epsilon = (T - T_c)/T_c$,

$$\xi = \xi_0 \epsilon^{-\nu}, \quad (2)$$

где ξ_0 — амплитуда корреляционной длины, T_c — критическая температура, ν — критический показатель

ПРОВОДИМОСТЬ И ТРАНСПОРТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

КРИТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ В РЕЖИМЕ КВАНТОВОГО ЭФФЕКТА ХОЛЛА В СТРУКТУРЕ HgTe/CdHgTe С ДВОЙНОЙ КВАНТОВОЙ ЯМОЙ

А.А. Брусникова^{1,2*}, С.В. Гудина¹, В.Н. Неверов¹, Н.Г. Шелушина¹, М.В. Якунин¹,
Н.Н. Михайлов³, С.А. Дворецкий³

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

²Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

³Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

*e-mail: brusnickova2003@ya.ru

Живейший интерес к исследованиям двумерного газа в структурах на основе HgTe/CdHgTe вызван многообразием свойств этих систем, связанных со сложной природой их энергетического спектра. Так, при критической ширине квантовой ямы $d_{QW} \cong d_C = 6.3$ нм реализуется закон дисперсии, аналогичный таковому у безмассовых фермионов в графене [1]. Квантовый эффект Холла (КЭХ) в таких системах наблюдается до комнатных температур в графене [1] и до азотных в HgTe [2], что дает новые возможности для анализа предсказаний теории скейлинга относительно критического поведения проводимости при квантовых фазовых переходах в режиме КЭХ. И действительно, как в графене [3], так и в HgTe [4], были получены значения критических индексов $\kappa \approx 0.42$, соответствующие предсказаниям теории и «классическим» значениям, наблюдавшимся ранее в полупроводниковых системах с короткодействующим случайным потенциалом [5]. С другой стороны, обе системы, как и структуры на основе GaAs, продемонстрировали важность учета масштаба случайного потенциала [5, 6] и межчастичного взаимодействия [7] при обсуждении универсальности полученных из эксперимента значений критических индексов.

В рамках подходов, описанных в [6], в магнитных полях (0 – 9 Тл) проведен анализ температурной (1.8 – 12 К) эволюции КЭХ в двойной квантовой яме, созданной из двух слоев бесщелевого материала HgTe р-типа с критической толщиной 6.3 – 6.5 нм, разделенных барьером Hg_{0.3}Cd_{0.7}Te в 3 нм [8, 9], с энергетическим спектром, похожим на спектр двуслойного графена [10]. На переходе между плато КЭХ с номерами $i = 2 \rightarrow 1$, положение которого дает концентрацию дырок $p = 1.6 \times 10^{15} \text{ м}^{-2}$, впервые для структур на основе HgTe наблюдался переход от высокотемпературного скейлингового режима с критическим индексом ширины полосы делокализованных состояний $\kappa = 0.97 \pm 0.03$ к низкотемпературному режиму с близким к универсальному значением $\kappa = 0.37 \pm 0.03$. В области меньших полей, где проявляется существенно меньшая концентрация подвижных дырок $p = 0.4 \times 10^{15} \text{ м}^{-2}$, на возвратном переходе $i = 2 \rightarrow 1 \rightarrow 2$ и на переходе $i = 3 \rightarrow 2$ не удается наблюдать универсального значения κ вплоть до 1.8 К. Причины такого поведения обсуждаются.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ для ИФМ УрО РАН.

1. A.H. Castro Neto *et al.*, Rev. Mod. Phys. **81**, 109 (2009).
2. D.A. Kozlov *et al.*, Appl. Phys. Lett. **105**, 132102 (2014).
3. A.J.M. Giesbers *et al.*, Phys. Rev. B **80** 241411(R) (2009).
4. T. Khouiri *et al.*, Phys. Rev. B **93**, 125308 (2016).
5. S.V. Gudina *et al.*, Low temperature physics **45**, 176 (2019).
6. Ю.Г. Арапов *и др.*, ФТП **49**, 1593 (2015).
7. M. Amado *et al.*, J. Phys.: Condens. Matter **24** 305302 (2012).
8. М.В. Якунин *и др.*, Письма в ЖЭТФ **104**, 415 (2016).
9. M.V. Yakunin *et al.*, Physical Review B **102**, 165305 (2020).
10. S.S. Krishtopenko *et al.*, Nature: Scientific Reports **6**, 30755 (2016).

ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЁРДОГО ЭЛЕКТРОЛИТА $\text{Ag}_6\text{I}_4\text{WO}_4$

Д.А. Ватлин*, А.С. Истомина, О.Г. Резницких, Н.В. Урусова, Т.В. Ярославцева, О.В. Бушкова

Институт химии твёрдого тела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: d.a.vatlin@mail.ru

Высокопроводящие твёрдые электролиты, или суперионные проводники, представляют особый интерес в современных научной и технологической сферах. Они могут использоваться как компоненты твердотельных источников тока, суперконденсаторов, датчиков, источников ионов в ионно-лучевых технологиях и т.д. Проводимость твёрдых электролитов обусловлена подвижностью того или иного сорта ионов в структуре материала. Среди всех известных твёрдых электролитов только Ag^+ -проводящие материалы сохраняют суперионную проводимость при отрицательных температурах (до -60°C и ниже) благодаря низкой энергии активации ($0.1 - 0.2$ эВ). Наиболее высокими транспортными свойствами обладают суперионные проводники семейства MAg_4I_5 , типичными представителями которого являются $\alpha\text{-RbAg}_4\text{I}_5$ и твёрдые растворы $\text{CsAg}_4\text{Br}_{3-x}\text{I}_{2+x}$. Их проводимость по ионам Ag^+ при комнатной температуре составляет $\sim 0.3 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$. Однако имеются сведения о том, что оба эти электролита термодинамически неустойчивы при температурах ниже комнатной. В связи с этим актуальна задача выбора альтернативного варианта Ag^+ -проводящего суперионного проводника для использования в низкотемпературных твердотельных источниках тока.

В данной работе был синтезирован и исследован твёрдый электролит $\text{Ag}_6\text{I}_4\text{WO}_4$, также относящийся к группе суперионных проводников на основе стабилизированной фазы $\alpha\text{-AgI}$. Выполнены исследования электротранспортных свойств полученного электролита, включающие в себя измерения ионной проводимости четырёхзондовым методом и потенциала окисления методом Хэбба-Вагнера. На рис. 1 приведена схема четырёхэлектродной ячейки для измерения ионной проводимости твёрдого электролита. Значение проводимости синтезированного

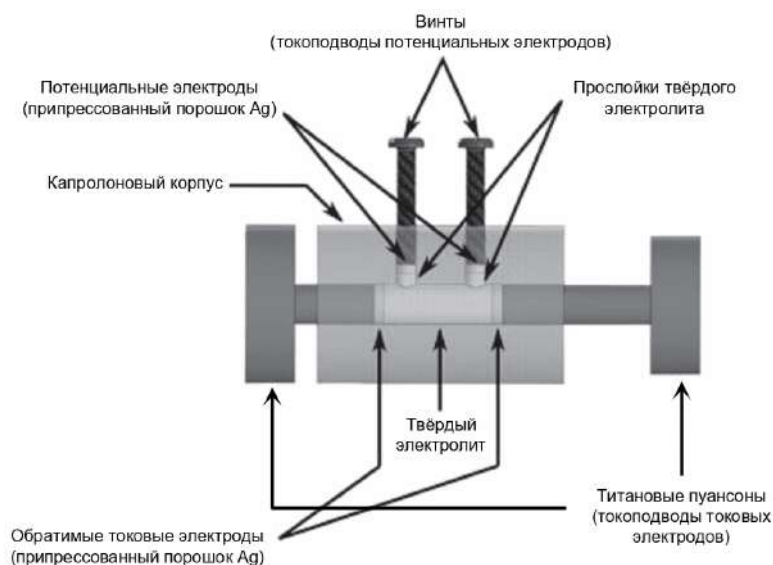


Рис. 1. Схема четырёхэлектродной ячейки для измерения ионной проводимости $\text{Ag}_6\text{I}_4\text{WO}_4$.

$\text{Ag}_6\text{I}_4\text{WO}_4$ по ионам Ag^+ составило $10^{-2} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$, что согласуется с литературными данными, полученными с использованием метода импедансной спектроскопии.

Работа выполнена в соответствии с Государственным заданием Института химии твердого тела УрО РАН (Пер. № НИОКТР 124020600047-4).

ПРИРОДА ПОДАВЛЕНИЯ ПРОВОДИМОСТИ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ФАЗАХ ОРГАНИЧЕСКИХ ИОННЫХ ПЛАСТИЧНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Д.С. Кушнир*, А.А. Хамзин

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

*e-mail: d.kushnir02@ya.ru

Органические ионные пластичные кристаллы (ОИПК) представляют собой новый класс твердотельных электролитов, обладающих значительными преимуществами перед обычными материалами, включая пластичность, негорючесть и относительно высокую ионную проводимость. В недавних экспериментах измерения спектров проводимости ОИПК $[P_{1,2,2,4}][PF_6]$ методом широкополосной диэлектрической спектроскопии был обнаружен новый релаксационный процесс в области частот АС-DC кроссовера, который приводит к резкому падению АС-проводимости при уменьшении частоты [1].

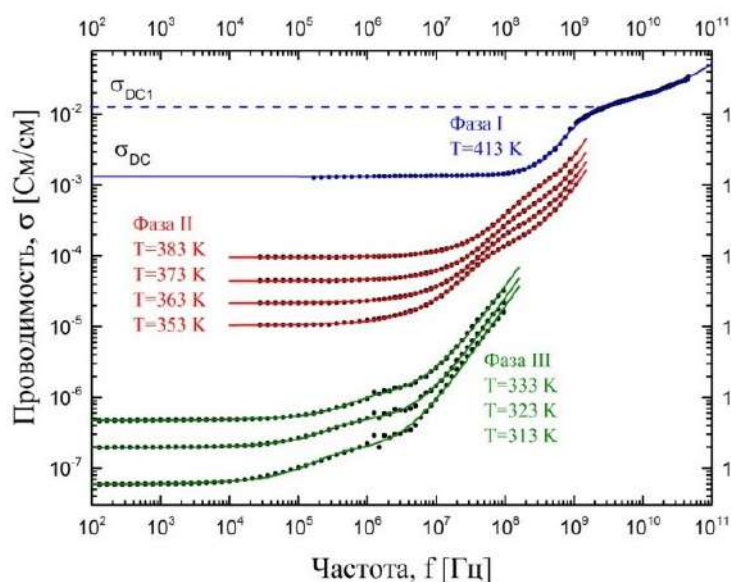


Рис. 1. Результаты численной подгонки экспериментальных спектров проводимости (символы) ОИПК $[P_{1,2,2,4}][PF_6]$ в твердотельных фазах I – III с помощью найденной в рамках разработанной модели теоретической зависимости (сплошные линии). Экспериментальные спектры проводимости получены методом широкополосной диэлектрической спектроскопии в работе [1].

быть жидкоподобные зернограничные фазы. Базируясь на этом механизме транспорта подвижных ионов и используя метод случайных блужданий, мы разработали оригинальную аналитическую модель ионной проводимости в твердотельных фазах ОИПК, которая отлично согласуется с экспериментом для ОИПК $[P_{1,2,2,4}][PF_6]$.

1. I. Popov *et al.*, J. Phys. Chem. C **127**, 15918 (2023).

Для объяснения наблюдаемого подавления динамической проводимости в твердотельных фазах ОИПК в области частот АС-DC кроссовера предлагается следующий механизм ионного транспорта. Согласно результатам моделирования молекулярной динамики и экспериментам по ядерному магнитному резонансу в ОИПК присутствует выраженная динамическая гетерогенность, проявляющаяся в наличии протяженных неупорядоченных компонент с более высокой подвижностью, которые окружают или проникают в более упорядоченные кристаллические области. Присутствие кристаллитов ограничивает диффузию мобильных ионов в неупорядоченных компонентах, которыми, к примеру, могут

МЕЖСЛОЕВАЯ ПРОВОДИМОСТЬ В УГЛАХ ЯМАДЖИ В СЛОИСТЫХ КВАЗИДВУМЕРНЫХ ПРОВОДНИКАХ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Т.И. Могилюк^{1*}, С.А. Гудин², П.Д. Григорьев^{3,4}

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

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

³Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Черноголовка, Россия

⁴Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

*e-mail: 5taras@mail.ru

В работе исследуется поведение межслоевого магнитосопротивления R_{zz} в слоистых квазидвумерных металлах в углах Ямаджи, то есть углах наклона магнитного поля, при которых наблюдается минимум межслоевой проводимости (ось z направлена перпендикулярно проводящим слоям). Рассматриваются случаи лоренцевой формы уровней Ландау, следующему из тау-приближения, и формы, соответствующей самосогласованному борновскому приближению. Предложенная модель и проведенные вычисления предсказывают зависимость $R_{zz}(B_z) \sim B^{3/2}$ для межслоевого сопротивления в углах Ямаджи в сильных магнитных полях B , что согласуется с экспериментальными данными из работы [1], в то время как прежняя «трехмерная теория» с лоренцевой формой уровней Ландау дает квадратичную зависимость $R_{zz}(B_z) \sim B^2$ [2]. Это отличие возникает из-за того, что в сильном магнитном поле правильнее использовать самосогласованное борновское приближение для описания рассеяния электронов на примесях, а не предположение о лоренцевой форме уровней Ландау (в сильном магнитном поле уже нельзя пренебрегать зависимостью времени свободного пробега электронов от силы магнитного поля). Полученное выражение для межслоевой проводимости в углах Ямаджи позволяет независимо определить из эксперимента величину $\omega_c \tau_0$ или τ_0/m^* (ω_c — циклотронная частота, τ_0 — время свободного пробега электронов, m^* — эффективная масса электронов), которую можно сравнить со значением, полученным из фактора Дингла (фактора затухания магнитных квантовых осцилляций). Материалы доклада опубликованы в [3].

1. R. Yagi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **59**, 3069 (1990).

2. R. Yagi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **60**, 3784 (1991).

3. Т.И. Могилюк и др. Письма в ЖЭТФ, **118**, 877 (2023).

ВОЗНИКНОВЕНИЕ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ В ОТСУТСТВИЕ ТОКА ЧЕРЕЗ ОБРАЗЕЦ В РЕЖИМЕ КВАНТОВОГО ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ОБРАЗЦЕ СО СЛУЧАЙНОЙ НЕЭКВИВАЛЕНТНОСТЬЮ КОНТАКТОВ

С.Д. Попов^{1*}, В.Н. Неверов¹, С.В. Гудина¹, К.В. Туруткин¹, Н.С. Сандаков¹,
И.С. Васильевский², А.Н. Виниченко²

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

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

*e-mail: staspopov2000@gmail.com

В работе [1] сообщалось о наблюдении возникновения разности потенциалов в областях магнитных полей, соответствующих плато квантового эффекта Холла (КЭХ), когда ток через образец отсутствовал, на образце со случайной неэквивалентностью контактов. В данной работе мы сообщаем о развитии этих исследований.

Исследовалась полупроводниковая гетероструктура с квантовой ямой InGaAs/InAlAs и метаморфным буфером In_xAl_{1-x}As, выращенная методом молекулярно-лучевой эпитаксии в Институте функциональной ядерной электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

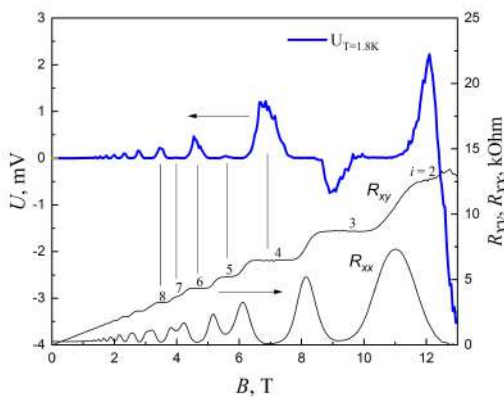


Рис. 1. (Левая ось) Напряжение, возникающее на парах контактов, в отсутствие внешнего тока в режиме КЭХ. (Правая ось) Холловское R_{xy} и продольное R_{xx} магнитосопротивления.

Измерения проводились в жидком гелии при температурах 4.2 и 1.7 К. Магнитное поле было направлено перпендикулярно плоскости двумерного электронного газа и изменялось в диапазоне от 0 до 13 Тл.

В этой работе мы сообщаем о возникновении напряжения на контактах образца в магнитных полях, отвечающих плато квантового эффекта Холла, в отсутствие тока, протекающего через образец. Так как наш образец в режиме КЭХ является топологическим изолятором, ток в магнитном поле будет протекать по краевым состояниям, не заходя в объем. В таком режиме ток будет протекать по областям, в которых находятся контакты, и из-за их несимметричности возникнет результирующий электрический сигнал.

Для объяснения возникновения напряжения на потенциальных контактах в отсутствие внешнего приложенного напряжения была предложена классическая модель взаимодействия различных

участков краевого тока, протекающего по краю образца, в области плато КЭХ.

Величина пиков напряжения, связанного с неэквивалентностью контактов, зависит от приложенного внешнего электрического тока (после вычитания вклада от тензора магнитосопротивления). Вследствие того, что данное напряжение зависит от квадрата полного тока, в то время как напряжения, связанные с магнитосопротивлением, линейны с внешним током, удалось экспериментально оценить величину краевого тока для плато с номером четыре $I_0 \approx 10 \pm 5$ мкА. Оценка из плотности состояний двумерного электронного газа дает величину $I_0 \approx 6$ мкА, что достаточно хорошо совпадает с величиной, полученной из эксперимента.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ для ИФМ УрО РАН.

1. S.V. Gudina *et al.*, Phys. Met. Metall. **125**, 137 (2024).

ЭЛЕКТРОННАЯ ПЛОТНОСТЬ СОСТОЯНИЙ, СОПРОТИВЛЕНИЕ И КРИТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА СВЕРХПРОВОДНИКА В СОЕДИНЕНИИ С ВОЛНОЙ ЗАРЯДОВОЙ ПЛОТНОСТИ И НЕИДЕАЛЬНЫМ НЕСТИНГОМ

А.В. Цветкова^{1*}, Я.И. Родионов², П.Д. Григорьев³

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

²Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, Москва, Россия

³Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Черноголовка, Россия

*e-mail: al.v.tsvetkova@yandex.ru

Существуют квазидвумерные соединения, в которых формируется несоизмеримая волна зарядовой плотности (ВЗП) с вектором нестинга $\mathbf{Q}$, в результате чего в спектре электронов открывается щель Δ [1]. В нашей работе [2] мы рассмотрели общую модель, описывающую такие соединения в модели квазиодномерного металла, и изучили ее электронные свойства в зависимости от присутствия ВЗП и величины нарушения нестинга Δ_1 .

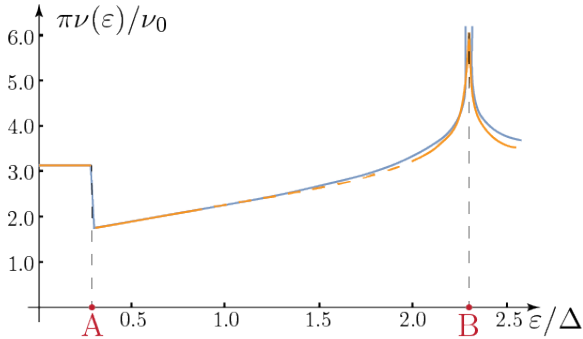


Рис. 1. Сравнение аналитического (оранжевая кривая) и численного (синяя кривая) результатов расчета электронной плотности состояний. В точке А $\epsilon = \Delta_1 - \Delta$ функция имеет скачок, в точке В $\epsilon = \Delta_1 + \Delta$ функция имеет логарифмическую расходимость.

Случай этот интересен тем, что даже в присутствии ВЗП металлическая проводимость сохраняется. Было показано, что плотность электронных состояний при определенных значениях энергии имеет две особенности: логарифмическую расходимость и разрыв первого рода. Сравнение аналитического и численного результатов представлено на рисунке 1. Наш анализ обобщает и уточняет выводы предыдущей работы [3].

На основе полученного результата численным методом также было рассчитано сопротивление соединения как функция температуры. Полученные данные качественно совпадают с экспериментальными из работы [1].

Известно, что в некоторых соединениях сверхпроводимость и ВЗП сосуществуют и оказывают влияние друг на друга, поэтому, с учетом нового

вида плотности состояний, мы провели расчет для критической температуры сверхпроводника T_c . Было показано, что присутствие антинестингового члена Δ_1 приводит к перенормировке предэкспоненты в стандартной формуле БКШ:

$$T_c = \left(\frac{\Delta_1 - \Delta}{\omega_D} \right)^{\delta\nu/\nu_0} T_0, \quad T_0 = \omega_D e^{-1/\nu_0 g}, \quad \nu_0 = \frac{1}{\pi \nu_F b}, \quad \delta\nu = \frac{1}{\pi \nu_F b} \sqrt{\frac{\Delta}{\Delta_1}}, \quad (1)$$

где ω_D — дебаевская частота, g — константа электрон-фононного взаимодействия, b — постоянная решетки. Полученные результаты применимы к системам сверхпроводников, в которых формируется ВЗП, такие как высокотемпературные купраты, органические сверхпроводники и другие соединения.

Исследование выполнено при поддержке фонда «БАЗИС», грант № 22-1-1-24-9.

1. A.A. Sinchenko *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112**, 036601 (2014).
2. A.V. Tsvetkova *et al.*, arXiv preprint arXiv:2501.00341 (2024) (to be published).
3. P.D. Grigoriev, Phys. Rev. B **77**, 224508 (2008).

РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕМЕНТИТА Fe_3C МЕТОДАМИ РЕЗОНАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Е.В. Суворкова*, К.Н. Михалев, А.Ю. Гермов, Д.А. Прокопьев, М.А. Уймин

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

*e-mail: e.v.suvorkova@mail.ru

Цементит, или θ -карбид железа Fe_3C , является составляющей многих углеродистых сталей. В данной работе он был получен методом механосинтеза. Орторомбическая структура цементита (*Pnma*) содержит две кристаллографически неэквивалентных позиции железа (Fe1 , Fe2). Ранние исследования по данным мессбауэровской спектроскопии сообщают противоречивые результаты [1-4], в некоторых из которых экспериментально наблюдают лишь один секстет, что свидетельствует о магнитной эквивалентности этих двух позиций. Использование современных высокоточных методов исследования, таких как ядерный магнитный резонанс (ЯМР), поможет прояснить детали магнитной структуры цементита.

Спектры ЯМР ^{57}Fe исследуемого образца Fe_3C в локальном поле представляют собой неоднородно уширенные ассиметричные линии, являющиеся суперпозицией двух гауссовых линий, соответствующих неэквивалентным кристаллографическим позициям Fe1 и Fe2 . При комнатной температуре значения сверхтонких полей для этих позиций составляют 201 и 208 кЭ соответственно. В среднем в исследуемом диапазоне температур 4.2 – 350 К разница между положениями максимумов двух линий составляет около 7 кЭ. Аналогичная зависимость наблюдается в работах [1,4]. Из анализа температурной зависимости ларморовской частоты также был определен критический индекс $\beta = 0.19$. Это существенно отличается от характерного для ферромагнетиков в модели Гейзенберга $\beta = 0.33$, что, возможно, связано с анизотропией обменных взаимодействий в этом соединении.

Спектры мессбауэровской спектроскопии ^{57}Fe , полученные при комнатной температуре, также представляют собой суперпозицию двух секстетов со сверхтонкими полями 195 кЭ и 210 кЭ, близкими к литературным [4]. Значение квадрупольного расщепления (0.05 и 0.02 мм/с соответственно) намного меньше, чем расчетное или полученное в парамагнитной фазе [1] тем же методом. Существует две гипотезы, объясняющие это различие: изменение зарядового окружения в магнитоупорядоченной фазе или наличие угла, близкого к магическому, между направлением градиента электрического поля (ГЭП) и электронными магнитными моментами атомов железа. Второе удалось опровергнуть получением мессбауэровских спектров во внешнем магнитном поле $H = 6$ кЭ, которые оказались практически идентичны спектрам, полученным без внешнего поля.

Таким образом, использование ЯМР совместно с мессбауэровской спектроскопией позволило разрешить противоречия в имеющихся результатах о значении сверхтонких полей двух неэквивалентных позиций атомов железа в цементите. Также установлено, что уменьшение величины квадрупольного расщепления не связано с возможным магическим углом между магнитными моментами атомов железа и направлением ГЭП.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

1. G. Le Caer, J. M. Dubois, J. P. Senateur, J. Solid State Chem. **19**, 19 (1976).
2. B. David *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **217**, 012097 (2010).
3. H. Bernas, I.A. Campbell, R. Fruchart, J. Phys. Chem. Solids **28**, 17 (1967).
4. X. W. Liu *et al.*, Sci. Rep. **6**, 26184 (2016).

СТРУКТУРНЫЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЁРДЫХ ТЕЛ

Влияние концентрации азота в среде напыления на структурные параметры тонких пленок NiO

М.С. Артемьев*, В.В. Изюров, С.С. Дубинин, А.П. Носов

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

*e-mail: cccp9697@mail.ru

Оксид никеля NiO представляет собой легкоплоскостной антиферромагнетик второго типа ($S = 1$) с температурой Нееля $T_N = 523$ К. NiO имеет кристаллическую структуру типа NaCl (пространственная группа $Fm\bar{3}m$) с параметром элементарной ячейки $a = 4.182$ Å [1]. Предполагается, что эффект замещения анионов в NiO, например, азотом (N) значительно изменит локальные электронные и магнитные взаимодействия, учитывая более обширную $2p$ -орбиталь и на один электрон меньше в N по сравнению с O. Замещение анионов с использованием N и углерода (C) в различных материалах нашло применение в области фотоники и квантовой информации. Ключевыми среди них являются квантовые датчики [2], что вызвало непосредственный интерес в изучении данного эффекта.

Для проведения исследовательских работ с NiO:N необходимо получить образцы высокого качества, а также рассмотреть как разная концентрация азота будет влиять на их свойства. Пленки NiO получали методом магнетронного распыления стехиометрической мишени на переменном токе в атмосфере с соответствующим соотношением аргона и азота. В процессе распыления температура подложки из $c\text{-Al}_2\text{O}_3$ составляла 473 К.

Рентгеноструктурные исследования проводили с использованием дифрактометра PANalytical Empyrean. Измеряли спектры рентгеновской дифракции в копланарной геометрии.

На основе полученных рентгеноструктурных данных была построена зависимость представленная на Рис. 1. Включение атомов N привело к увеличению

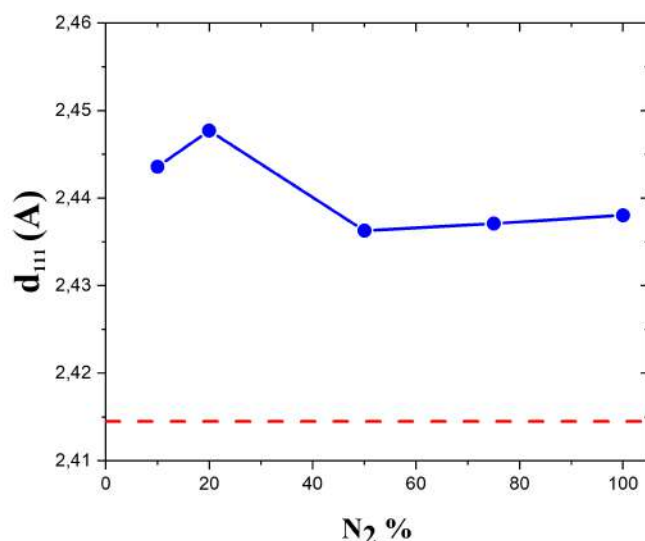


Рис. 1. Зависимость межплоскостных расстояний тонких пленок NiO от концентрации азота в среде напыления (сплошная линия), пунктирной линией представлено значение для объемного NiO.

межплоскостных расстояний, что хорошо согласуется с известными данными [3], но тенденция роста не непрерывна, как ожидалось, что требует дальнейших исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

1. M.I. Aivazov, *et al.*, Inorganic Materials. **7**, 1389 (1971).
2. S. Godin *et al.*, arXiv preprint arXiv. **2412**, 19250 (2024).
3. J. Keraudy *et al.*, Applied Surface Science **409**, 77 (2017).

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА СИСТЕМЫ $(\text{Cu}_2\text{Se})_n\text{TiSe}_2$

Л.Е. Горбов*, А.А. Титов, Е.Г. Шкварина

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

*e-mail: levgorbov@mail.ru

Интеркалатные соединения и слоистые дихалькогениды способны входить в состав модульных соединений, при этом их роль в таких соединениях малоизучена. Ранее изученные модульные соединения $(\text{Cu}_2\text{Se})_n\text{TiSe}_2$ ($n = 0.5; 1; 2$), обладают малой теплопроводностью ($0.3 - 0.47 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$) и широкой запрещенной зоной ($\approx 1.61 \text{ eV}$), также представляет интерес само конструирование этих материалов. Целью данной работы стояло синтезировать и изучить свойства модульных соединений халькогенидов металлов Cu и Ti, а также влияние методики синтеза на свойства полученных соединений.

Для этого методом твердофазных реакций в вакуумированных кварцевых ампулах были получены соединения Cu_2Se , TiSe_2 и Cu_4TiSe_4 обладающие пространственными группами $R\bar{3}m$; $P\bar{3}m1$; $P\bar{4}3m$, соответственно. Аттестация кристаллической структуры проводилась на дифрактометре Shimadzu XRD 7000 Maxima (излучение $\text{Cu K}\alpha_1$, графитовый монохроматор, $2\Theta = 10 - 90^\circ$) в ЦКП "Урал-М" (Института металлургии УрО РАН) с использованием метода порошковой рентгеновской дифракции. Cu_4TiSe_4 был синтезирован новым методом, из матриц Cu_2Se и TiSe_2 , в его структуре обнаружена дефектность по меди.

В данной работе изучаются и обсуждаются свойства фазы, а также исследуется замещение титана на цирконий и другие сочетания TiSe_2 Cu_2Se .

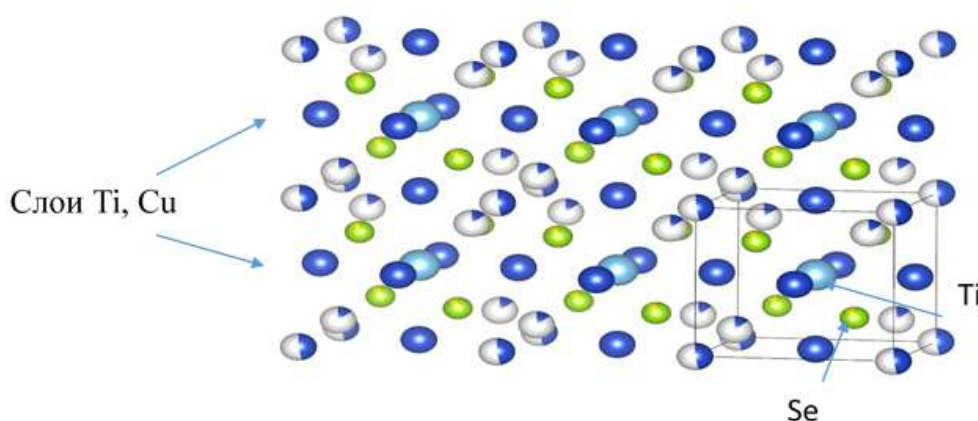


Рис. 1. Фрагмент кристаллической решетки $(\text{Cu}_2\text{Se})_n\text{TiSe}_2$.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

1. A. Lakshan *et al.*, Chemistry of Materials **36**, 5741 (2024).

СИНТЕЗ И КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА Fe_xZrSe_2 Е.Г. Дьячков^{1,2*}, А.С. Шкварин¹, А.А. Титов¹, С.В. Пряничников³, А.Н. Титов¹¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия²Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия³Институт металлургии им. академика Н.А. Ватолина УрО РАН, Екатеринбург, Россия*e-mail: pi31415@mail.ru

Дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) — это широкий классом материалов, с рядом фундаментальных свойств, а также с перспективами практических применений. Кристаллическая структура этих материалов, состоящая из так называемых «сэндвичей» $Ch - TM - Ch$ (Ch — халькоген, TM — переходный металл) с сильной связью между атомами в «сэндвиче» и слабой между самими «сэндвичами» позволяет внедрять в межслоевое пространство различные атомы или молекулы. Отдельный интерес к этой системе представляет явление ретроградной растворимости, позволяющее выделять наноструктурные включения непосредственно в межслоевом пространстве решетки матрицы [1]. Нами установлено наличие явления ретроградной растворимости для железа [2] в диселениде и дисульфиде титана. Обе эти матрицы являются полупроводниками, с разной щелью. С практической точки зрения было бы интересно получить магнитные включения в непроводящей матрице. В качестве такой матрицы была выбрана матрица ZrSe_2 , в которой наблюдается запрещенная щель примерно 0.8 эВ.

Синтез образцов был выполнен стандартным методом твердофазных реакций в откачанных и запаянных ампулах. Синтез был выполнен в несколько этапов. На первом этапе проводился синтез ZrSe_2 из исходных элементов. После получения матрицы в нее добавлялось необходимое количество железа. Далее синтез выполнялся при температуре 900 °С в течение недели. После этого производилась гомогенизация и повторный отжиг. Структуру и фазовый состав полученных поликристаллов изучали с использованием рентгеновской порошковой дифракции (XRD) на дифрактометре Shimadzu XRD 7000 Maxima (излучение $\text{Cu K}\alpha_1$, графитовый монохроматор, $2\theta = 10 - 90^\circ$) в ЦКП "Урал-М" (Института металлургии УрО РАН).

Установлено, что в образцах наблюдаются пики основной фазы (пространственная группа $R\bar{3}m1$), пики ZrSiO_4 (результат взаимодействия образца со стенками ампулы), пики ZrO_2 (возможно из исходного Zr) и небольшие пики недорастворившегося (или выделившегося в результате ретроградной растворимости) железа.

Для полного растворения железа был выполнен отжиг образцов при температуре 1050 °С в течение 8 часов. Индицирование полученных дифрактограмм показало наличие пиков основной фазы, фазы ZrSiO_4 и фазы ZrO_2 . Пиков железа не наблюдается. Полнопрофильное уточнение показало, что поведение параметров решетки типично для дихалькогенидов, интеркалированных железом. Наблюдается сжатие решетки в направлении оси c до состава примерно $\text{Fe}_{0.25}\text{ZrSe}_2$, после чего наблюдается рост параметра c .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и правительства Свердловской области (проект № 24-23-20029, соглашение 5-24-МГ).

1. A. N. Titov *et al.*, J. Phys. Chem. Lett. **9**, 5183 (2018).
2. E. G. Shkvarina *et al.*, J. Struct. Chem. **57**, 710 (2016).

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕЧАТИ НА ПЛОТНОСТЬ ОБРАЗЦОВ СПЛАВА Ti – 6Al – 4V, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

И.В. Казаков*, Н.В. Казанцева, И.В. Ежов, Н.А. Сахаров, М.В. Ильиных, М.С. Плотников

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

*e-mail: kazakov.ivan.99@inbox.ru

Выбор режима работы лазерного 3D принтера и качество исходного порошка оказывают существенное влияние на плотность и дефектность получаемого изделия. Неоптимальные параметры процесса и сложность равномерной укладки порошкового слоя в процессе изготовления образцов методом селективного лазерного сплавления приводят к производству менее плотных изделий по сравнению с традиционными методами производства. Пористость в виде микродефектов, нерасплавленного порошка и пустот служит фактором повышения напряжения, который оказывает непосредственное влияние на механические свойства изделия.

В этом исследовании изготавливались образцы методом селективного лазерного сплавления (СЛС) из порошка титанового сплава Ti – 6Al – 4V с разными параметрами печати 3D принтера 0NSINT AM150. Использовался порошок сферической формы с фракцией 45-100 мкм, химический состав приведен в таблице 1. Насыпная плотность порошка составляла 2.7 г/см³. Для печати образцов изменялись 3 параметра: мощность лазера, скорость и схема сканирования лазера.

Таблица 1. Химический состав сплава Ti – 6Al – 4V, ат.%

Ti	Al	V	Zr	Si	Fe	O	H	N	C
Осн.	5.3 - 6.8	3.5 - 5.3	<0.3	<0.1	<0.6	<0.2	0.015	<0.05	<0.1

Плотность СЛС-образцов измерялась методом Архимеда. С помощью оптического микроскопа Микромед Мет проводилось исследование макроструктуры для сравнения ванны расплава и дефектности СЛС-образцов, изготовленных при разных режимах печати.

В результате была установлена корреляция между плотностью СЛС-образцов и изменением основных параметров печати. Построено окно оптимальных параметров печати образца с наилучшей плотностью. Проводится обсуждение полученных результатов и сравнение их с литературными данными.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА Ti – 6Al – 7Nb ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ТРЕХТОЧЕЧНЫЙ ИЗГИБ

К.Ю. Карамышев*, И.В. Ежов, Н.В. Казанцева, Д.И. Давыдов, С.В. Афанасьев, Н.А. Сахаров

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

*e-mail: karamyshev.imp@mail.ru

Исследованы механические свойства в промышленных цилиндрических образцах Ti – 6Al – 7Nb после трехточечного изгиба при комнатной температуре. Трехточечный изгиб цилиндрических образцов Ti – 6Al – 7Nb проводили при комнатной температуре на универсальной испытательной машине Instron 5982. Погрешность определения перемещения траверсы составляет 1 микрон, а погрешность измерения силы во всем диапазоне до 100 кН - менее 10 Н (данные производителя). Диаметр опорных роликов составлял 10 мм, скорость траверсы 2 мм/мин. Длина образца и расстояние между опорами при испытаниях подбирались с учетом стандарта испытаний на изгиб [1].

Установлено, что промышленные образцы Ti – 6Al – 7Nb изгибались без разрушения до максимального угла испытания. Исследуемые образцы были вырезаны из прутков промышленного сплава Ti – 6Al – 7Nb. Химический состав сплава Ti – 6Al – 7Nb (ASTM F 1295) [2] приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав сплава Ti – 6Al – 7Nb, масс.%

Ti	Al	Nb	Fe	Ta	O ₂
Осн.	5.5 - 6.5	6.5 - 7.5	<0.25	<0.5	0.2

Также исследованы структура и фазовый состав деформированного промышленного канюлированного винта, изготовленного из сплава Ti – 6Al – 7Nb (DePuySynthes, Швейцария). В данной работе исследовался канюлированный винт, который был извлечен из тела реального пациента во время операции. В представленной работе не проводились медицинские клинические исследования. Недеформированная область канюлированного винта считалась эталонной. Длина винтов составляла 125 мм, диаметр 7.3 мм. После деформации в винте и в цилиндрических образцах обнаружено уменьшение объемной доли β -фазы. Проведено компьютерное моделирование изгибной деформации канюлированного винта Ti – 6Al – 7Nb. Рассчитана минимальная сила, обеспечивающая изгибную деформацию канюлированного винта.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-79-01244.

- ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Стандартинформ (2008).
- Standard: ASTM F1295-2016. Standard Specification for Wrought Titanium-6Aluminum-7Niobium Alloy for Surgical Implant Applications (UNS R56700). – West Conshohocken, PA.: ASTM International (2016).

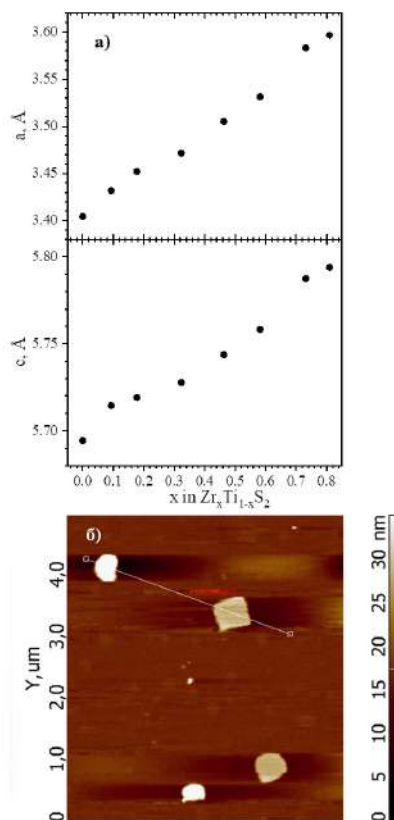
КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И МОРФОЛОГИЯ $Zr_xTi_{1-x}S_2$ А.Ю. Кузнецова^{1*}, А.И. Меренцов¹, Ю.В. Корх¹, Е.В. Таркаева², А.Н. Титов¹¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия*e-mail: cuznecova89634485295@mail.ru

Рис. 1. а) Концентрационная зависимость параметров элементарной ячейки a и c системы $Zr_xTi_{1-x}S_2$; б) Топография монокристалла

Морфология кристаллов твердых растворов замещения $Me_xTi_{1-x}Ch_2$ ($Me = V, Cr, Zr$; $Ch = S, Se$) представляет собой интерес благодаря формированию структурных фрагментов в пределах одного монокристалла при сохранении однофазности материала [1,2]. В работе [3] показано, что в системе $Zr_xTi_{1-x}S_2$ происходит перенос заряда между структурными фрагментами. Стабильность материала достигается благодаря кулоновскому взаимодействию между структурными фрагментами.

Методом твердофазного ампульного синтеза из прекурсоров TiS_2 и ZrS_2 впервые получена система $Zr_xTi_{1-x}S_2$ ($0 < x \leq 0.8$). Синтез выполнен при $T = 1000$ °C в течение 72 часов. Поликристаллические образцы аттестованы методом рентгеноструктурного анализа. Уточнение параметров кристаллической структуры по методу Ритвелда выполнено в программном пакете GSAS. Параметры a, c элементарной ячейки (рис.1а) монотонно увеличиваются, что говорит о хорошей взаимной растворимости ZrS_2 в TiS_2 . Методом газотранспортной реакции выращены монокристаллы $Zr_xTi_{1-x}S_2$ ($0 < x < 0.5$). Морфология и химический состав монокристаллов изучены с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Элементный анализ, а также уточнение атомных позиций показывает наличие самоинтеркалированного титана во всех исследованных образцах. Увеличение содержания циркония приводит к переходу самоинтеркалированного титана из тетра- в окта-позиции в межслоевом пространстве. Методом сканирующей зондовой микроскопии получена топография монокристаллов $Zr_xTi_{1-x}S_2$ ($x = 0.25, 0.5$). Внутри наблюда-

ются включения высотой от 20 до 50 нм и диаметром от 0.5 до 1 мкм. Электрическое сопротивление поликристаллических образцов $Zr_xTi_{1-x}S_2$ ($0 < x < 0.6$) измерено на постоянном токе в диапазоне температур 14 – 300 К. Увеличение содержания циркония приводит к переходу металл-диэлектрик, связанному с увеличением ширины запрещённой зоны при переходе от TiS_2 к ZrS_2 .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и правительства Свердловской области (проект РНФ № 24-23-20136, соглашение 9-24-МГ).

1. A.I. Merentsov *et al.*, J. Phys. Chem. Solids. **160**, 110309 (2022).
2. A.S. Shkvarin *et al.*, J. Phys. Chem. C **126**, 7076 (2022).
3. A.I. Merentsov *et al.*, J. Chem. Phys. **162**, 044704 (2025).

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЛАВА АМг5, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ MIG СВАРКИ

А.О. Курышев^{1*}, И.Г. Бродова¹, И.Г. Ширинкина¹, В.В. Астафьев¹, Ю.С. Коробов^{1,2},
А.О. Коротеев³, А.Ю. Мельников²

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

²Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

³Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь

*e-mail: Kuryshev@imp.uran.ru

Аддитивное производство — это процесс создания на основе цифровой модели объекта или детали путем послойного добавления материала. Одним из вариантов является метод аддитивного дугового выращивания проволоки (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM) с применением роботизированной MIG сварки [1]. Среди материалов, для которых разрабатываются аддитивные технологии, Al сплавы занимают одно из основных мест. Активно применяют различные системы, например, Al – Mg, Al – Mg – Zn – Cu и др. [2]. Например, сплав АМг5 — это сплав на основе Al, легированный Mg с массовой долей до 6 % и небольшим содержанием Mn, Si и Fe. Наличие в составе сплава Si и Mg повышает твёрдость и прочность сплава по сравнению с чистым Al благодаря выделению кристаллов упрочняющей фазы Mg₂Si. Изделия из сплава АМг5 активно применяют в создании металлоконструкций средней нагруженности, а малый вес изделий востребован в судостроительной и космической отрасли [3].

Методом WAAM с применением роботизированной MIG сварки, проволока СвАМг5 ГОСТ 7871-2019, при варьировании тока от 90 до 130 А и скорости подачи проволоки от 2.3 до 4.9 м/мин были аддитивно выращены детали в виде полых цилиндров ($D \times d \times h$ 120 × 80 × 100 мм) и прямоугольных призм ($D \times Ш \times В$ 100 × 30 × 100 мм). На макроуровне структура представлена равномерными линиями наплавки, более крупными и грубыми, чем треки внутри линий, имеющие изогнутую форму и меньший размер. Микроструктура образцов представлена в основном мелкими равноосными зёрнами со средним размером от 40 до 90 мкм, также на границах треков видны вытянутые зерна с размером 360 × 70 мкм. С помощью EBSD анализа установлено, что на микроуровне образцы имеют иерархическую структуру, состоящую из зёрен размером 40 мкм со сверхтонкой сеткой ячеистой субструктуры правильной сферической формы со средним размером 50 нм. РСА и энергодисперсионный анализ подтвердили, что фазовый состав образцов при всех режимах наплавки практически одинаков и представляет собой матрицу, состоящую из Al твёрдого раствора. Разница размеров зерна при разных режимах очень незначительна. Испытания на растяжения проводились на стандартных цилиндрических образцах, вырезанных в двух сечениях (вертикальном и горизонтальном). Полученные данные показали, что прочностные свойства сопоставимы и находятся в пределах $\sigma_B \sim 270 - 280$ МПа и $\sigma_{0.2} \sim 120 - 130$ МПа. Сравнивая прочностные свойства образцов, полученных методом WAAM с применением MIG сварки, со свойствами изделий металлопроката из сплава АМг5, можно сказать, что свойства полученных деталей превышают прочностные показатели изделий, полученных традиционными методами на 10% по сравнению с трубами, профилями, плитами и на 15% по сравнению с прутками.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

1. K. Treutler, Applied Sciences, **11**, 8619 (2021).
2. A. A. Batch. Technical science **17**, 8 (2022).
3. Н. П. Алешин. Сварка и диагностика, **3** (2022).

АНАЛИЗ НЕУПРУГИХ ПРОЦЕССОВ В РАМКАХ ТЕОРИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЕФЕКТОВ

В.В. Малашенко

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, Донецк, Россия

e-mail: malashenko@donfti.ru

При высокоэнергетических внешних воздействиях на металлы и сплавы возникает высокоскоростная пластическая деформация этих материалов. Это происходит как на стадии их обработки (динамическое канально-угловое прессование, высокоскоростная обработка, ковка, штамповка, резка), так и на стадии эксплуатации [1,2]. При высокоскоростной деформации скорость движения дислокаций, вносящих главный вклад в течение неупругих процессов и формирование механических свойств сплавов, может составлять сотни и даже тысячи метров в секунду. Для решения широкого круга задач дислокационной динамики весьма эффективной оказалась развитая нами теория динамического взаимодействия дефектов (ДВД) [3-6], основанная на модифицированной струнной модели Гранато-Люкке. В динамической области скоростей основным механизмом диссипации энергии движущейся дислокации становится переход энергии внешних воздействий в энергию поперечных дислокационных колебаний в плоскости скольжения. В рамках теории ДВД сила динамического торможения дислокации структурными дефектами, определяющая механические характеристики кристалла, может быть вычислена по формуле

$$F = \beta \int d^3q |q_x| |\sigma_{xy}(q)|^2 \delta(q_x^2 v^2 - \omega^2(q_z)),$$

где β — константа, зависящая от упругих модулей кристалла, $\sigma_{xy}(q)$ — Фурье-образ компоненты тензора напряжений, создаваемых структурными дефектами, $\omega(q_z)$ — спектр дислокационных колебаний. Сила динамического торможения дислокаций весьма чувствительна к виду спектра дислокационных колебаний, в частности, к наличию в нем щели. Спектральная щель может возникнуть как в результате коллективного взаимодействия растворенных атомов с дислокацией, так и в результате коллективного взаимодействия остальных дислокаций ансамбля с этой дислокацией, а также в результате взаимодействия дислокаций с поверхностью в приповерхностном слое и с магнитной подсистемой в кристаллах с гигантской магнитострикцией. Теория ДВД позволила в рамках единого подхода объяснить экспериментальные зависимости динамического предела текучести металлов и сплавов от концентрации точечных дефектов и параметра их несоответствия, плотности дислокаций, скорости пластической деформации. Были предсказаны динамические эффекты, проверка которых требует постановки новых целенаправленных экспериментов. К тому же теория ДВД позволила выявить ряд общих черт динамического поведения систем совершенно разной физической природы.

Таким образом, развитая нами теория динамического взаимодействия дефектов является эффективным инструментом анализа неупругих процессов в металлах и сплавах в условиях высокоскоростной деформации и позволяет получать аналитические выражения зависимости механических свойств кристаллов от характеристик структурных дефектов.

1. D. Batani, EPL **114**, 6500 (2016).
2. A.V. Yanilkin *et al.* International J. Plasticity **55**, 94 (2014).
3. В.Н. Варюхин, В.В. Малашенко, Известия РАН. Серия физическая, **82**, 37 (2018).
4. V.V. Malashenko, Physica B: Phys. Cond. Mat. **404**, 3890 (2009).
5. В.В. Малашенко, Кристаллография **54**, 312 (2009).
6. В.В. Малашенко, ФТТ **66**, 1403 (2024).
7. В.В. Малашенко, ФТТ **66**, 1983 (2024).

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХ МОДЕЛЕЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ Fe_2CrSe_4

М.В. Мамонова*, К.С. Кондрашова

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

*e-mail: mamonovamv@omsu.ru

Среди халькогенидов переходных металлов соединение Fe_3Se_4 рассматривается как перспективная основа для создания постоянных магнитов, не содержащих редкоземельных элементов. Замена железа хромом в $\text{Fe}_{3-x}\text{Cr}_x\text{Se}_4$ приводит к значительным изменениям магнитных и транспортных свойств. Соединение Fe_2CrSe_4 обладает большим коэрцитивным полем (полуширина петли гистерезиса достигает 15 кЭ при 2 К) и значительным эффектом обменного смещения при температуре ниже 50 К. Предполагается, что обменное смещение в Fe_2CrSe_4 является результатом присутствия областей (кластеров) с короткодействующими корреляциями в ферромагнитной матрице из-за неоднородного распределения атомов железа и хрома по решетке [1].

В работе [1] был исследован поликристаллический образец Fe_2CrSe_4 , синтезированный в виде кристалла. Кристаллическая структура образца была уточнена в моноклинной сингонии с использованием двух моделей (модель I - пространственная группа $I2/m$) и модель II - пространственная группа $B2$. Атомы переходных металлов ($M = \text{Fe}$ или Cr) в Fe_2CrSe_4 расположены внутри октаэдров $M1\text{-Se}_6$ и $M2\text{-Se}_6$, образованных шестью атомами Se, в полных слоях ($M1$) и в слоях с вакансиями ($M2$). Параметры системы для первой модели: $a = 6.216 \text{ \AA}$; $b = 3.568 \text{ \AA}$; $c = 11.511 \text{ \AA}$; $\beta = 91.35^\circ$; $\gamma = 90.0^\circ$; для второй модели: $a = 12.951 \text{ \AA}$; $b = 6.215 \text{ \AA}$; $c = 3.567 \text{ \AA}$; $\beta = 90.0^\circ$; $\gamma = 117.32^\circ$.

Цель данной работы в рамках первопринципного подхода метода функционала плотности проверить, какая из двух представленных моделей соединения будет наиболее энергетически выгодной. Расчеты проводились с использованием программного пакета VASP [2].

Были рассчитаны значения полной энергии суперъячейки для двух вариантов расчетов: без оптимизации, т.е. при изменении положения атомов с сохранением формы и размера ячейки, и с оптимизацией, т.е. с изменением формы и размера ячейки. Расчеты проводились с учетом коллинеарного магнетизма с направлением намагниченности для всех атомов вдоль оси Oz. Оптимизация повлияла незначительно, значения векторов изменились менее, чем на 3.5 %, значительное изменение произошло для угла γ для второй модели на 25 %. Значения полной энергии и намагниченности для двух моделей отличается менее чем на 1 %.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что более энергетически выгодной будет модель II с оптимизацией. Однако близкие значения полной энергии подтверждают возможность реализации обеих моделей.

1. V.A. Komarova *et al.*, J. of Magnetism and Magnetic Materials. **588**, 171511 (2023).
2. P.G. Kresse, J.Furthmuller, Phys. Rev. B **16**, 11169 (1996).

ЗАВИСИМОСТЬ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ ПРИ МЕГАПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ЭНЕРГИИ АФГ

Д.И. Мелкозеров^{1*}, Д.А. Сосян¹, В.П. Пилюгин¹, К.А. Постовалова¹, Ю.В. Соловьева²

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

²Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

*e-mail: melkozerv.denis.s@gmail.com

В современной металлургии особый интерес представляют материалы с аномальным температурным поведением прочностных характеристик в области высоких температур — представители группы $L1_2$. Данные сплавы являются перспективным материалом для производства авиационной и ракетной техники, и применения в металлургии. Особенности пластической деформации данных материалов, особенно под высоким давлением, еще не были досконально изучены. Представляет интерес поведение сплавов группы $L1_2$ с различными энергиями антифазных границ (АФГ).

Целью работы было изучение зависимости механизмов формирования структуры монокристаллических интерметаллидов группы $L1_2$ при мегапластических деформациях от величины энергии АФГ.

Объектом исследования в работе послужили монокристаллы никелевых сплавов Ni_3Ge , Ni_3Al , Ni_3Fe . Выбор сплавов был обусловлен различиями в величинах энергии АФГ – сплавы Ni_3Ge и Ni_3Al обладают энергиями АФГ в 4-5 раз выше, чем сплав Ni_3Fe . На твердосплавных (ВК-6) вращаемых наковальнях Бриджмена при температуре 293 К деформировали монокристаллические образцы Ni_3Al , Ni_3Ge и Ni_3Fe методом кручения под высоким квазигидростатическим давлением 8 ГПа.

В результате проведенных исследований были изучены особенности формирования субструктур Ni_3Ge , Ni_3Al и Ni_3Fe в условиях интенсивной пластической деформации. Величина энергии АФГ оказывает существенное влияние на процессы деформационной фрагментации субструктуры монокристаллов с $L1_2$ сверхструктурой. Методом дифракции с использованием синхротронного излучения получены дифракционные картины. Наблюдается выраженная зависимость скорости процессов деформационной фрагментации от величины энергии АФГ. Показано, что чем выше энергия АФГ, тем более затруднены процессы деформационной фрагментации и накопления разориентировок. Методом просвечивающей электронной микроскопии изучена микроструктура Ni_3Ge и Ni_3Al . Показано, что в обоих случаях после деформации кручением на 180° поликристаллическая структура формируется в тонком приповерхностном слое кристалла, в объеме кристалла сохраняется крупнокристаллическая составляющая структуры с различной степенью и особенностями фрагментации в зависимости от величины энергии АФГ. Выяснено, что в приповерхностном поликристаллическом слое наблюдается полное разрушение дальнего атомного порядка, а внутри деформированного кристалла упорядоченное расположение атомов сохраняется. В сплаве с высокой энергией АФГ (Ni_3Ge) формируется многоуровневая структура, состоящая из микрополосовых фрагментов и несовершенных нанофрагментов в сетчатой субструктуре с высокой плотностью дислокаций. Для Ni_3Fe в объеме кристалла наблюдается выраженная фрагментированная субструктура, представлена четырехугольными фрагментами с размерами в диапазоне 250÷500 нм, границы которых совпадают со следами плоскостей скольжения с кристаллографическими индексами $\{111\}$.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗО-ДИСУЛЬФИД ЦИРКОНИЯ

М.А. Михайлов^{1*}, К.А. Меренцова², А.А. Титов²¹Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия²Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: mih_mih_05@mail.ru

Внедрение железа и других переходных металлов в межслоевое пространство слоистых дихалькогенидов переходных металлов обычно приводит к сжатию решётки в направлении перпендикулярном слоям [1]. При этом растворимость железа носит ретроградный характер [2], то есть уменьшается с ростом температуры реакции. В настоящей работе изучается внедрение железа в дисульфид циркония. Реакция внедрения проводилась в вакуумированных кварцевых ампулах. Аттестация полученных керамик производилась методом порошковой дифрактометрии. Дифрактограммы полученных образцов индицировались в той же пространственной группе, что и исходный дисульфид циркония. Зависимость параметров элементарной ячейки дисульфида циркония от содержания в нём железа приведена на рисунке 1.

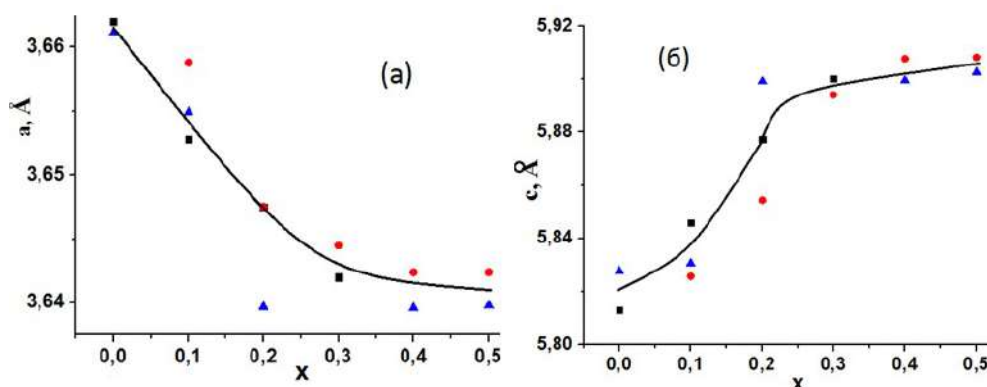


Рис. 1. Зависимости параметров элементарной ячейки дисульфида циркония от содержания железа x , в мольных долях. Линии проведены произвольно. На рисунке (а) представлена зависимость длины ребра основания элементарной ячейки от содержания железа. На рисунке (б) представлена зависимость высоты элементарной ячейки от содержания железа. Чёрные квадраты — синтез при 750°C, красные круги — тоже при 750°C с дополнительным гомогенизационным отжигом, синие треугольники — синтез при 1200°C.

По полученным в ходе аттестации образцов данным можно сделать следующие выводы. Железо удалось растворить в дисульфиде циркония. Зависимость высоты элементарной ячейки от содержания железа (рис. 1.б) не демонстрирует сжатия решётки в направлении, перпендикулярном слоям, что может свидетельствовать об отсутствии ретроградного характера растворимости железа в дисульфиде циркония; поскольку во всех известных интеркалатных системах с ретроградной растворимостью такое сжатие есть [1]. В работе приводятся и обсуждаются кристаллическая структура и физические свойства исследуемой системы.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Спин», № 122021000036-3).

1. А.В. Куранов, ФТТ **42**, 11 (2000).

2. А.Н. Титов, ФТТ **58**, 4 (2016).

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ В АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛАХ В УСЛОВИЯХ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

К.А. Мушанкова*, Л.В. Степанова

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева, Самара, Россия

*e-mail: karinamushankova@yandex.ru

В работе приведен анализ атомистических полей напряжений у вершины трещины в пластине с центральным дефектом. В статьях [1,2] было проведено исследование упругого режима деформирования, где было получено согласование решения Уильямса, обобщенного на случай анизотропной симметрии упругих свойств [3], и дискретного решения, полученного посредством атомистического моделирования в программном пакете Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator. Целью данной работы является получение картины полей напряжений при нелинейном режиме деформирования для материалов с кубической сингонией свойств и дальнейшее сравнение результатов с известными решениями механики сплошных сред. Было проведено моделирование пластинки размером $100 \times 100 \times 3$ с центральной трещиной длины 10 в единицах параметра решетки ($3.615 \text{ \AA}$ для исследуемой меди).

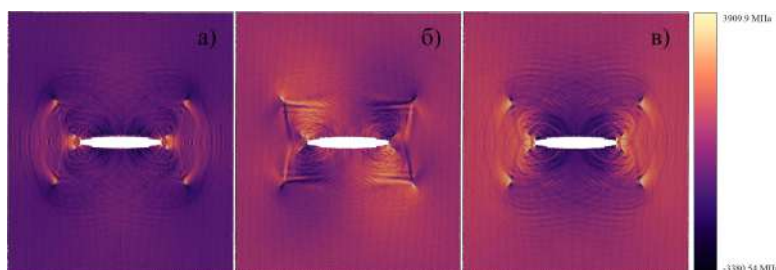


Рис. 1. Картины полей напряжений: а) компонента тензора напряжений σ_{11} , б) σ_{12} , в) σ_{22}

пластической деформации, поскольку поля вблизи вершины трещины существенно отличаются от распределений, характерных упругому режиму. Приведенные картины напряжений явственно свидетельствуют о наличии пластического деформирования вблизи кончика трещины. Впервые построены угловые распределения компонент тензора напряжений вблизи вершин трещин на атомистическом уровне. Продемонстрирована близость угловых распределений на наноскопическом и макроскопическом уровнях.

Проведенный анализ полей напряжений на атомистическом уровне будет использован для сращивания полей напряжений, деформаций и перемещений на различных масштабных уровнях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 25-21-00272).

1. L.V. Stepanova, K.A. Mushankova, Theoretical and Applied Fracture Mechanics **133**, 104613 (2024).
2. Л.В. Степанова, К.А. Мушанкова, Проблемы прочности и пластичности **86**, 1, 15 (2024).
3. M. Nejati, S. Ghouli, M.R. Ayatollahi, Applied Mathematical Modelling **91**, 837 (2021).

На рис. 1 получены визуализации для компонент тензора напряжений σ_{11} , σ_{12} , σ_{22} ГЦК-меди с применением потенциала погруженного атома на временном шаге 24 пс в условиях одноосного растяжения при постоянной скорости деформации 0.005 1/пс .

Полученные поля напряжений, приведенные на рисунках, четко показывают наличие

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ И УПРОЧНЕНИЯ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ ВОЛЬФРАМА И РЕНИЯ

К.А. Постовалова^{1*}, Д.А. Сосян¹, Д.И. Мелкозеров¹, А.М. Пацелов¹, В.П. Пилюгин¹,
П.Е. Панфилов²

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

²Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*e-mail: ksu_postovalova@mail.ru

Рений — самый тугоплавкий среди ГПУ-металлов ($T_{\text{плав}} = 3186^\circ\text{C}$) и второй по тугоплавкости среди всех металлов, уступая вольфраму ($T_{\text{плав}} = 3422^\circ\text{C}$). Рений является наиболее упрочняемым металлом в процессе пластической деформации при низких гомологических температурах. Рений выдерживает многократные нагревы и охлаждения без потери прочности. Его прочность при температурах порядка 1200°C выше, чем у вольфрама и молибдена. Среди металлов он является наиболее деформационно упрочняемым несмотря на то, что остальные ГПУ-металлы упрочняются много слабее, чем металлы с кубической решеткой. Причины и механизмы такого поведения тугоплавкого ГПУ-металла, который согласно современным представлениям должен быть высокопластичным и не должен сильно упрочняться, не до конца выяснены. Поэтому решение «рениевой проблемы» является актуальной задачей для материаловедения. В литературе отсутствуют данные о структурных превращениях рения и вольфрама и их механическом поведении при средних и больших деформациях при низких гомологических температурах под давлением, данное исследование уникально.

Целью работы являлось изучение структурных изменений рения и вольфрама и их механических свойств в результате мегапластической деформации при комнатной температуре и с нагревом.

Деформацию образцов проводили в камере Бриджмена (кручение под давлением — НРТ) из ВК-6 при 10–12 ГПа при 20°C и 400°C , что на 50°C выше точки хладноломкости вольфрама. Углы взаимного поворота наковален составляли значения от 0 до $3 \cdot 360^\circ$.

Продеформированные с нагревом образцы вольфрама по данным методов рентгеноструктурного анализа и сканирующей электронной микроскопии имеют субмикроструктурную структуру с размером кристаллитов менее 100 нм. Деформация образцов вольфрама под давлением вызвала структурную фрагментацию со значительным упрочнением. В структуре деформированного вольфрама отмечается наличие трещин и микротрещин как механизма релаксации напряжений при деформации и последующего снятия высокого давления. Значения микротвердости образцов вольфрама выросла от 3.5 ГПа у исходных образцов до 12.0 ГПа у сильнодеформированных. Переход образцов вольфрама от крупнокристаллического к субмикроструктурному повлиял на изменение характера изломов от хрупкого к вязко-подобному.

При небольших поворотах наковален (15°) в крупнозернистом рении (размер зерна 5–10 мкм) начинает формироваться ультрамелкодисперсная структура с величиной ячейки 20–40 нм. На основании полученных результатов сделан вывод, что в условиях интенсивной пластической деформации рений демонстрирует деформационное поведение, присущее пластичным металлам. В рении действуют базисное и призматическое скольжения, которые обеспечивают достижение больших степеней деформации с рекордно высоким упрочнением от 7 до 25 ГПа при переходе в нанокристаллическое состояние.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ СПЛАВА ВЖ159 ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

Н.А. Сахаров*, Д.И. Давыдов

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

*e-mail: niko.saharoff@yandex.ru

Жаропрочные никелевые сплавы помимо высокой прочности при температурах до 1200°C характеризуются хорошей жаростойкостью; применяются для изготовления ответственных деталей газовых турбин. Сплав ВЖ159 имеет никель в качестве основы, содержит хром до 28% (по массе), железо, молибден, ниобий, марганец. Сплав упрочняется за счет 10 – 12% γ' -фазы, на основе интерметаллида Ni_3Al , содержащей ниобий, а также за счет различных карбидов на основе ниобия и хрома. Фазовые составляющие сплава ВЖ159 не склонны к вырождению в частицы с нежелательной морфологией, что сохраняет высокий уровень пластических характеристик.

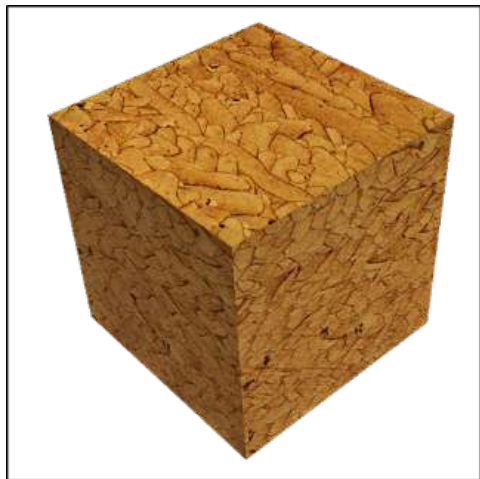


Рис. 1. 3D-изображения структуры по данным металлографии.

В работе изучалась структура и механические свойства сплава ВЖ159, полученного методом СЛС с помощью методов оптической металлографии и дифракции обратно отраженных электронов (EBSD).

Цилиндрические образцы напечатаны методом селективного лазерного сплавления горизонтально и вертикально относительно платформы построения; имеют схожую пористость и структуру. Плотность, измеренная методом взвешивания, равна 8.17 г/см³, что составляет 99% от плотности эталонного сплава, что свидетельствует о низкой пористости.

Структура сплава исследована в двух направлениях: в плоскости синтеза и в направлении роста. В плоскости синтеза структура неоднородная, видны отдельные треки шириной около 100 мкм. В горизонтально выращенном цилиндре в направлении синтеза формируются элементы структуры; зерна в основном имеют вытянутую форму, видны мелкие (< 14 мкм) равноосные рекристаллизованные зерна. Зерна в пределах одного трека имеют близкую ориентировку. В вертикально выращенном цилиндре в плоскости синтеза структура треков в следствие рекристаллизации выявляется слабо. Средний размер зерна составляет 10 – 12 мкм. Структура по направлению роста однородна по сечению, обладает типичной формой «рыбья чешуя», образованной ваннами расплава, средняя глубина ванн составляет около 60 мкм, наличествуют области с дендритной структурой. Наблюдаются равноосные зерна, образующие ожерелья вокруг более крупных зерен. В вертикально выращенном образце в направлении роста направленность выражена более четко: зерна имеют вытянутую форму в направлении синтеза. Анализ методом EBSD выявил разную морфологию трековой структуры материала, ориентированной различным образом по отношению к направлению. В структуре сплава обнаружены сферические поры диаметром 5 – 7 мкм, равномерно распределённые по объёму. Также присутствуют незначительные количества вытянутых пор (вдоль границ треков) и пор неправильной формы, а также непролавы. Общая пористость составляет 0.90 %.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

УПРОЧНЕНИЕ И СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СИЛЬНОДЕФОРМИРОВАННОМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ИРИДИИ

Д.А. Сосян^{1*}, П.Е. Панфилов², О.В. Антонова¹, А.М. Пацелов¹, К.А. Постовалова¹,
Д.И. Мелкозеров¹, В.П. Пилюгин¹

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

²Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*e-mail: sosyan.david98@gmail.com

Иридий является высокомодульным ($E = (520 - 590)$ ГПа, $G = 220$ ГПа) и единственным тугоплавким ($T_{пл} = 2447$ К) ГЦК-металлом со следующими показателями пластичности и прочности: относительное удлинение $\delta = 6$ %, сужение площади поперечного сечения $\psi = 10$ %, временное сопротивление $\sigma_B = 490$ МПа, условный предел текучести $\sigma_{0.2} = 88.2$ МПа.

Целью данной работы являлось изучение микроструктурных превращений иридия при деформации под высоким давлением методом наковален Бриджмена (сдвига (*shear under pressure*), *HPT* – *high pressure torsion*) и определения его максимально возможного деформационного упрочнения.

Деформация образцов иридия дисковой формы проводилась на твердосплавных наковальнях Бриджмена (ВК-6) начальным диаметром 3 мм под средним давлением 10 ГПа до $n = 3$ полных оборотов ($\epsilon \approx (4 - 6)$ ед. истинной деформации) при комнатной температуре (гомологическая температура $\theta = 0.12$) и с нагревом до 400°C ($\theta = 0.28$). Микроструктурные измерения проводились на микроскопе JEM-200CX методом тонких фольг в геометрии на просвет. Для определения текстуры, размеров кристаллитов, углов их взаимных разориентировок применяли скан-микроскопию на Tescan Mira LMS. Упрочнение измерялось методом Виккерса на ПМТ-3.

Было выполнено электронно-микроскопическое исследование образцов иридия, деформированных на $\epsilon \approx (1.0 - 1.5)$ ед. Исходное состояние с низкой дислокационной плотностью при обозначенной деформации трансформировалось в ячеистую дислокационную структуру с малыми углами взаимной разориентировки и размерами анизотропных ячеек микронного масштаба, вытянутых по направлению к деформации 1:2. Внутри образовавшихся дислокационных ячеек начала формироваться более мелкая дислокационная ячеистая структура с ячейками в 4 – 6 раз меньших по размеру. Кроме того, обнаружены структуры полосового типа дислокационного происхождения. Дальнейшая деформация привела к формированию нанокристаллической деформационной структуры с размером нанокристаллитов в диапазоне 50 – 100 нм.

В результате сдвиговой деформации под давлением в образцах иридия формируется текстура кручения с преимущественными ориентировками семейства плотноупакованных плоскостей [111] параллельно боковой поверхности образцов.

По данным измерения микротвердости деформационное упрочнение предельно деформированных образцов без разрушения после $n = 3$ ($\epsilon \approx 6$) составило от исходных значений (2.0 – 2.2) ГПа до (8.5 – 9.0) ГПа.

Теплая деформация иридия под давлением при температуре 400°C позволяет достигать мегапластических степеней до 6 ед. с сохранением образцов совершенной формой двояковыпуклой линзы, без трещин как в центре, так и на периферии.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

ТВЁРДЫЕ КОЛЛОИДНЫЕ РАСТВОРЫ СЛОИСТЫХ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

А.Н. Титов*, А.С. Шкварин, М.С. Постников, А.И. Меренцов

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

*e-mail: antitov@mail.ru

Слоистые дихалькогениды переходных металлов TX_2 являются представителями низко-размерных материалов, состоящих из структурных единиц с общей формулой $X-T-X$, $X = S, Se, Te$; $T = Ti, Zr, Hf, V$. Все эти материалы имеют одинаковую кристаллическую структуру, а Ti, Zr и Hf имеют одинаковые валентности. Неудивительно, поэтому, что большинство соединений TX_2 образует между собой твёрдые растворы. Внимательное изучение этих твёрдых растворов показало, что элементами раствора при этом являются не отдельные атомы, но целые структурные фрагменты.

Так, в твёрдых растворах замещения $Ti_{1-x}Cr_xSe_2$ и $Ti_{1-x}Zr_xSe_2$ обнаружено формирование индивидуальных слоёв $TiSe_2$, с одной стороны, и $CrSe_2$ или $ZrSe_2$ с другой. Слои имеют характерную толщину от 1 до 5 нм. Формирование смешанных слоёв, сочетающих в себе Ti и Cr или Ti и Zr не обнаружено. Индивидуальные слои формируются как минимум при концентрации Cr или Zr более 5 мол.%. При этом зависимость параметров решётки от концентрации замещающего металла является линейной. Это наводит на мысль о том, что такие системы следует рассматривать как раствор слоёв MSe_2 , $M = Cr, Zr$ в решётке $TiSe_2$. При этом в системе $Cr_xTi_{1-x}Se_2$ слои $CrSe_2$ имеют турбостратное разупорядочение с решёткой $TiSe_2$, тогда как в системе $Zr_xTi_{1-x}Se_2$ сопряжение слоёв $ZrSe_2$ и $TiSe_2$ когерентно. Площадь индивидуальных слоёв определить трудно из-за ограниченного поля наблюдения в методах с достаточно высоким разрешением по глубине, однако оценки показывают, что она составляет не менее 100 мкм и может достигать 1000 мкм.

В системе $V_xTi_{1-x}Se_2$ обнаружена область настоящего твёрдого раствора в области $x = 0 - 0.2$. Дальнейшее увеличение x приводит к формированию коллоидного раствора состоящего из слоёв $V_{0.2}Ti_{0.8}Se_2$ и VSe_2 . Характерная толщина слоёв составляет 1.2 – 1.5 нм, а площадь 500 – 1500 нм.

Анализ фотоэмиссионных спектров показывает, что слои MX_2 и TiX_2 заряжены друг относительно друга. Именно это позволяет им формировать твёрдый раствор, схожий по своей природе с коллоидным.

При замещении по подрешётке халькогена в системе $Ti(Se_{1-x}S_x)_2$ обнаружено формирование Янус-слоёв с общей структурой $S-Ti-Se$. Наличие таких слоёв подтверждено просвечивающей электронной микроскопией и генерацией второй гармоники на таких нецентросимметричных образованиях. Отсутствие центра симметрии приводит к формированию различных последовательностей этих слоёв — как $S-Ti-Se / S-Ti-Se...$ так и $S-Ti-Se / Se-Ti-S...$ и их комбинаций. Кроме того, оказывается, что Янус слои не являются полностью плоскими и выгнуты в сторону более крупного халькогена, формируя вытянутые образования, похожие на фрагмент трубки. Поскольку решётка TiX_2 , $X = S, Se$ описывается в группе $P - 3m1$ и имеет ось симметрии 3-го порядка, то существует три эквивалентных ориентации оси этих псевдо-трубок. Всё это приводит к исключительно сложной фазовой диаграмме такого простого с виду материала.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и правительства Свердловской области (проект № 24-23-20136, соглашение 9-24-МГ).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ СТРУКТУРЫ МЕДИ, ПОДВЕРГНУТОЙ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ, С РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ ГРАНИЦ ЗЕРЕН

Н.С. Чикунова¹, А.В. Столбовский^{1,2}, И.В. Блинов¹

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

²Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*e-mail: chikunova@imp.uran.ru

Известно, что деформационно-модифицированные интенсивной пластической деформацией (ИПД) структуры обладают сложной иерархией структурных элементов [1], а их развитие происходит в несколько этапов [2], характеризующихся различным распределением элементов в структуре. При этом принято считать, что одним из основных элементов структуры, влияющим на характеристики объемных металлических материалов, являются границы зерен (ГЗ) вследствие их высокой плотности в материале. Несмотря на успехи, достигнутые в изучении таких материалов, на сегодняшний день нет информации о привязке распределений относительных энергий границ зерен к сформированной структуре.

Поэтому целью работы является исследование взаимосвязи структуры меди, подвергнутой интенсивной пластической деформации, с распределением относительных энергий границ зерен.

В качестве материала для исследования была выбрана медь марки М1. Ультрамелкозернистая структура сформирована методом сдвига под высоким давлением (СВД) в наковальнях Бриджмена при 3 ГПа в диапазоне истинной деформации $4 \leq \epsilon \leq 7.3$ в условиях комнатной температуры. Подготовка поверхности образцов и съёмка на сканирующем туннельном микроскопе (СТМ) осуществлялись по методике работы [3]. Анализ СТМ-снимков на основе построения карт относительных энергий границ зерен, а также дальнейшая статистическая обработка осуществлялись по методике работы [4].

Установлена стадийность формирования структуры по зависимости твердости от истинной деформации. По СТМ-снимкам ультрамелкозернистой меди построены карты относительных энергий границ зерен. Показано, что структура материала, подвергнутого СВД, неоднородна. Распределение относительных энергий границ зерен в материале не хаотично, а зависит от расположения в структуре. Прослеживаются агломерации мелких зерен с низкой относительной энергией межкристаллитных границ, окруженные границами, обладающими большей энергией. Также вдоль скоплений зерен с низкой и средней относительной энергией расположены высокоэнергетические границы, что свидетельствует о накоплении большого количества дефектов в таких границах. Статистический анализ результатов показал наличие в распределении значений относительных энергий границ зерен 3-х составляющих, что указывает на наличие трех состояний межкристаллитных границ в получившейся структуре.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

1. S.V. Divinski, *Diff. Foundations* **5**, 57 (2015).

2. Т.И. Чашухина *и др.*, *ФММ* **98**, 98 (2004).

3. Н.С. Чикунова *и др.*, *Изв РАН. Серия Физическая* **87**, 1600 (2023).

4. N.S. Chikunova *et al.*, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* **88**, 1440 (2024).

ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ $\text{Fe}_x\text{Ni}_y\text{TiSe}_2$ ($x = 0 - 0.5$;
 $y = 0 - 0.5$)Е.Г. Шкварина¹, Е.Г. Дьячков¹, А.А. Титов¹, С.В. Пряничников², А.С. Шкварин¹, А.Н. Титов¹¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия²Институт металлургии им. академика Н.А. Ватолина УрО РАН, Екатеринбург, Россия*e-mail: shkvarin@imp.uran.ru

Композитные материалы на основе слоистых дихалькогенидов титана привлекают внимание с точки зрения возможности внедрения различных атомов или молекул в межслоевое пространство и модификации их свойств таким путем [1]. Ранее было изучено влияние внедрения железа и никеля по отдельности на кристаллическую структуру и свойства. В этих системах было обнаружено явление ретроградной растворимости, когда при нагреве Fe_xTiSe_2 и Ni_xTiSe_2 ($x = 0 - 0.5$) фиксируется выделение железа и никеля, которые реагируют с халькогеном, формируя селениды [2] [3]. Температуры выделения железа и никеля различны, что может быть использовано для направленного синтеза композита с требуемыми включениями.

В качестве предварительного этапа необходимо исследовать, как влияет одновременное внедрение железа и никеля в TiSe_2 на кристаллическую структуру этого материала.

В данной работе впервые синтезирована система $\text{Fe}_x\text{Ni}_y\text{TiSe}_2$ ($x, y = 0 - 0.5$). Первоначально была синтезирована матрица TiSe_2 из исходных элементов, затем в нее добавлялось необходимое количество железа и никеля, синтез проводился при 950 °С в вакуумированных кварцевых ампулах. Затем образцы перетирались и подвергались повторному гомогенизационному отжигу в тех же условиях.

Дифрактограммы всех образцов были получены на дифрактометре Shimadzu XRD 7000 Maxima (излучение $\text{Cu K}\alpha_1$, графитовый монохроматор, $2\theta = 10 - 90^\circ$) в ЦКП "Урал-М" (Институт металлургии УрО РАН).

По результатам этого исследования оказалось, что в образцах присутствует $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$, в результате чего состав основной фазы в образцах отличается от навески. Кристаллическая структура образцов была исследована методом полнопрофильного анализа, уточнялись числа заполнения, координаты атомов в обеих фазах, весовая доля фаз, на основе этого определен состав основной фазы в каждом образце. Из всех полученных образцов выделен срез с близким (практически одинаковым) содержанием никеля (на его примере исследовано влияние увеличения содержания железа на кристаллическую структуру) и срез с близким содержанием железа (для исследования влияния увеличения концентрации никеля).

Показано, что отношение Fe/Ni в основной фазе $\text{Fe}_x\text{Ni}_y\text{TiSe}_2$ линейно связано с этим же соотношением Fe/Ni в фазе $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$. Это позволяет контролировать состав включений $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$ и, таким образом, влиять на магнитные свойства материала.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и правительства Свердловской области (проект № 24-23-20029, соглашение 5-24-МГ).

1. A.N. Titov *et al.*, J. Phys. Chem. Lett. **9**, 5183 (2018).
2. E.G. Shkvarina *et al.*, J. Struct. Chem. Pleiades Publishing **57**, 710 (2016).
3. E.G. Shkvarina *et al.*, Phys. Chem. Chem. Phys. **26**, 15999 (2024).

ТЕРМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ БИ-ИНТЕРКАЛАТНОГО СОЕДИНЕНИЯ $\text{Fe}_x\text{Ni}_y\text{TiSe}_2$ А.С. Шкварин^{1*}, Е.Г. Дьячков¹, А.А. Титов¹, С.В. Пряничников², А.Н. Титов¹¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия²Институт металлургии им. академика Н.А. Ватолина УрО РАН, Екатеринбург, Россия*e-mail: shkvarin@imp.uran.ru

Дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) – это широкий класс материалов, с рядом фундаментальных свойств, а также с перспективами практических применений. Кристаллическая структура этих материалов, состоящая из так называемых «сэндвичей» Ch-ТМ-Ch (Ch – халькоген, ТМ – переходный металл) с сильной связью между атомами в «сэндвиче» и слабой между самими «сэндвичами» позволяет внедрять в межслоевое пространство различные атомы или молекулы. Явление ретроградной растворимости, позволяющее выделять наноструктурные включения непосредственно в межслоевом пространстве решетки матрицы [1] позволяет рассматривать подобные материалы в качестве прекурсоров в нанoeлектронике. Ранее обнаружена ретроградная растворимость железа [2] и никеля [3] в диселениде титана. При этом установлено, что температуры ретроградной растворимости для разных типов внедренных металлов различаются. Впервые синтезированная би-интеркалатная система $\text{Fe}_x\text{Ni}_y\text{TiSe}_2$ демонстрирует включения не отдельно никеля или железа, а включения $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$. Логично предположить, что это также результат ретроградной растворимости, соответственно количеством (и таким образом размером) включений можно управлять с помощью температуры.

Синтез образцов был выполнен стандартным методом твердофазных реакций в откачанных и запаянных ампулах. Синтез был выполнен в несколько этапов. На первом этапе проводился синтез TiSe_2 из исходных элементов. После получения матрицы в нее добавлялось необходимое количество железа и никеля. Далее синтез выполнялся при температуре 950°C в течение недели. После этого производилась гомогенизация и повторный отжиг. Термическая устойчивость изучалась методом отжигов. Каждый образец отжигался при температурах 300, 400, 500, 600, 700°C в течении 5, 4, 3, 2 и 1 день соответственно. Структуру и фазовый состав полученных поликристаллов изучали с использованием рентгеновской порошковой дифракции (XRD) на дифрактометре Shimadzu XRD 7000 Maxima (излучение $\text{Cu K}\alpha_1$, графитовый монохроматор, $2\theta = 10 - 90^\circ$) в ЦКП "Урал-М" (Института металлургии УрО РАН). Установлено, что в образцах наблюдаются пики основной фазы (пространственная группа $P-3m1$ или $I2/m$) и пики $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$. Наблюдается пропадание пиков моноклинной фазы для ряда при температуре 300°C. Поскольку ранее установлены температуры разупорядочения для моноинтеркалатов, можно предположить, что упорядочение связано с перераспределением атомов никеля, а не железа (температура разупорядочения которого на 100 градусов выше). Наблюдается ощутимое уменьшение интенсивности пиков $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$ при температуре отжига 600°C. Возможно, более длительные отжики позволят добиться полного растворения $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$ в решетке матрице. Повышение же температуры до 700°C наоборот, приводит к увеличению интенсивности пиков $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и правительства Свердловской области (проект № 24-23-20029, соглашение 5-24-МГ).

1. A.N. Titov *et al.*, J. Phys. Chem. Lett. **9**, 5183 (2018).
2. E.G. Shkvarina *et al.*, J. Struct. Chem. Pleiades Publishing **57**, 710 (2016).
3. E.G. Shkvarina *et al.*, Phys. Chem. Chem. Phys. **26**, 15999 (2024).

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА В ПЕРВИЧНОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО МАГНИТНОГО СТРУКТУРОСКОПА

Н.В. Гордеев^{1,2*}, А.Н. Сташков¹, А.М. Матосян^{1,2}

¹Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

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

*e-mail: Gordeev.Nikita@urfu.me

В сталях с аустенитно-мартенситной структурой зачастую требуется оперативно проводить неразрушающий контроль (НК) содержания остаточного аустенита (ОА), так как от его содержания зависят механические свойства конечных изделий. В качестве метода НК содержания ОА хорошо зарекомендовал себя магнитный с дифференциальной схемой измерения. По такой схеме построен первичный преобразователь Н-образного типа для дифференциального магнитного структуроскопа ДМС [1], в качестве чувствительного элемента в котором применялся феррозонд. Однако на современном этапе развития техники в качестве чувствительных элементов все больше находят применение полупроводниковые датчики Холла. Целью данного исследования является определение величины магнитного потока в месте установки датчика Холла в зависимости от магнитных характеристик образцов, содержащих различное количество ОА.

Исследование проведено методом конечных элементов с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics. Модель первичного преобразователя представляет собой Н-образный магнитопровод с сечением $12 \times 28 \text{ мм}^2$ из отожженного технически чистого железа с четырьмя катушками на полюсах. Создаваемые ими магнитные потоки направлены встречным образом в перемычке магнитопровода (рис. 1а). Для построения модели на Remagraph C-500 были измерены кривые намагничивания и максимальные магнитные индукции $B_{\max}$ в поле 550 А/см для образцов из стали ВНС-5 с содержанием ОА от 9 до 18 %, а также кривая намагничивания материала магнитопровода.

Установлено, что при полностью симметричной системе (на двух полюсах находятся образцы с одинаковым содержанием ОА) плотность магнитного потока вдоль перемычки стремится к нулевому значению. При возникновении асимметрии, вызванной различиями в содержании ОА в образцах, магнитный поток в перемычке магнитопровода становится отличным от нуля. Зависимость между $B_{\max}$ и индукцией в центре перемычки близка к линейной (рис. 1б). Полученные результаты будут использованы при оптимизации конструкции первичного преобразователя.

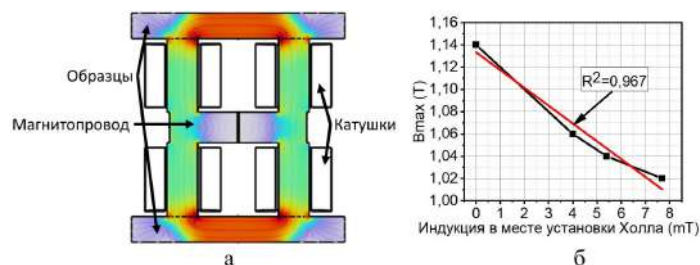


Рис. 1. Распределение магнитной индукции в случае полной симметрии (а) и график зависимости индукции в месте установки холла от максимальной индукции образцов (б).

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

1. Г.В. Бида, Дефектоскопия 1, 26 (2002).

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 38ХС

А.М. Матосян^{1,2*}, А.П. Ничипурук², А.М. Матосян^{1,2}, А.Н. Сташков², Н.В. Гордеев,
Е.Ю. Сажина², С.В. Афанасьев²

¹Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

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

*e-mail: matosian01@gmail.com

Конструкционная низколегированная сталь 38ХС широко используется для изготовления ответственных и высоконагруженных деталей: шестерней, валов, пальцев, муфт, роторов, клапанов двигателя. В процессе изготовления для придания оптимального соотношения твердости и пластичности сталь подвергается закалке и последующему отпуску при температуре от 450 до 700 °С. Однако даже при высоких температурах отпуска в деталях могут оставаться механические напряжения, которые в дальнейшем негативно скажутся на их ресурсе. Цель работы – исследование влияния термической обработки и холодной пластической деформации растяжением на магнитные свойства стали 38ХС, а также оценка остаточных механических напряжений по магнитным параметрам.

Образцы из стали 38ХС в форме параллелепипедов с исходными размерами 10 × 10 × 65 мм подвергались закалке от 900 °С в масло и последующему отпуску при температурах 500, 600, 650, 700 и 750 °С. После утонения до 4 мм образцы пластически деформировались до относительного удлинения 6 % с шагом 2 %. Магнитные измерения проводились с помощью установки Remagraph C-500.

Установлено, что для образцов с температурами отпуска 650 и 700 °С после деформации на 4 и 6 % на полевых зависимостях дифференциальной магнитной восприимчивости $\chi_d(H)$ видны перегибы и раздвоенные максимумы (рис. 1а и 1б), что свидетельствует о наличии в образцах магнитной анизотропии типа «легкая плоскость» [1]. С помощью программы SIMAF [2] для всех образцов рассчитывались критические поля необратимого смещения 90-градусных доменных границ и поля наведенной напряженности магнитной анизотропии. Из условия равенства энергии поля магнитной анизотропии и магнитоупругой энергии [1] рассчитаны остаточные механические напряжения σ (рис. 1в). Максимумы на кривых зависимости механических напряжений от температуры отпуска можно объяснить коагуляцией и сфероидизацией карбидов при температурах отпуска 600 – 650 °С и повышение плотности дислокаций при увеличении степени деформации.

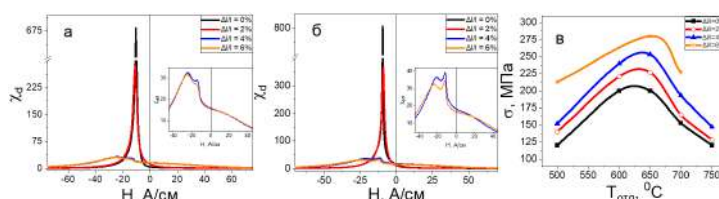


Рис. 1. Полевые зависимости дифференциальной магнитной восприимчивости для температур отпуска 650 и 700 °С (а,б) и зависимость остаточных механических напряжений от температуры отпуска при различной деформации (в) стали 38ХС.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

1. A.N. Stashkov, NDT&E International **118**, 102398 (2021).

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024681836 Российская Федерация.

КВАНТОВАЯ ДИФФУЗИЯ ДЕЙТЕРИЯ В ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛАХ

В.Б. Выходец¹, О.А. Нефёдова², Т.Е. Курённых¹, С.И. Обухов^{1*}

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

²Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: siobukhov@yandex.ru

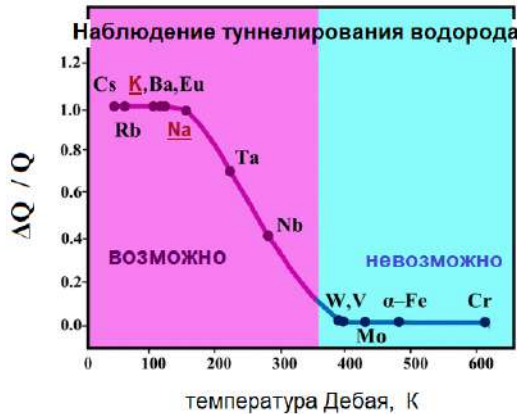


Рис. 1. Данные по квантовой диффузии водорода в металлах, подчёркиванием выделены наши результаты экспериментов по Na и K. Q это энергия активации диффузии при $T > \theta_D$. ΔQ это изменение Q в точке перегиба на графике $\log D$ от T^{-1} (см. рис. 2).

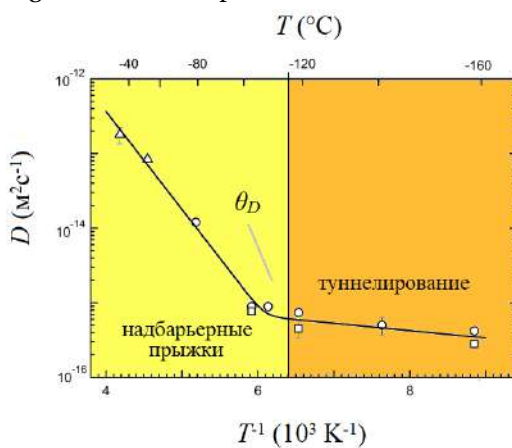


Рис. 2. Зависимость коэффициента диффузии дейтерия в натрии от $1/T$.

В работе исследовали диффузию дейтерия в натрии и калии при помощи разработанного нами метода NRAOL (анализ ядерных реакций в режиме реального времени, nuclear reaction analysis online) на базе ускорителя Ван де Граафа.

Фундаментальным вопросом являются условия, при которых в металлах может наблюдаться квантовая диффузия водорода. Эти условия были определены нами на основании результатов экспериментов по Na и K, – и литературных данных. В твёрдых телах существует только два механизма миграции атомов при диффузии: а) надбарьерные прыжки атомов, и б) туннелирование атомов. Все металлы, для которых когда-либо были получены литературные данные по квантовой диффузии водорода (механизм б), имели кубическую объёмо-центрированную (ОЦК) решётку.

Установлено, что туннелирование водорода для ОЦК металлов может наблюдаться 1) только при температуре ниже температуры Дебая (θ_D) данного металла, 2) только для металлов с $\theta_D < 350$ K (рис. 1).

В нашем эксперименте по калию перенос массы в процессе диффузии дейтерия происходил по механизму (а) при температурах 120 – 260 K, и по механизму (б) при температурах 90 – 120 K. В нашем эксперименте по натрию туннелирование происходило при $T < 160$ K (рис. 2). Переход от одного механизма к другому характеризуется перегибом на температурной зависимости коэффициента диффузии D , $\log D$ (T^{-1}) на рис. 2. Температура перегиба, T_b , была характеризована параметром $\Delta Q/Q$ — относительным изменением энергии активации диффузии (рис. 1).

ВОЗМОЖНОСТЬ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЖЕЛЕЗЕ И НИКЕЛЕ

А.Н. Сташков*, А.П. Ничипурук, А.В. Столбовский, А.М. Матосян

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

*e-mail: stashkov@imp.uran.ru

Оценка остаточных механических напряжений в деталях, узлах и конструкциях машин является важной задачей для прогнозирования их остаточного ресурса. Контроль деталей из ферромагнитных сплавов, наряду с применяемыми рентгеновскими и ультразвуковыми методами, может проводиться по магнитным параметрам. Целью данной работы являлось исследование магнитных свойств железа и никеля при их необратимом перемагничивании по предельной петле гистерезиса и определение чувствительных к остаточным напряжениям магнитных параметров. Для проведения магнитных измерений были подготовлены образцы из никеля (99.6% Ni) и технически чистого железа (99.9% Fe). Образцы из никеля отжигались в печи при 1000°C в течение 1 часа, образцы из железа — при 650°C в течение 1 часа. Отжиги проводились в условиях динамического вакуума при давлении не выше 10^{-5} Па с последующим медленным охлаждением в печи. Конечные размеры образцов составляли $2 \times 3 \times 100$ мм³. Образцы упруго растягивали и сжимали. Измерения магнитных свойств проводили на оригинальной магнитометрической установке [1].

Установлено, что в никеле (ферромагнетик с отрицательной магнитострикцией) при его упругом растяжении, так же как в технически чистом железе (ферромагнетик с положительной магнитострикцией) при его упругом сжатии на полевых зависимостях обратимой магнитной проницаемости наблюдаются два или три максимума (перегиба), связанных с наведенной напряжениями магнитной анизотропией типа «легкая плоскость». Наличие двух или трех максимумов означает наличие механических напряжений сжатия в ферромагнетике в направлении, совпадающем с направлением перемагничивания. Знак определяемых напряжений зависит от знака магнитострикции ферромагнетика: минус для ферромагнетика с положительной магнитострикцией и плюс для ферромагнетика с отрицательной магнитострикцией. По величине полей левого и правого максимумов, связанных с необратимым смещением 90-градусных доменных границ, были оценены механические напряжения сжатия для железа и напряжения растяжения для никеля. Найдены линейные уравнения связи приложенных напряжений со средним полем максимумов. Свободный член этих уравнений — это остаточные механические напряжения после отжига образцов, которые составили 15 МПа для никеля и 57 МПа для железа. Также с помощью магнитной методики определены константы магнитострикции в направлении легких осей намагничивания для железа $\lambda_{100} = 16.6 \cdot 10^{-6}$ и никеля $\lambda_{111} = -15.1 \cdot 10^{-6}$. Примечательно, что определение этих констант проведено на поликристаллах.

Разработано программное обеспечение SIMAF для расчета критических полей смещения разных типов доменных границ и поля наведенной напряжениями магнитной анизотропии для ферромагнетиков с кубической решеткой [2], которое позволяет сократить время обработки экспериментальных полевых зависимостей дифференциальной магнитной восприимчивости и повысить достоверность результирующих данных.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

1. A.N. Stashkov *et al.*, J. Nondestruct. Eval. **43**, 1 (2024).
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024681836.

ТЕПЛОФИЗИКА

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЕРЕГРЕТЫХ СТРУЙ ВОДЫ НА ПЛОСКУЮ ПРЕГРАДУ

А.А. Акашев*, А.В. Решетников, В.Г. Пастухов

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: akashev.anton@gmail.com

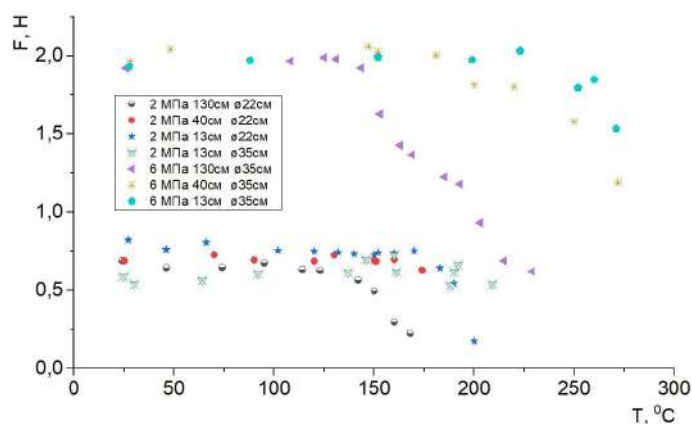


Рис. 1. Сила воздействия струи вскипающей воды на преграду в зависимости от температуры.

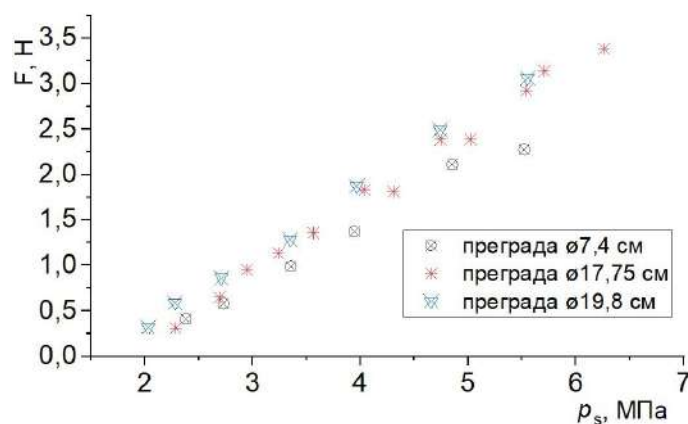


Рис. 2. Сила воздействия струи вскипающей воды на зондирующую плоскость в зависимости от давления насыщения в условиях полного развала струи при температурах 200 – 275 °С.

Из рисунка 1 видно, что до температуры 150 °С воздействие струи остается постоянным для каждого давления. С дальнейшим повышением температуры форма струи изменяется, и воздействие на преграду начинает зависеть от размера преграды и расстояния до сопла. Рисунок 2 демонстрирует линейную зависимость силы, действующей на различные зондирующие плоскости, от давления насыщения в условиях полного развала струи.

Целью работы являлось измерение воздействия холодных и перегретых струй на неподвижную преграду, при различных видах истекающей струи. Учет подобных воздействий необходим для проектирования и безопасного функционирования различных трубопроводов, охлаждающих установок и других технических устройств, связанных с перегретыми жидкостями.

Проведены опыты по истечению горячей воды из камеры высокого давления в атмосферу через короткий цилиндрический канал при температурах в интервале 25 – 275 °С. Были реализованы режимы истечения при постоянном давлении 2 и 6 МПа и в условиях полного развала струи. В качестве преграды были использованы круглые диски различных диаметров, которые размещались на расстоянии 13, 40, 130 см от выхода канала. Воздействие на преграду фиксировалось при помощи электронных весов, подключенных к ПК.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ПОДОБИЕ КАПИЛЛЯРНОЙ ПОСТОЯННОЙ И ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ БИНАРНЫХ РАСТВОРОВ

В.Н. Андбаева*, М.Н. Хотиенкова

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: andbaeva@mail.ru

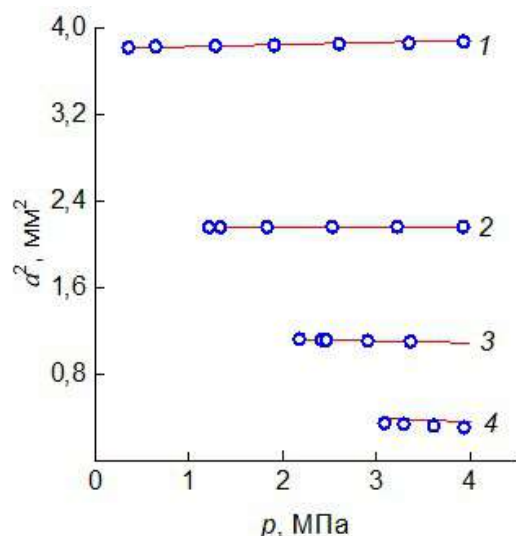


Рис. 1. Барическая зависимость капиллярной постоянной раствора изобутан–водород: 1 – К; 2 – 348.15; 3 – 378.15; 4 – 398.15. $\circ$ – экспериментальные данные, сплошные линии – расчет.

В работе проведен анализ температурных зависимостей капиллярной постоянной σ и поверхностного натяжения a^2 двух групп веществ: растворов углеводород–гелий и углеводород–водород. Гелий и водород являются малой добавкой к углеводородам (метан, этан, пропан, н-бутан, изобутан).

Эксперименты по определению капиллярной постоянной растворов выполнены дифференциальным капиллярным методом. Опыты проводились по изотермам при давлениях от давления насыщения углеводорода p_0 до 4 МПа. Максимально возможное давление в 4 МПа накладывает ограничения на максимальную концентрацию водорода/гелия в углеводороде, которая не превышает 3,5 моль %. Зависимости a^2 и σ от давления являются линейными функциями:

$$\begin{aligned} a^2 &= a_0^2 + (\partial a^2 / \partial p) \cdot (p - p_{s0}), \\ \sigma &= \sigma_0 + (\partial \sigma / \partial p) \cdot (p - p_{s0}), \end{aligned} \quad (1)$$

где индекс 0 относится к чистому углеводороду. Нами предложены уравнения для безразмерных наклонов производных, входящих в уравнения (1). Так для систем углеводород–гелий величина $\partial \tilde{a}^2 / \partial \pi = \sum_{i=1}^4 \alpha_i (\epsilon - 1)^i / i$, для систем углеводород–водород: $\partial \tilde{a}^2 / \partial \pi = a_1 (1 + a_2 \epsilon + a_3 \epsilon^8)$, где $\tilde{a}^2 = a^2 \rho_c g / k_B^{1/3} p_c^{2/3} T_c^{1/3}$, $\pi = (p - p_{s0}) / p_c$, $\epsilon = 1 - T / T_c$.

Индекс c относится к критической точке, коэффициенты α_i и a_i определялись методом регрессионного анализа.

Показано, что для определения капиллярной постоянной и поверхностного натяжения в системах углеводород–водород/гелий достаточно знать критические параметры углеводорода.

По уравнению (1) рассчитана капиллярная постоянная системы изобутан–водород. Результаты расчета представлены на рис. 1. Показано как количественное, так и качественное согласие эксперимента и полученного уравнения.

Для систем углеводород–водород установлено, что зависимость угловых коэффициентов $\partial \tilde{a}^2 / \partial \pi$ от параметра Филиппова $A = 100 \pi_{1.6}$ ($\pi_{1.6} = p / p_c$ при $T_c / T = 1.6$) линейна в интервале температур $0.1 < \epsilon < 0.4$.

ВЯЗКОСТЬ И КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ РАСПЛАВОВ Al – Mg и Al – Zn

Е.А. Баталова^{1*}, С.В. Файзуллина², Л.В. Камаева¹, Р.Е. Рыльцев³, Н.М. Щелкачев⁴¹Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия²Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия³Институт металлургии им. Н.А. Ватолина УрО РАН, Екатеринбург, Россия⁴Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина РАН, Троицк, Москва, Россия*e-mail: elizaveta.smagina.97@mail.ru

Добиться получения сплавов с заданными технологическими свойствами можно с помощью совместного анализа таких структурно – чувствительных свойств, как вязкость и величина переохлаждения расплава. Известно, что для металлических систем такой анализ позволяет качественно оценить изменение межатомного взаимодействия в расплаве при изменении концентрации атомов. Однако экспериментального материала, касающегося вязкости алюминиевых сплавов с высоким содержанием магния и цинка, недостаточно.

Поэтому перед данной работой была поставлена цель провести анализ концентрационных зависимостей вязкости и переохлаждения расплавов Al–Mg (от 2.5 до 95 ат.% Mg) и Al–Zn (от 2.5 до 97.5 ат.% Zn). А также выполнено *ab initio* молекулярно-динамическое моделирование (AIMD) расплавов Al-Mg для получения данных о локальном химическом упорядочении [1].

В работе была измерена кинематическая вязкость (ν) расплавов Al-Mg и Al-Zn [2]. Полученные политермы вязкости исследуемых расплавов в прямых и полулогарифмических координатах хорошо описываются уравнением Аррениуса в выбранных температурных интервалах. Анализ концентрационных зависимостей вязкости показал, что в расплавах Al-Mg наблюдается 5 интервалов с разным характером зависимости вязкости. Концентрационные зависимости вязкости расплавов Al-Zn также ведут себя немонотонно и имеют три особенности, в которых изотермы вязкости претерпевают существенные изменения.

Подробное исследование переохлаждения (ΔT) расплавов Al-Mg и Al-Zn при контролируемом медленном охлаждении (до 1 К/с) показало, что расплавы обеих систем кристаллизуются при невысоких значениях величины переохлаждения с образованием неравновесных структур. На концентрационной зависимости переохлаждения расплавов Al-Mg выделяются две концентрации (20 и 80 ат.% Mg), при которых наблюдается значимое изменение ΔT без изменения типа кристаллизации. Обнаруженные нами концентрационные особенности вязкости и переохлаждения расплавов Al-Mg хорошо согласуются с данными о концентрационном изменении химического ближнего порядка в этих расплавах. Для сплавов системы Al–Zn установлено, что температура, от которой охлаждается расплав, оказывает большее влияние на характер кристаллизации. При больших перегревах над температурой ликвидус (T_L) (200 – 300°C) наблюдается неравновесная кристаллизация, а случае, когда перегрев над T_L небольшой, кристаллизация протекает квазиравновесно.

AIMD сплава $Al_{20}Mg_{80}$ при различных температурах показало, что при уменьшении температуры ослабевает гетероатомное химическое взаимодействие, что может приводить к эффектам, обнаруженным на концентрационной зависимости ΔT .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00370, <https://rscf.ru/project/24-22-00370/>.

1. G. Kresse, J. Furthmuller, Comput. Mater. Sci. **6**, 15 (1996).
2. E. G. Shvidkovskiy, NASA TT **88** (1962).

АППРОКСИМАЦИОННОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ПЛОТНОСТИ ЖИДКИХ ОКТАНА И ПЕРФТОРОКТАНА ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 288.15 – 333.15 К

М.Р. Билукова^{1,2*}, Е.А. Рукавичникова^{1,2}, В.Н. Андбаева²

¹Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*e-mail: mishanabilukova17@gmail.com

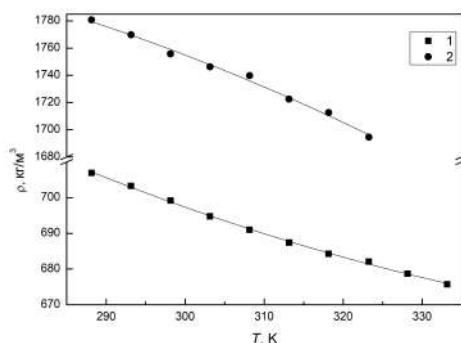


Рис. 1. Температурная зависимость плотности. 1 — октан, 2 — перфтороктан. Сплошная линия — расчет по ур. (1).

В работе измерена плотность октана (C_8H_{18}) и перфтороктана (C_8F_{18}) при атмосферном давлении в интервале температур 288.15–333.15 К. Определение плотности позволяет идентифицировать конкретные углеводороды, сравнивая экспериментально полученные данные с литературными значениями. Это особенно важно в химическом анализе, где точное определение структуры вещества является ключевым этапом. Исследование температурной зависимости плотности алканов позволяет выявить закономерности в их физико-химических свойствах. Точные значения плотности углеводородов необходимы для проектирования технологических процессов, связанных с переработкой и их использованием.

Плотности измерены прямым методом с помощью вибрационного плотномера ВИП - 2МР. Данный плотномер позволяет проводить измерения с точностью 0.03 кг/м³. Экспериментальные данные по плотности исследуемых веществ аппроксимированы уравнением вида:

$$\rho(T) = \sum_{i=0}^2 X_i T^i. \quad (1)$$

Коэффициенты X_i определены методом регрессионного анализа и представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Коэффициенты уравнения (1).

Коэффициенты аппроксимации	C_8H_{18}	C_8F_{18}
$X_0, \text{кг/м}^3$	1315.72	1231.63
$X_1, \text{кг/м}^3$	-3.34	5.71
$X_2, \text{кг/м}^3$	0.004	-0.01

Температурная зависимость плотности исследуемых веществ представлена на рисунке 1.

Полученные значения плотности использовались для расчета поверхностного натяжения соответствующих веществ.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЖИДКОЙ И ГАЗОВОЙ ФАЗ НИКЕЛЯ ПРИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЯХ ЭНЕРГИИ

К.А. Боярских^{1,2*}, К.В. Хищенко^{1,2,3}

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Москва, Россия

³Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

*e-mail: boyarskikh.ka@phystech.edu

Настоящее исследование посвящено описанию термодинамических свойств жидкой и газовой фаз никеля. Разработано уравнение состояния для этого металла, представленное в термодинамически полном виде зависимости потенциала удельной свободной энергии (F) от удельного объема (V) и температуры (T), как сумма холодной (при $T = 0$) составляющей (F_c) и тепловых вкладов атомов (F_a) и электронов (F_e):

$$F(V, T) = F_c(V) + F_a(V, T) + F_e(V, T). \quad (1)$$

Значения констант в выражениях этой зависимости выбирались из условия оптимального описания имеющихся опытных данных по изобарическому расширению жидкой фазы металла [1], температурной зависимости давления насыщенных паров и данных ударно-волновых экспериментов (в том числе [2—5]) в широкой области на фазовой диаграмме. Проведены расчеты изобар, линии фазового равновесия жидкость—пар, ударных адиабат и изоэнтроп разгрузки. Термодинамические параметры вещества на ударных адиабатах для разных начальных удельных объемах образцов V_0 при заданном давлении за фронтом ударной волны P определялись путем решения системы уравнений

$$E(V, T) = E_0 + \frac{1}{2}(P + P_0)(V_0 - V), \quad P = P(V, T). \quad (2)$$

Здесь E_0 и P_0 — удельная внутренняя энергия и давление в начальном состоянии перед фронтом ударной волны; $E_0 = E(V_0, T_0)$, $P_0 = P(V_0, T_0)$; функции $E(V, T)$ и $P(V, T)$ в (2) соответствуют уравнению состояния (1). Описание изоэнтропического расширения осуществлялось, как в предположении реализации метастабильных состояний фаз, так и для двухфазной смеси жидкость—пар [6]. Результаты расчетов, проведенных в рамках разработанного уравнения состояния, согласуются с имеющимися опытными данными в области применимости модели и могут быть использованы для гидродинамического моделирования [7] процессов в металле при высоких плотностях энергии.

1. R.S. Nixson, M.A. Winkler, M.L. Hodgdon, Phys. Rev. B **42**, 6485 (1990).
2. С.Б. Кормер, А.И. Фунтиков, В.Д. Урлин, А.Н. Колесникова, ЖЭТФ **42**, 686 (1962).
3. Р.Ф. Трунин, Г.В. Симаков, Ю.Н. Сутулов и др., ЖЭТФ **96**, 1024 (1989).
4. Р.Ф. Трунин, Г.В. Симаков, ЖЭТФ **103**, 2180 (1993).
5. Л.Ф. Гударенко, О.Н. Гущина, М.В. Жерноклетов и др., ТВТ **38**, 437 (2000).
6. К.А. Boyarskikh, K.V. Khishchenko, Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **88**, 1446 (2024).
7. K.V. Khishchenko, A.E. Mayer, Int. J. Mech. Sci. **189**, 105971 (2021).

ПОИСК ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕПЛО- И ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ: МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ПРОЦЕССОВ

Д.В. Волосников

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

e-mail: dima_volosnikov@mail.ru

Работа направлена на создание, развитие и выработку рекомендаций при эксплуатации программно-аппаратного комплекса (ПАК) для решения задач инженерной теплофизики и исследования (натурных измерений) свойств жидких теплоносителей и энергоносителей в условиях мощного локального импульсного воздействия. ПАК решает следующие задачи:

- оценка тепловой проводимости конкурирующих тепло- и энергоносителей при строго заданной температуре, включая области перегрева относительно линии равновесия жидкость-пар и сверхкритических давлений;
- определение коэффициента теплоотдачи от стенки нагревателя к теплоносителю при плотности теплового потока до 10 МВт/м^2 ;
- быстрое обнаружение летучих примесей в товарных жидкостях (оценка влагосодержания в них в диапазоне 0-500 ppm);
- определение расширенной фазовой диаграммы (температура-концентрация и жидкость-пар) перегретых бинарных растворов с НКТР и/или ВКТР;
- способ оценки дополнительного теплового сопротивления перегретых растворов при наличии сведений об их избыточном объеме (для длительности воздействия до 100 мс);
- контроль режима теплообмена в локально перегретых жидкостях.

В докладе будет продемонстрировано, что в условиях мощного тепловыделения достигнута принципиальная измеримость теплового потока и коэффициента теплоотдачи от нагревателя в жидкий образец при его мгновенном переводе в не вполне устойчивое и/или неустойчивое состояние. При импульсном изотермическом воздействии в условиях кондуктивного режима обнаружено наличие дополнительного теплового сопротивления в перегретых бинарных растворах, определяемое значениями их избыточных объемов смешения. Для случая частично смешивающихся растворов, в случае распада неустойчивого состояния перегретого выше диффузионной спинодали раствора, показано наличие интенсификации теплообмена. Предложен способ сосредоточенного во времени пассивного метода интенсификации теплообмена для миниатюрных систем охлаждения без участия фазового перехода жидкость-пар.

Проведена оценка значений предельных значений температур и давлений импульсно нагретых исходных компонентов композиционных топлив, а также исходных компонентов и их бинарных растворов в случае полного или частичного (при наличии НКТР и ВКТР) растворения. Определены температурно-временные характеристики кондуктивного и конвективного режимов теплообмена в импульсно нагреваемых практически важных образцах. Предложен способ сопоставления микроколичеств влаги в маслах, топливах и технических жидкостях (в образцах с температурой вскипания выше соответствующих значений воды) и в непредельных углеводородах (в образцах с температурой вскипания ниже соответствующих значений воды).

Оптический рефлектометр применен для оценки значений фазовой диаграммы при наличии области частичной растворимости бинарных растворов. Созданный экспериментальный стенд, включающий термозонд и оптозонд, может быть применен для контроля за химической реакцией и наличием влаги в исходных компонентах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-69-10006, <https://rscf.ru/project/23-69-10006>.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРО-ФАЗОВОГО РАЗДЕЛЕНИЯ БИНАРНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛОКАЛЬНОМ НАГРЕВЕ

А.А. Губин*, Д.В. Волосников, П.В. Скрипов

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: artyom.gubin@vsk.com

Актуальность данной работы обусловлена тем, что на сегодняшний день существует глобальная тенденция миниатюризации устройств в разных технических областях, таких как малая распределённая энергетика, микроэлектроника, аэрокосмическая индустрия и т.д. Уменьшение характерных размеров аппаратов приводит к увеличению плотности тепловых потоков и локальных перегревов. Применение в мини устройствах микро-каналов с жидкостным охлаждением накладывает ограничения на использование традиционных теплоносителей не исключающих возникновение паровых пробок [1]. Перспективными теплоносителями для охлаждения упомянутых устройств являются бинарные растворы, имеющие нижнюю критическую температуру растворения (НКТР), поскольку, при заходе в область ограниченной совместимости компонент возникают микро-фазовое разделение, капиллярная конвекция и как следствие происходит интенсификация теплообмена [2]. Поэтому важной является задача исследования характерных черт теплообмена в бинарных растворах с НКТР. Рядом преимуществ при исследовании таких систем обладает метод импульсного нагрева, поскольку он позволяет осуществлять перегрев относительно линии равновесия жидкость-жидкость за счёт малых характерных времён эксперимента. В данной работе использовался метод термостабилизации платинового проволочного зонда погруженного в жидкость, когда температура проволоки в ходе нагрева поддерживалась постоянной, и измерялась подводимая к ней мощность [3].

Цель работы — выявление управляющего параметра и факторов определяющих интенсификацию теплообмена для теплоносителей с НКТР на основе экспериментальных данных, полученных методом локального импульсного нагрева теплоносителя с подавленным парообразованием. Одна из решаемых задач моделирование фазового перехода жидкость-жидкость в рамках метода управляемого импульсного нагрева проволочного зонда для верификации существующей модели теплообмена в перегретом расслаивающемся растворе, в целях прогнозирования эффекта интенсификации теплообмена.

Моделирование проводилось в специализированном программном пакете с помощью метода конечных элементов. В ходе моделирования решалась двумерная задача: получены распределения концентрации фаз, распределения температур и поля скоростей в ходе нагрева. По полученным данным были рассчитаны мощности отвода тепла от моделируемого зонда за счёт тепловой проводимости (в неподвижной среде) и за счёт сложной микроконвекции связанной с расслоением исходно однородного теплоносителя.

Полученные результаты имеют качественное согласие с результатами экспериментов с водными образцами растворов полипропиленгликоль (ППГ-425, 725), со среднечисловой молекулярной массой $M_n \sim 425, 725$. Определено, что основным фактором, влияющим на интенсивность теплообмена, является изменение вязкости теплоносителя.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-69-10006, <https://rscf.ru/project/23-69-10006/>

1. D. Deng, L. Zeng, W. Sun, Int. J. of Heat and Mass Transf. **175**, (2021).
2. D. Volosnikov, I. Povolotskiy, P. Skripov, Applied Thermal Engineering **236** (2024).
3. Д.В. Волосников, И.И. Поволоцкий, А.А. Старостин, П.В. Скрипов, Теплофизика высоких температур, **59**, 384 (2021).

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТУРНОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ С МЕДНЫМ ФИТИЛЕМ И АММИАКОМ В КАЧЕСТВЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

А.С. Панасенко*, Ю.Ф. Майданик, С.В. Вершинин

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: ann.panasenko.95@yandex.ru

Проблема обеспечения тепловых режимов функциональных компонентов, используемых в различных технических объектах, является одной из наиболее характерных. В частности, особенно остро она стоит в современной и перспективной электронике, где необходимо отводить высокие тепловые потоки на достаточно большое расстояние при сильно ограниченной разности температур между источником и стоком тепла в условиях ограниченного пространства. Контурные тепловые трубы (КТТ), которые являются пассивными теплопередающими устройствами, выполненными в виде контура, работающими по замкнутому испарительно-конденсационному циклу, продемонстрировали способность эффективно решать такие задачи [1]. Важным компонентом КТТ является мелкопористая капиллярная структура (фитиль), создающая прокачивающее давление и одновременно выполняющая роль испарительного теплообменника, теплового и гидравлического затвора. До сих пор такие фитили изготавливались из никелевых, титановых или стальных порошков, обладающих относительно невысокой теплопроводностью, но хорошо совместимые с таким широко используемым теплоносителем, как аммиак. Использование значительно более теплопроводных медных фитилей может снизить термическое сопротивление КТТ, однако, до сих пор существовало распространенное представление, что медь химически не совместима с аммиаком [2]. Цель данной работы состояла в том, чтобы экспериментальным путем опровергнуть это стереотипное представление.

Объектом данного исследования является КТТ с цилиндрическим испарителем диаметром 12 мм с корпусом из нержавеющей стали, снабженным медным фитилем пористостью 66% и пробойным радиусом пор 3,4 мкм. В качестве теплоносителя использовался дегидрированный аммиак.

Рабочие характеристики КТТ исследованы с источником тепла с размерами 50×50 см при отводе тепла от конденсатора циркулирующей водой с расходом 6,5 л/мин и температурами 8, 20 и 30°C.

На рисунке 1 представлены результаты экспериментальных исследований зависимости полного термического сопротивления КТТ от подаваемой тепловой нагрузки. Подтверждена совместимость меди и аммиака, что открывает новые возможности для изготовления и дальнейшего практического применения медь-аммиачных КТТ.

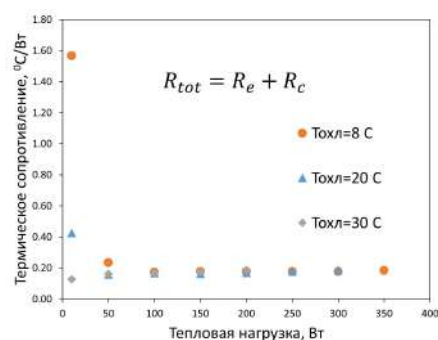


Рис. 1. Зависимость полного термического сопротивления КТТ от тепловой нагрузки при различных температурах охлаждения конденсатора, где R_{tot} — полное термическое сопротивление трубы, R_e — термическое сопротивление испарителя, R_c — термическое сопротивление конденсатора.

1. Ю.Ф. Майданик, М.А. Чернышева, Инженерно-физический журнал **97**, 5 (2024).
2. П. Дан, Д. Рей, Тепловые трубы. — М.: Энергия (1979).

КИНЕТИКА ГЕТЕРОГЕННОГО ВСПИПАНИЯ УМЕРЕННО ПЕРЕГРЕТОГО Н-ПЕНТАНА В СТЕКЛЯННОЙ ТРУБКЕ ПРИ ДАВЛЕНИЯХ ВЫШЕ АТМОСФЕРНОГО

М.А. Паршакова*, Е.В. Липнягов

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: parmari@yandex.ru

В работе представлены экспериментальные данные по изучению кинетики спонтанного вскипания перегретого н-пентана в стеклянной трубке с внутренним диаметром $D = 5,6$ мм. Трубка ориентирована вертикально, её нижний конец запаян. Середина трубки, заполненной н-пентаном, помещена в ячейку с теплоносителем ПМС-20 от проточного термостата Lauda C6 CS. Объем перегреваемой области $V = 2,3 \cdot 10^{-6}$ м³. Исследуемая жидкость вне

ячейки находится при комнатной температуре окружающей среды, нагреваясь за счет теплообмена с термостатируемой областью. Экспериментальная установка подробно описана в работе [1]. В текущем эксперименте установка модифицирована с целью измерения времени жизни перегретой жидкости τ при давлениях выше атмосферного с одновременной скоростной видеосъемкой процесса вскипания (до 1000 к/с). В опытах 1-7 (см. рис. 1(a)) времена τ измерены при постоянной температуре T , но разных давлениях p' в диапазоне 0,10-0,70 МПа. Опыты 8-10 проведены при постоянном давлении, но разных температурах в диапазоне 90,0-139,5 °С. На рис. 1(a) также представлены экспериментальные данные [2, 3],

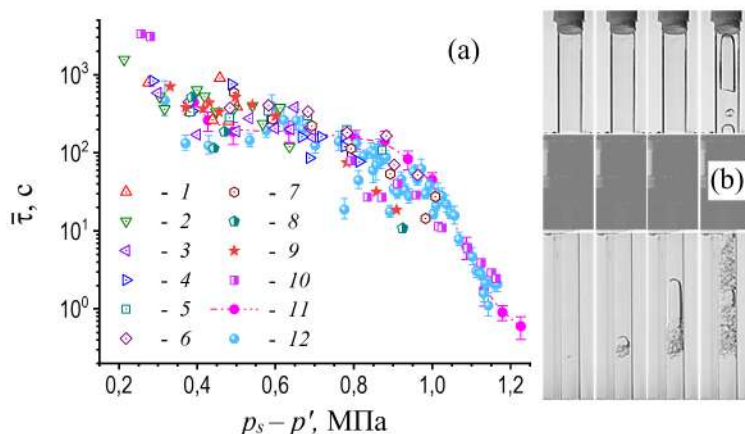


Рис. 1. Рис. 1. Вскипание перегретого н-пентана. (a) — Среднее время жизни перегретой жидкости в зависимости от глубины захода в метастабильную область $p_s - p'$; (b) — кадры вскипания при $p' = 0,62$ МПа, $T = 125,0$ °С ($\tau = 462$ с) и кипения в недогретой области (70,0 °С): 1-10 — эксперимент; 1-7 — изотермы; 8-10 — изобары; 11 — данные [2], $D = 7$ мм, $V = 2,7 \cdot 10^{-6}$ м³, $p' = p_{at}$; 12 — данные [3], $D = 5,6$ мм, $V = 2,8 \cdot 10^{-6}$ м³, $p' = p_{at}$; 1 — $T = 100,0$ °С; 2 — 110,0; 3 — 115,0; 4 — 120,0; 5 — 125,0; 6 — 130,0; 7 — 135,0; 8 — $p' = 0,12$ МПа; 9 — 0,14; 10 — 0,16.

полученные при атмосферном давлении $p_{at} = 0,10$ МПа в схожих условиях ($T = 85,0$ -139,9 °С).

Обнаружено, что зависимости среднего времени жизни перегретого н-пентана от глубины захода в метастабильную область $p_s - p'$ лежат вблизи одной кривой, где p_s — давление насыщенных паров при температуре перегрева. Выявлено, что после вскипания н-пентана устанавливается автоколебательный режим кипения метастабильной жидкости с пузырьковым или снарядным кипением в недогретой области (см. рис. 1(b)). В перегретой части образуются вихревые структуры, поддерживаемые пузырьковым кипением из нескольких центров, расположенных примерно на одной высоте. Большие пузыри (снаряды) образуются за счет укрупнения и слияния малых пузырей.

1. М.А. Паршакова, Е.В. Липнягов, Известия РАН. Серия физическая **88** (9), 62 (2024).

2. И.М. Падерин, В.С. Усков, Г.В. Ермаков, ТВТ **34** (6), 863 (1994).

3. М.А. Паршакова, Е.В. Липнягов, Известия РАН. Серия физическая **87** (11), 1554 (2023).

ТЕПЛООТДАЧА К ИМПУЛЬСНО ПЕРЕГРЕТОМУ РАСТВОРУ РАПСОВОЕ МАСЛО – ИЗОПРОПИЛОВЫЙ СПИРТ

И.И. Поволоцкий*, Д.В. Волосников, В.В. Шангин, А.А. Губин, П.В. Скрипов

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: iliyapov@rambler.ru

Масла растительного происхождения рассматриваются, как альтернатива традиционному дизельному топливу из нефти, поскольку они являются возобновляемым ресурсом и могут производиться локализовано. Одним из основных недостатков растительных масел является их изначально высокая вязкость и высокая температура вскипания по сравнению с традиционными топливами. Существуют различные подходы к решению этой проблемы, в частности, используется снижающая вязкость добавка к маслу в виде спирта [1]. Рапсовое масло, получаемое из семян рапса, было выбрано нами в качестве базовой жидкости, так как рапс широко распространен и хорошо приспособлен к умеренному климату нашей страны. Из биомассы рапса и производных этого растения можно синтезировать спирты с привлечением технологии гидролиза и ферментации [2].

Цель данного исследования — получение новых знаний о теплоотдаче к раствору рапсовое масло – изопропиловый спирт и сведений о температуре вскипания его исходных компонентов при различных давлениях. Данный раствор является моделью перспективного топлива. Исследовались образцы рапсового пищевого масла холодного отжима (ГОСТ 31759-2021) и изопропиловый спирт марки ХЧ (ТУ 6-09-402-87), а также их смесь (1 ÷ 20) мас.% спирта. Смесь готовилась с использованием магнитной мешалки Heidolph MR Hei-Тес в течение 30 минут до получения однородного состояния.

Для исследования теплоотдачи к образцам раствора и исходным компонентам был применен метод управляемого импульсного нагрева проволочного зонда, погруженного в исследуемую жидкость, а именно, режим термостабилизации при достижении температурой зонда заданного значения T_{st} [3]. Суть данного режима состоит в создании кратковременных квазиизотермических условий для импульсно нагреваемого зонда диаметром 20 мкм в веществе при соответствующем регулировании мощности его нагрева $P(t)$. При нагреве температура зонда увеличивается от начального значения T_0 до выбранного значения $T_{st}(t_2 \gg t_1) \approx \text{const}$ за время порядка $t_1 \sim 10^{-4}$ с и в дальнейшем поддерживается постоянной на заданном интервале времени $t_2 = 100$ мс.

Исследуемые растворы характеризуются полной совместимостью исходных компонентов. Обнаружено, что малые добавки (1 ÷ 5) мас.% изопропилового спирта в масло значительно (на десятки градусов) снижают температуру вскипания перегретой смеси в режиме её термостабилизации. На основе полученных опытных данных определены значения мгновенного коэффициента теплоотдачи при атмосферном давлении. Значения T_{st} изменялись от импульса к импульсу в диапазоне (100 ÷ 400)°С. Исследования проводились как в области устойчивых состояний, так и в области перегретых (относительно линии равновесия жидкость-пар) состояний. Обнаружено, что добавки спирта снижают теплоотдачу к перегретой смеси, что коррелирует с данными теплопроводности исходных компонентов в области устойчивых состояний.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-69-10006, <https://rscf.ru/project/23-69-10006/>.

1. T. Laza, Á. Bereczky, Fuel **90**, 803 (2011).
2. В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо **18**, 467 (2019).
3. Д. В. Волосников, И. И. Поволоцкий, А. А. Старостин, П. В. Скрипов, ТВТ **59**, 384 (2021).

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СПОНТАННОГО ВСКИПАНИЯ И КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАКТАТОВ

И.С. Романов^{1,2*}, А.П. Попов¹¹Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия²Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия*e-mail: igr.romanov02@gmail.com

Исследование температур спонтанного вскипания и критических параметров является ключевым для понимания фазовых переходов и термодинамических характеристик веществ, поскольку данные о критических свойствах имеют большое практическое значение, так как являются основой для оценки большого количества термодинамических свойств с использованием принципа соответственных состояний.

Целью данного исследования является определение температуры спонтанного вскипания и критических параметров ряда лактатов для улучшения понимания их фазовых переходов и термодинамических характеристик.

Фазовый переход всегда сопровождается отклонением системы от равновесия, он происходит с участием метастабильной фазы. Понятие метастабильного состояния предполагает сопоставление двух достаточно протяженных фаз, способных к равновесному сосуществованию, но под воздействием значительных возмущений она переходит в более стабильное состояние, что особенно важно для термонестабильных жидкостей. Поскольку лактаты являются термонестабильными жидкостями, исследования критических параметров были выполнены методом импульсного нагрева проволоочного зонда [1–3], помещенного в исследуемую жидкость. В основе метода лежит нагрев жидкости при помощи импульса электрического тока, подаваемого на тонкий платиновый проволоочный зонд. При таком нагреве жидкость достигает температуры, превышающей точку равновесного кипения, оставаясь в метастабильном состоянии до возникновения спонтанного гомогенного зародышеобразования паровой фазы [1,2] без разрушения структуры вещества.

В рамках данного исследования были изучены пять эфиров молочной кислоты (лактаты). Пропиллактат (CASRN 616-09-1) — эфир молочной кислоты и пропанола, применяется в качестве растворителя в лакокрасочной промышленности и производстве биополимеров. Пентиллактат (CASRN 6382-06-5) — эфир молочной кислоты и пентанола, обладает высокой растворяющей способностью для органических веществ и применяется в фармацевтической и косметической промышленности. Бутиллактат (CASRN 138-22-7) — эфир молочной кислоты и бутанола, используется как растворитель, а также в производстве пластификаторов. Этиллактат (CASRN 97-64-3) — наиболее распространенный эфир молочной кислоты и этанола, широко используется в производстве биоразлагаемых материалов. Метиллактат (CASRN 547-64-8) — эфир молочной кислоты и метанола, обладает высокой растворяющей способностью и экологической безопасностью, используется в процессах очистки и синтезе полимеров. Полученные данные о критических параметрах лактатов важны для областей деятельности, где требуется точное моделирование поведения веществ при высоких температурах и давлениях.

Полученные результаты подтвердили зависимость критической температуры и давления от молекулярной массы лактатов, также полученные экспериментальные данные были сопоставлены с теоретическими расчетами, выполненными с использованием методов групповых вкладов.

1. В.П. Скрипов, *Метастабильная жидкость*. — М.: Наука (1972).
2. В.П. Скрипов, Е.Н. Сеницын, П.А. Павлов и др., *Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии: Справочник*. — М.: Атомиздат (1980).
3. П.А. Павлов, *Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей*. Свердловск: УрО АН СССР (1988).

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ ГЕПТАНА И ПЕРФТОРГЕКСАНА ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 288.15 – 333.15 К

Е.А. Рукавичникова^{1,2*}, М.Р. Билукова^{1,2}, В.Н. Андбаева²

¹Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*e-mail: lena30954@gmail.com

В работе измерена капиллярная постоянная a^2 , плотность ρ и определено поверхностное натяжение σ жидких гептана (C_7H_{16}) и перфторгексана (C_6F_{14}) при атмосферном давлении в интервале температур 288.15–333.15 К. Гептан относится к классу алканов (ациклические углеводороды линейного или разветвлённого строения). Алканы используют как энергоносители, сырьё для нефтехимического синтеза и как растворители и компоненты смазочных масел. Перфторгексан относится к классу фторуглеродов и является производным гексана, в котором атомы водорода заменены на атомы фтора. Применяется в качестве искусственной крови, рабочего вещества в технологии жидкостного дыхания, при производстве лекарственных средств. Капиллярная постоянная измерена дифференциальным вариантом метода капиллярного поднятия [1]. Плотность измерена вибрационным плотномером ВИП-2МР. Поверхностное натяжение σ рассчитывалось по значениям капиллярной постоянной и плотности жидкой фазы по формуле [1]:

$$\sigma = \frac{1}{2} g a^2 \Delta \rho, \quad (1)$$

где $g = 9.816 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения, $\Delta \rho = \rho_L - \rho_V$ — разность ортобарических плотностей жидкой и паровой фазы. Поскольку в исследованной области температур $\rho_V \ll \rho_L$, при определении поверхностного натяжения принималось $\Delta \rho \approx \rho_L$. На рис. 1 представлена температурная зависимость поверхностного натяжения исследуемых жидкостей. Из рис. 1 видно, что поверхностное натяжение линейно убывает с ростом температуры. Максимальное отклонение эксперимента от линейной зависимости не превышает 0.135 мН/м.

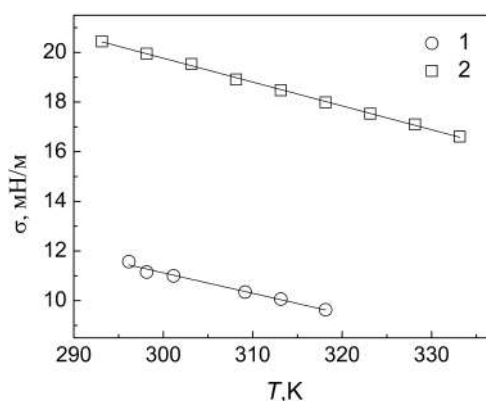


Рис. 1. Зависимость поверхностного натяжения от температуры: 1 — гептан, 2 — перфторгексан. Точки — эксперимент, сплошная линия — линейная аппроксимация.

1. В.Г. Байдаков, Межфазная граница простых классических и квантовых жидкостей. — Екатеринбург: УИФ «Наука» (1994).

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ СМЕСИ ЗОЛОТО—СВИНЕЦ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

Н.Н. Середкин^{1*}, К.В. Хищенко^{1,2,3}

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

³Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

*e-mail: nikser12@yandex.ru

В настоящей работе представлена модель термодинамики для смеси N компонент (на примере золота и свинца, $N = 2$) при высоких давлениях и температурах. Калорическое и термическое уравнения состояния компонентов представлены в форме функциональных зависимостей удельной внутренней энергии (E) и давления (P) от удельного объема (V) и температуры (T) [1]. Уравнение состояния смеси построено в предположении установления механического и теплового равновесия в компонентах. При этом для смеси при заданных P и T можно рассчитать характеристическую функцию этих параметров — удельную энергию Гиббса $G(P, T)$ — как сумму энергий Гиббса компонентов с учетом их массовых долей [1]. Зная характеристическую функцию G , можно определить остальные термодинамические параметры, в частности,

$$E(P, T) = G(P, T) - PV(P, T) + TS(P, T), \quad (1)$$

где S — удельная энтропия,

$$S(P, T) = (\partial G / \partial T)_P, \quad V(P, T) = (\partial G / \partial P)_T. \quad (2)$$

Тогда нетрудно получить выражения для удельного объема (V_{1N}) и удельной внутренней энергии смеси (E_{1N}):

$$V_{1N}(P, T) = \sum_{i=1}^N \alpha_i V_i(P, T), \quad E_{1N}(P, T) = \sum_{i=1}^N \alpha_i E_i(P, T), \quad (3)$$

V_i , E_i и α_i — удельный объем, удельная внутренняя энергия и массовая доля компонента i . По предложенной модели термодинамики проведены расчеты ударных адиабат золота, свинца и их смеси. Полученные результаты сопоставлены с ударно-волновыми данными [2] при высоких давлениях и температурах. Разработанные уравнения состояния золота, свинца и их смеси могут использоваться для решения задач численного моделирования гидродинамических процессов в конденсированном веществе [3].

1. Н.Н. Середкин, К.В. Хищенко, ТВТ **62**, 513 (2024).

2. S.P. Marsh (Ed.), LASL Shock Hugoniot Data. — Berkeley, CA: Univ. of California Press (1980).

3. Г.И. Канель, В.Е. Фортон, С.В. Разоренов, УФН **177**, 809 (2007).

КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛООТДАЧИ К ИМПУЛЬСНО ПЕРЕГРЕТЫМ РАСТВОРАМ БОРНОЙ КИСЛОТЫ

Д.В. Волосников¹, А.А. Ситдыков^{1,2*}, И.И. Поволоцкий¹, П.В. Скрипов¹¹Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия²Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия*e-mail: aleksey_sitdykov@mail.ru

Водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР) являются одними из самых распространённых в отечественной атомной промышленности. Доля вырабатываемой электроэнергии ВВЭР составляет порядка 2/3 от всех АЭС России. Важной независимой системой управления и защиты (СУЗ) водо-водяных энергетических реакторов является система борного регулирования. Доля действующих энергоблоков, где применяется система борного регулирования составляет более 60% от общего числа энергоблоков в РФ.

Наряду с другими независимыми СУЗ, система борного регулирования предназначена для компенсации части избыточной реактивности в начале кампании свежей топливной загрузки и компенсации медленных изменений реактивности в течение кампании. В СУЗ ВВЭР применяется борная кислота. Борная кислота в теплоносителе первого контура используется в качестве поглотителя тепловых нейтронов, а её концентрация зависит от состояния активной зоны и устанавливается в зависимости от запаса реактивности активной зоны. Поддержание реактора в критическом состоянии во время медленных переходных процессов достигается путем регулирования концентрации борной кислоты, вводимой в теплоноситель [1]. Концентрацию борной кислоты изменяют либо разбавлением теплоносителя реактора чистой водой, либо, наоборот, подпиткой первого контура раствором высокой концентрации. Диапазон изменения концентрации борной кислоты в активной зоне реактора ВВЭР-1000 составляет 0 — 13 г/кг, в отдельных случаях до 16 г/кг [2].

Исследуется теплоотдача к водным растворам борной кислоты в области устойчивых и относительно устойчивых состояний в случае кратковременного перегрева относительно температуры равновесия жидкость-пар раствора при различных давлениях в малых временных и пространственных масштабах. Теплоотдача происходит как за счет тепловой проводимости, так и при включении конвекции и вскипания [3]. Создана измерительная ячейка для работы с недиэлектрическими жидкостями. Ячейка апробирована на четырёх образцах водного раствора борной кислоты (0, 4, 10, 17 г/кг) в рамках метода управляемого нагрева зонда импульсом длительностью 10 мс. В условиях неподвижной среды определён коэффициент теплоотдачи водного раствора борной кислоты в диапазоне температур нагрева до 600 К и давлений до 20 МПа. Определены режимы и диапазоны кондуктивного и конвективного режимов теплообмена, а также температуры вскипания исследуемых образцов при атмосферном давлении. В отдельном опыте проведены измерения при малых значениях числа $Re = 1 - 3$. Сделаны выводы о возможности применения импульсного зондового метода для определения коэффициента теплоотдачи в условиях потока.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-69-10006, <https://rscf.ru/project/23-69-10006/>.

1. С.А. Андрушечко, А.М. Афров, Б.Ю. Васильев и др., АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. — М: Логос (2010).
2. Конотоп Ю.Ф., Одейчук Н.П., Красноручский В.С. и др., Современное состояние проблемы поглощающих нейтроны материалов и изделий на их основе для реакторов типа. — Х: ННЦ ХФТИ (1998).
3. Д.В. Волосников, И.И. Поволоцкий, А.А. Старостин и др., ТВТ **59**, 384 (2021).

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ПОРИСТОГО АМОРФНОГО ЛЬДА, НАСЫЩЕННОГО ПРОПАНОМ

А.С. Томин*, М.З. Файзуллин, А.В. Виноградов, В.П. Коверда

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: andrey.itf.2017@yandex.ru

При осаждении разреженных потоков водяного пара и газа на криоподложку возможно формирование аморфного льда, насыщенного газом. Нагрев подобных конденсатов приводит к появлению в аморфной среде кристаллических зародышей, их росту и последующей спонтанной кристаллизации с образованием газового гидрата. Газовый гидрат (ГГ) – это клатратное нестехиометрическое соединение, в котором молекулы воды формируют полый кристаллический каркас, заполненный молекулами газа. Такие соединения интересны благодаря способности связывать большое количество газа. Например, при разложении единичного объема гидрата метана выделяется порядка 160 объемов газа. Исследование свойств ГГ, условий получения и границ устойчивости может быть актуальным для разработки перспективных технологий хранения и транспортировки газов.

В данном докладе представлены результаты исследования свойств бинарной системы пористый аморфный лед-пропан. Образцы получали в вакууме совместным осаждением сверхзвуковых потоков водяного пара и пропана на медную подложку, охлаждаемую жидким азотом. Осаждение под углом к подложке (см. рис. 1) позволяет получать пористые образцы с большим газосодержанием [1].

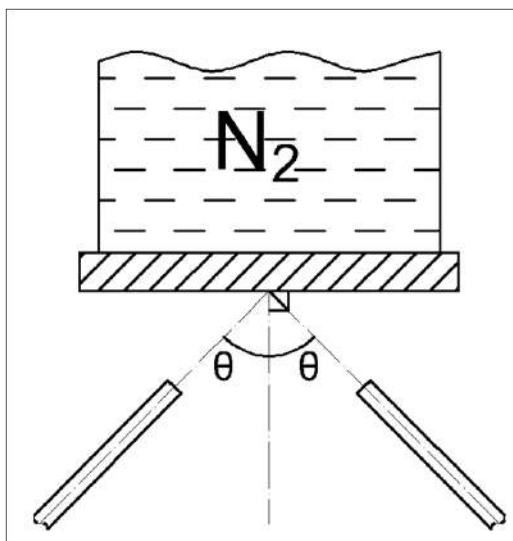


Рис. 1. Рис. 1. Схема осаждения образцов.

Для наблюдения за образцом использовали емкостный датчик, закрепленный на подложке. По показаниям датчика можно определить моменты стеклования и кристаллизации. Температура измерялась медь-константановой термопарой, закрепленной на емкостном датчике. Тепловые эффекты регистрировали методом ДТА (дифференциально-термический анализ). При осаждении образца температура подложки не превышала 90 К, вакуум в камере был не ниже 10^{-5} мм.рт.ст.

В работе были определены температуры стеклования и кристаллизации образцов при нагревании со скоростью $T' = 0,05$ К/с. Показано, что увеличение газосодержания образца повышает температуру его кристаллизации, а увеличение пористости приводит к изменению характера кристаллизации.

Результаты исследования свидетельствуют об успешности применения метода неравновесной конденсации потоков разреженного водяного пара и газа для получения ГГ. В перспективе метод может быть использован для получения гидрата водорода при решении проблем его хранения и транспорта в связи с развитием водородной энергетики.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00116, <https://rscf.ru/project/23-29-00116/>.

1. G.A. Kimmel, K.P. Stevenson, Z. Dohnálek, R.S. Smith, B.D. Kay, J. Chem. Phys. **114**, 5284 (2001).

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКЕЙЛИНГОВЫХ УРАВНЕНИЙ, ОПИСЫВАЮЩИХ ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА НА ЛИНИИ НАСЫЩЕНИЯ

Е.Е. Устюжанин

Научно-исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия
e-mail: evgust@gmail.com

В работе рассмотрены комплексы, которые содержат свойства шестифтористой серы (плотность жидкости (ρ_l), плотность газа (ρ_g)) на линии насыщения и представляют собой параметр порядка (f_s), средний диаметр (f_d), комплекс $ur = f_d/f_s$ и др. Исследуется ряд уравнений ($\Delta\rho_l(\tau)$, $\Delta\rho_g(\tau)$ и др.), ориентированных на теплофизические (ТФ) расчеты в широкой окрестности критической точки (КТ) SF_6 , здесь $\Delta\rho_l$, $\Delta\rho_g$ - относительные плотности, $\tau = (T - T_c)/T_c$ - относительная температура, T_c — температура в КТ.

Цель нашего исследования заключается в том, чтобы получить, во-первых, оценку погрешности (ρ_l, ρ_g, T) данных для SF_6 в диапазоне ($2 \cdot 10^{-8} < \tau < 10^{-2}$); в этом расчете намечено использовать надежные опытные (ρ_l, ρ_g, T) величины и рекомендации скейлинговой теории критических явлений (СТ). Во-вторых, намечено изучить функции ($f_s(\tau)$, $f_d(\tau)$, $\Delta\rho_l(\tau)$, ...) и численно оценить некоторые термодинамические комплексы ($ur, Z_l = \Delta\rho_l/f_s, Z_g = |\Delta\rho_g|/f_s$ и др.) в указанной области температур. В соответствии с выбранной целью авторами рассматриваются задачи III.

В рамках задачи I исследуем функции ($\Delta\rho_l(\tau)$, $|\Delta\rho_g|(\tau)$), с помощью которых традиционно представляют бинадаль вещества, здесь $\Delta\rho_l = (\rho_l - \rho_c/\rho_c)$ - относительная плотность жидкости, $\Delta\rho_g = (\rho_g - \rho_c/\rho_c)$ - относительная плотность газа. В этой части привлекаем результаты работ, в которых для SF_6 упоминаются: а) экспериментальные (ρ_l, ρ_g, T) данные, б) расчетные (ρ_l, ρ_g, T) данные, в) значения критических характеристик $D = (T_c, \rho_c, \alpha, \beta, \dots)$.

Для выбора формы, которая может описывать функции ($\Delta\rho_l(\tau)$, $|\Delta\rho_g|(\tau)$) в окрестности КТ, обратимся к моделям ($f_s(\tau)$, $f_d(\tau)$) [1]:

$$f_s = B_{s0}\tau^\beta + \dots + B_{s3}\tau^2 + B_{s4}\tau^3, f_d = B_{d0}\tau^{2\beta} + \dots + B_{d3}\tau^2 + B_{d4}\tau^3 \quad (1)$$

В методическом плане данной работы выполнено несколько этапов. Среди них: а) формирование исходного массива, содержащего надежные опытные (ρ_l, ρ_g, T) данные в интервале $2 \cdot 10^{-8} < \tau < 0.3$; б) разработка эмпирических уравнений $Z_{leff}(x_1, x_2)$, $Z_{geff}(x_1, x_2)$ которые имеют простую структуру и содержат коэффициенты ((x_1, x_2) , вычисляемые путем статистической обработки опытных (ρ_l, ρ_g, T) данных), в) формирование методики, нацеленной на поиск ((x_1, x_2)).

В рамках решения задачи II получена численная информация о форме бинадали при использовании: 1) координат ($\Delta\rho_l, |\Delta\rho_g|, \tau$) и 2) координат (Z_l, Z_g, ur_{bas}), здесь $ur_{bas} = (B_{d0}/B_{s0})\tau^\beta$ - некоторый базовый комплекс. Показаны некоторые преимущества второго варианта координат перед первым, в том числе выявлена симметрия между жидкостной веткой $Z_l(ur_{bas})$ и газовой веткой $Z_g(ur_{bas})$ бинадали.

В результате решения задачи III построены функции $Z_l(x_1, x_2, \tau)$ и $Z_g(x_1, x_2, \tau)$. На их основе получены численные данные, которые подтверждают, что в окрестности КТ указанные функции имеют простую структуру, отвечают требованиям СТ в окрестности КТ и удовлетворительно согласуются с соответствующими опытными данными.

1. Е.Е. Устюжанин, В.Ф. Очков, В.А. Рыков и др., Теплофизика и аэромеханика **30**, 591 (2023).

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ РАСТВОРА ПРОПАН–МЕТАН

М.Н. Хотиенкова*, В.Н. Андбаева

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: mkhotienkova@yandex.ru

В данной работе представлены результаты определения ортобарических плотностей и состава раствора пропан–метан, необходимые для расчета поверхностного натяжения. Концентрация метана в жидкой и паровой фазе раствора, а также ортобарические плотности определялись по модифицированному уравнению состояния Леммона-Якобсена [1]. Модификация заключалась в замене уравнений состояния чистых веществ, на уравнения, разработанные в Госстандарте СССР [2, 3], которые позволяют описать не только стабильные, но и метастабильные состояния.

В рамках одножидкостной модели плотность свободной энергии Гельмгольца однородной бинарной смеси может быть представлена в виде [1]:

$$f(\rho, T, x) = f^0(\rho, T, x) + f^r(\delta, \tau, x) + f^m(\delta, \tau, x), \quad (1)$$

где x — концентрация второго компонента смеси, выраженная в мольных долях, $f^0(\rho, T, x)$ — свободная энергия единицы объёма идеальной газовой смеси, $f^r(\delta, \tau, x)$ — вклад в свободную энергию от межмолекулярных взаимодействий, $f^m(\delta, \tau, x)$ — вклад, обусловленный неидеальностью раствора.

Термодинамическое равновесие между двумя и более сосуществующими фазами наблюдается в системе, когда нет потоков тепла, импульса и вещества через межфазную границу. Следовательно, температура, давление и химические потенциалы μ_i всех компонентов должны быть равны во всех фазах. Таким образом, для бинарного раствора на линии фазового равновесия должны выполняться следующие условия:

$$\begin{cases} T' = T'', \\ p' = p'', \\ \mu'_1 = \mu''_1, \\ \mu'_2 = \mu''_2. \end{cases} \quad (2)$$

Параметры T', p', μ'_1 и μ'_2 — температура, давление и химические потенциалы компонентов в жидкой фазе, T'', p'', μ''_1 и μ''_2 — в паровой фазе. Данная система была решена методом Ньютона-Рафсона, что позволило определить ортобарические плотности и концентрации исследуемого раствора на линии насыщения.

1. E.W. Lemmon, R.T. Jacobsen, Int. J. Thermophys. **20**, 825 (1999).
2. В.В. Сычёв, А.А. Вассерман, В.А. Загорученко и др., Термодинамические свойства метана, М.: Издательство стандартов (1979).
3. В.В. Сычёв, А.А. Вассерман и др., Термодинамические свойства пропана, М.: Издательство стандартов (1989).

ДИЛАТОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ

Д.А. Ягодин*, В.В. Филиппов

Институт металлургии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: DYagodin@yandex.ru

В работе представлены результаты измерения плотности некоторых чистых металлов в жидком состоянии дилатометрическим методом. Установка представляет собой муфельную печь, в которую помещен дилатометрический держатель образца. Он изготовлен из высококачественного Al_2O_3 по компенсационной схеме Хеннинга и расположен в печи вертикально. Измерения проводятся в среде аргона, который при непрерывной продувке с помощью газового расходомера подается во внутренний объем дилатометрической ячейки. Нагреватель печи состоит из четырех последовательно соединенных SiC стержней длиной 30 см, которые образуют квадруполь вокруг внешней трубки держателя образца. Печь подключается непосредственно к силовому симистору, которым управляет регулятор температуры Термодат 16к6 с обратной связью (термопара печи типа S). Аналогичная термопара служит для измерения температуры образца. Тепловое расширение образца определяется цифровым микрометром с разрешением 0.5 мкм. Регистрация температуры и измерение удлинения образца происходят в автоматическом режиме, с сохранением результатов в ПК. Установка позволяет проводить измерение плотности до 1600°C .

Для измерения плотности жидкого образца используется цилиндрический графитовый тигель, внутрь которого помещается крышка-поршень. Внешний диаметр этой подвижной крышки около 10.5 мм и при этом меньше внутреннего диаметра тигля примерно на 5 – 10 мкм. Они изготовлены из высокоплотного графита с низким КЛТР, который известен. Основными параметрами для определения плотности являются начальная длина образца h_0 и внутренний диаметр D_0 тигля, которые измеряются цифровыми микрометром и нутромером с точностью 5 мкм. При длине образца 15–20 мм и измерении массы m на аналитических весах погрешность измерения плотности не превышает 0.1% при комнатной температуре. Расчет плотности жидкого образца проводился по формуле

$$d(t) = \frac{4m}{\pi(D_0 + \Delta D(t))^2[h_0 + \Delta h'(t) + \Delta X - \Delta X']}, \quad (1)$$

где ΔX — измеренное приращение длины исследуемого образца, $\Delta X'$ — измеренное приращение длины стандарта. Тогда $(\Delta X - \Delta X')$ — приращение длины исследуемого образца с учетом коррекции. $\Delta D(t)/D_0$ и $\Delta h'(t)/h'_0$ — температурные зависимости относительного удлинения материала тигля и стандарта (измеряются отдельно). В опытах использовали индий и олово чистотой 99.999%. Измерения проводили от температуры плавления до 1000°C в режиме нагрева и охлаждения со скоростью 3 К/мин. Каждый образец измеряли дважды. Все полученные точки аппроксимировали общей кривой. Для жидкого индия $d(t) = -0.7319 \cdot t + 7136.4$, а для жидкого олова $d(t) = -0.6750 \cdot t + 7153.9$, где плотность приведена в кг/м^3 , а температура в $^\circ\text{C}$. Экспериментальные точки отклоняются от приведенных уравнений не более 0.2%. Для сравнения использовали рекомендованные в обзорных работах значения плотности для In [1] и Sn [2]. Максимальное отклонение от рекомендованных значений плотности не превышает 0.3% на краях температурных диапазонов. Таким образом, дилатометрический метод позволяет определить плотность, а также коэффициент объемного теплового расширения с высокой точностью.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИМЕТ УрО РАН.

1. M.J. Assael *et al.*, J. Phys. Chem. Ref. Data **41**, 033101 (2012).
2. M.J. Assael *et al.*, J. Phys. Chem. Ref. Data **39**, 033105 (2010).

ЭЛЕКТРОФИЗИКА

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ К СИЛЬНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЯМ НАНОКОМПОЗИТА Cu-Nb, ЛЕГИРОВАННОГО ПЕРЕХОДНЫМИ МЕТАЛЛАМИ

С.В. Заяц*, А.В. Спирин, Е.Ю. Зайцев, С.Н. Паранин

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: seriyoga@iep.uran.ru

Для обработки материалов штамповкой, сваркой, резкой и др. используются технологии магнитно-импульсной обработки, где основным инструментом является индуктор в виде одно- или многовитковой катушки. При многократной генерации импульсных сильных магнитных полей известна проблема деградации и разрушения проводящих материалов в условиях силового и термического воздействия тока и магнитного поля. Данная работа является продолжением исследования возможности применения волокнистого нанокompозита Cu-Nb, который обладает высокими значениями проводимости, сопротивлением разрыву и термостойкостью, легированного переходными металлами. В качестве исходных материалов были выбраны: микрокомпозиционный наноструктурный провод Cu-18%Nb сечением 4×6 мм, изготавливаемый методом сборки и волочения (компания РусатомМеталлтех, Москва) и коммерческие порошки: хрома ПХО-1М (99.9%), титана ПТЭМ-1 (99.8%) и никеля (ПНК-УТЗ (99.9%)).

Исходный провод сплава Cu-Nb измельчался в стружку поперечным фрезерованием в среде изопропилового спирта (ИПС) с аргоном. Далее производился помол стружки в порошок в шаровой планетарной мельнице АГО-2с, также в ИПС с аргоном. Переработка стружки размером фрагментов около 100 мкм до частиц размером менее 25 мкм проводилась за 90 минут обработки в мельнице при соотношении шары/порошок 5:1, загрузке около 25 г и скорости вращения барабанов 1850 об/мин. Существенного загрязнения материала углеродом и кислородом не наблюдалось. Композиции Cu-Nb с 1 – 5 масс.% Cr, Ti и Ni получались путем их смешивания в мельнице в атмосфере аргона в течение 3 минут.

Одноосное магнитно-импульсное прессование (МИП) всех порошков проводилось при давлении порядка 1.3 ГПа с нагревом до 430°C в вакууме. Диаметр компактов — 32 мм, толщина ~ 3 мм. Относительная плотность образцов после МИП составила 94 – 97% в зависимости от материала. Компакты спекали при 750 – 830°C в течение 1 часа, увеличение относительной плотности при спекании образцов не превышало 0.3 – 1.1%.

Уровень микротвердости H_v базового материала составлял 3.4 ГПа, для материалов с добавками в зависимости от ее типа и количества 3.9 – 4.9 ГПа. После отжига при 800°C микротвердость снижалась на 20 – 30% для всех составов и составляла 2.5 – 3.5 ГПа. Наилучшие значения прочности, 0.9 – 1 ГПа, наблюдались для материалов, отожженных при температуре 770 – 800°C/1 ч и при малых содержаниях легирующих элементов, 1 – 3 масс.%. Электросопротивление порошковых компактов базового состава и композиций до высокотемпературного отжига составило 6.46 – 11.4 мкОм·см в зависимости от состава. После отжига при 800°C сопротивление материалов заметно снижается до уровня 3.5 мкОм·см для базового состава и 4.1 – 7.4 мкОм·см для материалов с добавками.

Проведено испытание однородного образца из материала базового состава при генерации в тестовом концентраторе магнитного поля с индукцией 40 Тл и длительностью полупериода 14 мкс. В ходе испытаний тестовая пластина композита хрупко треснула поперек тока на 25-м импульсе. Разрушение может происходить за счет превышения порогового поля для данного материала, оцененного теоретически в 37.3 Тл, разупрочнения композита вследствие циклического нагрева со снижением на 30% микротвердости материала, а также из-за низкой пластичности композита.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 24-29-00800.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ НИКЕЛЬ-ЦИНКОВЫХ ФЕРРИТОВ ДЛЯ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВ

В.Е. Патраков*, С.Н. Рукин

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: patrakov@iep.uran.ru

В настоящее время в мощной импульсной энергетике нано- и пикосекундного диапазонов активно развивается новый класс устройств — нелинейные линии передачи с насыщенным ферритом (NLTL, Nonlinear Transmission Line). Основными применениями ферритовых NLTL являются генерирование мощных импульсов СВЧ колебаний [1] и компрессия монополярных мультигигаваттных импульсов (режим MCL, Magnetic Compression Line) [2]. Конструктивно ферритовая NLTL представляет собой коаксиальную линию передачи, на центральный проводник которой надеты ферритовые кольца. Линия помещается во внешнее магнитное поле, за счёт которого феррит вводится в состояние магнитного насыщения. При подаче на вход такой линии высоковольтного импульса он распространяется по ней в волновом режиме, при этом форма импульса изменяется за счёт взаимодействия с ферритом: генерация мощных СВЧ колебаний происходит при больших длительностях входного импульса, а сжатие импульса во времени с увеличением пиковой мощности — при малых длительностях входного импульса.

Существенное влияние на волновой режим распространения импульса оказывают диэлектрическая и магнитная проницаемости сред, заполняющих линию, так как ими определяется скорость распространения электромагнитной волны в линии. В описанных устройствах магнитная проницаемость обычно близка к единице, так как феррит находится в состоянии насыщения, и основное влияние на распространение волны оказывает его диэлектрическая проницаемость. Однако этот параметр обычно не контролируется производителем. Для дальнейшего исследования ферритовых NLTL, в особенности для снижения количества неизвестных входных параметров при их численном моделировании, актуальным является измерение диэлектрической проницаемости используемых нами ферритовых материалов. В данной работе было проведено измерение диэлектрической проницаемости для колец из никель-цинковых ферритов марок М200ВНП и М1000НН производства компании «Нева-Феррит» (г. Санкт-Петербург). Внешние диаметры исследованных колец составляли от 12 до 180 мм. Измерение диэлектрической проницаемости проводилось методом пробного конденсатора [3] в частотном диапазоне 0.4 — 100 кГц. При создании обкладок пробных конденсаторов было уделено особое внимание устранению воздушных зазоров, вносящих погрешность при подобных измерениях.

Измерения показали, что в диапазоне частот 0.4 — 50 кГц диэлектрическая проницаемость значительно снижается при увеличении частоты. Такое поведение было объяснено в рамках эффекта Максвелла-Вагнера (миграционной поляризации), проявляющегося в поликристаллических образцах с низкой электропроводностью [4]. На частотах выше 50 кГц влияние миграционной поляризации снижается, и относительная диэлектрическая проницаемость образцов стремится к постоянному значению, лежащему в диапазоне 11 — 13 для образцов из разных партий.

1. П.В. Припутнев, И.В. Романченко, В.В. Ростов, ЖТФ **93**, 595 (2023).
2. V.E. Patrakov *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **95**, 084709 (2024).
3. Ф. Эме, Диэлектрические измерения. — М.: Химия (1967).
4. П.Т. Орешкин, Физика полупроводников и диэлектриков. — М.: Высшая школа (1977).

НАНОМАТЕРИАЛЫ

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ПОДАЧИ ГАЗА В КАМЕРУ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ОКСИДА ГАФНИЯ-ЦИРКОНИЯ

П.А. Александрович*, А.Н. Потылкин, Д.А. Голосов

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

*e-mail: pavelaleksandrowitch@yandex.ru

В последние годы оксид гафния (HfO_2) стал рассматриваться в микроэлектронике как наиболее перспективный *high-k* диэлектрик для замены традиционного диоксида кремния SiO_2 [1]. Однако пленки HfO_2 не обладают термической стабильностью и кристаллизуются при температурах 400–450°C, что приводит к увеличению токов утечки [2]. Один из способов получения термостойких пленок HfO_2 основан на легировании HfO_2 цирконием.

Проведены исследования диэлектрических характеристик (диэлектрической проницаемости ϵ , тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\varphi$, частотной дисперсии D_F , ширины запрещенной зоны E_g , плотности тока утечки J_L , пробивного напряжения $E_{\text{пр}}$) пленок оксида гафния-циркония, нанесенных методом реактивного магнетронного распыления Hf-Zr составной мишени в среде Ar/O_2 газов. Ток разряда магнетрона, частота импульсов и коэффициент заполнения во всех экспериментах поддерживались постоянными и составляли $I_t = 1.5 \text{ A}$, $F_p = 10 \text{ кГц}$, $D = 80\%$. Использовалось два способа подачи газов в камеру: смесь газов (Ar/O_2) подавалась в газораспределитель магнетрона (совместная газоподача, или СГ); Ar подавался в газораспределитель магнетрона, а O_2 подавался в область подложки (раздельная газоподача, или РГ).

Установлено, что при распылении Hf-Zr составной мишени и использовании совместной газоподдачи получены пленки $\text{Hf}_{0.6}\text{Zr}_{0.4}\text{O}_y$ с ϵ 14–16 ($F = 1 \text{ кГц}$) и 13–15 ($F = 1 \text{ МГц}$) частотной дисперсией $D_F = 1.1$, $\text{tg}\varphi$ 0.008–0.012 ($F = 1 \text{ кГц}$) и 0.05–0.06 ($F = 1 \text{ МГц}$), напряженностью поля пробоя $(2.5 - 3.0) \cdot 10^8 \text{ В/м}$, и плотностью тока утечки $(3 - 5) \cdot 10^{-5} \text{ А/м}^2$ (таблица 1). При этом E_g пленок составила 5.87–5.89 эВ.

Применение РГ не приводило к значительным изменениям характеристик пленок, однако при РГ отмечалось снижение D_F до 1.02, уменьшение $\text{tg}\varphi$ до 0.05 и J_L до $(3 - 5) \cdot 10^{-5} \text{ А/м}^2$. При этом наблюдалось повышение ϵ до 14.5–16 ($F = 1 \text{ кГц}$) и до 14.5–16 ($F = 1 \text{ МГц}$) и увеличение E_g пленок до 5.86–5.89 эВ (таблица 1). Важным преимуществом РГ являлась возможность нанесения качественных пленок $\text{Hf}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_y$ в переходном режиме работы системы при высоких скоростях нанесения. При РГ и концентрации кислорода 33–50%, где формируются качественные пленки, скорость нанесения изменялась в пределах от 0.19 до 0.47 нм/с. Для сравнения, при СГ качественные пленки $\text{Hf}_{0.6}\text{Zr}_{0.4}\text{O}_y$ формировались при концентрации кислорода более 29.2%, что соответствует реактивному режиму нанесения, где скорость нанесения составляла менее 0.08 нм/с.

Таблица 1. Диэлектрические характеристики пленок оксида гафния-циркония.

Мишень, режим нанесения	C_{Zr} , ат.%	ϵ		D_F	$\text{tg}\varphi, \cdot 10^{-3}$		J_L при $E = 5 \cdot 10^7 \text{ В/м}$, А/м^2	$E_{\text{пр}}, \cdot 10^8 \text{ В/м}$	E_g , эВ
		1 кГц	1 МГц		1 кГц	1 МГц			
Hf-Zr, СГ	40	14-16	13-15	1.1	8-12	50-60	$(3 - 5) \cdot 10^{-5}$	2.5-3.0	5.87-5.89
Hf-Zr, РГ	40	14.5-16	14.5-16	1.02	6-8	40-50	$(3 - 5) \cdot 10^{-5}$	2.3-3.5	5.86-5.89

Исследования выполнены в рамках научного проекта № Т23МЭ-013 при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

1. H. Wong, H. Iwai, Microelectron. Eng. **83**, 1867 (2006).
2. M. Li *et al.*, Appl. Phys. Lett. **98**, 252903-1 (2011).

МОДЕЛЬ ГРАФЕНА В АТОМНОПОДОБНОМ БАЗИСЕ: ПОДБОР ПАРАМЕТРОВ БАЗИСА
В ПАКЕТЕ SIESTA

А.Я. Переходюк, Е.В. Аникина*

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

*e-mail: anikate@inbox.ru

Базис атомноподобных орбиталей позволяет достаточно быстро моделировать атомную структуру материалов [1], но за такое быстроедействие приходится расплачиваться необходимостью определения параметров базисного набора, обеспечивающих оптимальное сочетание точности расчетов и требуемых вычислительных ресурсов. Зачастую такие подготовительные расчеты опускаются в описании исследований материалов, хотя выбор параметров моделирования может достаточно сильно повлиять на результаты. В данной работе на примере монослоя графена была исследована зависимость характеристик системы не только от параметров атомноподобного базисного набора, но и от порядка, в котором рассматривались параметры базиса.

Для моделирования в рамках теории функционала электронной плотности использовался программный пакет SIESTA [2]. Гексагональная ячейка моделирования с параметром трансляции 8.66 Å содержала 24 атома углерода. Для имитации изолированного слоя графена вакуумная прослойка составляла не менее 40 Å. Разбиение обратного пространства на $19 \times 19 \times 1$ k -точек и разбиение прямого пространства с параметром MeshCutoff 360 Рб (≈ 4.8 кэВ) позволили получить погрешность определения полной энергии системы менее 10 мэВ. Для обменно-корреляционного функционала использовалось приближение обобщенных градиентов. Базисный набор брался в размере SZ [2].

Оказалось, что подбор радиуса обрезки орбитали не зависит от порядка выбора орбитали для оптимизации. И в случае первоначальной оптимизации орбитали C(2s), и в случае первоначальной оптимизации орбитали C(2p) оптимальные радиусы обрезки составили для C(2s) и C(2p) 4.50 Å и 4.76 Å, соответственно. Эти параметры коррелируют с полученными ранее оптимальными величинами для базиса размера DZP [3]. Таким образом, при поиске оптимального значения основного радиуса обрезки (при наличии нескольких атомноподобных орбиталей) можно рассматривать орбитали независимо друг от друга.

Работа выполнена в рамках грантовой программы Виктора Христенко «Шаг в будущее».

1. K.V. Alantev *et al.*, Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **87**, 11 (2023)
2. J.M. Soler *et al.*, J. Phys. Condens. Matter **14**, 11 (2002)
3. .V. Kaplun, E.V. Anikina, V.P. Beskachko, Bull. South Ural State Univ., Ser. Math. Mech. Phys. **14**, 2 (2022)

СТРУКТУРНЫЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОЧНЫХ НАНОСТРУКТУР, ОБОГАЩЕННЫХ ^{57}Fe

И.В. Блинов^{1*}, А.В. Столбовский^{1,2}, Ю.В. Корх¹, Т.В. Кузнецова¹, И.К. Максимова¹,

А.Ю. Гермов¹, Б.Ю. Голобородский¹, Р.М. Фалахутдинов¹, Д.Ф. Акрамов¹

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

²Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*e-mail: blinoviv@mail.ru

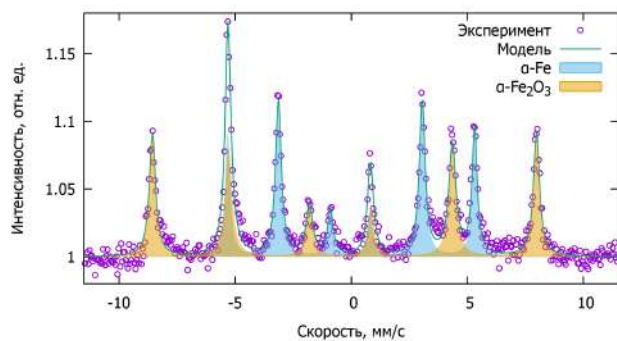


Рис. 1. Мессбауэровский спектр (CEMS) MgO (100)/ ^{57}Fe (50 нм)/Cr (2 нм) после отжига 260°C — 1 ч.

Исследование межслойных границ в пленочных наноструктурных материалах является важной и актуальной задачей в области физики магнитных явлений. Поскольку для наноразмерных объектов толщина граничной переходной области может быть сопоставима с толщиной слоев, то магнитные свойства наноструктур будут определяться как характеристиками слоев, так и межслойными границами. В настоящее время не имеется достаточной информации по структурам интерфейсов многослойных наноструктур, что сдерживает их практическое применение в устройствах на их основе.

В настоящей работе проведены исследования магнитных свойств, структуры слоев и межслойных границ в железосодержащих пленочных наноструктурах. Образцы MgO (100)/ ^{57}Fe (50 нм)/Cr (2 нм) были приготовлены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на монокристаллические подложки MgO. С помощью рентгеновской дифракции показано, что в образцах формируется высокосовершенная аксиальная текстура $\langle 100 \rangle$ с осью перпендикулярной плоскости подложки. Измерены спектры комбинационного рассеяния света на конфокальном рамановском микроскопе Confotec MR 200 (SOL Instruments) с лазерным возбуждением на длине волны 532 нм. Обнаружено, что при термомагнитной обработке в атмосфере кислорода, в пленках формируется оксид железа $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ с высокой степенью кристалличности, о чем свидетельствует появление высокоинтенсивных узких рамановских пиков. Проведены мессбауэровские измерения пленок на ядрах ^{57}Fe в геометрии обратного рассеяния с регистрацией электронов конверсии (CEMS) в исходном и отожженном состояниях (Рис. 1). Магнитными измерениями установлено, что в образцах после напыления поле анизотропии составляет 500 Э и в плоскости пленки формируется анизотропия 4-го порядка. После термомагнитной обработки коэрцитивная сила H_c значительно возрастает от 20 до 150 Э, при этом объемная доля $\alpha\text{-Fe}$ уменьшается. Отсутствие сдвига петли магнитного гистерезиса не наблюдается, что вероятно, обусловлено низкой магнитной анизотропией антиферромагнитного оксида $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [1]. В дальнейшем планируется повышение анизотропии путем проведения дополнительной термообработки в магнитном поле [2].

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 24-22-20083 и Правительства Свердловской области.

1. R. Coehoorn, K.H.J. Buschow (Ed.), Handbook of magnetic materials, – Amsterdam, Elsevier B.V., (2003).
2. A. Harres, J. Geshev, Journal of Physics: Condensed Matter **24**, 32 (2012).

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ОКИСЛЕННЫХ ПЛЕНОК ПЕРМАЛЛОЯ С ЭФФЕКТОМ ОБМЕННОГО СМЕЩЕНИЯ

И.В. Блинов*, Ю.В. Корх, Т.В. Кузнецова, И.К. Максимова, Р.М. Фалахутдинов, Д.Ф. Акрамов

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

*e-mail: blinoviv@mail.ru

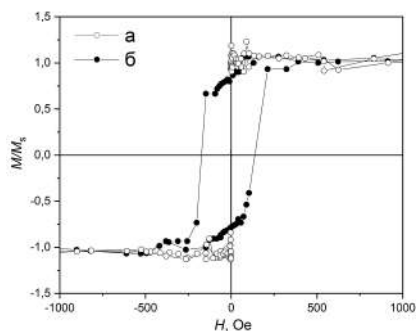


Рис. 1. Петли магнитного гистерезиса $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ta}$ (5 нм)/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (20 нм) а) после напыления б) после отжига на воздухе 280°C – 1 ч.

В формировании макроскопических свойств металлических магнитных наноструктур большое значение имеет структура слоев и межслойных границ, влияние близости соседних слоёв, смешивание и диффузия различных материалов в области интерфейса. Изменяя их структурные свойства, можно существенным образом воздействовать в частности на формирование однонаправленной анизотропии в наноструктурах с границей раздела ферромагнетик/антиферромагнетик.

Методом магнетронного напыления на монокристаллических подложках Al_2O_3 приготовлены наноструктурные пленки пермаллоя ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$), выполнены исследования их структурных и магнитных свойств, исследована кинетика формирования оксидов в различных условиях окисления.

В результате рентгенографического исследования установлено, что в пленках после напыления формируется аксиальная текстура $\langle 111 \rangle$. Показано, что совершенство текстуры, главным образом, определяется качеством используемых подложек. Пленки $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, обладающие более совершенной текстурой, характеризуются более низкой коэрцитивной силой.

После окисления пленки были исследованы методом рамановской спектроскопии. Установлено, что на поверхности $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ при окислении в камере магнетронной установки в атмосфере особо чистого кислорода образуются оксиды $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, Fe_3O_4 , NiFe_2O_4 с преобладанием NiFe_2O_4 . В пленках пермаллоя, окисленных на воздухе, по мере роста температуры термомагнитной обработки формируются преимущественно оксиды NiFe_2O_4 и аморфные оксигидроксидные группы железа. При дальнейшем повышении температуры отжига формирующиеся оксиды на поверхности пленок $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ являются оксидами железа (преимущественно $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$).

Методом атомно-силовой микроскопии установлено, что с увеличением температуры термообработки увеличивается среднеквадратичная шероховатость и на поверхности образуются и укрупняются кластеры оксидных фаз с формированием упорядоченно расположенных «цветочноподобных» фаз [1]. Методом магнитно-силовой микроскопии визуализирована доменная микроструктура образцов. В исходном состоянии образцы характеризуются доменной структурой типа слабо контрастных полосовых доменов. При увеличении температуры отжига магнитно-силовые изображения приобретают вид известный как «магнитная рябь».

Определены закономерности изменения гистерезисных свойств и определена их температурная стабильность при варьировании температуры отжига. Установлены условия формирования обменного сдвига петли гистерезиса в окисленных пленках пермаллоя. Соответствующие петли магнитного гистерезиса приведены на Рис. 1.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 24-22-20083 и Правительства Свердловской области.

1. J. F. Mir, S. Rubab, M. A. Shah, Chemical Physics Letters **741**, 137088 (2020).

СИНТЕЗ, МАГНИТНЫЕ И МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЕ СВОЙСТВА НАНОПРОВОЛОК 3d-ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В ТОЛСТЫХ ФОЛЬГАХ АЛЮМИНИЯ

А.А. Верясова^{1*}, А.Е. Дрягина¹, А.Н. Горьковенко¹, Н.А. Кулеш¹, Е.В. Кудюков¹, А.А. Юшков¹,
В.О. Васьковский^{1,2}

¹Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

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

*e-mail: alenaver75@gmail.com

Магнитные нанопроволоки относятся к перспективному классу магнитных композиционных наноматериалов, потенциальные области их применения включают в себя среды для записи информации, сенсоры, устройства спинтроники, и т.д. [1,2]. Их уникальные свойства обусловлены сочетанием анизотропии формы, ферромагнитных свойств, высокой электропроводности и малыми размерами. В таких системах возможна реализация магнитострикционных и магнитоэлектрических эффектов. У нанопроволок, синтезированных с использованием шаблонов анодированного алюминия, есть возможность модуляции длины, диаметра, а также состава [2]. Нанопроволоки, полученные в режиме постоянного тока можно использовать в различных встраиваемых системах, например, в трековой памяти [3].

Работа направлена на получение металлических нанопроволок Ni, FeNi в шаблонах анодированного алюминия с использованием электроосаждения в режиме постоянного тока, а также на изучение их магнитных и магниторезистивных свойств.

В качестве основы выступали толстые фольги Al толщиной 2 мм. Анодирование алюминия проводилось в два этапа в растворе щавелевой кислоты [4,5]. После получения шаблонов оставшийся слой Al стравливался, и на одну из поверхностей шаблона наносился проводящий слой меди методом магнетронного распыления. Далее проводилось электролитическое осаждение в них чистых металлов и сплавов Ni, Fe в DC-режиме.

Образцы были аттестованы с целью уточнения магнитных гистерезисных и магниторезистивных свойств. Измерение магнитных свойств проводилось на вибрационном магнетометре Lake Shore 7407 при комнатной температуре в диапазоне полей ± 15 кЭ и оригинальной установке для исследования магнитосопротивления, измерения проводились в двух направлениях: перпендикулярно и параллельно оси нанопроволок. Также было проведено исследование морфологии и структуры с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEOL-2100. Исследования показали, что нанопроволоки являются поликристаллическими и не обладают выраженной текстурой. Размеры кристаллитов варьируются в диапазоне 15 – 250 нм. Нанопроволоки на дне пор имеют ветвистую морфологию, что связано со способом получения нанопроволок. Измерение магнитных гистерезисных свойств показало, что ось легкого намагничивания лежит вдоль оси массива нанопроволок, что характерно для таких структур. Анизотропия магнитосопротивления для образца FeNi составила $2.3 \pm 0.1\%$, для Ni образца — $1.1 \pm 0.1\%$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ, проект № FEUZ 2024-0060.

1. Fernández-Roldán J.A., Micromagnetism of cylindrical nanowires with compositional and geometric modulations (2019).
2. Vazquez M., Journal of Magnetism and Magnetic Materials **543**, 168634 (2022)
3. Rial J., Proenca M.P., Nanomaterials **10** (12), 2403 (2020).
4. Lee W., Park S.J., Chemical reviews **114**, 7487 (2014).
5. Dryagina A. *et al.*, IEEE Magnetics Letters **13**, 1 (2022).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОТРУБОК НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛЁНКИ $CN_x : Eu_yO_z$

А.С. Лавренюк^{1,2*}, В.В. Недёркин^{1,2}, Е.И. Шемченко²

¹Донецкий государственный университет, Донецк, Россия

²Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», Донецк, Россия

*e-mail: alina2003626@mail.ru

Для получения различных перспективных композитных материалов применяются углеродные нанотрубки (ОУНТ или МУНТ). На их основе возможно получение твёрдотельных неохлаждаемых кубитов (NV^- -вакансия), совместимых с современными электронными вычислительными системами. Легирование редкоземельными материалами углеродных нанотрубок позволяет получать однофотонные лазеры для кубитов, а также приёмники излучения таких лазеров. Таким образом, на основе углеродных нанотрубок возможно получение твёрдотельных квантовых вычислительных ячеек типа «излучатель-кубит-приёмник», совместимых с современной полупроводниковой электроникой. На свойства нанотрубок влияют их геометрические характеристики, меняя которые во время роста нанотрубок, возможно управлять свойствами композитного материала [1,2].

Обычно на стандартных углеродных плёнках наблюдается хаотичное расположение нанотрубок [3]. Было обнаружено линейно-упорядоченное расположение углеродных нанотрубок в плёнках, полученных на модернизированной вакуумной установке ВУП-5М с DC-магнетроном, выращенных в атмосфере азота ($CN_x : Eu_yO_z$), и легированных оксидом европия, состоящих из плотно упакованных пучков нанотрубок [4].

Целью работы было исследование геометрических характеристик по выделенным линиям, совпадающим с упорядоченными рядами нанотрубок, в полученном образце.

Изображения пленок $CN_x : Eu_yO_z$ [5] были получены методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью зондовой лаборатории NTEGRA Aura. Обработку и анализ АСМ-изображений осуществляли в программе ImageAnalysis, которая позволяет выделять по заранее заданным параметрам неоднородности на поверхности образца зёрна, являющиеся частями нанотрубок, выступающих над сплошной поверхностью пленки. Высота зёрен определяется относительно общего нулевого уровня, т.е. базовой поверхности, ниже которой лежит сплошной слой плотноупакованных нанотрубок.

При измерении геометрических характеристик зёрен по выделенным направлениям выполнялся срез на некотором заданном уровне, определяемом коэффициентом k_{SL} , равным отношению заданной высоты сечения к высоте глобального максимума поверхности пленки. Вычисленные параметры были получены при $k_{SL} = 0.5$.

Было определено: геометрические характеристики углеродных нанотрубок в обнаруженных рядах совпадают с таковыми основной массы нанотрубок в образце; упорядоченные ряды в плёнках состоят преимущественно из пучков углеродных нанотрубок; ряды углеродных нанотрубок в плёнке являются упорядоченными, что может свидетельствовать о периодическом процессе в плазме DC-магнетрона.

1. В.Д. Окунев *и др.*, ФТВД **34**, 37 (2024).
2. В.Д. Окунев *и др.*, Письма в ЖТФ **46**, 47 (2020).
3. В.Д. Окунев *и др.*, ФТТ **63**, 433 (2021).
4. Е.И. Шемченко, И.Я. Лихтенштейн, ФТВД **29**, 63 (2019).
5. Е.И. Шемченко, А.Г. Петренко, И.Я. Лихтенштейн, Вестник Луганского национального университета им. Владимира Даля **5**(11), 151 (2018).

ЗАВИСИМОСТЬ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ФЕРРИТ-ГРАНАТОВЫХ ПЛЕНОК ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Г.С. Максимов*, М.Б. Стругацкий, Е.М. Максимова

Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, Симферополь, Россия

*e-mail: neondreamer00@gmail.ru

Эпитаксиальные магнитные пленки со структурой феррит-гранатов получили широкое практическое применение, что требует высокого совершенства их кристаллической структуры. Основными источниками напряжений в пленочных материалах являются: разница параметров элементарных ячеек пленки и подложки Δa и отличие коэффициентов теплового расширения пленки и подложки. Эти напряжения, возрастающие с толщиной пленки, могут релаксировать с образованием дислокаций. Поэтому исследования внутренних напряжений в пленках, причин их появления и изменении при температурных воздействиях, по-прежнему, остаются актуальной задачей. На сегодня, исследования теплового расширения пленочных материалов либо посвящены пленкам другого состава, либо феррит-гранатовым пленкам, но в них рассмотрено тепловое расширение пленки-подложки как единого объекта [1]. Метод исследования, представленный в настоящей работе, дает возможность проследить за изменением структуры пленки и подложки по отдельности.

Цель настоящей работы — установить влияние температурного воздействия на структурные характеристики магнитных феррит-гранатовых пленок и немагнитных гранатовых подложек.

Рентгенодифракционные исследования проводились для двух феррит-гранатовых пленок кристаллографической ориентации (111) на дифрактометре Shimadzu XRD 7000 Maxima в $\text{CuK}\alpha$ -излучении с графитовым монохроматором, с использованием Si в качестве внешнего стандарта в низкотемпературной камере Anton Paar TTK-450, рис. 1.

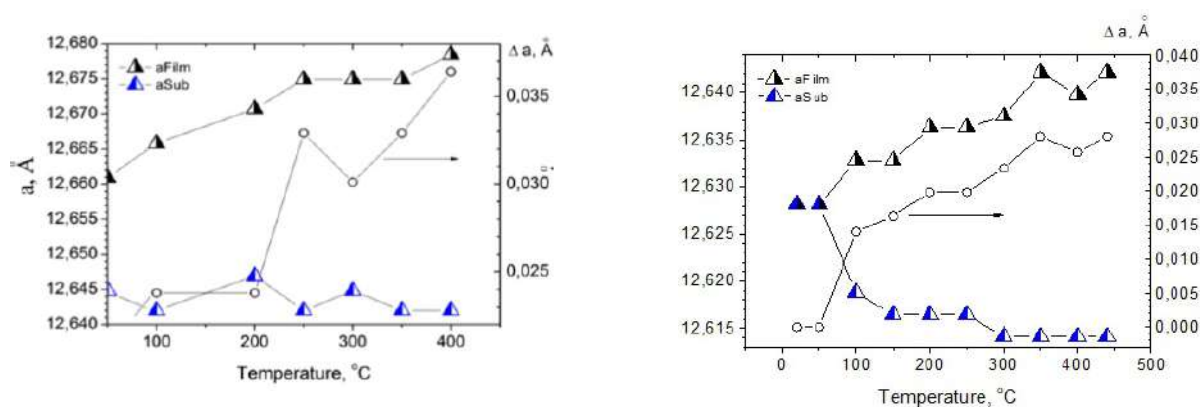


Рис. 1. Температурная зависимость параметров элементарных ячеек, (треугольники, левая ось) и величины их несоответствия Δa (кружки, правая ось): а) пленка $(\text{Bi,Lu,Gd,Ca})_3(\text{Fe,V})_5\text{O}_{12}$, подложка $(\text{GdCa})_3(\text{GaMgZr})_5\text{O}_{12}$; б) пленка $(\text{Y,La,Bi})_3(\text{Fe,In,Sc,Ge,Co})_5\text{O}_{12}$, подложка $\text{Y}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$

По графикам видно наличие температурных участков с наиболее резким изменением величины параметра несоответствия Δa . Для этих же участков характерна наибольшая разница коэффициентов теплового расширения пленки и подложки, Аномалии теплового расширения на этих участках мы связываем с наличием в них температур компенсации и Кюри, в которых происходит изменение магнитной структуры пленок.

1. С.С. Аплеснин и др., Нанофизика и наноэлектроника. Труды XXII Международного симпозиума **2**, 140 (2018).

ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА ТОНКИХ ПЛЕНОК ГЕМАТИТА

К.А. Меренцова*, С.С. Дубинин, А.С. Шкварин, А.П. Носов

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

*e-mail: merencovak@imp.uran.ru

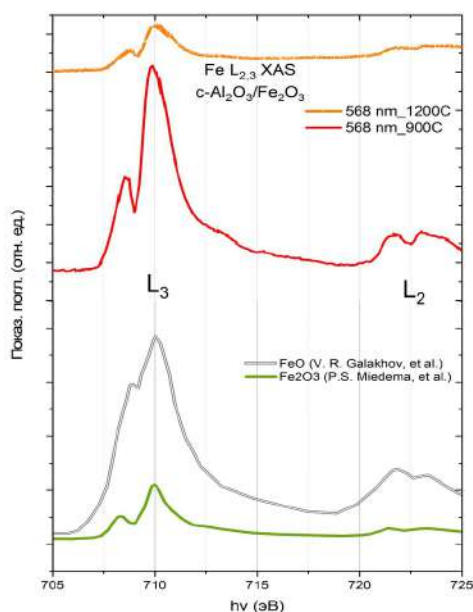


Рис. 1. Рентгеновские спектры отражения (XAS) Fe для пленок термообработанных при 900°C и 1200°C. Для сравнения воспроизведены спектры из работ [1,2].

где они направлены в противоположные стороны. Различие энергий между этими состояниями вызывает образование двух четко разделенных пиков в спектре поглощения. При возбуждении $2p$ -электрон может переходить на более высокие уровни, такие как $3d$ или $4s$, а переходы с уровней L_2 и L_3 к вакантным состояниям в зоне проводимости формируют наблюдаемые пики. Интенсивность этих пиков зависит от различий в энергии между уровнями.

Исследования подтвердили наличие ферромагнитной фазы магнетита (Fe_3O_4) в структуре пленок после термообработки при температуре 900°C. Анализ спектров выявил характерные пики, связанные с переходами $2p$ -электронов, что указывает на изменения электронной структуры материала. Литературные данные о спектре Fe_3O_4 были получены методом сложения спектров FeO и Fe_2O_3 [1,2] в равных пропорциях, что подтверждает адекватность моделирования структуры и электронных характеристик магнетита на основе известных свойств других оксидов железа. Полученные спектры рентгеновской абсорбции (XAS) для нанопленок Fe_2O_3 были сопоставлены с литературными данными, при этом различие составило всего 0.5%, что свидетельствует о высокой точности измерений.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ для ИФМ УрО РАН.

1. V.R. Galakhov *et al.*, J. Phys. Chem. C **114**, 22413 (2010).
2. P.S. Miedema *et al.*, J. Electron Spectros. Relat. Phenomena **187**, 32 (2013).

Характеристика наночастиц железа в тонких пленках Fe_2O_3 методом рентгеновской абсорбционной спектроскопии (XAS) позволила выявить особенности их электронной структуры и магнитных свойств. Тонкопленочный гематит (Fe_2O_3), напыленный на подложки c -сапфира (c — Al_2O_3) методом магнетронного напыления в среде с соотношением газов 90% аргона и 10% кислорода, был исследован для изучения влияния термообработки на его свойства. Результаты показали, что нагревание при температуре 900°C приводит к образованию дополнительной ферромагнитной фазы магнетита (Fe_3O_4) в антиферромагнитных пленках, что имеет важное значение для применения в таких областях, как спинтроника, сенсоры и системы хранения данных.

В спектрах рентгеновского поглощения Fe_2O_3 наблюдаются внутриатомные и короткодействующие эффекты, влияющие на поведение катионов $2p$. Спектр поглощения $2p$ -электронов расщепляется на L_3 и L_2 компоненты из-за спин-орбитального взаимодействия, что приводит к разделению уровней $2p$ на два подуровня: L_3 ($2p_{3/2}$), где спин и орбитальный момент направлены в одну сторону, и L_2 ($2p_{1/2}$),

ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНКИ $CN_x : Eu_yO_z$, ПОЛУЧЕННОЙ С ПОМОЩЬЮ ДС-МАГНЕТРОНАВ.В. Недёркин^{1,2*}, А.С. Лавренюк^{1,2}, Е.И. Шемченко²¹Донецкий государственный университет, Донецк, Россия²Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, Донецк, Россия*e-mail: vova.nederkin@gmail.com

Для получения различных перспективных композитных материалов применяются углеродные нанотрубки (УНТ). Легирование углеродных нанотрубок редкоземельными металлами позволяет получать перспективные материалы для создания вычислительных ячеек для квантового компьютера по типу «излучатель-кубит-приемник» совместимых с современной полупроводниковой электроникой, а платиной — катализаторы с большим сроком службы. Так же интенсивно проводятся исследования по применению активированных углеродных нанотрубок в медицине. Учитывая, что свойства углеродных нанотрубок зависят от их геометрических характеристик, то изучение закономерностей формирования углеродных нанотрубок является актуальной задачей.

Методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) было проведено исследование морфологии поверхности углеродных плёнок, выращенных в атмосфере азота, и легированных трёхвалентным оксидом европия ($CN_x : Eu_yO_z$), состоящих из плотноупакованных пучков многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ) [1-3].

Целью работы было исследовать явления, повлиявшие на морфологию поверхности плёнок $CN_x : Eu_yO_z$ с необычным, линейно-упорядоченным расположением пучков углеродных нанотрубок.

АСМ-изображения плёнок $CN_x : Eu_yO_z$ были получены с помощью зондовой лаборатории NTEGRA Aura. Обработку и анализ АСМ изображений осуществляли в программе Image Analysis.

В процессе работы ДС-магнетрона в плазме распылённого вещества мишени возбуждаются продольные ионно-звуковые волны при наличии достаточного количества ионов в потоке [4-6] и формированием устойчивых неоднородностей плотности потока распыленного вещества мишени.

Ионно-звуковые колебания модулируют приток частиц на подложку, не влияя на процесс роста пленки, обеспечивая прямую связь между явлениями в плазме, структурой и свойствами пленки. В результате, все параметры образцов представляют собой «замороженные» колебания. Частота «замороженных» колебаний в пленках, как и частота ионно-звуковых колебаний в плазме, зависит от давления рабочего газа [7].

Методами электронной микроскопии были обнаружено, что на поверхности присутствуют выраженные линейные структуры вертикальных МУНТ в виде упорядоченных полос. Период таких полос чётко коррелирует с частотой ионно-звуковых колебаний в плазме ДС-магнетрона и связан с формированием устойчивых неоднородностей плотности потока распыленного вещества мишени.

1. B. Schultrich. Tetrahedrally Bonded Amorphous Carbon Films – Berlin: Springer (2018).

2. Mazzanti S. *et al.*, ACS Catalysis **11**, 11109 (2021).

3. A.C. Ferrari, S.E. Rodil, J. Robertson, Physical Review (B) **67**, 155306 (2003).

4. Б.Б. Кадомцев, Коллективные явления в плазме - М.: Наука (1988).

5. В.Д. Окунев *и др.*, Письма в ЖТФ **46**, 47 (2020).

6. В.Д. Окунев *и др.*, ФТТ **63**, 433, (2021).

7. В.Д. Окунев *и др.*, ФТВД **34**, 37 (2024).

ТОПОГРАФИЯ СКОЛОТОЙ ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛОВ $\text{Ti}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{Ch}_2$ ($\text{Ch} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$)

М.С. Постников^{1*}, А.Ю. Кузнецова¹, А.И. Меренцов¹, Ю.В. Корх¹, Е.В. Таркаева², А.Н. Титов¹

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

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

*e-mail: mithanya0403@gmail.com

Одним из способов варьирования электронной структуры дихалькогенидов переходных металлов является замещение по подрешетке металла. При синтезе материалов $M\text{Ch}_2$ ($M = \text{Ti}, \text{Zr}$) обнаружено, что растворение компонентов происходит за счет растворения слоев $M\text{Ch}_2$, а не атомов. Установлено, что слои (структурные фрагменты) заряжены друг относительно друга и именно это приводит к образованию монокристалла единого состава [1,2]. Исследование топографии этих структурных фрагментов представляет интерес с точки зрения влияния замены халькогена на морфологию поверхности в ряду $\text{Ti}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{S}_2$, $\text{Ti}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{Se}_2$, $\text{Ti}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{Te}_2$. Такие рельефы могут быть использованы для последующего создания гетероструктур.

Синтез образцов $\text{Ti}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{Ch}_2$ ($\text{Ch} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$) выполнен методом твердофазной реакции из компонентов TiCh_2 и ZrCh_2 . Полученные образцы аттестовывались методом рентгеноструктурного анализа. Монокристаллы выращены методом газотранспортной реакции. Аттестация монокристаллов проводилась на сканирующем электронном микроскопе с использованием приставки с энергодисперсионным анализом, такая методика является объемной и не позволяет изучить состав наноразмерного включения на поверхности монокристалла. Топография поверхности изучалась методом атомно силовой микроскопии в режиме измерения высоты. Для достижения гладкой и чистой поверхности непосредственно перед экспериментом монокристаллы скалывались. На сколотой поверхности монокристаллов обнаружены включения (см. Рис. 1).

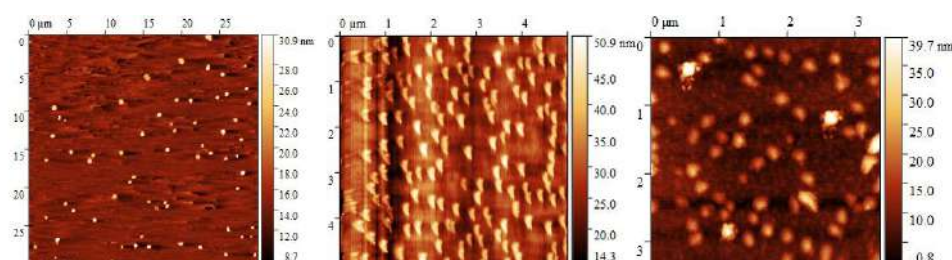


Рис. 1. Топография поверхности монокристаллов. Левый рисунок — $\text{Ti}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{S}_2$, центральный — $\text{Ti}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{Se}_2$, правый — $\text{Ti}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{Te}_2$

На монокристалле $\text{Ti}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{S}_2$ наблюдаются включения высотой от 20 до 50 нм и диаметром около 0.1 мкм, также эти включения имеют гексагональную форму, что говорит о их когерентности с исходным кристаллом. В $\text{Ti}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{Se}_2$ диаметр включений меньше (~ 0.2 мкм), как и высота (около 20 нм). В теллуриде высота включений в среднем 10 нм и диаметр включений составляет ~ 0.25 мкм. При замещении халькогена в $\text{Ti}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{Ch}_2$ (S–Se–Te) происходит уменьшение высоты включений и увеличение площади основания, что коррелирует с переходом от диэлектрика к полупроводнику [1,2].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и правительства Свердловской области (проект РНФ № 24-23-20136, соглашение 9-24-МГ).

1. A.I. Merentsov *et al.*, J. Phys. Chem. Solids. **160**, 110309 (2022).

2. A.S. Shkvarin *et al.*, J. Phys. Chem. C **126**, 7076 (2022).

КИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ
В КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ InP/ZnSС.С. Савченко^{1*}, А.С. Вохминцев¹, И.А. Вайнштейн^{1,2}¹Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия²Институт металлургии УрО РАН, Екатеринбург, Россия*e-mail: s.s.savchenko@urfu.ru

Коллоидные квантовые точки (КТ) на основе фосфида индия представляют собой перспективные материалы для оптоэлектроники, биолюминесцентных меток и сенсоров благодаря их настраиваемым оптическим свойствам, экологической безопасности и биосовместимости, а также гибким возможностям функционализации поверхности и создания многослойных систем [1]. Вместе с тем квантовый выход люминесценции таких нанокристаллов сильно зависит от наличия структурных дефектов, что определяет актуальность исследования характеристик соответствующих энергетических состояний [2]. Нами впервые показано [3], что методы термостимулированной люминесценции (ТСЛ) со спектральным разрешением позволяют получить фундаментальную информацию о процессах захвата и рекомбинации с участием дефектов в коллоидных квантовых точках.

Явление ТСЛ было исследовано для коллоидных КТ InP в оболочке ZnS с различными средними размерами в диапазоне 2.0 – 2.6 нм и стабилизирующими покрытиями на основе полиакриловой кислоты и поливинилпирролидона. Для изучения ТСЛ образцы охлаждались до 7 К с помощью гелиевого криостата Janis CCS-100/204N и облучались ультрафиолетовым светом дейтериевой лампы ЛД (Д) через фильтр УФС–1. Затем осуществлялся линейный нагрев образцов до 340 К со скоростью 10 К/мин и с использованием спектрографа Shamrock SR-303i-B и ПЗС-матрицы Newton^{EM} DU970P-BV-602 регистрировался люминесцентный сигнал. Экспериментальные данные представляют собой трехмерные зависимости в координатных осях: температура, длина волны, интенсивность люминесценции. В работе обсуждаются как температурные сечения, являющиеся спектрами свечения ТСЛ, так и спектральные сечения, соответствующие температурным кривым ТСЛ.

Обнаружено, что ансамбли квантовых точек InP/ZnS демонстрируют ТСЛ отклик в виде широкой полосы с единственным максимумом как по температурной, так и по спектральной шкале. Анализ спектров ТСЛ показал, что соответствующие рекомбинационные процессы предположительно обусловлены участием дефектов на основе оборванных связей атомов индия и фосфора в области интерфейса ядро/оболочка. Оценка характеристик процессов захвата с использованием метода начального роста, формальной кинетики общего порядка и W-функции Ламберта указывает на доминирование кинетических процессов первого порядка и низкую вероятность повторной локализации носителей заряда. Результаты настоящей работы демонстрируют перспективы использования подходов термоактивационной спектроскопии для изучения свойств локальных дефектных состояний в энергетической структуре коллоидных квантовых точек. Полученные с помощью ТСЛ данные могут быть использованы при оптимизации синтеза КТ с целью получения более совершенных оптических материалов для разработки оптоэлектронных устройств и сенсоров с улучшенными характеристиками.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-00133, <https://rscf.ru/project/24-72-00133/>.

1. А.А. Ремпель и др., Успехи химии **93**, RCR5114 (2024).
2. S. Savchenko *et al.*, Phys. Chem. Chem. Phys. **26**, 18727 (2024).
3. С.С. Савченко, А.С. Вохминцев, И.А. Вайнштейн, Изв. РАН. Сер. физ., в печати (2025).

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ И ФИЗИКА НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Пленки $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ на стекле с примесью CeO_2 А.В. Петров^{1*}, О.В. Снигирев¹, Ю.В. Блинова², А.Г. Маресов¹¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия²Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия*e-mail: petroov123@gmail.com

Железосодержащие сверхпроводники фазы 11 (Fe_1Se_1), где «11» отражает стехиометрические индексы Fe и Se, обладают целым рядом интересных свойств, среди которых: простейшая структура, чрезвычайно высокие критические магнитные поля (порядка 50 Тл), и критические токи при сильных магнитных полях [1] всего примерно на порядок ниже, чем у купратных сверхпроводников, что делает их привлекательными для фундаментальных исследований природы сверхпроводимости в этих соединениях.

С точки зрения прикладных исследований, нужно отметить, что многие высокотемпературные сверхпроводники на основе железа токсичны и нетехнологичны, в то время как селенид железа безопасен и допускает достаточно простые технологические операции. Также, низкая по сравнению с купратами температура осаждения (порядка 300°C) пленок FeSe или пленок FeSeTe с частичным замещением Se на Te [2] может облегчить задачу получения ВТСП проводников 3-го поколения на диэлектрических аморфных гибких подложках, необходимых для передачи высокочастотных сигналов и электроэнергии на переменном токе с минимальными потерями [3].

В данной работе найдены режимы напыления тонких пленок $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ методом импульсного лазерного осаждения (PLD) на аморфную подложку из стекла К-208, содержащего в своем составе окись церия CeO_2 . При этом температура перехода пленки $T_C = 9.5$ К в сверхпроводящее состояние оказалась выше, чем на боросиликатном стекле Fischer Scientific, не имеющем в своем составе CeO_2 [4,5], но ниже температуры сверхпроводящего перехода мишени $T_{C(M)} = 14$ К, что противоположно общеизвестной картине свойств тонких пленок семейства FeSe и $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ на кристаллических подложках. Из результатов измерений оценены энергия активации вихрей U , величина критического тока, плотность критического тока j_C , верхнее критическое поле H_{C2} и поле необратимости H_{irr} . В частности, при $T = 2$ К j_C достигает $(3 - 5) \cdot 10^4$ А/см² в собственном поле и снижается примерно на порядок при увеличении магнитного поля до 4 Тл; H_{irr} (4 К) возрастает до 10 Тл, а энергия активации вихрей U , хотя и существенно меньше, чем в оксидных сверхпроводниках, сопоставима с данными для монослойной пленки $\text{FeSe}/\text{SrTiO}_3$ [6] и монокристаллов FeSeTe [7]. При этом кристаллическая ячейка пленки сжата в плоскости ab ($a = 3.760$ Å) и растянута по оси c ($c = 6.045$ Å).

1. H. Ding *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **36**, 11LT01 (2023).
2. I. Tsukada *et al.*, AIP Adv. **6**, 095314 (2016).
3. O. V. Snigirev *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **507**, 022033 (2014).
4. L. Chen *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 020201 (2013).
5. L. Chen, C.-F. Tsai, A. Chen *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **23** (3), 7500904 (2013).
6. W. Zhao, C.-Z. Chang, X. Xi. *et al.*, 2D Mater. **3**, 024006 (2016).
7. R. Kumar, G. D. Varma, Phys. Status Solidi B **257**, 1900552 (2020).

СПИН-ВОЛНОВЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ В ГИБРИДНЫХ СТРУКТУРАХ
СВЕРХПРОВОДНИК/ФЕРРОМАГНИТНЫЙ ИЗОЛЯТОР С ДИНАМИЧЕСКИМ
ЭФФЕКТОМ БЛИЗОСТИ

Я.В. Туркин*, Н.Г. Пугач

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

*e-mail: yturkin@hse.ru

В работе рассматривается спектр стоячих спиновых волн в тонкой пленке ферромагнитного диэлектрика, находящегося в контакте со сверхпроводником s -типа. Изменение спектра ферромагнитного резонанса (ФМР) происходит в результате динамического обменного эффекта между сверхпроводником и диэлектриком. При прецессии намагниченности на границе между сверхпроводником и диэлектриком возникает динамическая наведенная намагниченность, которая может служить нестационарным возбуждением на границе магнетика. Если частоты прецессии ФМР мод и первого типа колебаний достаточно близки, может возникнуть ситуация, когда интерфейсная наведенная намагниченность прецессирует с частотой первой моды колебаний, что приводит к ее возбуждению и эффективному закреплению спинов. Такой эффект позволяет возбуждать более высокие типы спиновых волн с помощью однородного переменного электромагнитного поля.

Модель этого эффекта основана на системе линейных нестационарных уравнений Узаделя [1] и уравнениях Ландау-Лифшица-Гильберта, которые описывают взаимодействие сверхпроводника и ферромагнитного диэлектрика. С учетом периодичности прецессии намагниченности, уравнение Узаделя может быть представлено в виде разложения Фурье [2], что позволяет преобразовать задачу в частотное пространство. Возбуждение спиновых волн на границе между магнетиком и сверхпроводником моделируется с использованием нестационарных граничных условий, которые учитывают частичное закрепление намагниченности и изменения спектра магнонов из-за эффекта близости сверхпроводника. Обратное влияние близости сверхпроводника к ферромагнитному диэлектрику может быть учтено через нестационарный спиновый ток, инжектируемый из магнитного слоя. В модели для сверхпроводника учитывается только слагаемое первого порядка по углу спинового смешивания. Полученные результаты позволяют оценить зависимость порога возбуждения первой спиновой моды от коэффициента затухания в ферромагнитном диэлектрике, а также исследуется влияние спиновой поляризации квазичастиц на систему [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного Фонда (проект № 23-72-00018).

1. A. Brinkman *et al.*, Phys. Rev. B **68**, 224513 (2003).
2. Y.V. Turkin, N. Pugach, Beilstein J. Nanotechnol. **14**, 233 (2023).
3. M. Eschrig *et al.*, New J. Phys. **17**, 083037 (2015).

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

СПЕКТРОСКОПИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
ДЛЯ ФОТОВОЛЬТАИКИ СВИНЦОВО-ГАЛОГЕНИДНЫХ ПЕРОВСКИТОВВ.Е. Аникеева^{1*}, О.И. Семенова², М.Н. Попова¹¹Институт спектроскопии РАН, Троицк, Россия²Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия*e-mail: anikeeva.ve@phystech.edu

Солнечные элементы на основе перовскита являются перспективной фотоэлектрической технологией третьего поколения благодаря высокой эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую, а также из-за низкой стоимости изготовления фотоактивного слоя [1]. Исследования функциональных свойств свинцово-галогенидных перовскитов позволяют улучшить характеристики оптоэлектронных приборов на их основе.

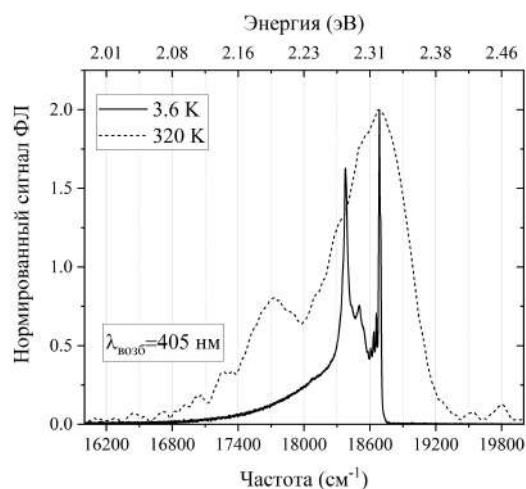


Рис. 1. Нормированные спектры фотолуминесценции монокристалла CsPbBr₃ при температуре 3.6 К (сплошная линия) и 320 К (прерывистая линия) при возбуждении светом с $\lambda_{\text{возб}} = 405$ нм.

двухступенчатый гистерезис смещения положения спектральных линий в области температур фазовых переходов, соответствующий переходу из тетрагональной фазы в промежуточную, а затем в ромбическую. Для более стабильного неорганического перовскита CsPbBr₃ были измерены спектры фотолуминесценции (ФЛ) и «бесконтактной» фотопроводимости. Впервые наблюдалась богатая структура линий в низкотемпературном спектре ФЛ (рис. 1): узкий пик (2.318 эВ) — ФЛ автолокализованного экситона, набор линий (2.314 – 2.279 эВ), отнесённых к ФЛ экситонно-примесных комплексов и широкая полоса с максимумом 2.24 эВ, соответствующая ФЛ примесных или дефектных центров [4].

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ для ИСАН № FFUU-2024-0004.

1. H. Lin, M. Yang, X. Ru *et al.*, Nat. Energy **8**, 789 (2023).
2. K.N. Boldyrev *et al.*, J. Phys. Chem. C **124**, 23307 (2020).
3. V.E. Anikeeva *et al.*, Optical Materials: X **20**, 100259 (2023).
4. В.Е. Аникеева *и др.*, Оптика и спектроскопия **132**, 793 (2024).

В докладе будут представлены результаты спектроскопического исследования монокристаллов гибридных перовскитов CH₃NH₃PbX₃ (X = I, Br, Cl), а также полностью неорганического CsPbBr₃. Были исследованы температурные (3 – 300 К) и поляризационные зависимости спектров отражения в терагерцовом диапазоне (15 – 700 см⁻¹), что позволило определить параметры фононов в данных соединениях [2,3]. Сильный ангармонизм в CH₃NH₃PbX₃ (X = I, Br) был выявлен при анализе спектров пропускания в среднем инфракрасном диапазоне. Расщепление некоторых линий в ромбической фазе связано с туннелированием катиона метиламмония между несколькими минимумами потенциальной энергии [2,3]. Впервые методами инфракрасной спектроскопии были зарегистрированы структурные фазовые переходы в CH₃NH₃PbX₃ (X = I, Br), для CH₃NH₃PbBr₃ наблюдался

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ КРИОТЕРМОМЕТРЫ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ ДВОЙНЫХ ФТОРИДОВ КАЛИЯ-ИТТРИЯ, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Er^{3+} ИЛИ Ho^{3+}

М. Дياب^{1,2*}, М.Н. Попова²

¹Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

²Институт спектроскопии РАН, Москва, Россия

*e-mail: diab.m@phystech.edu

Фторидные люминофоры с редкоземельными (РЗ) ионами широко используются в устройствах фотоники. Кристаллы K_2YF_5 и KY_3F_{10} , легированные ионами РЗ элементов, известны как эффективные стоксовы и антистоксовы люминофоры, преобразователи частоты света, материалы для лазеров и термолюминесцентных дозиметров. Недавно было показано, что на нанокристаллах $\text{KY}_3\text{F}_{10}:\text{Eu}^{3+}/\text{Mn}^{2+}$ можно сделать люминесцентный термометр с хорошей чувствительностью в области комнатной температуры и выше [1].

Мы исследовали возможность использования люминесценции кристаллов $\text{K}_2\text{YF}_5:\text{Er}^{3+}$ [2] и $\text{KY}_3\text{F}_{10}:\text{Ho}^{3+}$ [3] для измерения криогенных температур. Спектры высокого разрешения (до 0.01 cm^{-1}) регистрировались на Фурье-спектрометре Bruker IFS 125HR. Проведено сравнение температурных зависимостей отношений интенсивностей линий люминесценции, $LIR(T)$, и больцмановских населенностей начальных уровней переходов (см. Рис. 1). Выбраны пары линий люминесценции, попадающих в окно прозрачности оптических волокон, для измерений температуры с максимальной абсолютной чувствительностью при температуре около 23 К. Относительная чувствительность при этом достигает $9\% \text{ K}^{-1}$. Показано, что на основании измеренных температурных зависимостей полуширин линий можно создать люминесцентный криотермометр на область температур 20 – 180 К с мало меняющейся относительной чувствительностью (от 2 до $3\% \text{ K}^{-1}$).

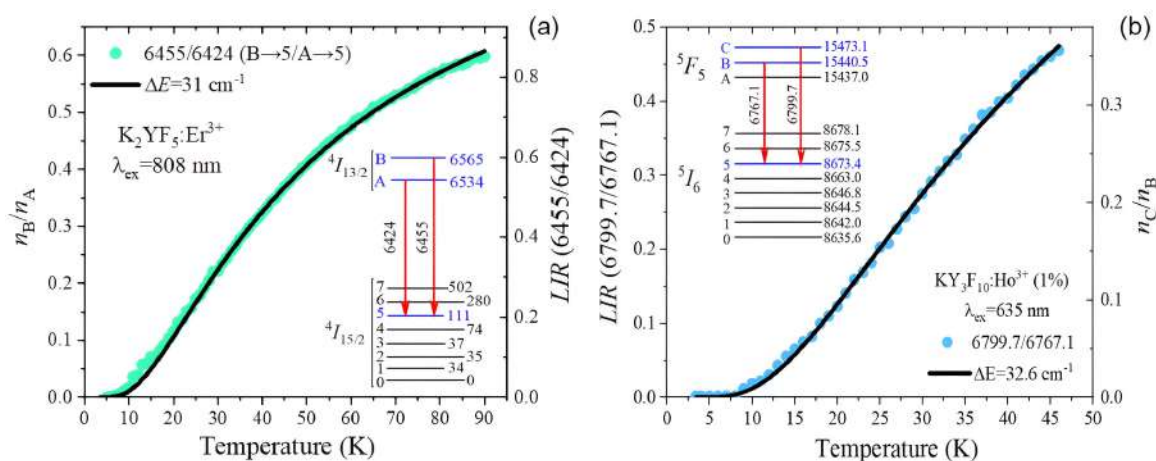


Рис. 1. Температурные зависимости LIR и больцмановских населенностей начальных уровней переходов (a) ($B \rightarrow 5$) и ($A \rightarrow 5$) в $\text{K}_2\text{YF}_5:\text{Er}^{3+}$, (b) ($C \rightarrow 5$) и ($B \rightarrow 5$) в $\text{KY}_3\text{F}_{10}:\text{Ho}^{3+}$.

Изученные кристаллы ($\text{K}_2\text{YF}_5:\text{Er}^{3+}$, $\text{KY}_3\text{F}_{10}:\text{Ho}^{3+}$) обладают значительным потенциалом для измерения криогенных температур с использованием люминесцентной больцмановской ратиометрической термометрии и температурных зависимостей ширины линий.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант № 23-12-00047).

1. J. Ying *et al.*, J. Mater. Sci. Mater. Electron. **35**, 1414 (2024).
2. K. N. Boldyrev *et al.*, Opt. Spectrosc. **132**, 216 (2024).
3. M. Diab *et al.*, Opt. Mater. **160**, 116676 (2025).

ОПТИЧЕСКИЕ НАНОКЕРАМИКИ С УГЛЕРОДНЫМИ КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ

А.Н. Киряков^{1,2*}, Т.В. Дьячкова¹, А.П. Тютюнник¹, И.В. Бакланова¹¹Институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург, Россия²Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия*e-mail: arseny.kiriakov@urfu.ru

Углеродные квантовые точки (carbon quantum dots - CQDs) представляют собой нанокластеры атомов углерода с преимущественно sp² гибридизацией и являются новым перспективным функциональным материалом оптики и фотоники. Высокие показатели квантового выхода делают фотонные материалы на CQDs привлекательными для использования в качестве сенсоров оптического излучения, а также люминофоров нового поколения. Основной фокус исследовательских групп направлен на изучение растворов и плёнок, содержащих CQDs. Вместе с тем, при таком подходе сталкиваются с фундаментальной проблемой стабильности функциональных свойств углеродных наночастиц. Настоящее исследование нацелено на создание оптически-активного люминофора на основе широкозонной оксидной матрицы и углеродных квантовых точек в качестве люминесцентной добавки.

Наноккомпозиты получены методом термобарического прессования смеси MgAl₂O₄ и диспергированного графена при давлении 6 ГПа и температурных режимах синтеза от 573 до 973 К с применением ячейки типа тороид и CaCO₃ проставки. Вкратце, исходный нанопорошок MgAl₂O₄ был перемешан с диспергированным в УЗ ванне нанопорошком графена, после чего смесь была упакована в платиновой капсуле и помещалась в углеродный нагреватель, который размещался в специальной проставке, изготовленной из CaCO₃. В процессе синтеза сначала нагнеталось необходимое давление, после чего производился разогрев графитового нагревателя. В работе был выполнен комплексный анализ структурных параметров на основе данных РФА и рамановской спектроскопии. Выполнен анализ фотолюминесцентных характеристик, а также кинетических зависимостей ФЛ в температурных диапазонах от 4 до 300 К.

Исходный наноккомпозит представляет собой соединение MgAl₂O₄ в котором по данным РФА имеется отличное от нормального значение заселённости позиций. В низкочастотной части спектров рамановского рассеяния присутствуют полосы, характерные для катионных колебаний нормальной шпинели, однако также присутствуют колебания, обусловленные наличием анти-сайт дефектов по типу катионов алюминия в тетраэдрических позициях магния. Это также подтверждает предположение, что исходная матрица имеет нестехиометрию по магнию. рамановское рассеяние подтверждает наличие углеродных колебаний, соответствующих G – моде.

В спектрах фотолюминесценции синего и ближнем УФ диапазонов наблюдается интенсивное свечение при возбуждении УФ излучением. В голубом, зелёном и оранжевых спектральных диапазонах наблюдается ФЛ с двумя экстремумами. Положение и энергетическая разность между этими экстремумами изменяется с ростом энергии квантов возбуждающего излучения.

В температурном диапазоне от 4 до 300 К ФЛ при лазерном возбуждении 405нм характеризуется тушением согласно классическим представлениям для ФЛ центров. Кинетика ФЛ имеет не длительность. Анализ кинетических зависимостей показывает, что в исследуемом температурном диапазоне отсутствуют какие-либо существенные отклонения кинетических зависимостей в ФЛ, что не согласуется с классическими представлениями одиночного центра в кристалле.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-01024, <https://rscf.ru/project/23-72-01024/>.

СИНТЕЗ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДВОЙНОГО БОРАТА $\text{DyCr}_3(\text{VO}_3)_4$ Н.Н. Кузьмин^{1*}, В.В. Мальцев², И.А. Морозов³¹Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва, Россия²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия³Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия*e-mail: nik.nik.kuzmin@yandex.ru

Бораты вызывают большой исследовательский интерес благодаря большому разнообразию кристаллических структур и тем, что являются перспективными оптическими материалами [1].

Бораты с общей формулой $\text{LnM}_3(\text{VO}_3)_4$ (Ln = лантаноиды и Y; M = Al, Sc, Cr, Fe, Ga) кристаллизуются в структурном типе минерала хантита. Эти соединения относятся к магнитоэлектрическим и обладают нелинейными оптическими и лазерными свойствами. Наибольший интерес среди них вызывают представители с двумя магнитными подсистемами, состоящими из ионов $4f$ - и $3d$ -элементов. Именно они обуславливают необычные магнитные свойства, обнаруженные у боратов редкоземельных элементов и железа [2]. Бораты редкоземельных элементов и хрома изучены значительно в меньшей степени. В литературе имеются сообщения об исследовании условий синтеза, структурных и магнитных свойств боратов $\text{DyCr}_3(\text{VO}_3)_4$ [3-5]. На ранних этапах исследований полагалось, что структура этих соединений имеет только пространственную группу $R32$ [6], но в дальнейшем была обнаружена вторая структурная модификация с пространственной группой $C2/c$ [7]. Обе модификации имеют близкие структуры и часто кристаллизуются вместе. В связи с этим существует потребность в получении однофазных кристаллов этих соединений и изучении их физических свойств.

В работе построена диаграмма фазовых соотношений системы $\text{Dy}_2\text{O}_3 - \text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{V}_2\text{O}_5$ при 1000°C . Методом порошковой рентгеновской дифракции в ней определено пять кристаллических фаз: DyVO_3 , Dy_3VO_6 , DyCrO_3 , CrVO_3 и $\text{DyCr}_3(\text{VO}_3)_4$. Кристаллы обнаруженного бората диспрозия и хрома были выращены из раствора в расплаве в псевдо-тройной системе $\text{DyCr}_3(\text{VO}_3)_4 - \text{K}_2\text{Mo}_3\text{O}_{10} - \text{V}_2\text{O}_5$. В данной системе оконтурены зоны кристаллизации $\text{DyCr}_3(\text{VO}_3)_4$, CrVO_3 , Cr_2O_3 , а также область их сокристаллизации. По полученным спектрам поглощения в дальнем инфракрасном диапазоне кристаллов бората диспрозия и хрома показано, что с понижением температуры кристаллизации, а также с увеличением доли $\text{K}_2\text{Mo}_3\text{O}_{10}$ в исходной шихте в получаемых кристаллах увеличивается доля модификации с пространственной группой $R32$. В работе определены схема энергетических уровней иона Dy^{3+} в парамагнитном состоянии и температура антиферромагнитного упорядочения ($\approx 7\text{ K}$).

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ № FFUU-2024-0004.

1. M. Mutailipu *et al.*, Chemical Reviews **121**, 1130 (2020).
2. А.М. Кадомцева *и др.*, Физика низких температур **36**, 640 (2010).
3. Н.Н. Кузьмин *и др.*, Неорганические материалы **56**, 873 (2020).
4. I.A. Gudim *et al.*, Journal of Crystal Growth **637**, 127716 (2024).
5. A. Bludov *et al.*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials **512**, 167010 (2020).
6. A.A. Ballman, American Mineralogist **47**, 1380 (1962).
7. В.С. Куражковская *и др.*, Журнал структурной химии **49**, 1074 (2008).

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ $Zr_xTi_{1-x}Ch_2$ ($Ch = S, Se$)

А.И. Меренцов*, А.С. Шкварин, М.С. Постников, А.Ю. Кузнецова, А.Н. Титов

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

*e-mail: Alexander.Merentsov@urfu.ru

Электронная структура замещённых и интеркалированных дихалькогенидов переходных металлов может направленно варьироваться изменением химического состава. В твёрдых растворах замещения в том случае, когда смешиваемые соединения различаются шириной фундаментальной щели либо различаются типом проводимости, возможно наблюдать переходы типа металл-диэлектрик. Более того, даже при совпадении валентности атомов переходного металла в смешиваемых дихалькогенидах $TiSe_2$ и $ZrSe_2$ оказывается возможным перенос заряда с $ZrSe_2$ на $TiSe_2$ из-за разницы в энергии связи валентных электронов Ti и Zr [1]. Такое перенос заряда делает в кристаллах замещённых соединений устойчивой гетерогенную морфологию типа структурных фрагментов в пределах одного монокристалла. В настоящей работе проводится сравнение твёрдых растворов $Zr_xTi_{1-x}Se_2$ и $Zr_xTi_{1-x}S_2$ для выявления роли халькогена в формировании электронной структуры дихалькогенидов титана-циркония.

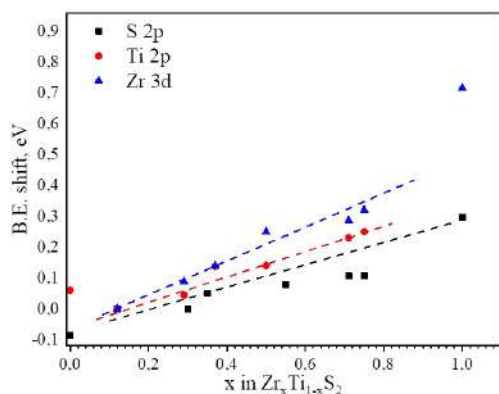


Рис. 1. Сдвиги энергии связи (Б.Е.) спектров внутренних уровней в системе $Zr_xTi_{1-x}S_2$ относительно $Zr_{0.12}Ti_{0.88}S_2$

Измерения рентгеновских фотоэлектронных спектров монокристаллов системы $Zr_xTi_{1-x}S_2$ выполнены на лабораторном спектрометре Escalab 250Xi (монохроматизированное излучение $Al K_{\alpha}$, $h\nu = 1486.6$ eV) в ресурсном центре «Физические методы исследования поверхности» СПбГУ. Спектры рентгеновского поглощения и рентгеновские фотоэлектронные спектры в резонансных $Ti 2p - 3d$ и $Zr 3p - 4d$ получены на линии НаноФЭС Курчатовского источника синхротронного излучения. Все измерения проводились в вакууме при остаточном давлении не более $1 \cdot 10^{-9}$ мбар. Химический состав монокристаллов определён как по рентгеновским фотоэлектронным спектрам, так и с помощью метода рентгеновского энергодисперсионного анализа на электронном микроскопе. Измерения температурных зависимостей элект-

рического сопротивления монокристаллов выполнены на постоянном токе в направлении вдоль и поперёк слоёв в интервале температур 15 – 300 К.

Увеличение концентрации циркония приводит к последовательному сдвигу энергий связи внутренних уровней (Рис. 1), как это наблюдалось ранее для системы $Zr_xTi_{1-x}Se_2$ [1]. При этом скорость роста энергий связи абсолютна аналогична системе $Zr_xTi_{1-x}Se_2$. Наличие выраженного резонанса вблизи уровня Ферми на спектрах валентной полосы, полученной в режиме $Ti 2p - 3d$ резонансного возбуждения, говорит о переносе заряда на титан. Металлический тип температурной зависимости электросопротивления также подтверждает перенос заряда.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и правительства Свердловской области (проект РНФ № 24-23-20136, соглашение 9-24-МГ).

1. A.I. Merentsov *et al.*, J. Chem. Phys. **162**, 044704 (2025).

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ИК-СПЕКТРОВ КВАЗИДВУМЕРНЫХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ TlGaSe_2 А.Д. Молчанова^{1*}, К.Р. Аллахвердиев²¹Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва, Россия²Национальная академия авиации, Баку, Азербайджан*e-mail: nastyamolchanova@list.ru

Слоистые квазидвумерные кристаллы TlGaSe_2 являются сегнетоэлектриками, полупроводниками, фотопроводниками и фотовольтаиками. Благодаря этим свойствам они могут применяться в качестве фототранзисторов, УФ-сенсоров, мемристоров и выпрямителей тока [1—3]. Кроме того, в структуре TlGaSe_2 при различных температурах реализуется ряд фазовых переходов. Изучение фазовой диаграммы кристалла существенно для разнообразных приложений в сегнетоэлектрической памяти, оптоэлектронике и сенсорике. Впервые фазовый переход в TlGaSe_2 был зарегистрирован при температуре около 100 К по спектрам комбинационного рассеяния света [4], затем информация о кристаллическом и сегнетоэлектрическом состояниях уточнялась различными методами, такими как диэлектрические измерения, теплоемкость, рентгеновская дифракция, ядерный магнитный резонанс и др [5]. При температурах 120 и 107 К происходят два последовательных структурных фазовых перехода. При $T_c = 107$ К происходит переход первого рода в соразмерную сегнетоэлектрическую фазу, сопровождающийся учетверением элементарной ячейки. Ему предшествует переход второго рода при $T_i = 120$ К в несоразмерную фазу. В интервале температур 107 – 120 К реализуется промежуточное несоразмерное состояние с модулированным волновым вектором $(\delta, \delta, 1/4)$, $\delta \approx 0.02$ в единицах обратной решетки [6]. Помимо известных переходов при T_i и T_c , в литературе обсуждались фазовые переходы при $T < T_i$ [5]. Однако кристаллическая структура и динамика решетки TlGaSe_2 при низких температурах пока что недостаточно изучены. Настоящее исследование направлено на устранение этого пробела и дает детальное исследование температурной зависимости спектров TlGaSe_2 , что может быть успешно применено для анализа фазовых переходов.

В данной работе представлены результаты исследования кристалла TlGaSe_2 методом инфракрасной спектроскопии высокого разрешения в диапазоне частот 15 – 300 см^{-1} и температурном диапазоне 3 – 325 К. Были построены температурные зависимости параметров фононных мод, в которых наблюдаются особенности, свидетельствующие о структурных фазовых переходах и об отклике фононной подсистемы на сегнетоэлектрические состояния TlGaSe_2 . Приведён возможный сценарий обнаруженных структурных и сегнетоэлектрических переходов кристалла, основанный на анализе полученных спектроскопических данных.

Работа выполнена в рамках государственных заданий Минобрнауки РФ для ИСАН № FFUU-2024-0004.

1. M.Yu. Seyidov *et al.*, Phys Scr. **90**, 015805 (2015)
2. S. Yang *et al.*, 2D Mater. **4**, 035021 (2017)
3. M.Yu. Seyidov *et al.*, Semiconductors **52**, 2007 (2018)
4. Г.В. Абдулаев *и др.*, Доклады АН Азерб. ССР **33**, 26 (1977)
5. A.M. Panich, J Phys: Condens Matter. **20**, 293202 (2008)
6. D.F. McMorrow *и др.*, J Phys: Condens Matter. **2**, 3699 (1990)

ДИНАМИКА КРЕМНИЕВЫХ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ В АЛМАЗЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ОТЖИГА

Э.С. Сектаров^{1,2*}, А.А. Хомич³, А.П. Большаков³, Р.А. Хмельницкий⁴, В.С. Седов³,
В.Г. Ральченко³, К.Н. Болдырев⁵

¹Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

³Институт общей физики им. А.М. Прохорова, Москва, Россия

⁴Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

⁵Пекинский технологический институт, Чжухай Пекинский технологический институт, Чжухай, КНР

*e-mail: sektarov_es@mail.ru

Центры окраски в алмазах применяются в оптической квантовой памяти, квантовой сенсорики, лазерах, квантовой криптографии. [1] Изучение формирования центров окраски представляет как фундаментальный, так и прикладной интерес. Цель работы — экспериментальное исследование влияния отжига на кремниевые (SiV) центры окраски в алмазе.

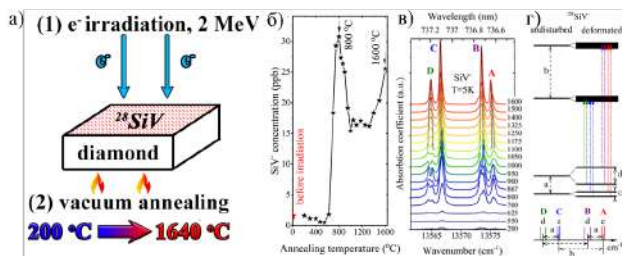


Рис. 1. (а) Схема подготовки образца: (1) Облучение образца электронами с энергией 2 МэВ, (2) Постепенный отжиг образца от 200 до 1600 °С; (б) Зависимость концентрации SiV- от температуры отжига; (в) Спектры поглощения SiV- при разных температурах отжига; (г) Энергетические уровни SiV- в стабильном состоянии и при деформационном расщеплении.

Изготовлена гомоэпитаксиальная алмазная пленка, легированная Si, методом химического осаждения из газовой фазы в микроволновой плазме с использованием газовой смеси $\text{CH}_4\text{-H}_2$ с добавлением моноизотопного силана $^{28}\text{SiH}_4$. Образец облучен электронами с энергией 2 МэВ для образования вакансий. Исследовано оптическое поведение отрицательно заряженных центров окраски SiV- и нейтральных центров окраски SiV⁰ при отжиге в вакууме. Процесс отжига, проводимый постепенно от 200 °С до 1640 °С, был тщательно исследован с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния, фотolumинесценции и оптического поглощения. Интенсивность фотolumинесценции ZPL SiV- (738 нм), из-

меренная при комнатной температуре, быстро увеличивается выше 600 °С, достигает максимума при ≈ 800 °С, уменьшаясь при дальнейшем нагреве и снова увеличиваясь выше 1300 °С.

Результаты исследования отожженного алмаза, легированного кремнием, предоставляют полезную информацию о кинетике центров окраски SiV- и SiV⁰ в зависимости от температуры отжига.

Работа выполнена при поддержке научного проекта Минобрнауки России FFUU-2024-0004 Института спектроскопии РАН.

1. U.F.S. D’Haenens-Johansson *et al.*, Phys. Rev. B **84**, 245208 (2011)

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА СТЕКОЛ $\text{Bi}_2\text{O}_3 - \text{GeO}_2 - \text{Na}_2\text{O}$, СОЛЕГИРОВАННЫХ Tm_2O_3 И Er_2O_3

К.С. Серкина^{1*}, И.В. Степанова¹, А.В. Король¹, О.В. Князькова¹, Э.С. Сектаров²

¹Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

²Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва, Россия

*e-mail: serkina24@gmail.com

Висмутгерманатные стекла демонстрируют широкополосную люминесценцию в ближнем инфракрасном диапазоне (1100 – 1500 нм), что делает их перспективными кандидатами для использования в качестве сред для оптического усиления. Источником данного типа люминесценции являются так называемые висмутовые активные центры (ВАЦ). Многие авторы предполагают, что ВАЦ имеют сложную структуру, основой которой являются ионы висмута в низших степенях окисления (ниже 3+) [1].

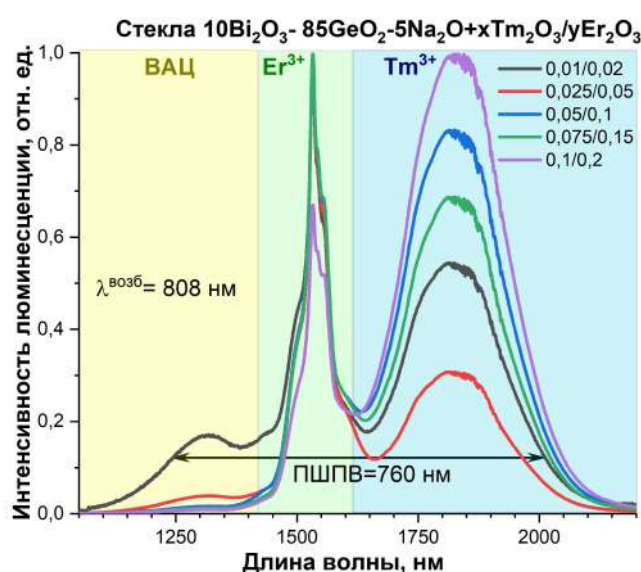


Рис. 1. Спектры люминесценции исследуемых стекол при возбуждении 808 нм

при возбуждении диодным лазером с длиной волны 808 нм.

Спектры люминесценции исследуемых стекол (рис. 1) представляют собой суперпозицию полос люминесценции ВАЦ, Tm^{3+} и Er^{3+} . Образец, легированный 0.01 мол.% Tm_2O_3 и 0.02 мол.% Er_2O_3 проявляет наиболее сверх-широкополосную люминесценцию полная ширина на полувысоте (ПШПВ) составляет порядка 760 нм. Дальнейшее увеличение содержания оксидов эрбия и тулия снижает люминесценцию ВАЦ, снижая значение ПШПВ. Анализ спектров показал, что в висмутсодержащих стеклах происходят обменные взаимодействия $\text{ВАЦ} \leftrightarrow \text{Tm}^{3+}$, $\text{ВАЦ} \leftrightarrow \text{Er}^{3+}$ и $\text{Er}^{3+} \leftrightarrow \text{Tm}^{3+}$, направление которых зависит от концентрации редкоземельных активаторов.

1. M. Peng *et al.*, Opt. Lett **29**, 1998-2000 (2004).

2. M. Peng *et al.*, Opt. Express **19**, 20799 (2011).

3. X. Song *et al.*, J Non-Cryst Solids **557**, 120575 (2021).

Легирование висмутгерманатных стекол оксидами эрбия и тулия позволит расширить спектральный диапазон люминесценции вплоть до 2200 нм за счёт проявления собственной ИК-люминесценции данных редкоземельных ионов. Ионы Er^{3+} и Tm^{3+} проявляют люминесценцию в областях 1400 – 1650 нм и 1650 – 2200 нм, соответственно [2,3].

Целью настоящей работы являлось исследование люминесцентных характеристик висмутгерманатных стекол, легированных оксидами эрбия и тулия. Объектом исследования были стекла мольного состава $10\text{Bi}_2\text{O}_3 - 85\text{GeO}_2 - 5\text{Na}_2\text{O}$ с добавлением 0.01 – 0.1 мол.% Tm_2O_3 и 0.02 – 0.2 мол.% Er_2O_3 сверх 100%.

Спектры люминесценции регистрировали на ИК-Фурье-спектрометре IFS125HR

ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА $\text{Fe}_x\text{Ti}(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)_2$ А.С. Шкварин^{1*}, А.А. Титов¹, Е.А. Шрамков², Р.Г. Чумаков², А.Н. Титов¹¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия*e-mail: shkvarin@imp.uran.ru

При изучении системы $\text{Ti}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$ было установлено, что распределение халькогенов формирует Янус-слои типа S-Ti-Se, изогнутые из-за различия в размерах халькогенов [1]. Среди других изоструктурных систем система $\text{Ti}(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)_2$ демонстрирует полную нерастворимость TiSe_2 и TiTe_2 . Это можно объяснить тем, что из-за большей разницы в размерах халькогенов невозможно формирование Янус-слоёв, изгиб сильнее, чем в системе $\text{Ti}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$. Нами обнаружено, что интеркаляция железом до состава $\text{Fe}_{0.25}\text{Ti}(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)_2$ приводит к возможности растворения компонентов до состава $x = 0.5$. Мы связываем эффект с увеличением жёсткости решётки, вызванного внедрением железа, ограничивающего возможность изгиба Янус-слоёв.

Исследование электронной структуры выполнено на линии НаноФЭС Курчатовского источника синхротронного излучения (Москва, Россия). Монокристаллические образцы расщеплялись *in situ* в вакуумной камере при давлении ниже $1 \cdot 10^{-9}$ Торр. Общее инструментальное разрешение составляло менее 0.35 эВ. Энергетическая калибровка выполнялась по уровню Ферми. Все измерения проводились при комнатной температуре.

Спектры основного $\text{Ti } 2p$ уровня и спектры поглощения $\text{Ti } L_{2,3}$ демонстрируют явную аддитивную природу. Спектры $\text{Te } 4d$ основного уровня демонстрируют слабую зависимость от изменения как концентрации железа, так и селена. Спектр $\text{Se } 3d$ в свою очередь демонстрирует значительное изменение энергии связи, по сравнению с обычным Fe_xTiSe_2 . Спектры поглощения железа практически не отличаются от таковых в интеркалатах на основе TiSe_2 и TiTe_2 . Спектры резонансной фотоэмиссии демонстрируют наличие мощной полосы непосредственно на уровне Ферми в режиме $\text{Ti } 2p - 3d$ резонанса. В режиме резонансного $\text{Fe } 2p - 3d$ возбуждения наблюдается сильная полоса RRAS, интенсивность которой хорошо коррелирует с концентрацией железа [2]. Наличие полосы свидетельствует о переносе заряда с атомов железа на атомы титана, как и в моноинтеркалатах [3]. Однако изменения в спектре $\text{Se } 3d$ позволяют предположить, что атомы железа в основном взаимодействуют с «структурными фрагментами» на основе TiSe_2 . Если рассматривать эту систему как слои Януса, то атомы селена должны находиться в вогнутой области, так как их радиус меньше. Атомы железа, попадая в такие области гибридизуются с атомами титана, вследствие чего происходит «притягивание» фрагментов друг к другу. Это приводит в некоторому выпрямлению слоя, и его существование становится возможным. Данная работа показывает, что условием взаимной растворимости TiSe_2 и TiTe_2 является возможность формирования Янус-слоёв.

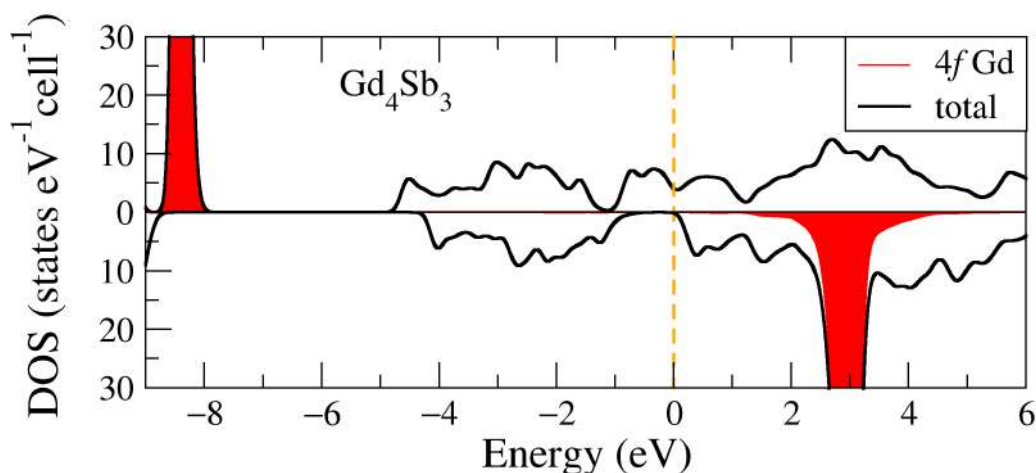
Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

1. Titov A.N. *et al.*, Chem. Mater. **33**, 8915 (2021).
2. Shkvarin A.S. *et al.*, RSC Adv. **6**, 106527 (2016).
3. Shkvarin A.S. *et al.*, Inorg. Chem. **57**, 5544 (2018).

ТЕОРИЯ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СВОЙСТВ Gd_4Sb_3 С.Т. Байдак^{1*}, А.В. Лукоянов^{1,2}¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия²Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия*e-mail: baidak@imp.uran.ru

Исследования полуметаллических ферромагнетиков представляют большой интерес для спинтроники благодаря своим необычным транспортным и электронным свойствам. В подобных соединениях можно наблюдать 100% поляризацию спина для электронов с энергией близкой к энергии Ферми и ненулевой проводимостью в таком случае обладают только электроны с определенной проекцией спина. Впервые была изучена электронная структура соединения Gd_4Sb_3 на основе Sb, и обнаружено, что данное соединение обладает свойствами полуметаллического ферромагнетика (half-metal) [1]. Расчеты электронной структуры выполнены с помощью метода GGA+U, который учитывает сильные электронные корреляции в 4*f*-оболочке. В расчетах выявлен ферромагнитный тип магнитного упорядочения, и вычисленный магнитный момент оказался равен $31\mu_B/\text{ф.е.}$, что в основном обусловлено наполовину заполненной 4*f*-оболочкой из гадолиния. Интересные особенности зонной структуры соединения Gd_4Sb_3 были выявлены в расчете спин-поляризованного типа. Мы обнаружили, что одна спиновая проекция обладает полностью металлическими свойствами с множеством зон, пересекающих уровень Ферми, и наблюдается высокая плотность состояний в районе энергии Ферми, рис. 1. При этом оказалось, что зонная структура другой спиновой проекции имеет энергетическую щель в размере 0.67 эВ с полным отсутствием состояний на уровне Ферми и в его окрестности. Позднее результаты были подтверждены другой группой, однако экспериментально обнаружены только аномальные эффекты Нернста и Холла, другие исследования не проводились [2]. Полученные результаты потенциально делают соединение Gd_4Sb_3 новым интересным полуметаллическим ферромагнетиком. Более подробную информацию по исследованию можно найти в опубликованной работе [1].

Рис. 1. Плотность состояний полная и для Gd-4*f* в соединении Gd_4Sb_3 .

Данное исследование было выполнено при поддержке Российского Научного фонда в рамках проекта № 22-42-02021.

1. S. T. Baidak, A. V. Lukoyanov, *Int. J. Mol. Sci.* **24**, 8778 (2023).

2. Y. Han *et al.*, *Phys. Rev. B* **110**, 144405 (2024).

ТОК ВИГНЕРА И ЕГО СВЯЗЬ С КВАНТОВО-КЛАССИЧЕСКИМ ПЕРЕХОДОМ

И.Д. Бурков^{1*}, С.С. Сеидов^{2,1}¹ Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия*e-mail: masterofphysic@mail.ru

В работе рассматривается поведение тока Вигнера для различных начальных состояний частицы в одномерной квантовой яме, а также его особенности при изучении квантово-классического предела. Функция Вигнера определяет квазивероятностное распределение в фазовом пространстве канонически сопряженных величин. Определяется она как Фурье образ матричного элемента матрицы плотности $\hat{\rho}$, характеризующей состояние системы, между двумя смещёнными состояниями

$$W(x, p) = \frac{1}{\hbar} F_y \left[\left\langle x + \frac{y}{2} \left| \hat{\rho} \right| x - \frac{y}{2} \right\rangle \right] \left(\frac{p}{\hbar} \right). \quad (1)$$

Классическое распределение вероятности в фазовом пространстве подчиняется уравнению Лиувилля. Также для такого распределения можно записать уравнение непрерывности и из системы уравнений найти функцию тока. Аналогичный подход возможен и к функции Вигнера, результатом которого служит ток Вигнера [1]

$$\begin{aligned} \dot{W}(x, p, t) &= -\frac{p}{m} \partial_x W(x, p, t) + i \{ \{ V(x), W(x, p, t) \} \} = -\nabla \cdot \mathbf{j}_W(x, p, t) \\ \Rightarrow \mathbf{j}_W(x, p, t) &= \begin{pmatrix} \frac{p}{m} W(x, p, t) \\ -\int i \{ \{ V(x), W(x, p, t) \} \} dp \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mathbf{j}_W(x, p, t)$ — ток Вигнера; m — масса частицы; $V(x)$ — потенциал, в котором движется частица; $\{ \{ \cdot, \cdot \} \}$ — скобка Моеля.

Ток Вигнера определяет траектории в фазовом пространстве системы. Такие траектории обладают особенностями, представляющими интерес для изучения.

Квантово-классический переход осуществляется путём устремления константы Планка к нулю. Также таким переходом служит предел высоких энергий. Для изучения поведения при классическом пределе введём классический импульс p_c и сделаем замену $\hbar k_n = p_c$, где $k_n = \sqrt{2E_n m} / \hbar \sim n$; n — номер собственного состояния частицы в квантовой яме. При такой замене константы Планка в функции Вигнера совместный предел $\hbar \rightarrow 0$ и $n \rightarrow \infty$ остаётся постоянным [2]. При анализе высокоэнергетического собственного состояния становится заметным образование пучностей тока Вигнера вдоль классического импульса.

В результате были исследованы токи Вигнера собственных и нестационарных состояний частицы в одномерной квантовой яме, описаны характеристики траекторий, образованные под влиянием тока, изучены особые точки на фазовом пространстве, а также исследован квантово-классический переход для тока Вигнера.

Работа выполнена при поддержке Стратегического проекта НИТУ «МИСИС» «Квантовый интернет» в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

1. S. S. Seidov, D. G. Bezymiannykh, Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical **58**, 025301 (2024).
2. G. Angelone, P. Facchi, M. Ligabó, Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical **57**, 425304 (2024)

ВОЛНОВАЯ ПРИРОДА ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ И ЕЕ МОДЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ

А.М. Власова

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия
 Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия
 e-mail: alisa-12005@yandex.ru

Пластическая деформация металлов — это неоднородный процесс. Существует два типа локализации деформации: пространственная и временная. Под пространственной локализацией понимается способность пластической деформации накапливаться на небольших участках. Под временной локализацией понимается способность материала деформироваться в разные моменты времени с разной скоростью.

Л.Б. Зуев в [1] вводит гипотезу об автоволновом характере локализованной деформации, то есть предполагает, что деформация описывается дифференциальными уравнениями в частных производных параболического типа:

$$\frac{\partial u(t, x)}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u(t, x)}{\partial x^2} + f(t, x, u(t, x)). \quad (1)$$

Однако если обратиться к исторически первым описаниям пластической деформации уравнениями в частных производных, то уравнение движения элемента из стержня или проволоки задается дифференциальным уравнением в частных производных волнового типа [2]

$$\rho \frac{\partial^2 u(t, x)}{\partial t^2} = T \frac{\partial^2 u(t, x)}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где $T = \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon}$, u - смещение поперечного сечения, ρ - плотность материала, t — время, σ — напряжение, $\epsilon = \frac{\partial u}{\partial x}$.

Френкелем и Конторовой [3] предложена модель движения дислокаций, как основных носителей пластической деформации, которая описывается уравнением волнового типа, названного уравнением синус-Гордон

$$\frac{\partial^2 u(t, x)}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 u(t, x)}{\partial x^2} + \sin u. \quad (3)$$

Данная работа — естественное продолжение работы [4], в которой представлена модель для численного решения (3) методом конечных разностей по алгоритму, учитывающему явление наследственности как деформационной предыстории моделируемого образца.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Давление», № 122021000032-5)

1. Л.Б. Зуев, Автоволновая пластичность. Локализация и коллективные моды. - М.: Физматлит, 2019.- 208 с.
2. T. von Kerman, P. Duwez, Journal of Applied Physics **21**, 2, 987 (1950).
3. Y. S. Kivshar, O. M. Braun. The Frenkel-Kontorova Model: Concepts, Methods and Applications. Springer, 506 (2004).
4. А.М. Vlasova, AIP Conference Proceedings **2509**, 020204, **2022**.

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО АНТИФЕРРОМАГНИТНОГО ИЗОЛЯТОРА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ КВАНТОВЫМИ ЭФФЕКТАМИ

В.В. Вальков, А.О. Злотников, А. Гамов*

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

*e-mail: agamow96@gmail.com

Из экспериментальных исследований топологического изолятора MnBi_2Te_4 в магнитном поле, ориентированном вдоль тригональной оси кристалла, при температурах, много меньших температуры Нееля, известно, что возрастание магнитного поля от нуля до поля спин-флоп перехода сопровождается монотонным увеличением намагниченности [1, 2]. Такое поведение противоречит феноменологической теории [2-4], поскольку по ее предсказаниям намагниченность в отмеченных областях температуры и магнитного поля должна равняться нулю.

В данной работе в рамках эффективного гамильтониана, описывающего магнитную подсистему топологического изолятора MnBi_2Te_4 и учитывающего анизотропию, а также треугольный тип решетки, построена квантовая теория термодинамических свойств MnBi_2Te_4 в магнитном поле.

Получено дисперсионное уравнение, описывающее все ветви спектра магнитных возбуждений, решение которого при ненулевых значениях магнитного поля для всех допустимых фаз позволило определить квантовую ренормировку критических полей, определяющих поле спин-флоп перехода, а также поле насыщения при поперечной геометрии.

Проанализированы поправки к намагниченности подрешеток и температуре Нееля, обусловленные нулевыми квантовыми колебаниями, возникающими вследствие того, что неелевское состояние не соответствует точной функции гамильтониана системы. В аналитическом виде показано, что поправки к намагниченности не зависят от магнитного поля и не влияют на ее поведение до точки спин-флоп перехода.

Установлено, что экспериментально обнаруженные особенности низкотемпературного поведения намагниченности MnBi_2Te_4 во внешнем магнитном поле обусловлены квантовыми эффектами, инициируемыми одноионной анизотропией.

При этом аномальное возрастание намагниченности материала до спин-флоп перехода, а также после него в фазе «схлопнутых» подрешеток объясняется подавлением вкладов от этих квантовых эффектов. Сопоставление результатов теоретического анализа с данными эксперимента позволило уточнить параметры модели MnBi_2Te_4 .

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-10021 (<https://rscf.ru/project/23-22-10021/>) и Красноярского краевого фонда науки.

1. Y.-J. Hao *et al.*, Phys. Rev. X **9**, 041038 (2019).
2. Y. Lai *et al.*, Phys. Rev. B **103**, 184429 (2021).
3. B. Li *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 167204 (2020).
4. Y. Li *et al.*, Phys. Rev. B **100**, 134438 (2019).

КВАНТОВЫЙ АЛГОРИТМ ОПОРНЫХ ВЕКТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КУДИТОВ

Е.В. Глазкова^{1,*}, С.С. Сеидов^{1,2}¹НИТУ МИСИС, Москва, Россия²НИУ «ВШЭ», Москва, Россия*e-mail: eglazkova@ya.ru

В данной работе был реализован квантовый алгоритм опорных векторов [1] с использованием кубитов и кудитов, проведено исследование зависимости точности классификации от выбранного квантового анзаца для расчета скалярного произведения, количества слоев квантового анзаца, а также числа запусков цепочки. Алгоритм был реализован на 4 наборах данных: «Капли», «Луны», «Круги» и «Случайный» (рис. 1) с использованием 4 квантовых анзацев [2] (рис. 2). Метод опорных векторов является алгоритмом машинного обучения,

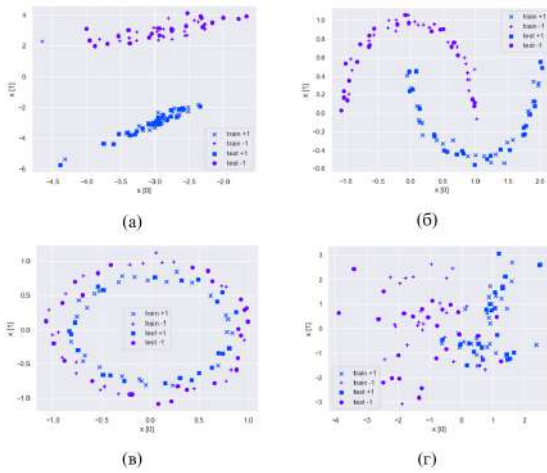


Рис. 1. Наборы данных: (а) Капли, (б) Луны, (в) Круги, (г) Случайный.

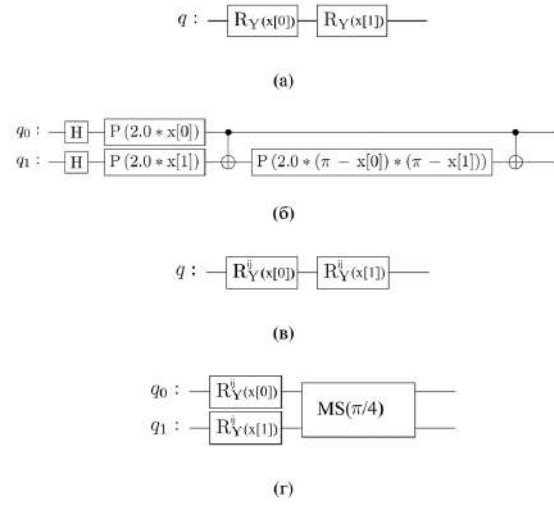
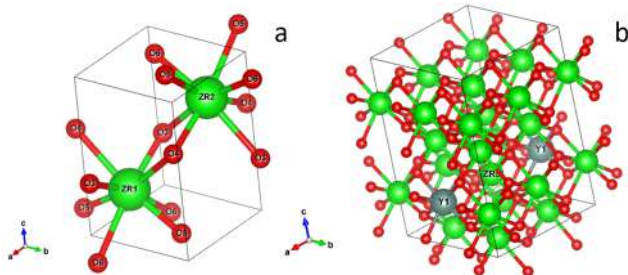
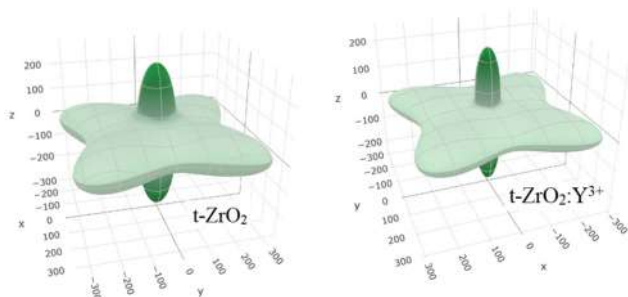


Рис. 2. Квантовые анзацы: (а) однокубитный, (б) двухкубитный, (в) однокудитный, (г) двухкудитный.

суть которого заключается в решении задачи классификации. Данный алгоритм можно разбить на следующие этапы: вычисление матрицы скалярных произведений K_{ij} (производится на квантовом компьютере с помощью разработанных схем); создание матрицы $H_{ij} = y_i y_j K_{ij}$, которая учитывает метки тренировочных точек; нахождение двойственной переменной такой, что $\sum_{i=1}^L \alpha_i - \frac{1}{2} \alpha^T H \alpha$ – максимальна и соответствует ограничениям $0 \leq \alpha_i \leq C \quad \forall i$ и $\sum_{i=1}^L \alpha_i y_i = 0$; расчет константы смещения $b = \frac{1}{N_s} \sum_{s \in S} (y_s - \sum_{m \in S} \alpha_m y_m \langle x_m, x_s \rangle)$, и расчет меток тестовых точек $y^{\text{test}} = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^L \alpha_i y_i \langle x_i, x_j \rangle - b \right)$.

Работа выполнена в рамках гранта № K1-2022-027 по теме «Цифровые двойники для квантовых технологий: Управление сложными системами для задач квантовых технологий и поиска новых материалов», стратегического проекта Квантовый интернет.

1. V. Havlicek, A.D. C´orcoles, K. Temmel, A.W. Harrow, Nature **567**, 209 (2019).
2. A.S. Nikolaeva, E.O. Kiktenko, A.K. Fedorov, Phys. Rev. A **109**, 022615 (2024).

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА $\text{ZrO}_2 : R^{3+}$: *ab initio* РАСЧЕТК.И. Глухов^{1*}, В.А. Чернышев¹, П.А. Заяц²¹Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия²Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия*e-mail: glukhovk172@yandex.ruРис. 1. Кристаллическая структура $t\text{-ZrO}_2$ (a) и $t\text{-ZrO}_2\text{:Y}^{3+}$ (b).Рис. 2. Зависимость модуля Юнга от направления для $t\text{-ZrO}_2$ (a) и $t\text{-ZrO}_2\text{:Y}^{3+}$ (b).

Диоксид циркония ZrO_2 , активированный редкоземельными ионами R^{3+} , имеет разнообразное применение, на его основе разрабатывают биосовместимые керамики и оптические материалы [1]. Представляет интерес в рамках единого *ab initio* подхода исследовать комплекс свойств диоксида циркония, в том числе допированного редкоземельными ионами. В работе исследованы кубическая, моноклинная и тетрагональная фаза ZrO_2 . Исследовано влияние допанта Y^{3+} на упругие свойства $t\text{-ZrO}_2$. Исследована зонная структура $t\text{-ZrO}_2\text{:Y}^{3+}$. Расчеты проведены в рамках DFT подхода с использованием гибридного функционала B3LYP, учитывающего вклад нелокального обмена в формализме Хартри-Фока. Для расчетов использована программа CRYSTAL17, предназначенная для моделирования периодических структур в рамках МО ЛКАО подхода [2]. Показано, что замещение 25% ионов Zr^{4+}

ионами Y^{3+} в тетрагональной фазе приводит к уменьшению модуля объемной упругости на $\sim 15\%$, уменьшению модуля Юнга на $\sim 25\%$, увеличению анизотропии упругих свойств и уменьшению хрупкости кристалла, ширина запрещенной щели при этом изменяется незначительно.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № FEUZ-2023-0017). Расчеты проведены на кластере «Уран» ИММ УрО РАН, З.П.А. благодарит Минобрнауки за финансирование, выделенное ИФМ УрО РАН.

1. J. Liao, D. Zhou, B. Yang, R. Liu, Q. Zhang, Optical Materials **35**, 2 (2012).
2. R. Dovesi *et al.*, CRYSTAL17 User's Manual (2018). URL: <http://www.crystal.unito.it/index.php>.

ПЛОСКО-СИММЕТРИЧНАЯ КАПИЛЛЯРНАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ: ПЯТИВОЛНОВЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Е.А. Кочурин^{1,2*}, П.А. Русских¹

¹Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

*e-mail: kochurin@iep.uran.ru

Теория изотропной капиллярной турбулентности была разработана в конце 1960-х годов Захаровым и Филоненко [1]. К настоящему времени спектр турбулентности Захарова-Филоненко подтвержден с высокой точностью как экспериментально, так и численно. Однако в случае сильной анизотропии распространения волн, когда все волны коллинеарны, ситуация существенно меняется. В такой вырожденной геометрии условия резонансного взаимодействия перестают выполняться не только для трех волн, но и для четырех взаимодействующих волн. В данной работе проведено полностью нелинейное моделирование плоскосимметричной капиллярной турбулентности. В работе показано, что система взаимодействующих волн переходит в квазистационарное состояние с прямым каскадом энергии, несмотря на отсутствие резонансов низшего порядка. Рассчитанные спектры возмущений поверхности жидкости с высокой точностью описываются аналитическими оценками, полученными из размерностного анализа в предположении доминирующего влияния пятиволновых резонансных взаимодействий. Детальное изучение статистических характеристик слаботурбулентного состояния не выявляло влияния каких-либо когерентных или сильно нелинейных структур. Проведенный корреляционный анализ высокого порядка указывает на множество нетривиальных пятиволновых резонансов. Показано, что процесс распада волны на две пары встречных волн отвечает за локальную передачу энергии в малые масштабы. В целом, результаты расчетов хорошо согласуются как с теорией слабой турбулентности, так и с недавними экспериментами, проведенными для капиллярных волн на поверхности ртути.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-10012.

1. В. Е. Захаров, Н. Н. Филоненко ПМТФ **8**, 62 (1967).

ЭФФЕКТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ ПРИ МИГРАЦИИ ИОНОВ ЦИНКА В V_2O_5 : ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ DFT + U

Я.М. Плотников*, Д.М. Коротин^{1,2}

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

²Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

*e-mail: yar66rus.pl@gmail.com

Исследование новых типов аккумуляторов является актуальной проблемой в современной энергетике, особый интерес среди которых представляют аккумуляторы на основе ионов Zn, ведь эти аккумуляторы имеют ряд преимуществ перед уже имеющимися Li-ионными батареями, такие как доступность, выгода, экологичность, безопасность и др [1]. Перспективным материалом катода является оксид ванадия V_2O_5 , который демонстрирует хорошие свойства переноса заряда и в его межслоевое пространство прекрасно интеркалируют ионы цинка, что делает его привлекательным материалом для цинк-ионных аккумуляторов.

В этом исследовании мы используем теорию функционала плотности (DFT) с поправкой Хаббарда U для исследования электронных и магнитных свойств V_2O_5 , особенно в контексте структуры $Zn_{0.5}V_2O_5$. Включение поправки Хаббарда необходимо для учета сильных электронных корреляций, присущих частично заполненной d -оболочке ионов ванадия. Наши расчеты показывают, что локализованные электроны на d -орбиталях ванадия образуют магнитные моменты +1.09 и -1.09 магнетона Бора на этих атомах, тем самым подтверждая важность подхода DFT + U для этой системы.

Кроме того, мы анализируем энергетические барьеры, связанные с миграцией ионов цинка как вдоль, так и поперек слоев V_2O_5 . Миграция вдоль слоев примерно в пять раз энергетически выгоднее, чем миграция поперек них. Примечательно, что мы наблюдаем значительную зависимость энергетического барьера от значения параметра Хаббарда. По мере увеличения U локализация электронов на ванадии усиливается, что приводит к 20%-ному снижению энергетического барьера для миграции цинка, когда U увеличивается до 5.31 эВ. Это значение выводится из теории возмущений функционала плотности и дает оценку *ab initio* для параметра Хаббарда U , специфичного для этой системы.

Подводя итог, наше исследование подчеркивает решающую роль электронных корреляций в катодах V_2O_5 для цинк-ионных аккумуляторов. Используя метод DFT + U , мы показываем, что кулоновские взаимодействия сильно влияют на локализацию заряда, магнитное упорядочение и миграцию ионов.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-22-00349).

1. N. Zhang *et al.*, ACS Energy Letters **3**, 1366 (2018).

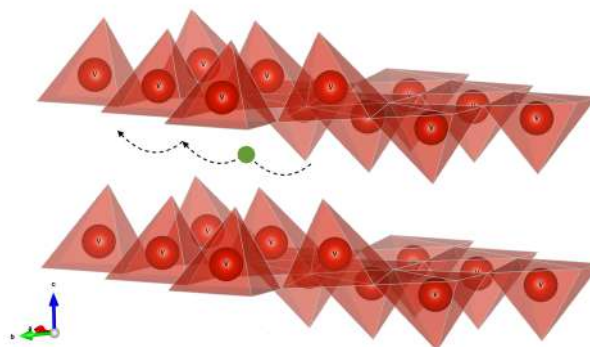


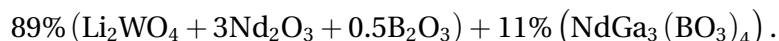
Рис. 1. Кристаллическая структура $Zn_{0.5}V_2O_5$ с траекторией миграции ионов Zn (зеленый круг), выделенной черной пунктирной линией. Красные сферы обозначают атомы ванадия в центре пирамид VO_5 .

ПРОБЛЕМА ВЫБОРА РАСТВОРОВ-РАСПЛАВОВ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ
МОНОКРИСТАЛЛОВ $\text{NdGa}_3(\text{BO}_3)_4$ К.А. Ситников^{1*}, Е.В. Еремин², И.А. Гудим²¹Сибирский Федеральный университет, Красноярск, Россия²Институт физики имени Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия*e-mail: kirill-55as11@mail.ru

Кристаллы редкоземельных тригональных оксиборатов со структурой хантита ранее изучались как нелинейно-оптические среды, и только в последнее время вызвали интерес как мультиферроики, в частности алюмо-, галло-, ферро- и хромбораты [1]. Кристаллы $\text{NdGa}_3(\text{BO}_3)_4$ были выращены методом спонтанного зарождения и группового выращивания на затравках.

Для выращивания кристаллов в качестве растворителя использовались вольфрамат лития и тримолибдат висмута. Известно, что в растворе-расплаве на основе тримолибдата висмута, как и при выращивании хромовых боратов, кристаллизуется только моноклинная фаза галлиевых боратов, а при использовании раствора-расплава на основе вольфрамата лития существует диапазон температур, в котором кристаллизуется не моноклинная фаза, а тригональная [2, 3]. Тригональная фаза является высокотемпературной.

Для получения тригональной фазы использовался следующий раствор-расплав



Температура насыщения уточнялась $\pm 2^\circ\text{C}$ с помощью пробных кристаллов, и для данного раствора-расплава она оказалась равной 980°C .

Полученные кристаллы имели моноклинную структуру, поэтому для повышения температуры в раствор-расплав были добавлены оксиды неодима и бора. Но этим был достигнут обратный эффект – получено такое соотношение вольфрамата лития и оксида бора, что температура насыщения раствора-расплава снизилась, а соответственно увеличилась растворимость кристаллообразующих оксидов. В дальнейшем в раствор-расплав добавлялся только оксид неодима, что не способствовало повышению температуры насыщения до нужных величин. Далее, исходя из существования высокотемпературной фазы $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$, в раствор-расплав был добавлен оксид алюминия. Добавление оксида алюминия привело к повышению концентрации компонентов раствора-расплава, а значит и температуры насыщения, что в свою очередь привело к появлению кристаллов.

1. K.-C. Liang, R.P. Chaudhury, B. Lorenz, Y.Y. Sun, L.N. Bezmaternikh, V.L. Temerov, C.W. Chu, *Physical Review B* **83**, 180417 (2011).
2. I.A. Gudim, N.V. Mikhashenok, A.D. Vasiliev, S.V. Melnikova, M.S. Pavlovskii, S.A. Skorobogatov, A.I. Pankrats, *Journal of Cryst. Growth* **637-638**, 127716 (2024).
3. A.I. Pankrats, S.A. Skorobogatov, I.A. Gudim, N.V. Mikhashenok, S.M. Zharkov, G.M. Zeer, *Journal of Alloys and Compounds* **1010**, 178230 (2025).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗОВОЙ ДИАГРАММЫ ОСНОВНОГО СОСТОЯНИЯ СЛОИСТЫХ ПЕРОВСКИТОВ

Д.Е. Чижов^{1,2*}, П.А. Игошев¹

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

²Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*e-mail: dchizhon@yandex.ru

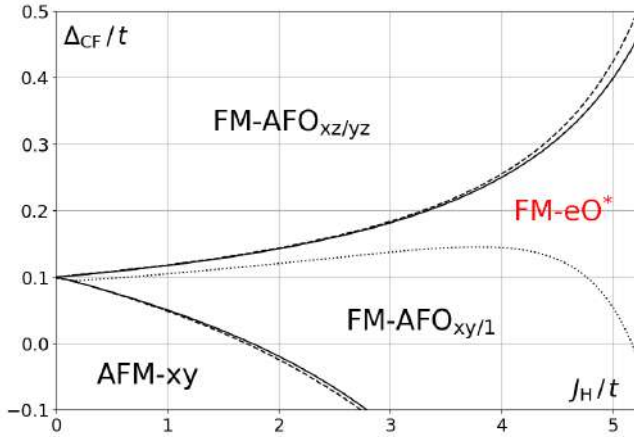


Рис. 1. Фазовая диаграмма основного состояния при $U = 20t$, $\lambda = 0$. Сплошными (пунктирными) линиями показаны результаты, полученные в рамках теории среднего поля [2] для GHM (модели Хаббарда). Фаза FM-eO неустойчива в GHM, см. текст.

Работа направлена на объяснение физических свойств изоляторов с сильными электронными корреляциями и орбитальным вырождением, в частности, слоистого перовскита Sr_2VO_4 . Атомы ванадия образуют квадратную решетку с одним электроном на узел.

Механизм кинетического обмена для модели Хаббарда, построенной для t_{2g} -мультиплета в приближении ближайших соседей с параметром переноса t , $t_{ij}^m = a_{x;ij}(\delta_{m,xy} + \delta_{m,xz}) + a_{y;ij}(\delta_{m,xy} + \delta_{m,yz})$ ($a_{x;ij}(a_{y;ij}) = -t$, если i и j — ближайшие соседи по оси x (y), иначе $= 0$), дает обобщенную модель Гейзенберга (GHM) [1, 2] в терминах оператора обобщенного спина $\hat{S}_{im}^{(o)} = \frac{1}{2} \sum_{\sigma\sigma'} c_{im\sigma}^\dagger \sigma_{\sigma\sigma'}^{(o)} c_{im'\sigma'}$, где $c_{im\sigma}^\dagger$ и $c_{im\sigma}$ — операторы рождения и уничтожения электрона на орбитали m узла i со спином $\sigma \in \{\uparrow, \downarrow\}$; $\sigma^{(o)}$ — матрица

Паули, $o \in \{0, x, y, z\}$. В гамильтониан GHM входят слагаемые вида

$$\hat{H}_{\text{ex}} = \sum_{\langle i,j \rangle} \sum_{oo'} J_{m_1 m_2; m_3 m_4}^{(o,o')} \left(t_{ij}^{m_1}, \dots, t_{ij}^{m_4}, U, J_H, \Delta_{\text{CF}}, \lambda \right) \hat{S}_{im_1 m_2}^{(o)} \hat{S}_{jm_3 m_4}^{(o')}, \quad (1)$$

где $J_{m_1 m_2; m_3 m_4}^{(o,o')}$ — обобщенный обменный интеграл; U , J_H , Δ_{CF} и λ — параметры Хаббарда, хундовского обменного взаимодействия, расщепления кристаллическим полем и спин-орбитального взаимодействия соответственно.

В приближении среднего поля энергия E_{GS} основного состояния GHM есть биквадратичная форма компонент $u_{s;m\sigma}$ волновой функции ($s \in \{A, B\}$ — индекс подрешетки), подлежащих определению из условия минимальности E_{GS} .

При различных λ были найдены фазы AFM-xy, FM-AFO_{xz/yz}, FM-AFO_{xy/1}, FM-eO и AFO-eO (до (после) дефиса указан спиновый (орбитальный) двухподрешеточный порядок, см. точные определения в работе [2]). Фазовая диаграмма основного состояния при $\lambda = 0$ показана на рис. 1. Фаза FM-eO, найденная ранее в подходе [2], не учитывающем локальные корреляции, оказывается неустойчивой в более точном подходе на основе GHM.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ для ИФМ УрО РАН.

1. P. A. Igoshchev, S. V. Streltsov, K. I. Kugel, Journal of Magnetism and Magnetic Materials **587**, 171315 (2023).
2. P. A. Igoshchev, D. E. Chizhov, V. Y. Irkhin, S. V. Streltsov, Physical Review B **110**, 115110 (2024).

Биофизика

ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЦЕРИЯ

Т.В. Берняева*, А.В. Киреева

Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*e-mail: tbernyaeva@list.ru

На сегодняшний день изучение характеристик наночастиц различных металлов вызывает всё больший интерес [1]. Их использование распространяется на многие области, начиная от текстильной промышленности и заканчивая медицинской сферой.

Среди множества наноматериалов особое внимание уделяется наночастицам оксида церия вследствие существующей возможности перехода между двумя степенями окисления Ce^{4+} и Ce^{3+} . Также, одной из основных характеристик CeO_2 является эффективное поглощение ультрафиолетового излучения. В ряде литературных источников [2, 3, 4] установлено, что на скорость и полноту протекания реакций с участием оксида церия влияет группа критериев: кислотность (pH) среды; наличие допантов в кристаллической решетке наночастиц; природа красителя, являющегося индикатором процесса. Однако, в настоящее время нет результатов исследований, отражающих комплексное влияние вышеупомянутых факторов на протекание фотокаталитических процессов в присутствии наночастиц CeO_2 . Поэтому целью данной работы является исследование фотокаталитической активности наночастиц оксида церия при различных условиях.

Фотокаталитическая активность наночастиц оксида церия исследовалась на примере фотодеструкции катионного красителя метиленового синего при pH 3, 7, 10. Степень обесцвечивания контролировалась каждые 5 минут с использованием спектрофотометра ПЭ-5400УФ при длине волны 665 нм. Общее время облучения — 60 минут.

Полученные графики показали соответствие экспериментальных данных кинетической модели псевдо-первого порядка. Коэффициенты скорости реакции для pH 3, 7 и 10 составили 0.0012, 0.0049, 0.0461 мин^{-1} соответственно. За время облучения 60 минут степень разложения красителя в щелочной среде составила более 90%.

Таким образом, исследования показали, что наночастицы оксида церия способны проявлять фотокаталитическую активность, что может найти применение в системах очистки воды. Использование наночастиц оксида церия в составе композиционных материалов способствует получению самоочищающихся поверхностей.

1. М.Н. Кузнецова, В.Ю. Жилкина, Фармацевтическое дело и технология лекарств **2**, 9 (2021).
2. C. Chesneau, A. Pawlak, S. Hamadi, E. Leroy, S. Belbekhouche, RSC Pharmaceutics **1**, 98 (2024).
3. N. Jalali, A. Rakhsha, M. Nami, F. Rashchi, VR. Mastelaro, Energy Advances **2**, 1051 (2023).
4. Z. Kalaycıoğlu, B. Uysal, O. Pekcan, F. Erim, ACS Omega **8**, 13004 (2023).

ВЛИЯНИЕ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ И ДРУГИХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОРАСТАНИЕ СЕМЯН И ПОСЛЕДУЮЩЕЕ РАЗВИТИЕ СЕЯНЦЕВ КЛЕВЕРА ЛУГОВОГО

А.Ю. Беляев¹, Н.А. Кругликов^{2*}, А.Г. Быструшкин³

¹Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия

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

³Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений,
Москва, Россия

*e-mail: nick@imp.uran.ru

Для многих видов и сортов бобовых растений семенное размножение является основным способом их воспроизводства, поэтому совершенствование технологий предпосевной подготовки семян этих растений является актуальной задачей.

Твердосемянность (водонепроницаемость семенной кожуры) существенно затрудняет семенное размножение бобовых растений (в частности, клевера лугового) в условиях сельскохозяйственных посевов. Продолжается разработка эффективных методов преодоления твердосемянности: достижения высоких показателей всхожести семян и обеспечения дальнейшего нормального развития растений из проростков. Среди таких методов перспективны различные варианты обработки семян сжиженными газами, в частности, жидким азотом [1]. Такой способ обработки практикуется уже давно, он хорошо сочетается с криохранением семян в жидком азоте.

Целью данного исследования является разработка методов улучшения посевных качеств сортовых семян клевера лугового при помощи обработок сжиженными газами в комбинации с другими способами (методами) предпосевной подготовки.

Для обработки семян использовали методику, описанную в работе [1]. Полевые эксперименты проводили на территории ботанического сада Курганского госуниверситета в 2023 году. Проращивание семян в лабораторных условиях проводили в чашках Петри в кондиционируемом помещении при температуре 20° С в режиме 12 ч. свет/12 ч. темнота.

В пробах семян дикорастущего клевера лугового после их обработки в сжиженных газах существенно снижалась доля твердых семян, но у многих проростков происходило обламывание семядолей, что замедляло дальнейшее развитие сеянцев [1]. Семена сортовых образцов клевера лугового при почти полном отсутствии в их составе твердых семян сохраняли высокую жизнеспособность (и не имели поврежденных семядолей) после замораживания в жидком азоте и последующего оттаивания при комнатной температуре. Показатели полевой всхожести и энергии прорастания сортовых семян клевера лугового, обработанных жидкими газами, в вариантах полевого опыта оказались пропорционально ниже их аналогичных показателей при проращивании в лабораторных условиях. В некоторых вариантах полевого опыта с сортовыми семенами наблюдалось повышение всхожести семян и улучшение развития сеянцев после комплексной обработки семян, сначала сжиженными газами, а затем — перекисью водорода и гуматом калия. Полученные результаты свидетельствуют о возможности улучшения посевных качеств сортовых семян клевера лугового с применением комплекса физических и химических методов стимуляции прорастания семян, дальнейшего роста и развития сеянцев.

Работа выполнена в рамках государственных заданий Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН, ИЭРиЖ УрО РАН и ФГБНУ ВИЛАР (FGUU-2025-0001). Эксперименты по обработке семян в чистых сжиженных газах — были проведены на базе отдела криогенных технологий центра коллективного пользования ИФМ УрО РАН. Благодарим Тормозина М.А. (УралНИИСХ) за предоставленные для экспериментов сортовые семена клевера лугового.

1. N.A. Kruglikov *et al.* Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **88**, 9, P1423 (2024).

ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ВЫЖИВАЕМОСТЬ ДРОЖЖЕЙ

Н.А. Кругликов^{1*}, Д.А. Крылова^{1,2}, И.Н. Бажукова²¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия²Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия*e-mail: nick@imp.uran.ru

Зависимость «доза-эффект» для ионизирующего излучения найдена для большого количества микроорганизмов в том числе и для дрожжей [1]. Степень инактивации микроорганизмов, достигаемая при обработке высоким давлением, зависит от ряда взаимодействующих факторов, включая тип и количество микроорганизмов, интенсивность и продолжительность обработки давлением, температуру, состав среды [2].

Целью данного исследования является оценка устойчивости дрожжей выбранного штамма к обработке ионизирующим излучением и гидростатическим давлением разной величины. В экспериментах был использован сухой препарат спиртовых дрожжей (*Saccharomyces cerevisiae*), распространяемый под торговой маркой Bragman Industrial, поскольку дрожжи этого штамма обладают высокой резистентностью к высоким концентрациям этанола. В качестве питательной среды использовали 4% водный раствор сахарозы (80 г дистиллированной воды, 3.33 г сахарозы). 24-х часовая суспензия, содержащая молодые дрожжевые клетки, более устойчивые к неблагоприятным факторам, была разделена на образцы. Каждый образец был помещен в отдельную пробирку.

Для обработки образцов ионизирующим излучением был задействован ускоритель УЭЛР-10-10С с максимальной энергией 10 МэВ в центре радиационной стерилизации ФТИ УрФУ. Было проведено три обработки в различных режимах (5, 10, 15 кГр).

Для обработки образцов гидростатическим давлением задействовали гидростат НРР600/30L, в качестве передающей жидкости использующий воду. Было проведено пять обработок (100, 200, 300, 400, 550 МПа). Время удержания давления составляло 5 минут.

Для изучения динамики биологического эффекта физических воздействий определяли жизнеспособность клеток в культуре при помощи микроскопа и камеры Горяева. Для того, чтобы отличить живые клетки от мертвых, использовали методику окрашивания клеток метиленовой синью [3]. Выживаемость оценивали как отношение количества выживших клеток к общему их числу.

При помощи аппроксимации определены доза облучения и величина давления, вызывающие уменьшение числа живых клеток в два раза, которые составляют 9 кГр и 340 МПа, соответственно.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

1. Е. Н. Агданцева и др. Вопросы радиационной безопасности. 3, 50 (2018).
2. E. Palou, A. Lopez-Malo, G.V. Barbosa-Canovas, B.G. Swanson, Handbook of food preservation. — N.Y.-OX.: CRC Press (2007).
3. О.Ю. Калужина, А.Н. Гусев, Практикум по дисциплине "Технология спирта": учебное пособие. — Уфа: Башкирский государственный аграрный университет (2013).

Авторский указатель

- Hu F., 69
Wang J., 69
Абдулкадирова Н.З., 69, 70, 76, 77
Айрузов А.Р., 97
Акашев А.А., 151
Акрамов Д.Ф., 177, 178
Александрович П.А., 175
Алиев А.М., 69, 70, 73, 76, 77
Аллахвердиев К.Р., 198
Алтунян А.Л., 98
Андбаева В.Н., 152, 154, 162, 167
Аникеева В.Е., 193
Аникина Е.В., 176
Антонова О.В., 137
Артемьев М.С., 123
Архипов А.В., 83
Астафьев В.В., 129
Афанасьев С.В., 127, 146
Бажукова И.Н., 219
Байгутлин Д.Р., 82
Байдак С.Т., 205
Бакланова И.В., 195
Балаев Д.А., 87
Барташевич А.М., 89
Баталова Е.А., 153
Баяндин Ю.В., 49, 62
Белушкин А.В., 50
Беляев А.Ю., 218
Беляева А.О., 90
Берняева Т.В., 217
Билюкова М.Р., 154, 162
Блинов И.В., 139, 177, 178
Блинова Ю.В., 189
Боев Н.М., 93
Болдырев К.Н., 199
Большаков А.П., 199
Боярских К.А., 155
Бражкин В.В., 98
Бродова И.Г., 129
Брусникова А.А., 111
Бурков И.Д., 206
Бучельников В.Д., 75
Бушкова О.В., 112
Быструшкин А.Г., 218
Вайнштейн И.А., 185
Вальков В.В., 208
Василевский Ф.А., 71
Васильевский И.С., 115
Васьковский В.О., 86, 179
Ватлин Д.А., 112
Вахитов Р.М., 92
Ведерникова А.Г., 72
Великанов Д.А., 90
Вершинин С.В., 158
Верясова А.А., 179
Виниченко А.Н., 115
Винник Д.А., 79
Виноградов А.В., 165
Власова А.М., 207
Волегов А.С., 85
Волков А.Ю., 51, 104
Волосников Д.В., 156, 157, 160, 164
Вохминцев А.С., 185
Выходец В.Б., 147
Гамзатов А.Г., 69, 70, 72, 73, 76, 77
Гамов А., 208
Гареева З.В., 91
Герасимов Е.Г., 89
Гермов А.Ю., 119, 177
Гижевский Б.А., 52
Глазкова Е.В., 209
Глухов К.И., 210
Голобородский Б.Ю., 177
Голосов Д.А., 175
Голубятникова А.А., 85
Горбов Л.Е., 124
Гордеев Н.В., 145, 146
Горьковенко А.Н., 179
Горьковенко В.Н., 83
Гохфельд Ю.С., 90
Григорьев П.Д., 114, 116
Григорьев С.В., 53
Громилов С.А., 90
Губин А.А., 157, 160
Губкин А.Ф., 54
Гудим И.А., 107, 213
Гудин С.А., 55, 114
Гудина С.В., 111, 115

- Гудкова С.А., 79
Давыдов Д.И., 127, 136
Дворецкий С.А., 111
Джамалудинов М.Р., 103
Диаб М., 194
Друзьев Д.А., 99
Дрягина А.Е., 179
Дубинин С.С., 123, 182
Дубровский А.А., 87
Дьячков Е.Г., 81, 125, 140, 141
Дьячкова Т.В., 195
Дюндик С.С., 97
Дёмин А.М., 56
Ежов И.В., 126, 127
Ерагер К.Р., 78
Еремин Е.В., 90, 107, 213
Живулин В.Е., 79
Загребин М.А., 74, 75
Зайцев Е.Ю., 171
Заяц П.А., 210
Заяц С.В., 171
Злотников А.О., 208
Иванов В.Ю., 79
Игошев П.А., 71, 72, 214
Изюров В.В., 123
Ильиных М.В., 126
Ирхин В.Ю., 79
Истомина А.С., 112
Кадырбардеев А.Т., 73
Казак Н.В., 90
Казаков И.В., 126
Казанцева Н.В., 126, 127
Калашников В.С., 101
Камаева Л.В., 57, 98, 153
Карамышев К.Ю., 127
Карпухин Д.А., 76, 77
Киреева А.В., 217
Кириллов В.Л., 87
Киряков А.Н., 195
Князев Н.А., 62
Князев Ю.В., 87
Князькова О.В., 200
Ковалева А.Ю., 80
Коверда В.П., 165
Коледов В.В., 76, 77, 101
Колодкин Д.А., 88
Кондратьев О.А., 90
Кондрашова К.С., 131
Коробов Ю.С., 129
Король А.В., 200
Коротеев А.О., 129
Коротин Д.М., 212
Корх Ю.В., 79, 128, 177, 178, 184
Кочурин Е.А., 211
Кругликов Н.А., 52, 218, 219
Крылова Д.А., 219
Кудюков Е.В., 179
Кузнецов А.С., 74, 78
Кузнецова А.Ю., 128, 184, 197
Кузнецова Т.В., 79, 177, 178
Кузьмин Н.Н., 196
Кулеш Н.А., 179
Кунцевич А.Ю., 58
Курляндская Г.В., 83
Курышев А.О., 129
Курённых Т.Е., 147
Кушнир Д.С., 113
Лавренюк А.С., 180, 183
Ласуков А.И., 87
Лепаловский В.Н., 86
Ли О.А., 93
Липнягов Е.В., 159
Лобанов А.Д., 79
Лукоянов А.В., 205
Магомедов А.Р., 105
Магомедов М.А., 100, 103, 105
Мазагаева М.К., 100
Майданик Ю.Ф., 158
Макаров Д.В., 106
Макеев М.Ю., 80
Максимов Г.С., 181
Максимова Е.М., 97, 181
Максимова И.К., 177, 178
Малашенко В.В., 130
Мальцев В.В., 196
Мамонова М.В., 80, 131
Манцевич В.Н., 59
Маресов А.Г., 189
Маркович И.А., 74
Мартьянов О.Н., 87
Матосян А.М., 145, 146, 148
Матюнина М.В., 74
Маширов А.В., 78
Мелкозеров Д.И., 132, 135, 137

- Мельников А.Ю., 129
Меренцов А.И., 128, 138, 184, 197
Меренцова К.А., 81, 133, 182
Михайлов М.А., 133
Михайлов Н.Н., 111
Михалев К.Н., 60, 119
Могилюк Т.И., 114
Моисеев Д.М., 82
Молчанова А.Д., 198
Морозов Е.В., 76, 77, 101, 102
Морозов И.А., 196
Муртазаев А.К., 100, 103, 105
Муртазаев К.Ш., 103
Мусабилов И.И., 76, 77
Мушанкова К.А., 134
Мушников Н.В., 61, 89
Наймарк О.Б., 49, 62
Наумов С.В., 52
Неверов В.Н., 111, 115
Недёркин В.В., 180, 183
Нефёдова О.А., 147
Никитюк А.С., 62
Никонов А.В., 63
Ничипурук А.П., 146, 148
Новикова О.С., 104
Носов А.П., 123, 182
Обамби М.А., 75
Обухов С.И., 147
Палюлин В.В., 59
Панасенко А.С., 158
Панфилов П.Е., 135, 137
Паранин С.Н., 171
Паршакова М.А., 159
Пастухов В.Г., 151
Патраков В.Е., 172
Патраков Е.И., 79
Пацелов А.М., 135, 137
Переходюк А.Я., 176
Петров А.В., 189
Пилюгин В.П., 132, 135, 137
Платонов С.П., 88
Плотников М.С., 126
Плотников Я.М., 212
Поволоцкий И.И., 160, 164
Подгорбунская П.О., 104
Пойманов В.Д., 102
Попов А.П., 161
Попов С.Д., 115
Попова М.Н., 193, 194
Постников М.С., 138, 184, 197
Постовалова К.А., 132, 135, 137
Потылкин А.Н., 175
Прокопьев Д.А., 119
Прудников П.В., 99
Пряничников С.В., 125, 140, 141
Пугач Н.Г., 190
Ральченко В.Г., 199
Рамазанов М.К., 100, 103, 105
Рамазанов Р.М., 105
Резницких О.Г., 112
Решетников А.В., 151
Родионов Я.И., 116
Романов И.С., 161
Рукавичникова Е.А., 154, 162
Рукин С.Н., 172
Русалина А.С., 83
Русских П.А., 211
Рыльцев Р.Е., 153
Савченко С.С., 185
Сажина Е.Ю., 146
Сандаков Н.С., 115
Сарычев М.Н., 79
Сахаров Н.А., 126, 127, 136
Свалов А.В., 83
Седов В.С., 199
Сеидов С.С., 84, 206, 209
Сейсембаева В.Р., 85
Сектаров Э.С., 199, 200
Семенов С.В., 87
Семенова О.И., 193
Семенова С.В., 86
Середкин Н.Н., 163
Серкина К.С., 200
Ситдыков А.А., 164
Ситников К.А., 213
Скоробогатов С.А., 87
Скрипов П.В., 157, 160, 164
Смородина Е.Д., 87
Снигирев О.В., 189
Соколовский В.В., 75, 78, 82
Сокольчик Д.П., 106
Соловьева Ю.В., 132
Солтус А.Р., 88
Сосян Д.А., 132, 135, 137

- Спирин А.В., 171
Сташков А.Н., 145, 146, 148
Сташкова Л.А., 89
Степанова Е.А., 85
Степанова И.В., 200
Степанова Л.В., 134
Столбовский А.В., 139, 148, 177
Столяр С.В., 93
Стругацкий М.Б., 181
Суворова Е.В., 119
Таланцев Е.Ф., 104
Тарасова А.С., 90
Таркаева Е.В., 128, 184
Титов А.А., 124, 125, 133, 140, 141, 201
Титов А.Н., 125, 128, 138, 140, 141, 184, 197, 201
Титова В.Р., 107
Томин А.С., 165
Туркин Я.В., 190
Туруткин К.В., 115
Тютюнник А.П., 195
Уймин М.А., 119
Урсова Н.В., 112
Устюжанин Е.Е., 166
Файзуллин М.З., 165
Файзуллина С.В., 153
Фалахутдинов Р.М., 177, 178
Фещенко А.А., 86
Филиппов В.В., 108, 168
Филиппов М.А., 92
Филиппова В.В., 91
Хамзин А.А., 113
Хищенко К.В., 64, 155, 163
Хмельницкий Р.А., 199
Хомич А.А., 199
Хотиенкова М.Н., 152, 167
Цветкова А.В., 116
Черкасова Н.А., 79
Чернышев В.А., 210
Чижов Д.Е., 214
Чикунова Н.С., 139
Чичай К.А., 65
Чумаков Р.Г., 201
Шаймарданова Л.Г., 85
Шангин В.В., 160
Шелушинина Н.Г., 111
Шемченко Е.И., 180, 183
Ширинкина И.Г., 129
Шишкин Д.А., 79
Шкварин А.С., 81, 125, 138, 140, 141, 182, 197, 201
Шкварина Е.Г., 124, 140
Шохрина А.О., 93
Шрамков Е.А., 201
Щелкачев Н.М., 153
Юшков А.А., 83, 86, 179
Ягодин Д.А., 108, 168
Якунин М.В., 111
Ярославцева Т.В., 112

Тезисы докладов
XXIV Всероссийской школы-семинара
по проблемам физики конденсированного состояния вещества,
посвященной 100-летию со дня рождения Е.А. Турова
г. Екатеринбург, 14 марта — 20 марта 2025 г.

ISBN 978-5-6052052-0-3



9 785605 205203 >

УДК 538.9
ББК 22.37я431

Материалы школы-семинара
публикуются в авторской редакции

Технический редактор — П.А. Игошев
Верстка — П.А. Игошев, С.А. Маслова, Д.И. Радзивончик,
Д.В. Беляев, Е.И. Корзунова, А.Д. Лобанов, А.С. Панасенко
Н.А. Кругликов, Е.В. Суворкова
Дизайн обложки — Н.С. Чикунова, Е.В. Суворкова
В дизайне обложки использована картина Е. А. Турова
Ответственные за выпуск — С.А. Гудин, А.Н. Спашков
Отпечатано на ризографе ИФМ УрО РАН
Тираж 70 экз. Усл. печ. л. 25, 8
Заказ № 4.

ИФМ УрО РАН
620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18
тел. (343) 378-38-65
e-mail: spfks@imp.uran.ru

