

**Российская академия наук
Уральское отделение
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ
им. М. Н. Михеева
Уральского отделения РАН**

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ
Института физики металлов УрО РАН
по итогам 2016 года**

Тезисы докладов

27 марта – 30 марта 2017 года

г. Екатеринбург
2017

Глубокоуважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в работе научной сессии Института физики металлов УрО РАН по итогам 2016 года, которая состоится 27 марта – 30 марта 2017 года.

Надеемся, что Ваше присутствие на этой сессии в качестве докладчика или участника научных дискуссий будет интересным и полезным и для Вас, и для нашего института.

Дирекция и Ученый совет института

© ИФМ УрО РАН

Содержание

Предисловие..... 14

Электронные свойства конденсированных сред

Эффекты локализации и делокализации в режиме квантового эффекта Холла в гетероструктурах на основе HgTe с широкой квантовой ямой.

Ю.Г. Арапов, С.В. Гудина, В.Н. Неверов, С.М. Подгорных, М.Р. Попов, Г.И. Харус, Н.Г. Шелушинина, М.В. Якунин, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий 22

Возникновение сверхпроводящей фазы с повышенной критической температурой при замещении селена теллуrom в ферритмагнетике Fe₇Se₈.

Н.В. Баранов, А.С.А. Абухасва, Н.В. Селезнева, В.А. Казанцев 24

Спиновые переходы под давлением в клиноферросилите FeSiO₃.

А.А. Дьяченко, А.О. Шориков, А.В. Лукоянов, В.И. Анисимов 26

Спиральный магнитный порядок и переход металл–изолятор в узкозонных металлических соединениях.

П.А. Игошев, М.А. Тимиргазин, В.Ю. Ирхин..... 28

Фокусировка фононов и термоэдс увлечения в полупроводниковых кристаллах с вырожденной статистикой носителей тока.

И.Г. Кулеев, И.И. Кулеев, С.М. Бахарев, В.В. Устинов30

Экспериментальное обнаружение квантовых осцилляций аномального холловского сопротивления в кристаллах селенида ртути с примесями кобальта.

*А.Т. Лончаков, С.Б. Бобин, В.В. Дерюшкин, В.И. Окулов,
Т.Е. Говоркова, В.Н. Неверов* 32

Теория спин-термических эффектов в гибридных структурах металл/магнитный диэлектрик/металл.
И.И. Ляпилин, М.С. Окороков, Н.Г. Бебенин, В.В. Устинов34

Экситоны в центре зоны Бриллюэна в магнитоэлектрике CuV_2O_4 .
В.В. Меньшенин 36

Экспериментальное обоснование двухкомпонентной модели электронной структуры квазикристаллических сплавов.
А.Ф. Прекул, Н.И. Щеголихина 38

Фазовые переходы порядок – беспорядок и суперионная проводимость в соединениях $\text{M}\text{C}\text{V}_{11}\text{N}_{12}$ и $\text{M}\text{C}\text{V}_9\text{N}_{10}$ ($\text{M} = \text{Li}, \text{Na}$).
*А.В. Скрипов, А.В. Солонинин, О.А. Бабанова,
Р.В. Скорюнов* 40

Экситоны с переносом заряда в нанокристаллах NiO.
В.И. Соколов, Н.Б. Груздев, М.А. Уймин, И.В. Бызов..... 42

Скейлинг холловского и продольного сопротивления на границе антиферромагнетик – сверхпроводник.
*Т.Б. Чарикова, Н. Г. Шелушинина, Г.И. Харус, Д.С. Петухов,
О.Е. Петухова, А.А. Иванов* 44

Объекты с новой зонной структурой – двойные квантовые ямы на основе бесщелевого полупроводника HgTe .
*М.В. Якунин, С.М. Подгорных, М.Р. Попов,
В.Н. Неверов* 46

Структура и физико-механические свойства конденсированных сред

Анализ эволюции микроструктуры интерметаллидов и керамики при кручении под давлением.
*Б.А. Гринберг, М.А. Иванов, В.П. Пилюгин, А.М. Пацелов,
А.В. Плотников, Т.П. Толмачев, О.В. Антонова,
А.М. Власова, Ю.В. Соловьева* 48

Кислородный дефицит и растворимость дейтерия в оксидных наночастицах.
В.Б. Выходец, Т.Е. Куренных 50

Состояние границ зерен и зернограничная диффузия в ультрамелкозернистых Mo и W, полученных интенсивной пластической деформацией.
В.В. Попов, А.В. Сергеев, А.В. Столбовский 52

Термодинамика и кинетика ранних стадий распада в поликристаллических сплавах. Первопринципное и атомистическое моделирование.
*Ю.Н. Горностырев, П.А. Коржавый, Л.Е. Карькина,
И.Н. Карькин, М.В. Петрик, А.Р. Кузнецов* 54

Структура и свойства композитов на основе Nb_3Sn с внутренними источниками олова в зависимости от дизайна, легирования и режима диффузионного отжига.
Е.Н. Попова, И.Л. Дерягина, Е.Г. Валова-Захаревская 56

Фазовые превращения в многокомпонентных сплавах на основе интерметаллида $\text{Co}_3(\text{Al,W})$.
*Н.В. Казанцева, Н.Н. Степанова, Д.И. Давыдов,
Н.И. Виноградова, С.Л. Демаков, Д.А. Шишкин,
Е.П. Романов* 58

Ориентационные соотношения и механизм мартенситного превращения в среднеуглеродистой стали с пакетным мартенситом. <i>В.М. Гундырев, В.И. Зельдович, В.М. Счастливец</i>	60
Эффекты фрикционного наноструктурирования в стали Гадфильда. <i>Л.Г. Коршунов, В.В. Сагарадзе, Н.Л. Черненко, В.А. Шабашов</i>	62
Влияние сильного постоянного магнитного поля на процессы возврата и рекристаллизации в холоднокатаных ферромагнитных сплавах. <i>И.В. Гервасьева, В.А. Милютин</i>	64
Разработка высокопрочных и пластичных сплавов Ti–Ni–Hf с высокотемпературными эффектами памяти формы. <i>В.Г. Пушин, Н.Н. Куранова, А.В. Пушин, А.Н. Укусников, Н.И. Коуров, Т.Э. Кунцевич, Е.С. Белослудцева, Е.Б. Марченкова, В.П. Дякина</i>	66
Механизм и кинетика контролируемых диффузией структурно-фазовых превращений в стареющих Fe–Ni–(Al, Ti) сплавах при холодной мегапластической деформации. <i>В.В. Сагарадзе, В.А. Шабашов, К.А. Козлов, В.А. Завалишин, В.П. Пилюгин, Н.В. Катаева, А.Р. Кузнецов, А.В. Литвинов, С.В. Афанасьев, А.Е. Заматовский, К.А. Ляшков</i>	68
Магнетизм	
Сильнонелинейные локализованные возбуждения в магнетиках и мультиферроиках со спиральной структурой. <i>В.В. Киселев, А.А. Расковалов</i>	70

Возможности ЯМР-релаксометрии при определении движения флюида в пористой среде. <i>С.В. Жаков, В.В. Лоскутов, Ю.К. Доломанский</i>	72
Магнитострикционное высокоэффективное электромагнитно-акустическое возбуждение ультразвуковых волн без поля смещения. <i>А.В. Михайлов, Ю.Л. Гобов, Я.Г. Смородинский</i>	74
Эффект Яна-Теллера и адиабатическое охлаждение вблизи точки кроссовера. <i>Е.В. Розенфельд</i>	76
Спиновые клапаны с синтетическим антиферромагнетиком: изменение однонаправленной анизотропии и управление функциональными параметрами. <i>В.В. Устинов, М.А. Миляев, Л.И. Наумова, В.В. Проглядо, Т.А. Чернышова, И.Ю. Каменский, Т.П. Криницина</i>	78
Магнитные структуры мультиферроиков. <i>А.Н. Пирогов, А.Е. Теплых, В.Д. Пархоменко, С.Г. Богданов, Ю.Н. Скрябин, Д.Г. Келлерман, В.Я. Шур, Е.В. Владимирова, М.А. Семкин, Н.В. Урусова, А.С. Волегов, С. Ли</i>	80
Перспективы снижения магнитных потерь в магнитопроводах стержневых трансформаторов. <i>В.И. Пудов, Ю.Н. Драгошанский</i>	82
Микроволновые свойства 3D-нанокмозитов с частицами 3d-металлов и палладия. <i>А.Б. Ринкевич, Д.В. Перов, М. Пардави-Хорват, М.И. Самойлович</i>	84
Магнитооптические и магнитотранспортные свойства мультислойных наноструктур Co/Cu.	

*И.Д. Лобов, М.М. Кириллова, А.А. Махнев, Л.Н. Ромашев,
А.В. Королев, М.А. Миляев, В.В. Проглядо, В.В. Устинов*86

**Однонаправленная анизотропия в слоистых кобальтитах
R₂BaCo₂O_{5.5} (R = Eu, Gd).**

*Н.И. Солин, С.В. Наумов, Е.В. Мостовицкова, С.В. Телегин,
А.В. Королев* 88

**Гигантская магнитострикция при переходе
антиферромагнетик – ферромагнетик в La_{0.75}Sm_{0.25}Mn₂Si₂.**

*Н.В. Мушников, Е.Г. Герасимов, В.С. Гавико,
К.А. Язовских* 90

**Неоднородное магнитное состояние и спиновая динамика
в электронно-допированных кубических манганитах по
данным ЯМР.**

*З.Н. Волкова, А.Ю. Гермов, С.В. Верховский, К.Н. Михалев,
А.П. Геращенко, А.В. Королев* 92

**Особенности структурного превращения в сплавах
FePd и Fe–Pd–Ni и их влияние на магнитные
гистерезисные свойства.**

*Н.И. Власова, А.Г. Попов, Н.М. Клейнерман, В.В. Сериков,
В.С. Гавико, Л.А. Сташкова, Н.Н. Щеголева, О.А. Головня*94

Contents

Electronic properties of condensed matter

**Effects of localization and delocalization in a quantum Hall
effect regime in HgTe-based heterostructures with a wide
quantum well.**

*Yu.G. Arapov, S.V. Gudina, V.N. Neverov, M. R. Popov,
N.G. Shelushinina, M.V. Yakunin, S.A. Dvoretzky,
N.N. Mikhailov* 22

**The appearance of the superconducting phase with
enhanced critical temperature at the tellurium for selenium
substitution in ferrimagnet Fe₇Se₈.**

*N.V. Baranov, A.C.A. Abouhaswa, N.V. Selezneva,
V.A. Kazantsev* 24

**Spin transitions in a wide range of pressure in clinoferrosilite
FeSiO₃.**

A.A. Dyachenko, A.O. Shorikov, A.V. Lukoyanov, V.I. Anisimov26

**Spiral magnetic order and the metal-insulator transition in
narrow-band metal compounds.**

P.A. Igoshev, M.A. Timirgazin, V.Yu. Irkhin 28

**Phonon focusing and drag thermal power in semiconductor
crystals with degenerate charge-carrier statistics.**

I.G. Kuleyev, I.I. Kuleyev, S.M. Bakharev and V.V. Ustinov 30

**Experimental detection of quantum oscillations of the
anomalous Hall resistance in mercury selenide crystals with
cobalt impurities.**

*A.T. Lonchakov, S.B. Bobin, V.V. Deryushkin, V.I. Okulov,
T.E. Govorkova, V.N. Neverov, E.A. Pamyatnykh,
L. D. Paranchich*..... 32

Theory of thermo-spin effects in Pt|YIG|Pt structures.

I. I. Lyapilin, M. S. Okorokov, N. G. Bebenin, V. V. Ustinov..... 34

**Excitons in the center of the Brillouin zone in CuB₂O₄
magnetoelectrics.**

V. V. Men'shenin 36

**Experimental Justification of the Two-Component Model of
Electronic Structure in Quasicrystalline Alloys.**

A.F. Prekul, N.I. Shchegolikhina..... 38

Order – disorder phase transitions and superionic conductivity in $\text{MCB}_{11}\text{H}_{12}$ and $\text{MCB}_9\text{H}_{10}$ compounds (M = Li, Na). <i>A.V. Skripov, A.V. Soloninin, O.A. Babanova, R.V. Skoryunov</i>	40
Charge transfer excitons in NiO nanocrystals. <i>V.I. Sokolov, N.B. Gruzdev, M.A. Uimin, I.V. Byzov</i>	42
Scaling of the Hall and longitudinal resistivity near antiferromagnetic-superconductor phase boundary. <i>T.B.Charikova, N.G.Shelushinina, G.I.Harus, D.S.Petukhov, O.E.Petukhova, A.A.Ivanov</i>	44
Double quantum wells based on gapless semiconductor HgTe as objects with a new band structure. <i>M.V. Yakunin, S.M. Podgornykh, M.R. Popov, V.N. Neverov</i>	46
Structure and physico-mechanical properties of condensed matter	
Analysis of the evolution of the microstructure of intermetallic compounds and ceramics upon high pressure torsion. <i>B.A. Greenberg, M.A. Ivanov, V.P. Pilyugin, A.M. Patselov, A.V. Plotnikov, T.P. Tolmachev, O.V. Antonova, A.M. Vlasova, Y.V. Solovieva</i>	48
Oxygen deficit and deuterium solubility in oxide nanoparticles. <i>V.B. Vykhodets, T.E. Kurennykh</i>	50
The state of grain boundaries and grain-boundary diffusion in ultrafine-grained Mo and W obtained by severe plastic deformation. <i>V.V. Popov, A.V. Sergeev, A.V. Stobovky</i>	52

Ab initio based investigations of thermodynamics and kinetics of decomposition in iron and aluminum based alloys. <i>Yu.N. Gornostyrev, P.A. Korzhavyi, L.E. Karkina, I.N. Karkin, M.V. Petrik, A.R. Kuznetsov</i>	54
Structure and properties of Nb_3Sn-based composites with internal tin sources depending on their design, doping and diffusion annealing regimes. <i>E.N. Popova, I.L. Deryagina, E.G. Valova-Zaharevskaya</i>	56
Phase transformation in $\text{Co}_3(\text{Al,W})$-based alloys. <i>N.V. Kazantseva, N.N. Stepanova, D.I. Davidov, N.I. Vinogradova, S.L. Demakov, D.I. Shishkin, E.P. Romanov</i>	58
Orientation relationships and the mechanism of martensitic transformation in medium-carbon steel with packet martensite. <i>V. M. Gundyrev, V. I. Zel'dovich, V. M. Schastlivtsev</i>	60
The Effects of friction nanostructuring in Hadfield steel. <i>L.G. Korshunov, V.V. Sagaradze, N.L.Chernenko, V.A.Shabashov</i> ..	62
Effect of High DC Magnetic Field on Recovery and Recrystallization Processes in Cold Rolled Ferromagnetic Alloys. <i>I.V. Gervasyeva, V.A. Milyutin</i>	64
Development of high strength and ductile Ti-Ni-Hf alloys with high temperature shape memory effects. <i>V. G. Pushin, N. N. Kuranova, A. V. Pushin, A. N. Uksusnikov, N. I. Kourov, T. E. Kuntsevich, E. S. Belosludtseva, E. B. Marchenkova, V. P. Dyakina</i>	66
The mechanism and kinetics of diffusion controlled structural and phase transformations in aging Fe-Ni-(Al, Ti) alloys during cold megaplastic deformation. <i>V.V. Sagaradze, V.A. Shabashov, K.A. Kozlov, V.A. Zavalishin,</i>	

*V.P. Pilyugin, N.V. Kataeva, A.R. Kuznetsov, A.V. Litvinov,
S.V. Avanasiev, A.E. Zamatovsky, K.A. Lyashkov* 68

M a g n e t i s m

**Strongly nonlinear localized excitations in magnets and
multiferroics with a spiral structure.**
V.V. Kiselev, A.A. Raskovalov 70

**Potential of NMR relaxometry for fluid mobility detection
in porous media.**
S.V.Zhakov, V.V.Loskutov, Yu.K.Dolomanski 72

**High-performance magnetostrictive electromagnetic–acoustic
excitation of ultrasonic waves without a bias field.**
A.V. Mikhailov, Yu.L. Gobov, Ya.G. Smorodinskii 74

**Jahn–Teller effect and adiabatic cooling in the vicinity of
crossover point.**
E.V. Rosenfeld 76

**Spin valves with synthetic antiferromagnet: change
of unidirectional anisotropy and control of functional
parameters.**
*V.V. Ustinov, M.A. Milyaev, L.I. Naumova, V.V. Proglyado,
T.A. Chernyshova, I.Y. Kamensky, T.P. Krinitsina* 78

Magnetic structures of multiferroics.
*A.N. Pirogov, A.E. Teplykh, V.D. Parkhomenko, S.G. Bogdanov,
Yu.N. Skryabin, D.G. Kellerman, M.A. Semkin, N.V. Urusova,
A.S. Volegov, V.Ya.Shur, S. Lee* 80

**Prospects for reducing the magnetic losses in magnetic cores
of stack-transformers.**
V.I. Pudov, Yu.N. Dragoshanskii 82

**Microwave properties of 3D nanocomposites
with the particles of 3d metals and palladium.**
*A.B.Rinkevich, D.V.Perov, M. Pardavi-Horvath,
M.I. Samoylovich* 84

**Magneto-optical and magnetotransport properties
of Co/Cu multilayered nanostructures.**
*I.D. Lobov, M.M. Kirillova, A.A. Makhnev, L.N. Romashev,
A.V. Korolev, M.A. Milyaev, V.V. Proglyado, V.V. Ustinov* 86

**Unidirectional anisotropy in layered cobaltite RBaCo₂O_{5,5}
(R=Eu, Gd).**
*N. I. Solin, E. V. Mostovshchikova, S. V. Naumov, S. V. Telegin,
and A. V. Korolev* 88

**Giant magnetostriction upon the antiferromagnet-to-
ferromagnet transition in La_{0.75}Sm_{0.25}Mn₂Si₂.**
*N.V. Mushnikov, E.G. Gerasimov,
V.S. Gaviko, K.A. Yazovskikh* 90

**Inhomogeneous magnetic state and spin dynamics in
electron-doped cubic manganites according to NMR data.**
*Z.N. Volkova, A.Yu. Germov, S.V. Verkhovskii, K.N. Mikhalev,
A.P. Gerashenko, A.V. Korolev* 92

**The peculiarities of the structural transformation
in the FePd and Fe-Pd-Ni alloys and their effect on magnetic
hysteresis properties.**
*N.I. Vlasova, A.G. Popov, N.M. Kleinerman, V.V. Serikov,
V.S. Gaviko, L.A. Stashkova, N.N. Shchegoleva, O.A. Golovnia* 94

85 лет Институту физики металлов УрО РАН (1932–2017)

К 110-летию со дня рождения В.И. Архарова

В 2017 г. исполняется 110 лет со дня рождения Владимира Ивановича Архарова (27.02.1907 – 26.09.1997), крупного ученого-физика, академика Национальной АН Украины.



В.И. Архаров начал свою деятельность в нашем институте в 1936 г., а с 1958 г. одновременно в Уральском государственном университете, где им была организована одна из первых в стране кафедр физики твердого тела.

Им была построена теория процессов окисления металлов при высоких температурах и сформулированы основные принципы жаростойкости и защитного действия оксидных пленок, влияния различных легирующих эле-

ментов в сплаве на структурный тип окалины. На основе этих работ им была написана и защищена докторская диссертация на тему «Структурная теория высокотемпературного окисления железа, стали и некоторых других металлов», а основные научные результаты обобщены в 1945 г. в монографии «Окисление металлов при высоких температурах». Признанием значимости полученных результатов является то, что с 1969 г. В.И. Архаров (начало выпуска журнала) до конца своих дней был членом редколлегии журнала «Oxidation of Metals» (издающимся в Нью-Йорке, США). В 1946 г. он был утвержден в звании профессора.

Одним из направлений исследований в период работы В.И. Архарова на Урале было изучение взаимодействия металлов с другими газовыми средами – азотирующими, карбидизирующими и другими. Особенно детально были разработаны теоретические и прикладные аспекты газового хромирования, как в плане теоретического рассмотрения процесса, так и в отношении физико-химических и механических свойств получающихся при этом процессе металлопокрытий, возможности практической реализации процесса. Результаты исследований были изложены им в монографии «Газовое хромирование» (1945г.)

На основе исследований в годы войны (1944–1945) В.И. Архаровым были разработаны методика и технология газового хромирования стальных изделий, что позволило решить проблему выбора материала для производства важного оборонного изделия и наладить его серийное производство. За эти работы он в 1945 г. был награжден орденом Красной Звезды.

В.И. Архаров был инициатором создания на Урале академического научного журнала «Физика металлов и металловедение» и с 1955 г. (до своего отъезда на Украину) был заместителем главного редактора.

В 1965 г. В.И. Архаров был избран академиком НАН Украины и переехал на работу в г. Донецк.

В списке научных трудов В.И. Архарова насчитывается около 500 публикаций (в том числе 5 монографий), относящихся к физике твердого тела и физическому материаловедению. Его монографии «Окисление металлов при высоких температурах» (1945 г.) и «Кристаллография закалки стали» (1951 г.) явились одними из первых крупных работ по этим проблемам в мировой науке.

Идеи Владимира Ивановича Архарова находят теоретическое развитие в работах его учеников и последователей.

В.О. Есин

К 90-летию со дня рождения А.А. Самохвалова

В 2017 г. исполняется 90 лет со дня рождения Алексея Андреевича Самохвалова (28.07.1927 – 14.08.2000) – видного российского ученого в области новых магнитных материалов.



А.А. Самохвалов – один из создателей в Советском Союзе нового научного направления – физики магнитных полупроводников, которое является предшественником бурно развивающейся в наше время спинтроники.

Алексей Андреевич в 1949 г. поступил в аспирантуру Института физики металлов. После защиты кандидатской диссертации в 1954 г. им были выполнены работы по созданию и внедрению новых гамма-дефектоскопов, которые позволяли ускорить контроль изделий в 50–80 раз по сравнению с прежними методами при значительном удешевлении контрольных операций.

В 1964 г. А.А. Самохвалов был назначен руководителем группы ферритов. Под его руководством были проведены исследования большого ряда ферритов, редкоземельных соединений на основе двухвалентного европия, халькогенидных хромовых шпинелей. Результаты экспериментальных и теоретических исследований ферритов были обобщены в обзоре «Электронная проводимость в магнетите и ферритах» (*Phys. Status Solidi*, В, 1977), написанном А.А. Самохваловым совместно с М.И. Клингером. Эта публикация является одной из самых цитируемых работ А.А. Самохвалова. За «синтез и исследование новых ферромагнитных материалов на основе низшего окисла европия» А.А. Самохвалов в 1970 г. был

удостоен премии Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева.

В 1971 г. А.А. Самохвалов становится доктором физико-математических наук, а в 1972 г. в ИФМ УНЦ РАН создается лаборатория магнитных полупроводников, которую Алексей Андреевич возглавлял до 1998 г. Рейтинг его, как заведующего, всегда был высоким. Ведущее положение лаборатории в это время подтверждается решением НС по проблеме «Физика и химия полупроводников» при Президиуме АН СССР в 1977 г., согласно которому ИФМ определен головным по физике магнитных полупроводников.

В 1984 г. А.А. Самохвалову в соавторстве была присуждена Государственная премия СССР за цикл работ «Магнетизм и электронная структура редкоземельных и урановых соединений». Вместе с сотрудниками лаборатории Алексеем Андреевичем были обнаружены и исследованы новые явления сильного электрон-магнетонного взаимодействия в магнитных полупроводниках, генерация спиновых волн носителями заряда в сильном электрическом поле, эффект черенковского усиления спиновых волн дрейфующими носителями заряда, обнаружен новый механизм затухания спиновых волн, основанный на магнитоэлектрическом механизме, разработаны и предложены для практического применения новые устройства на основе магнитных полупроводников.

Последние годы Алексей Андреевич занимался проблемами ВТСП, локальной сверхпроводимостью и поверхностными явлениями в магнитных полупроводниках. В 1998 г. А.А. Самохвалову было присвоено звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации». А.А. Самохвалов является автором более 300 трудов, среди них 2 монографии, 6 обзоров, 14 авторских свидетельств. Он воспитал целую плеяду учеников, среди которых 3 доктора и 16 кандидатов физико-математических наук.

Н.Н. Лошкарева

К 80-летию со дня рождения В.П. Калашникова

В этом году исполняется 80 лет со дня рождения известного советского физика Владимира Петровича Калашникова (09.11.1937 – 11.02.2006).



В 1962 г. В.П. Калашников стал аспирантом нашего института, однако свою научную деятельность он начал будучи еще студентом, когда под руководством профессора П.С. Зырянова стал заниматься теорией квантовой плазмы в сильных магнитных полях, а с профессором Г.В. Скродским – изучением поляризации световых пучков в гравитационных полях. В ИФМ В.П. Калашников занимался теорией кинетических явлений в системах многих частиц в сильных внешних полях.

Наиболее фундаментальные результаты получены В.П. Калашниковым в области физической кинетики. Им выполнен целый ряд важных исследований в линейной и нелинейной теории термогальваномагнитных эффектов в проводящих кристаллах, в кинетике парамагнитных явлений и общей теории неравновесных процессов.

Один из циклов работ Владимира Петровича относится к построению теории нового физического эффекта – поляризации спинов ядер сильным током горячих электронов в полупроводниках и полуметаллах. Им разработана полная теория эффекта Феера, который находится на стыке ряда направлений в современной физике твердого тела – теории нелинейных гальваномагнитных явлений, теории электронной спин-решеточной релаксации и теории ядерной спин-решеточной релаксации. В 1965г. он защищает кандидатскую диссертацию

«Некоторые вопросы квантовой теории явлений переноса в сильном магнитном поле».

Широкую известность получили работы В.П. Калашникова, посвященные развитию общих методов описания неравновесных систем со многими степенями свободы. Метод основан на построении асимптотических выражений для неравновесных статистических операторов (НСО), функционально зависящих от ограниченного числа огрубленных макроскопических переменных. Его отличительной чертой является то, что он приводит к такой же стандартизации решения задач теории необратимых процессов, как и существующие методы аналитической механики – в решении задач механических. Им был предложен алгоритм построения НСО для различной степени огрубления и уравнений баланса для макроскопических переменных, сформулирована теория отклика неравновесных систем на внешнее механическое и термическое возмущение, построены выражения для неравновесных адмиттансов и функций Грина. Кроме того, были проанализированы различные модификации метода НСО и показана их эквивалентность. В 1972 г. В.П. Калашников защитил докторскую диссертацию «Метод неравновесного статистического оператора и его приложения к кинетике парамагнитных явлений в проводящих кристаллах».

Особенность работ В.П. Калашникова – это сочетание оригинальных исследований по развитию общей теории неравновесных процессов с приложением этой теории к конкретным проблемам – расчету новых эффектов. Отличительной чертой его научных работ является исключительная ясность постановки задачи.

У Владимира Петровича было много учеников и коллег в разных городах страны и за рубежом, с которыми он поддерживал тесный контакт. Под его руководством были подготовлены и защищены 15 кандидатских и докторских диссертаций по новейшим разделам теоретической физики.

И.И. Ляпилин, Н.Г. Бебенин

К 80-летию со дня рождения А.И. Пономарева

В 2017 г. исполняется 80 лет со дня рождения Анатолия Ивановича Пономарева (26.12.1937 – 20.05.2006).



Первые научные работы Анатолия Ивановича относятся к концу 60-х годов и посвящены исследованиям явлений переноса носителей заряда и гальваномагнитным эффектам в полупроводниковых соединениях HgTe и GaSb. Анатолий Иванович работал в Институте физики металлов УрО РАН с 1983 по 2006 гг. и занимался изучением гальваномагнитных свойств бесщелевых и узкощелевых полупроводников (HgTe и HgSe), разбавленных магнитных полупроводников ($\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ и $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$), а также, после открытия высокотемпературной сверхпрово-

димости (ВТСП), исследованием термогальваномагнитных эффектов и релаксационных явлений в ВТСП-соединениях.

Прекрасный экспериментатор, А.И. Пономарев модернизировал установку для получения импульсных магнитных полей до 400 кЭ. В результате исследований было установлено, что в разбавленных магнитных полупроводниках $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ обменное взаимодействие локализованных *d*-электронов Mn с зонными электронами приводит к существенной перенормировке *g*-фактора электронов проводимости, который определяется состоянием магнитной подсистемы. Аномалии осцилляций Шубникова – де Газа в магнитных полупроводниках обусловлены влиянием этого обмена.

В результате впервые выполненных комплексных исследований кинетических эффектов (электропроводности, эффекта Холла и термоэдс) в ВТСП-соединениях LaSrCuO, YBaCuO, YBa(Li,K,La)CuO было установлено, что существуют общие закономерности в характере изменения кинетических коэффициентов, проявляющиеся при изменении состава и при отклонении от стехиометрии, а в соединении LaSrCuO в области нормального состояния преобладает дырочная проводимость. Был обнаружен новый тип резистивного состояния, который характеризовался гистерезисными и релаксационными эффектами. Результаты комплексных исследований электрических и магнитных свойств ВТСП указывали на единую природу наблюдаемых особенностей: наличие гистерезиса сопротивления и намагниченности, наличие остаточного сопротивления и остаточной намагниченности, релаксация этих величин по логарифмическому закону. Исследования электрического сопротивления в магнитных полях выше второго критического поля позволили установить температурную зависимость сопротивления при температурах ниже критической вплоть до $T = 0,2$ К. Логарифмический закон возрастания сопротивления при понижении температуры характерен для систем с двумерной проводимостью и определяется вкладом электрон-электронного взаимодействия и интерференционными поправками к проводимости. В 1998 г. Анатолий Иванович защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по теме «Электронные кинетические явления в полупроводниковых и ВТСП соединениях с примесями замещения и собственными дефектами».

Т.Б. Чарикова.

Эффекты локализации и делокализации в режиме квантового эффекта Холла в гетероструктурах на основе HgTe с широкой квантовой ямой

Ю.Г. Арапов¹, С.В. Гудина¹, В.Н. Неверов², С.М. Подгорных³,
М.Р. Попов¹, Г.И. Харус¹, Н.Г. Шелушнина¹, М.В. Якунин¹,
Н.Н. Михайлов⁴, С.А. Дворецкий⁴

¹Лаборатория полупроводников и полуметаллов

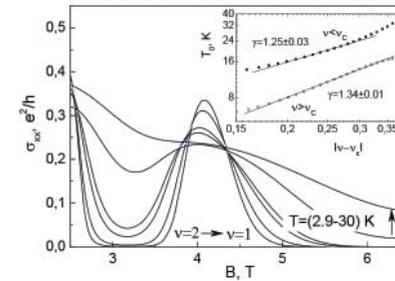
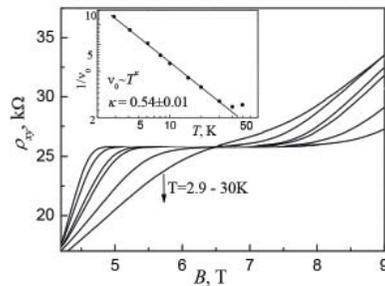
²Лаборатория углеродных наноматериалов

³Лаборатория низких температур

⁴Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

В рамках гипотезы двухпараметрического скейлинга и представлений о прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка проанализированы экспериментальные зависимости продольного и холловского сопротивлений для переходов «плато-плато» квантового эффекта Холла (КЭХ) (металлическая проводимость по делокализованным состояниям), а также в областях плато КЭХ (прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка по локализованным состояниям в щели подвижности между уровнями Ландау), для широкой квантовой ямы HgTe/HgCdTe с инвертированной зонной структурой. Найденные значения критических индексов как в полосе делокализованных состояний (квантовое туннелирование), так и в области прыжковой проводимости (классическое протекание), свидетельствуют о решающей роли крупномасштабного хаотического потенциала при описании процессов переноса заряда в режиме КЭХ в исследованной системе [1–5].

На рисунках показаны зависимости холловского со-



противления $\rho_{xy}(B, T)$ в области плато КЭХ с фактором заполнения $\nu=1$ и продольной проводимости $\sigma_{xx}(B, T)$ в области квантового фазового перехода «плато-плато» с факторами заполнения $\nu=1 \rightarrow \nu=2$ от магнитного поля и температуры ($T=2.9-30\text{K}$) (направление стрелок на рисунках обозначает

рост температуры). На вставках: температурная зависимость обратной ширины полосы делокализованных состояний $1/\nu_0$ в центре уровня Ландау; характеристическая температура T_0 как функция расстояния $|\nu - \nu_c|$ до центра уровня Ландау (ν_c) с двух сторон от перехода $\nu=1 \rightarrow \nu=2$ («Δ» – $\nu < \nu_c$, «O» – $\nu > \nu_c$). Критический индекс длины локализации γ определен как $\ln(T_0) \propto \gamma \ln |\nu - \nu_c|$.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Спин» № 01201463330 при поддержке РФФИ (гранты 14-02-00151, 16-32-00725, программы ФИ УрО РАН № 15-9-2-21).

[1] S.V. Gudina, Yu.G. Arapov et al. *Phys.Stat.Sol. (C)*. 2016, v. 13, p. 473–476, DOI 10.1002/pssc.201510299.

[2] Yu.G. Arapov, S.V. Gudina et al. *J. LowTemp.Phys.* 2016, v. 185, p. 665–672 (2016), DOI 10.1007/s10909-016-1477-0.

[3] Ю.Г. Арапов, С.В. Гудина и др. *ФТП*, 2015, т. 49, с.1593.

[4] Yu.G. Arapov, S.V. Gudina et al. *17 Int. Conf. on II–VI Compounds and Related Materials*, 2015, Paris, Conference book, p. 324.

[5] Ю.Г. Арапов и др. *Труды XIX Межд.симп. «Нанофизика и нанoeлектроника»*, 2015, Н. Новгород, с. 628–629.

Возникновение сверхпроводящей фазы с повышенной критической температурой при замещении селена теллуром в ферритмагнетике Fe_7Se_8

Н.В. Баранов¹, А.С.А. Абухасва², Н.В. Селезнева², В.А. Казанцев³

¹Лаборатория микромагнетизма

²Институт естественных наук и математики УрФУ

³Лаборатория нейтронных исследований вещества

Сверхпроводящие свойства и критическая температура в соединениях на основе $\text{Fe}_{1+\delta}\text{Se}$ с тетрагональной структурой сильно зависят от условий синтеза, от допирования или замещения, как по подрешетке железа, так и по подрешетке халькогена, а также от наличия вакансий, приложенного давления и от присутствия других фаз [1–4]. Целью настоящей работы являлось выявление роли сосуществования разных фаз на сверхпроводящие свойства образцов $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$ с дефицитом железа по отношению к составу типа 1:1. Соединение Fe_7Se_8 обладает слоистой структурой типа NiAs и является ферритмагнетиком с температурой Нееля около 450 К. Аналогичное соединение с теллуром Fe_7Te_8 отсутствует, а предел растворимости теллура в системе $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$ не превышает 15 ат. %. В работе установлено, что замещение селена теллу-

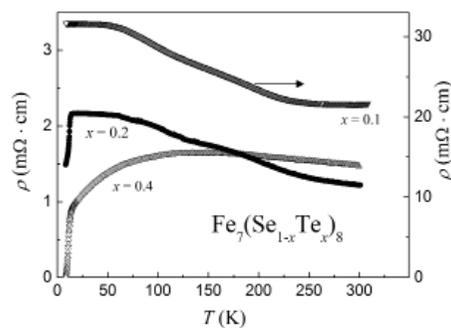


Рис. 1 Температурные зависимости электросопротивления образцов $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$.

ром в соединении Fe_7Se_8 приводит из-за ограниченной растворимости теллура к фазовому расслоению и к появлению в образцах $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$ при $y > 0.15$ сверхпроводящей тетрагональной фазы типа PbO наряду с ферритмагнитной фазой. Объем сверхпроводящей фазы зависит от условий

термообработки и достигает 30 %. Обнаружено, что образцы $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$ с содержанием теллура выше $y \geq 0.4$ обладают более высокими значениями температуры начала сверхпроводящего перехода (T_c^{onset} до 17.8 К) по сравнению с однофазными образцами $\text{Fe}(\text{Se},\text{Te})$ (рис. 1). Повышенные значения T_c^{onset} обусловлены дефицитом железа и взаимодействием между фазами типа NiAs и PbO, обладающими разными межатомными расстояниями, магнитными и электронными свойствами.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН (проект № 15-17-2-22) и РФФИ (проекты № 16-02-00480 и № 16-03-00733).

[1] N.V. Baranov, A.S. Abouhaswa, N.V. Selezneva, V.A. Kazantsev, P.N.G. Ibrahim. *Solid State Sciences*, 2016, v. 61, c. 136–145.

[2] A.S. Abouhaswa, A.I. Merentsov, N.V. Baranov. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 2016, vol. 527, p. 21–27.

[3] A. Abouhaswa, N. Baranov, N. Selezneva, A. Merentsov. *VI Euro-Asian Symposium "Trends in magnetism" (EASTMAG-2016)*. Krasnoyarsk, Russia. 2016, p. 160.

[4] A. S. Abouhaswa, N. V. Selezneva, A. I. Merentsov, N. V. Baranov. *Третья Межд. молодежная научная конференция. Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2016, УрФУ, Екатеринбург, Россия. 2016, с. 54.*

Спиновые переходы под давлением в клиноферросилите FeSiO₃

А.А. Дьяченко¹, А.О. Шориков^{1,2}, А.В. Лукоянов^{1,2}, В.И. Анисимов^{1,2}

¹Лаборатория оптики металлов

²УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина

В рамках метода DFT+DMFT были получены спиновые переходы в клиноферросилите FeSiO₃ под давлением. Было обнаружено, что ионы железа Fe²⁺ в FeSiO₃ испытывают два спиновых перехода из высокоспинового в низкоспиновое состояние: при 1200 К переходы происходят при 100 и 120 ГПа, переходя полностью в низкоспиновое состояние при 120 и 150 ГПа соответственно (рис. 1). При более высоких температурах происходит увеличение границ спиновых переходов и давлений, вследствие чего в условиях нижней мантии Земли (23–135 ГПа и 1900–4000 К) низкоспиновое состояние становится недостижимым для ионов железа Fe²⁺, что согласуется с современными представлениями о спиновом состоянии

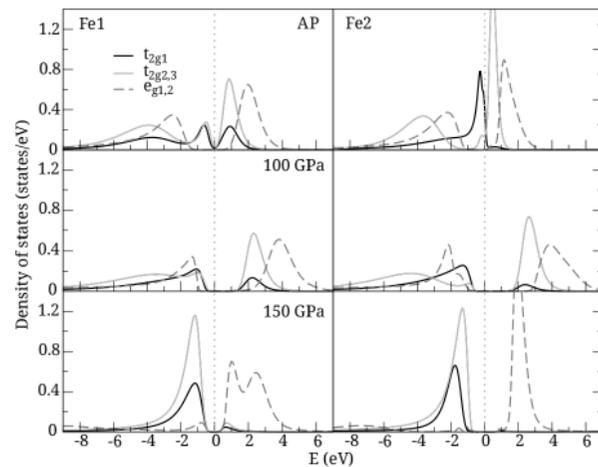


Рис. 1. Рассчитанные в рамках метода DFT+DMFT спектральные функции ионов железа Fe1 и Fe2 в FeSiO₃ при 1200 К для нормального давления.

атомов Fe²⁺ в силикате перовските (Mg,Fe)SiO₃. При температуре в 1200 К то же наблюдается переход металл–изолятор, в то время как при более высоких температурах металлическое состояние наблюдается для всех давлений.

Для ионов железа FeSiO₃ была приведена оценка энергетических уровней атомных орбиталей для всех величин давлений, а также был произведен расчет вероятностей электронных конфигураций, благодаря чему удалось установить, что спиновый кроссовер состоит преимущественно из высоко- и низкоспиновых конфигураций, сосуществующих в области перехода. Стоит отметить, что для одного типа ионов железа наблюдалось небольшое количество состояний промежуточного спина, присутствие которых является следствием сильных искажений кристаллической структуры клиноферросилита [1].

Полученные результаты позволяют расширить представления о магнитных свойствах минералов нижней мантии Земли.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект № 14-22-00004).

[1] А.А. Dyachenko, А.О. Shorikov, А.В. Lukoyanov, В.И. Anisimov. *Phys. Rev. B*, 2016, v. 93, p. 245121.

Спиральный магнитный порядок и переход металл–изолятор в узкозонных металлических соединениях

П.А. Игошев¹, М.А. Тимиргазин², В.Ю. Ирхин¹

¹Лаборатория квантовой теории конденсированного состояния

²Физико-технический институт УрО РАН, Ижевск

Магнитная фазовая диаграмма основного состояния модели Хаббарда на ГЦК-решетки для бесконечного U .

Показана сильная асимметрия основного состояния относительно знака t' в согласии с теоремами Нагаока. Аналитически определен критерий перехода второго рода насыщенный ферромагнетик (sFM) – ненасыщенный ферромагнетик (uFM) (спин-поляронная неустойчивость).

В рамках метода вспомогательных бозонов получены магнитные фазовые диаграммы основного состояния металлических систем при половинном заполнении в переменных отношении интегралов переноса t'/t — параметр кулоновского взаимодействия U для различных кубических решеток (ПК, ОЦК, ГЦК). Подробно исследован переход металл-изолятор

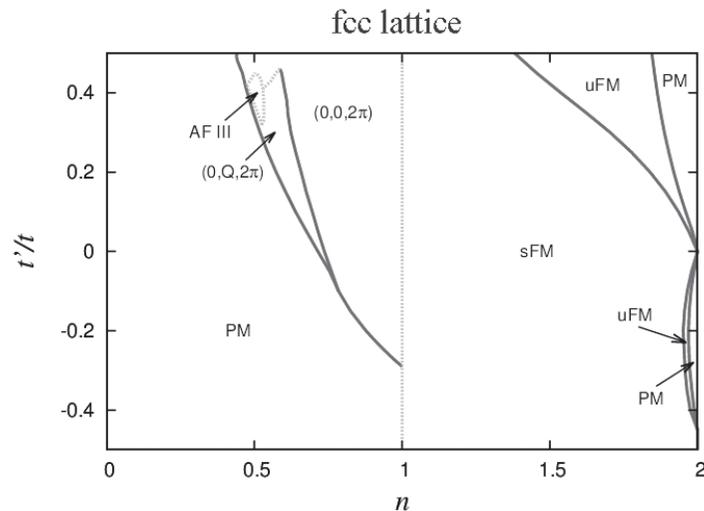
и найдено, что сценарий такого перехода является магнитным (слэтеровским). Показано, что для ГЦК-решетки переход металл–изолятор реализуется либо через спиральную (АФМ-I) фазу, либо через переход первого рода в фазу АФМ-III (при больших t' — АФМ-II) по классификации Гуденафа.

Исследовано формирование спирального магнитного порядка для предельного случая бесконечно большого U и построена фазовая диаграмма в переменных концентрация электронов $n-t'/t$ (рис. 1). Аналитически исследовано решение уравнений вблизи половинного заполнения зоны проводимости (проблема Нагаока). В частности, показано, что при определенном значении t' изменяется асимптотика намагниченности подрешетки при $n \rightarrow 1$. Таким образом реализуется переход между насыщенным и ненасыщенным антиферромагнетизмом [1–2].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 16-02-00995) программы фундаментальных исследований УрО РАН, проекты № 15-8-2-9, № 15-8-2-12.

[1] М.А. Тимиргазин, П.А. Игошев, А.К. Арзников, В.Ю. Ирхин. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2016, v. 28, p. 505601.

[2] М.А. Тимиргазин, П.А. Игошев, А.К. Арзников, В.Ю. Ирхин. *J. Low Temp Phys.*, 2016, v. 185, p. 651.



Фокусировка фононов и термоэдс увлечения в полупроводниковых кристаллах с вырожденной статистикой носителей тока

И.Г. Кулеев¹, И.И. Кулеев¹, С.М. Бахарев¹, В.В. Устинов²

¹Лаборатория кинетических явлений

²Лаборатория электрических явлений

Впервые учтено влияние анизотропии упругой энергии на электрон-фононное увлечение и термоэлектрические явления в полупроводниках при низких температурах. Исследовано влияние фокусировки на вклады квазипродольных и квазипоперечных фононов в термоэдс увлечения для кристаллов HgSe:Fe в режиме кнудсеновского течения фононного газа.

Проведенный анализ показал [1], что вклад быстрой поперечной моды (t_1) в термоэдс увлечения (α_{drag}) мал из-за малости продольной компоненты этой моды, и им можно пренебречь. Вклад продольных фононов (L) в термоэдс увлечения, как и их длина свободного пробега, имеет максимум в направлении фокусировки [111], а минимум – в направлении дефокусировки [001] (рис. 1). Отношения вкладов продольных фононов в термоэдс в симметричных направлениях имеют вид $\alpha_{drag}^{L[111]} : \alpha_{drag}^{L[110]} : \alpha_{drag}^{L[100]} = 1.54 : 1.37 : 1$. Максимум термоэдс увлечения, обусловленный медленной поперечной модой (t_2), достигается в направлениях фокусировки [001], а минимум – в направлениях дефокусировки [011]. Отношения вкладов для симметричных направлений равны $\alpha_{drag}^{t_2[100]} : \alpha_{drag}^{t_2[110]} : \alpha_{drag}^{t_2[111]} = 1.54 : 1.37 : 1$. Показано, что в направлениях [111] вклад продольных фононов в 4.6 раза больше вклада медленной поперечной моды. Однако в направлении фокусировки моды t_2 ее вклад в термоэдс может превышать вклад продольных фононов, и должен учитываться при анализе термоэдс в монокристаллах HgSe:Fe (см. рис. 1).

Установлено, что угловые зависимости термоэдс увлечения и длин свободного пробега фононов медленной квазипо-

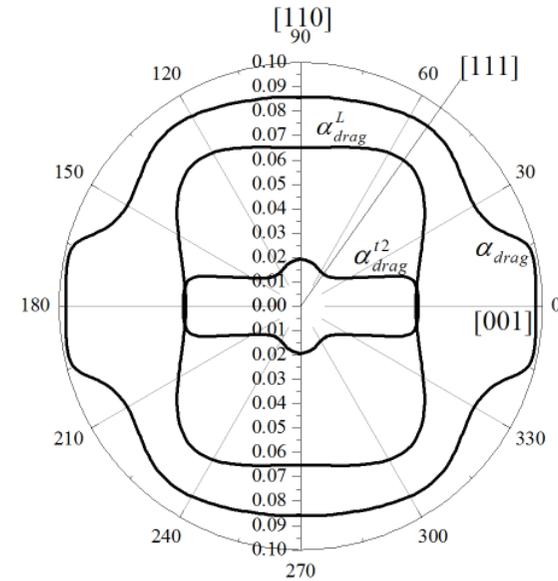


Рис. 1. Угловые зависимости термоэдс α_{drag} (мВ/К), а также вкладов продольных α_{drag}^L и квазипоперечных фононов $\alpha_{drag}^{t_2}$ для образцов HgSe:Fe длиной 2.9 см с квадратным сечением 0.1 см, когда тепловой поток вращается в плоскости {110}. Температура 0.4 К.

перечной моды в режиме кнудсеновского течения фононного газа непосредственно коррелируют с угловыми зависимостями плотности фононных состояний для этой моды. Все величины достигают максимальных значений в областях фокусировки, а минимальных значений – в областях дефокусировки этой моды.

Работа выполнена по плану РАН в рамках темы «Спин» при поддержке программы ОФН РАН (грант № 15-17-2-17, гранта № 14.Z50.31.0025 по постановлению Правительства РФ № 220).

[1] И.Г. Кулеев, И.И. Кулеев, С. М. Бахарев, В.В. Устинов. *ЖЭТФ*, 2016, т.150, с.567.

Экспериментальное обнаружение квантовых осцилляций аномального холловского сопротивления в кристаллах селенида ртути с примесями кобальта

А.Т. Лончаков¹, С.Б. Бобин¹, В.В. Дерюшкин¹, В.И. Окулов¹,
Т.Е. Говоркова¹, В.Н. Неверов²

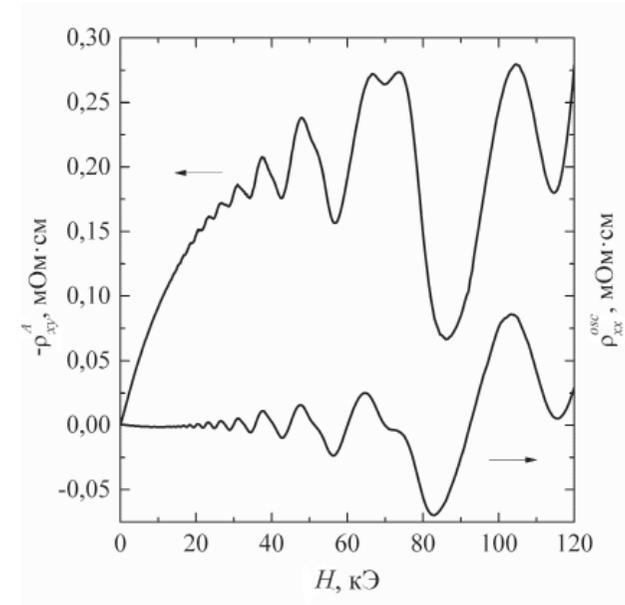
¹Лаборатория полупроводников и полуметаллов

²Лаборатория углеродных наноматериалов

В кристаллах селенида ртути, легированных донорными примесями переходных $3d$ -элементов, примесные состояния оказываются гибридизированными с состояниями полосы проводимости кристалла [1], следствием чего является предсказанный в [2] эффект спонтанной спиновой поляризации электронов. Он получил экспериментальное подтверждение в [3], благодаря наблюдению аномального эффекта Холла (АЭХ) в кристаллах $\text{HgSe}:3d$. В [3, 4] развито теоретическое описание термодинамического АЭХ в системах со спонтанной спиновой поляризацией электронов, для которого предсказаны квантовые осцилляции с амплитудой, превышающей амплитуду осцилляций нормального холловского сопротивления.

С целью проверки предсказаний теории для исследования были подготовлены два ориентированных образца с концентрацией кобальта $2.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (образец 1) и $7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (образец 2). Измерения магнитосопротивления и холловского сопротивления были выполнены при $T = 4.2 \text{ К}$. в сверхпроводящем соленоиде фирмы «Oxford Instruments» в магнитном поле напряженностью до 120 кЭ в центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН.

Главный результат работы, показанный на рисунке для образца 2, состоит в обнаружении квантовых осцилляций аномального вклада в холловское сопротивление $\rho_{xy}^A(H)$, которые выявлены на фоне насыщения плавного аномального вклада. На этом же рисунке приведены осцилляции поперечного сопротивления $\rho_{xx}^{osc}(H)$, амплитуда которых меньше амплитуды $\rho_{xy}^A(H)$. В рамках развитых представлений о спонтанной



спиновой поляризации электронов [2, 4] осцилляции $\rho_{xy}^A(H)$ могут отвечать осцилляциям термодинамического АЭХ. Полученный результат имеет важное значение для приложений в области полупроводниковой спинтроники.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Электрон», № 01201463326) при частичной поддержке РФФИ (проект № 16-32-00131 мол_а) и программы фундаментальных исследований УрО РАН (проект № 15-17-2-32).

[1] В.И. Окулов. *ФНТ*, 2004, т. 30, с. 1194–1202.

[2] В.И. Окулов и др. *ФНТ*, 2011, т. 37, с. 1001–1007.

[3] А.Т. Лончаков и др. *Письма в ЖЭТФ*, 2012, т. 96, с. 444–448.

[4] В.И. Окулов и др. *ФНТ*, 2014, т. 37, с. 1322–1324.

Теория спин-термических эффектов в гибридных структурах металл/магнитный диэлектрик/металл

И.И. Ляпилин¹, М.С. Окорок¹, Н.Г. Бебенин², В.В. Устинов²

¹Лаборатория теоретической физики

²Лаборатория электрических явлений

Одной из центральных задач спинтроники является разработка новых методов генерации и управление спиновыми токами в твердом теле. В отличие от проводящих кристаллов, где перенос спинового углового момента обусловлен зонными носителями заряда, в непроводящих магнитных материалах реализация спинового эффекта Зеебека (СЭЗ) связана с возбуждением системы локализованных спинов. Перенос углового момента при СЭЗ обусловлен спин-волновым током (спиновой волной), основу которого составляют возбуждения подсистемы локализованных спинов (магноны). В силу малого затухания спиновых волн спин-волновой ток распространяется на значительно большие расстояния, нежели электронный спиновый ток, что позволяет надеяться на возможные практические применения эффекта.

Развита микроскопическая теория спинового транспорта в условиях резонансного возбуждения спиновой подсистемы электронов проводимости и термического возмущения магнитной подсистемы гибридной структуры Pt|YIG|Pt [1–10]. Рассмотрено приближение эффективных параметров, когда каждая из рассматриваемых подсистем (электроны проводимости, магноны, фононы) характеризуется своей эффективной температурой.

Предложен и изучен новый метод генерации спин-волнового тока в магнитном диэлектрике структуры Pt|YIG|Pt, в основе которого лежит резонансное возбуждение спиновой подсистемы электронов проводимости (электродипольное или полев звуковой волны) с последующей передачей момента в ферромагнитный диэлектрик благодаря обменному взаимодействию. Построены макроскопические уравнения, описывающие спин-

волновой ток, учитывающие как резонансно-диффузионный характер распространения магнонов, так и процессы их релаксации. Показано, что в рассматриваемых условиях возбуждение спин-волнового тока имеет резонансный характер. Найдены явные выражения для кинетических коэффициентов в виде корреляционных функций, определяющих как диффузионные, так и релаксационные процессы.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Спин» № 01201463330 (проект 12-Т-2-1011) при поддержке Минобрнауки РФ (гранты 14.Z50.31.0025 и 16-02-00044), и проекта № 15-17-2-17.

- [1] I. I. Lyapilin, M. S. Okorokov, V. V. Ustinov. *Phys. Rev. B*. 2015, v. 91, p. 195309.
- [2] I. I. Lyapilin, M. S. Okorokov, N. G. Bebenin. *Appl. Magn. Reson.* 2016, v. 47, p. 1179.
- [3] И.И. Ляпилин, М.С. Окорок. *ФТП*, 2016. Т. 50, с. 1537.
- [4] И.И. Ляпилин, М.С. Окорок, В.В. Устинов. *ФНТ*, 2017. Т. 43, № 4, (в печати).
- [5] I. I. Lyapilin, M. S. Okorokov, N. G. Bebenin. *JMMM* (doi <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.12.056>)
- [6]. I. I. Lyapilin, M. S. Okorokov. *Сб. тез. докл. XX Межд. симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника», Н.Новгород, 2016.*
- [7] I. I. Lyapilin, M. S. Okorokov. *Сб. тез. докл. 24 Inter. Symp. «Nanostuctures: Physics and Technology», S. Peterburg (2), 2016.*
- [8] I. I. Lyapilin, M. S. Okorokov, V. V. Ustinov. *Сб. тез. докл. VI Euro-Asian Symposium “Trends in Magnetism”, Красноярск, 2016.*
- [9] I. I. Lyapilin, M. S. Okorokov. *Сб. тез. докл. VICMM-2016, “Magnetic. Materials new Technol. 2016”. Иркутск, Листвянка (2).*
- [10] I. I. Lyapilin, M. S. Okorokov. *Сб. тез. докл. XXI Межд. зимняя школа по физике полупроводников, Екатеринбург (2), 2016.*

Экситоны в центре зоны Бриллюэна в магнитоэлектрике CuV_2O_4

В.В. Меньшенин

Лаборатория теоретической физики

Интерес к соединению CuV_2O_4 в последние годы связан с интерпретацией возможности внесения малым магнитным полем кристаллической киральности в это соединение и контроля киральности этим полем. Утверждается, что наведение этой киральности происходит благодаря гигантскому росту магнитокирального дихроизма, резонирующего с $d-d$ бесфононными переходами на ионах меди. Эти переходы формируют экситонные возбуждения кристалла. Отметим, что магнитокиральный дихроизм связан с циркулярно поляризованным светом.

Проведен теоретико-групповой анализ возможности возбуждения экситонов в магнитоэлектрике CuV_2O_4 в точке $\Gamma(0,0,0)$ зоны Бриллюэна.

Для определения симметрии операторов перехода электронов проанализирована магнитная симметрия этого соединения. Показано, что местная (локальная) точечная магнитная группа содержит лишь тождественное преобразование, поскольку остальные элементы местной точечной группы не сохраняют магнитную структуру как сами по себе, так и в сочетании с операцией обращения времени. Определена также магнитная точечная группа метабората меди в соизмеримой магнитной структуре. Эта группа не содержит антиунитарных элементов и включает только тождественное преобразование и отражение в плоскости m_{xy} . Последняя операция является нечетным элементом относительно вектора антиферромагнетизма.

Найдено расщепление энергетических уровней ионов меди под действием кристаллического поля и спин-орбитального взаимодействия в приближении среднего кристаллического поля. Показано, что энергетический уровень с минимальной энергией обладает симметрией $\Gamma_{56}^{(S_4)}$, где верхний индекс указывает на то, по неприводимому представлению какой группы проведено разложение.

Показано, что симметрия операторов перехода, характеризующих экситоны метабората меди с волновым вектором $\mathbf{k}=0$ определяется двумя неприводимыми представлениями точечной магнитной группы метабората меди. Эти операторы перехода оказываются невырожденными относительно обращения времени. Получены общие условия возбуждения этих экситонов в электродипольных и магнитодипольных процессах линейно поляризованными электромагнитными волнами.

Возбуждение экситонов циркулярно поляризованными электромагнитными волнами может иметь место, когда у магнитной точечной группы есть одно двумерное физически неприводимое представление. Однако такого обычного физически неприводимого представления у магнитной точечной группы нет. Таким образом, экситоны с волновым вектором равным нулю, могут возбуждаться в метаборате меди только линейно поляризованными электромагнитными волнами [1].

Работа выполнена в рамках бюджетного финансирования по теме «квант» № 01201443331.

[1] В.В. Меньшенин. *ЖЭТФ*, 2017, т.151, № 2, с. 326.

Экспериментальное обоснование двухкомпонентной модели электронной структуры квазикристаллических сплавов

А.Ф. Прекул, Н.И. Щеголихина

Лаборатория низких температур

В предположении, что тонкая структура туннельных спектров обусловлена внутренней полевой эмиссией электронов с основного в возбужденное состояние двухуровневых электронных ловушек, произведена деконволюция локальных и усредненных туннельных спектров $dI/dV(V)$ квазикристаллов системы Al–Cu–Fe. Для фазы $Al_{63}Cu_{25}Fe_{12}$ получен набор элементарных термов с характерными энергиями щелей $\delta E_i = 5, 20, 80, 250, 400, 1400$ и 5300 meV. Показано, что соответствующие этим щелям элементарные термы существуют также в оптических спектрах (σ_o), в термически индуцированных компонентах проводимости (σ_t), магнитной восприимчивости (χ_t), эффекта Холла (R_H) и в электронной теплоемкости (C_e). Конволюция этих термов дает практически идеальную аппроксимацию всех перечисленных характеристик. Некоторые примеры этого показаны на рис. 1–3 [1, 2].

Тем самым, впервые экспериментально обоснована дискретная часть спектра двухкомпонентной модели электронной структуры реальных квазикристаллических сплавов [3]. Модель с учетом новых результатов схематически показана на рис. 4 [2].

Работа выполнена по теме «Спин» № 01201463333000.

[1] А.Ф. Прекул, Н.И. Щеголихина. *Письма в ЖЭТФ*, 2016, т. 103, вып. 9, с. 684–688.

[2] Alexandre Prekul, Natalia Shchegolikhina. *Crystals*, 2016, v. 6, iss. 9, p. 119–134.

[3] E. Macia. *Phys. Rev. B*, 2002, v. 66, p.174203(1–12).

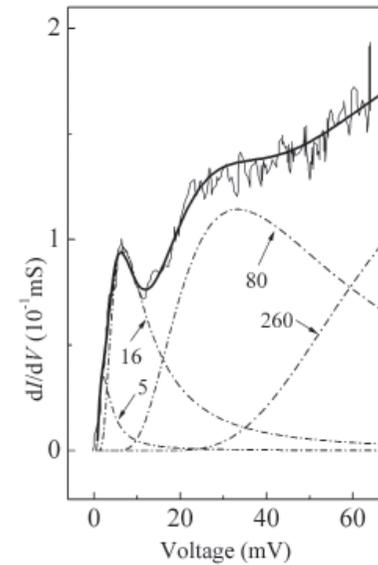


Рис. 1

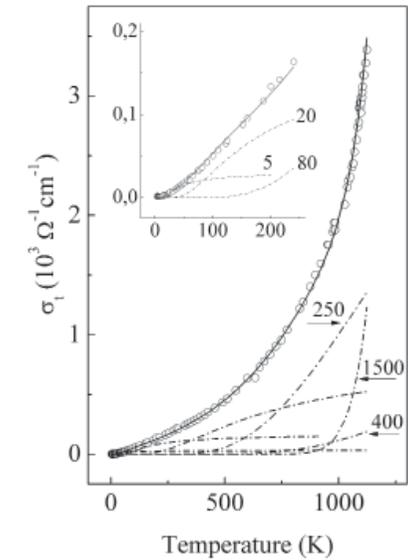


Рис. 2

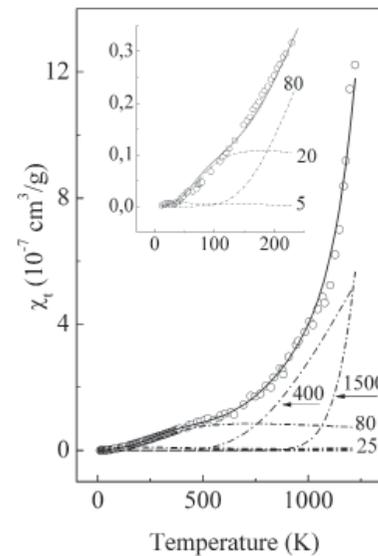


Рис. 3

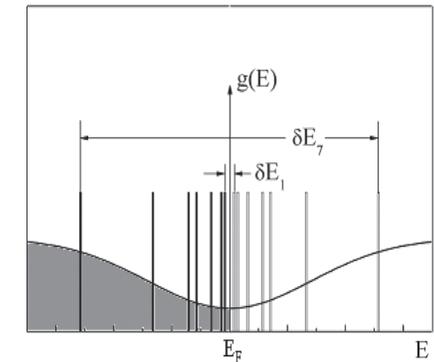


Рис. 4

Фазовые переходы порядок-беспорядок и суперионная проводимость в соединениях $\text{M}\text{CB}_{11}\text{H}_{12}$ и $\text{M}\text{CB}_9\text{H}_{10}$ ($\text{M} = \text{Li}, \text{Na}$)

А.В. Скрипов, А.В. Солонинин, О.А. Бабанова, Р.В. Скорюнов

Лаборатория кинетических явлений

Высокотемпературные фазы соединений $\text{M}_2\text{B}_{12}\text{H}_{12}$ и $\text{M}_2\text{B}_{10}\text{H}_{10}$ ($\text{M} = \text{Li}, \text{Na}$) с разупорядоченной ориентацией комплексных анионов $[\text{B}_{12}\text{H}_{12}]^{2-}$ или $[\text{B}_{10}\text{H}_{10}]^{2-}$ обладают высокой ионной проводимостью по ионам M^+ . В низкотемпературных упорядоченных фазах этих соединений ионная проводимость на несколько порядков ниже. Замещение одного атома бора на углерод в комплексных анионах приводит к существенному понижению температуры фазового перехода порядок-беспорядок при сохранении суперионной проводимости в неупорядоченных фазах $\text{M}\text{CB}_{11}\text{H}_{12}$ и $\text{M}\text{CB}_9\text{H}_{10}$ [1, 2]. Однако температуры фазовых переходов в этих карбозамещенных соединениях все равно превышают комнатную, что неудобно для практических приложений.

Мы обнаружили, что в твердых растворах со смешанными анионами $\text{M}_2(\text{CB}_9\text{H}_{10})(\text{CB}_{11}\text{H}_{12})$ неупорядоченная фаза с суперионной проводимостью стабилизируется вплоть до низких температур [3]. Скорости спин-решеточной релаксации ^1H , измеренные на частоте 28 МГц для $\text{NaCB}_{11}\text{H}_{12}$ и твердого раствора $\text{Na}_2(\text{CB}_9\text{H}_{10})(\text{CB}_{11}\text{H}_{12})$, представлены на рис. 1. Скачкообразное изменение скорости релаксации в $\text{NaCB}_{11}\text{H}_{12}$ вблизи 370 К связано с фазовым переходом порядок-беспорядок, сопровождающимся резким изменением частот реориентаций анионов. В твердом растворе $\text{Na}_2(\text{CB}_9\text{H}_{10})(\text{CB}_{11}\text{H}_{12})$ переход в упорядоченную фазу подавляется за счет структурных фрустраций. Это позволило получить соединения с наивысшими значениями проводимости по ионам Na^+ при комнатной температуре ($\sim 0.07 \text{ S/cm}$ [3]) среди всех известных твердых ионных проводников.

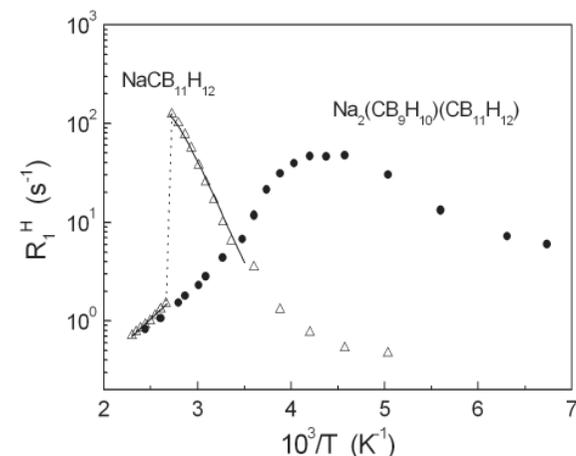


Рис. 1. Температурные зависимости скорости спин-решеточной релаксации ^1H для $\text{NaCB}_{11}\text{H}_{12}$ (кружки) и твердого раствора $\text{Na}_2(\text{CB}_9\text{H}_{10})(\text{CB}_{11}\text{H}_{12})$ (треугольники).

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема «Спин» № 01201463330) при поддержке РФФИ (№ 15-03-01114).

[1] A.V. Skripov, R.V. Skoryunov, A.V. Soloninin, O.A. Babanova, W.S. Tang, V. Stavila, T.J. Udovic. *J. Phys. Chem. C*, 2015, v. 119, p. 26912–26918.

[2] W.S. Tang, M. Matsuo, H. Wu, V. Stavila, W. Zhou, A.A. Talin, A.V. Soloninin, R.V. Skoryunov, O.A. Babanova, A.V. Skripov, A. Unemoto, S. Orimo, T.J. Udovic. *Adv. Energy Mater.*, 2016, v. 6, p. 1502237.

[3] W.S. Tang, K. Yoshida, A.V. Soloninin, R.V. Skoryunov, O.A. Babanova, A.V. Skripov, M. Dimitrievska, V. Stavila, S. Orimo, T.J. Udovic. *ACS Energy Lett.*, 2016, v. 1, p. 659–664.

Экситоны с переносом заряда в нанокристаллах NiO

В.И. Соколов¹, Н.Б. Груздев¹, М.А. Уймин², И.В. Бызов²

¹Лаборатория оптики металлов

²Лаборатория прикладного магнетизма

В работе впервые зарегистрированы пики с энергиями 3.510 и 3.543 эВ и расстоянием между ними 33 мэВ в спектре оптической плотности нанокристаллов NiO вблизи края фундаментального поглощения при температуре $T = 8$ К (рис. 1). С ростом температуры и с уменьшением размеров наночастиц от 25 до 10 нм эти пики ослабляются, что свидетельствует об их экситонной природе.

По области быстрого роста коэффициента поглощения была проведена обработка спектра оптической плотности и определена величина ширины запрещенной щели. Для нанокристаллов 10 нм величина E_G смещается в сторону больших энергий по сравнению с нанокристаллами 25 нм. Этот сдвиг можно связать с эффектом пространственного квантования.

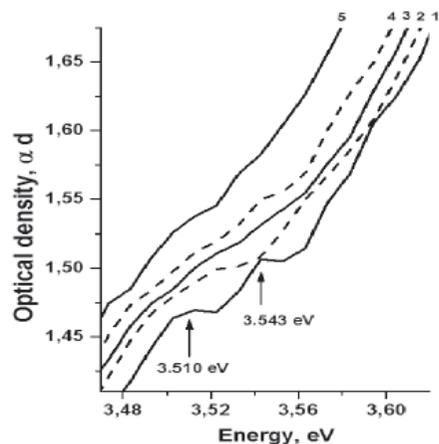


Рис. 1. Спектры оптической плотности нанокристаллов NiO с размером наночастиц 25 нм при температурах $T=8$ К (кривая 1, смещена вниз на величину $\alpha d=0,027$); 50 К (кривая 2, смещена вниз на $\alpha d=0,008$); 100 К (3); 150 К (4) и 200 К (5).

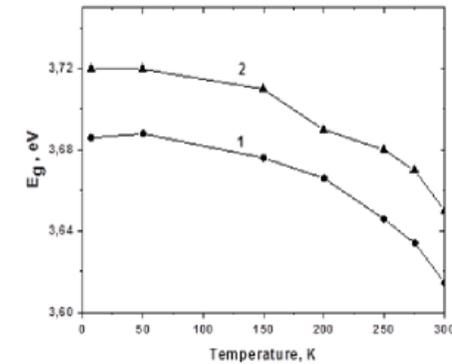


Рис. 2. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны для нанокристаллов NiO размерами наночастиц 25 нм (1) и 10 нм (2).

По изменению величины E_G (рис. 2) определена приведенная масса электронно-дырочной пары, она оказалась равной $0,11m_0$, (m_0 – масса свободного электрона). Обнаруженная структура экситона с переносом заряда $\{d^9h\}$ в NiO сравнивается двумя интенсивными пиками экситонов Ванье–Мотта, наблюдаемым ранее в спектре отражения MgO. В спектрах возбуждения фотолюминесценции $Mg_{1-c}Ni_cO$ [1] также наблюдались дублеты экситонных линий с переносом заряда. Расстояние между линиями как в MgO, так и в $Mg_{1-c}Ni_cO$ составляет 25 мэВ. Расстояние между наблюдаемыми нами экситонными линиями в NiO имеет близкую величину 33 мэВ. Сравнение свидетельствует о том, что наблюдаемые экситонные дублеты обусловлены спин-орбитальным расщеплением вершины валентной зоны в оксидах MgO, NiO и $Ni_cMg_{1-c}O$, формируемой p -состояниями кислорода. Величина этого расщепления составляет 25 мэВ для MgO и $Ni_cMg_{1-c}O$ и 33 мэВ – для NiO.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН (проект № 15-9-2-46).

[1] V.I. Sokolov, V.A. Pustovarov, V.N. Churmanov, N.B. Gruzdev, M.A. Uimin, I.V. Byzov, A.V. Druzhinin, N.A. Mironova-Ulmane. *Journal of Luminescence*, 2016, v. 169, p. 641–644.

Скейлинг холловского и продольного сопротивления на границе антиферромагнетик–сверхпроводник

Т. Б. Чарикова¹, Н. Г. Шелушинина¹, Г. И. Харус¹, Д. С. Петухов¹,
О. Е. Петухова¹, А. А. Иванов²

¹Лаборатория полупроводников и полуметаллов, ИФМ УрО РАН
²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Проявление асимметрии физических свойств купратов n - и p -типа при изменении как температуры, так и внешнего магнитного поля, приводит к необходимости исследования квантового фазового перехода в сверхпроводящее (СП) состояние в зависимости от внешних воздействий. Электронное легирование соединения Nd_2CuO_4 церием позволяет получить антиферромагнитное (АФ) соединение $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$, дополнительный отжиг в бескислородной атмосфере подавляет статический АФ порядок и приводит к появлению сверхпроводимости.

Эпитаксиальные монокристаллические пленки $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}/\text{SrTiO}_3$ с $x=0.14$ и 0.15 (недолегированная и оптимально легированные области фазовой диаграммы) с ориентацией (001), синтезированные методом импульсного лазерного осаждения, были подвергнуты термообработке (отжигу) при различных условиях для получения образцов с разным содержанием кислорода и, как следствие, с разной степенью нестехиометрического беспорядка (δ). Систематические измерения тензора электросопротивления как функции внешнего магнитного поля до $H = 90$ кЭ ($H \parallel c, J \parallel ab$) в интервале температур $T = (1.8-40)$ К были проведены на установке Quantum Design PPMS 9 (ЦКП «Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов» ИФМ УрО РАН).

Установлено, что существует скейлинг холловского и продольного сопротивлений $\rho_{xy}(B) \sim [\rho_{xx}(B)]^\beta$ вблизи границы АФ–СП. Уменьшение величины скейлингового индекса при температуре $T = 4.2$ К от $\beta = 1.11 \div 1.21$ в области сосуществования АФ и СП ($x=0.14$) [1] до $\beta = 0.57 \div 0.70$ в СП области

с максимальной критической температурой ($x=0.15$) [1–2] свидетельствует об изменении симметрии спаривания носителей заряда от анизотропного s -волнового типа спаривания к симметрии спаривания d -типа вследствие усиления роли антиферромагнитных спиновых флуктуаций. Особенности степенной зависимости $\rho_{xy}(B) \sim [\rho_{xx}(B)]^\beta$ движения вихрей в смешанном состоянии могут быть связаны с нестехиометрическим беспорядком в слоистых электронно-легированных сверхпроводниках. Изменение знака полевой зависимости холловского сопротивления в электронно-легированных соединениях свидетельствует о реконструкции поверхности Ферми. Реконструкция поверхности Ферми при изменении уровня легирования и переходе из области сосуществования АФ и СП к сверхпроводящей области влечет изменение симметрии спаривания носителей заряда.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России, тема «Электрон» № 01201463326, при частичной финансовой поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН (грант №15-8-2-6) и РФФИ (грант №15-02-02270).

[1] Т.В. Charikova, N.G. Shelushinina, G.I. Harus et al. *Physica C*, 2016, v. 525–526, p. 78–83.

[2] Т.В. Charikova, N.G. Shelushinina, G.I. Harus et al. *Journal of Low Temperature Physics (JLTP)*, 2016, accepted.

Объекты с новой зонной структурой – двойные квантовые ямы на основе бесщелевого полупроводника HgTe

М.В. Якунин¹, С.М. Подгорных², М.Р. Попов¹, В.Н. Неверов³

¹Лаборатория полупроводников и полуметаллов

²Лаборатория низких температур

³Лаборатория углеродных наноструктур

Экспериментально показано, что в двойной квантовой яме, созданной из двух слоев материала с бесщелевым зонным спектром – HgTe – и разделенных тонким барьером CdHgTe, можно получить качественно новые варианты энергетического спектра. При относительно широких слоях HgTe (в наших образцах – 20 нм [1]) получается полуметалл, в котором можно регулировать величину перекрытия зон проводимости и валентной с помощью прикладываемого поперечного электрического поля. В магнитном поле B_c перекрытие снимается (при больших начальных перекрытиях B_c велико) заходя в область хорошо выраженного квантового эффекта Холла (КЭХ). Мы обнаружили ряд аномалий КЭХ в окрестностях B_c (многократные инверсии холловского магнитосопротивления (МС) $\rho_{xy}(B)$, нулевое плато КЭХ и др.), и показали как они связаны с имеющимися здесь особенностями в рассчитанной картине уровней Ландау.

При толщинах слоев HgTe, близких к критической величине 6.3 нм, получается спектр в центре зоны Бриллюэна, аналогичный спектру двуслойного графена, но со своими особенностями. Мы обнаружили необычную структуру КЭХ в таких образцах (см. рисунок) [2]. Здесь присутствует аномальный пик на плато КЭХ с номером $i = 2$, который фактически есть элемент возвратного КЭХ между состояниями $i = 2 - 1 - 2$. Мы показали, что аномальный пик связан с внедрением электронного уровня Ландау в спектр уровней легких дырок. Склонам аномального пика соответствует два максимума продольного МС $\rho_{xx}(B)$. Это указывает на то, что возвратный характер КЭХ здесь связан с последовательным пересечением

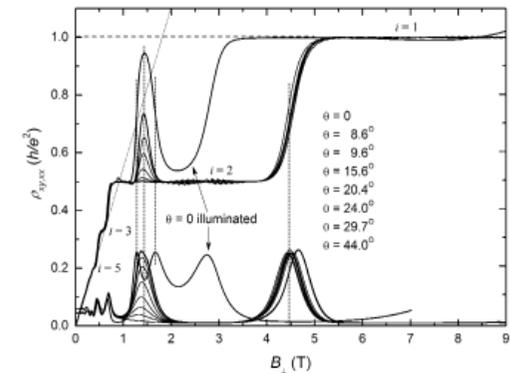
уровнем Ферми одного делокализованного состояния в противоположных направлениях, что ранее не наблюдалось. В значительно больших полях наблюдается стабильный переход 2 – 1, сопровождаемый традиционным максимумом $\rho_{xx}(B)$.

Аномальный пик разделяет две области полей. Слева наблюдается регулярная картина КЭХ; она дает концентрацию дырок $0.4 \times 10^{15} \text{ м}^{-2}$. Справа переход 2 – 1 в сильных полях дает величину концентрации примерно в 4 раза больше. Мы объясняем это локализацией дырок в состоянии боковых максимумов в слабых полях.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Спин», №01201463330) при частичной поддержке РФФИ (проект № 14-02-00151) и проекта УрО РАН № 15-9-2-21.

[1] M.V. Yakunin, A.V. Suslov, M.R. Popov, E.G. Novik, S.A. Dvoretzky, N.N. Mikhailov. *Phys. Rev. B*, 2016, v. 96, 085308 (14 pp.).

[2] М.В. Якунин, С.С. Криштопенко, С.М. Подгорных, М.Р. Попов, В.Н. Неверов, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий. *Письма в ЖЭТФ*, 2016, т. 104, с. 415–423.



Анализ эволюции микроструктуры интерметаллидов и керамики при кручении под давлением

Б.А. Гринберг¹, М.А. Иванов², В.П. Пилюгин¹,
А.М. Пацелов¹, А.В. Плотников¹, Т.П. Толмачев¹,
О.В. Антонова³, А.М. Власова¹, Ю.В. Соловьева⁴

¹Лаборатория физики высоких давлений

²Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова, НАН Украины, Киев

³Лаборатория прочности

⁴Томский государственный архитектурно-строительный университет

Исследована эволюция микроструктуры интерметаллида Ni_3Ge и керамики (кварц, хрусталь) после интенсивной пластической деформации кручением. Выявлена роль, которую играет в изменении микроструктуры превращение плоскости в изогнутую поверхность при кручении под давлением.

После сильной пластической деформации при нагреве без нагрузки наблюдается вытягивание прямолинейных дислокаций вдоль выделенных направлений, т.е. автоблокировка (рис. 1а). Поворот под давлением приводит к исчезновению автоблокировки (рис. 1б). Причина состоит в том, что плоскость попереч-

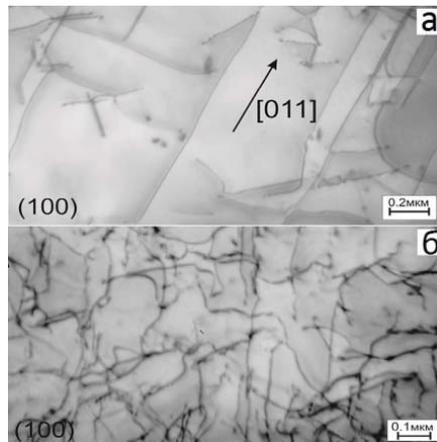


Рис. 1. ИПД кручением: а – деформация (1 ГПа), нагрев (400°C, 1ч); б – деформация (1.5 ГПа), поворот (10°), нагрев (400°C, 5ч).

ного скольжения, с которой связана автоблокировка, превращается в изогнутую поверхность. Автоблокировка играет роль индикатора структуры кристаллической решетки, свидетельствуя о степени ее искажения.

Обнаружено ускорение консолидации керамического порошка благодаря кручению под давлением. Искажение кристаллической решетки при повороте (рис. 2) вследствие превращения плоскостей в изогнутые поверхности содействует слипанию частиц порошка.

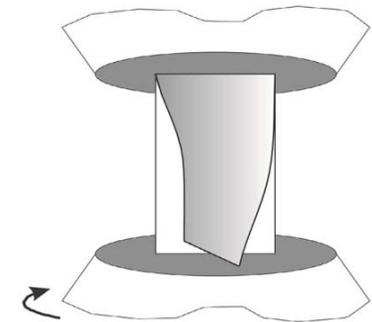


Рис. 2. Искажение решетки при кручении под давлением.

Несмотря на многочисленные работы по ИПД кручением, превращение любой кристаллографической плоскости в изогнутую поверхность оказалось незамеченным.

В списке литературы [1–5] приведены только те работы авторов, которые составляют основу доклада.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект №14-02-00015) и Российского научного фонда (проект №14-29-00158).

[1] Б.А. Гринберг, М.А. Иванов, В.П. Пилюгин и др. *Деформация и разрушение материалов*, 2016, № 12, с. 17–26.

[2] В.А. Greenberg, М.А. Ivanov. *Russian metallurgy (Metally)*, 2016, № 4, р. 266–285.

[3] Б.А. Гринберг, М.А. Иванов, О.В. Антонова и др. *Успехи физики металлов*, 2013, 14, № 2, с. 9–111.

[4] Б.А. Гринберг, М.А. Иванов, О.В. Антонова и др. *ФММ*, 2011, 112, № 2, с. 215–224.

[5] Б.А. Гринберг, М.А. Иванов, О.В. Антонова и др. *Кристаллография*, 2012, т. 57, № 4, с. 603–610.

Кислородный дефицит и растворимость дейтерия в оксидных наночастицах

В.Б. Выходец, Т.Е. Куренных

Лаборатория нанокompозитных мультиферроиков

Установлено, что к моменту завершения высокотемпературного синтеза наночастиц диоксида титана в них имел место сильный кислородный дефицит в поверхностном атомном слое [2]. Синтез нанопорошков проводился в атмосфере инертных газов с помощью технологии лазерного испарения керамической мишени. Эффект поверхностного кислородного дефицита характеризуется высокой степенью общности, ранее он был также обнаружен в наночастицах других оксидных систем (Al_2O_3 и стабилизированного иттрием кубического ZrO_2), которые сильно отличаются друг от друга по физико-химическим свойствам. Согласно расчетам с помощью теории функционала плотности, такое неоднородное распределение ионов кислорода в наночастицах является термодинамически равновесным при высоких температурах. Экспериментальные данные по этому вопросу были получены нами впервые с помощью оригинальной методики, в ее основе лежит синтез наночастиц, кислородная подсистема которых обогащена изотопом ^{18}O .

Оксидные нанопорошки широко используются в технике, их мировое годовое производство превышает 50 тыс т., в ценовом выражении это составляет 5 миллиардов долларов США. В то же время эффект поверхностного кислородного дефицита не учитывался в стратегии применения оксидных нанопорошков. Это связано с практическим отсутствием данных о влиянии поверхностного кислородного дефицита на физико-химические и функциональные свойства оксидных нанопорошков. В настоящей работе впервые были получены результаты, свидетельствующие о влиянии поверхностного кислородного дефицита на важнейшее функциональное свойство оксидных нанопорошков, а именно, на их катали-

тическую активность. Соответствующие результаты были получены для порошков Al_2O_3 , кубического ZrO_2 и TiO_2 [1–3]. Тестом, моделирующим каталитические свойства, были данные по растворимости дейтерия в нанопорошках при их отжиге в газообразном дейтерии. Концентрация дейтерия определялась с помощью методики ядерного микроанализа. Было установлено, что способностью поглощать дейтерий обладает только дефицитный по кислороду слой наночастиц. Кроме того, растворимость дейтерия и кислородный дефицит являются регулируемыми свойствами нанопорошков. Полученные результаты свидетельствуют о принципиальной возможности получения оксидных нанопорошков с широким спектром структур, электрических, магнитных и каталитических свойств и использовании эффекта регулируемого кислородного дефицита в практических приложениях.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН (проект № 15-17-2-10) и РФФИ (проект № 15-03-06617).

[1] В.Б. Выходец, Т.Е. Куренных, С.И. Обухов. *Сб. тез. докладов 46-й Межд. Тулиновской конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, МГУ, с. 19.*

[2] V.B. Vykhodets, K.G. Jonson, T.E. Kurennykh, I.V. Beketov, O.M. Samatov, A.I. Medvedev, E.A.A. Jarvis. *Phys. Rev. B, 2017, in press.*

[3] В.Б. Выходец, Т.Е. Куренных. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures, 2016, вып. 5, с. 6–14.*

Состояние границ зерен и зернограничная диффузия в ультрамелкозернистых Мо и W, полученных интенсивной пластической деформацией

В.В. Попов, А.В. Сергеев, А.В. Столбовский

Лаборатория диффузии

На основании эмиссионных мессбауэровских исследований установлено, что границы зерен (ГЗ) в ультрамелкозернистых (УМЗ) Мо и W, полученных интенсивной пластической деформацией (ИПД) методом кручения под высоким давлением, находятся в так называемом «неравновесном» состоянии, о чем свидетельствует наличие избыточного свободного объема.

При отжиге выше 623 К (в случае УМЗ Мо) и выше 723 К (в случае УМЗ W) в результате протекания релаксационных процессов состояние части ГЗ изменяется, и наряду с неравновесными ГЗ появляются границы, состояние которых близко к состоянию границ рекристаллизационного происхождения. Процесс трансформации неравновесных ГЗ, сформировавшихся при ИПД в равновесные, заканчивается в УМЗ Мо при 823 К, а в УМЗ W – при 873 К.

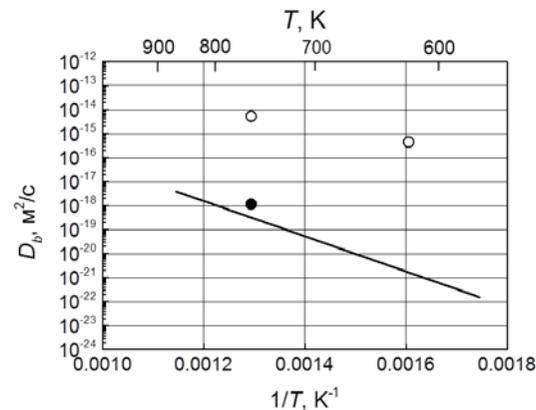


Рис. 1. Коэффициенты зернограничной диффузии D_b в УМЗ Мо (маркеры) и крупнозернистом Мо (линия).

Определены коэффициенты зернограничной диффузии D_b в УМЗ Мо (D_b). Показано, что D_b в таких материалах на несколько порядков выше, чем в крупнозернистых материалах с ГЗ рекристаллизационного происхождения, что свидетельствует об их неравновесном состоянии. В отличие от неравновесных ГЗ, которые являются путями сверхбыстрой диффузии, коэффициенты зернограничной диффузии вдоль границ, претерпевших релаксацию при отжиге, близки к значениям D_b в крупнозернистом Мо с границами зерен рекристаллизационного происхождения (см. рис. 1).

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Спин», при частичной поддержке УрО РАН (проект № 15-9-2-44) и РФФИ (проект № 15-03-03103). Результаты опубликованы в [1–7].

- [1] V.V. Popov. *Phys. Met. Metallog.* 2012, v. 113, p. 1257–1289.
- [2] V.V. Popov. *Def. Diffus.*, 2013, v. 333, p. 157–173.
- [3] V.V. Popov. *Mat. Sci. Forum.* 2014, v. 783–786, p. 2671–2676.
- [4] В.В. Попов. *Изв. РАН. Сер. физическая.* 2015, т. 8, с. 1111–1117.
- [5] V.V. Popov, A.V. Sergeev, A.V. Stolbovsky. *Def. Diffus. Forum.* 2015, v. 364, p. 147–156.
- [6] V.V. Popov, A.V. Sergeev. *Def. Diffus. Forum.* 2016, v. 367, p. 130–140.
- [7] В.В. Попов, А.В. Сергеев, В.А. Столбовский. *ФММ.* 2017, т. 118, в печати.

Термодинамика и кинетика ранних стадий распада в поликристаллических сплавах. Первопринципное и атомистическое моделирование

Ю.Н. Горностырев¹, П.А. Коржавый¹, Л.Е. Карькина², И.Н. Карькин¹, М.В. Петрик², А.Р. Кузнецов³

¹Лаборатория теоретической физики

²Лаборатория теории прочности

³Лаборатория механических свойств

Кинетика распада и образование выделений в поликристаллических сплавах на основе Fe и Al исследованы с использованием методов первопринципного и атомистического моделирования, соответствующих различным пространственным и временным масштабным уровням [1–3]. Выявлены микроскопические механизмы образования сегрегаций на границах зерен в сплавах алюминия. Показано, что в зависимости от типа легирующего элемента в сплавах алюминия особенности образования сегрегаций могут определяться *деформационным* (сплав Al–Mg) или *электронным* (сплавы Al–Zn, Al–Si) механизмом взаимодействия легирующего элемента с ГЗ (рис. 1а). Корректный учет различных факторов позволил получить обогащение ГЗ в согласии с экспериментом.

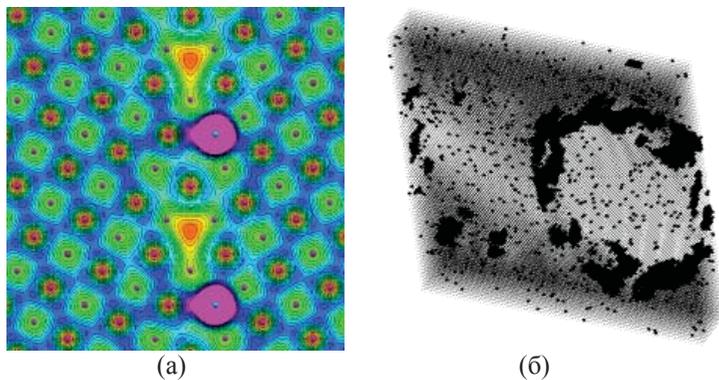


Рис. 1. Распределение зарядовой плотности в окрестности ГЗ $\Sigma 5 \{210\} [001]$, содержащей атом Zn (а); распределение атомов Cu в кристаллите с двумя зернами для сплава Fe – 3ат.%Cu, $T=775$ К (б).

Особенности протекания ранних стадий распада в поликристаллических сплавах Fe–Cu [3] и Al–Mg [1] исследованы с использованием атомистического моделирования в рамках комбинированного MD+МС-подхода, реализующего диффузионное перераспределение легирующего элемента и атомную релаксацию кристаллической решетки. Показано, что в Fe–Cu при малом размере зерна ($D \sim 10$ нм) распад в объеме подавлен, а когерентно связанные с матрицей выделения Cu образуются преимущественно на ГЗ, размер и состав которых зависят от типа границ (рис. 1б). В поликристалле сплава Al–Mg обогащение ГЗ определяется конкуренцией процессов сегрегации и Mg–Mg взаимодействия в области ГЗ.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 14-12-00673.

[1] I.N. Karkin, L.E. Karkina, A.R. Kuznetsov, M.V. Petrik, Yu.N. Gornostyrev, P.A. Korzhavyi. *Materials Physics and Mechanics* 2015, v. 24, p. 201–210.

[2] L.E. Karkina, I.N. Karkin, A.R. Kuznetsov, I.K. Razumov, P.A. Korzhavyi, Yu.N. Gornostyrev. *Comput. Mat. Sci.*, 2016, v. 112, p. 18–26.

[3] И.Н. Карькин, Л.Е. Карькина, П.А. Коржавый, Ю.Н. Горностырев. *ФТТ*, 2017, т. 59, с. 103–109.

Структура и свойства композитов на основе Nb_3Sn с внутренними источниками олова в зависимости от дизайна, легирования и режима диффузионного отжига

Е.Н. Попова, И.Л. Дерягина, Е.Г. Валова-Захаревская

Лаборатория прецизионных сплавов и интерметаллидов

Метод внутреннего источника Sn позволяет получать самую высокую токнесущую способность в сверхпроводниках на основе Nb_3Sn , что привлекает к ним особое внимание, в частности, в связи с созданием Большого Адронного Коллайдера.

Методами просвечивающей (ПЭМ) и сканирующей (СЭМ) электронной микроскопии изучены предоставленные ВНИИМ им. акад. А.А. Бочвара композиты разной конструкции (количество Nb волокон, конечный диаметр, исходная концентрация Sn, наличие упрочняющих вставок Cu–Nb в стабилизирующей медной оболочке, легирование Nb волокон Ti или медной матрицы Mn) после разных режимов диффузионного отжига.

Установлена корреляция между структурными характеристиками сверхпроводящей фазы (размер зерен Nb_3Sn , разброс по размерам, морфология сверхпроводящих слоев) и получаемой критической плотностью тока проводника J_c . Оптимальная структура сверхпроводящих слоев (минимальный средний размер равноосных зерен и минимальная доля столбчатых зерен) получена в проводниках с легированной Mn медной матрицей, отожженных по режиму $375^\circ\text{C}/48\text{ч} + 575^\circ\text{C}/48\text{ч} + 650^\circ\text{C}/150\text{ч}$, что обеспечило самые высокие значения J_c . Введение упрочняющих вставок Cu–18Nb в стабилизирующую медную оболочку улучшает структуру и морфологию сверхпроводящих слоев благодаря более равномерной деформации стрендов (рис. 1а и 1б). Повышение температуры 3-й ступени диффузионного отжига (до 675°C) приводит к увеличению доли крупных зерен Nb_3Sn , росту среднего размера зерна и разброса по размерам, в результате чего J_c понижается.

Увеличение числа Nb-волокон и добавление 4-й ступени отжига ($700^\circ\text{C}/50\text{ч}$) приводят к огрублению зерен Nb_3Sn ,

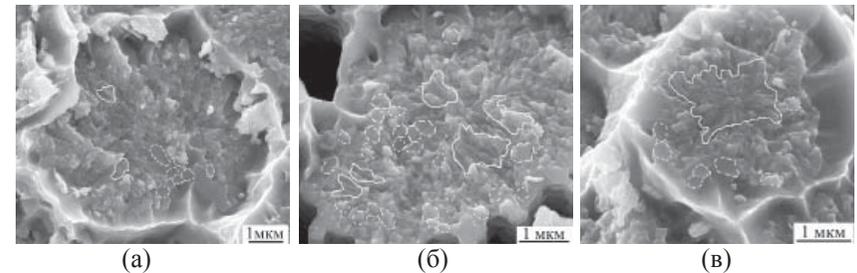


Рис. 1. Изломы Nb-волокон.

Сплошные линии – зоны столбчатых зерен; пунктир – крупные равноосные зерна:

а – оптимальная структура и самая высокая $J_c = 2280 \text{ A/mm}^2$ при легировании матрицы Mn и упрочнении оболочки Cu–Nb; б – неравномерная структура без Mn и Cu–Nb, $J_c = 2023 \text{ A/mm}^2$; в – увеличено число Nb-волокон, введена 4-я ступень отжига – максимум столбчатых и крупных зерен, минимальная J_c (850 A/mm^2).

уширению разброса по размерам и увеличению количества столбчатых зерен, что отрицательно влияет на J_c (рис. 1в).

Работа выполнена в центре коллективного пользования электронной микроскопии ИФМ УрО РАН в рамках государственной программы по теме «Кристалл» (гос. рег. № 01201463333) при частичной поддержке УрО РАН (проект № 15-17-2-11). Результаты опубликованы в [1–2].

[1] I. Deryagina, E. Popova, E. Patrakov, E. Valova-Zaharevskaya, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2016, v. 26, No. 2, p. 6000706.

[2] Е.Н. Попова, И.Л. Дерягина, Е.Г. Валова-Захаревская, Е.И. Патраков, *ФММ*, 2016, т. 117, № 10, с. 1063–1072.

Фазовые превращения в многокомпонентных сплавах на основе интерметаллида $\text{Co}_3(\text{Al,W})$

Н.В. Казанцева¹, Н.Н. Степанова², Д.И. Давыдов², Н.И. Виноградова³, С.Л. Демаков⁵, Д.А. Шишкин⁴, Е.П. Романов²

¹Лаборатория магнитного структурного анализа

²Лаборатория прецизионных сплавов и интерметаллида

³Лаборатория физического материаловедения

⁴Лаборатория микромагнетизма

⁵УрФУ, г. Екатеринбург

Установлены тип и порядок фазовых превращений и определена температура Кюри интерметаллидных сплавов на границах тройной системы Co-Al-W и в концентрационной области существования интерметаллида $\text{Co}_3(\text{Al,W})$ [1–5]. Обнаружен новый класс магнитомягких $\text{Co}_3(\text{Al,W})$ сплавов [2, 6]. Определены особенности кристаллографических переходов и ориентационные соотношения между равновесными фазами: $\gamma\text{-Co}$ (FCC), Co_3W (D019), Co_7W_6 (D85), CoAl (B2) и $\text{Co}_3(\text{Al,W})$ ($L1_2$) [7]. Обнаружена новая метастабильная мартенситная фаза в бинарном сплаве системы Co-Al (рис. 1) [8].

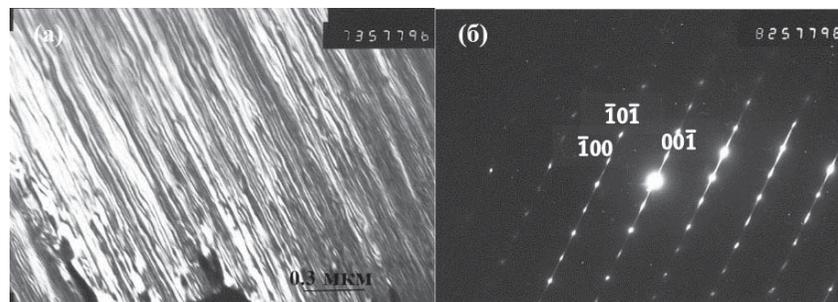


Рис. 1. Микроструктура исходного сплава $\text{Co} - 9 \text{ ат.}\% \text{Al}$, ПЭМ, дефектная область ГПУ (4Н)-фазы:
а – темнопольное изображение в $(-10-1)\epsilon$; б – микроэлектроннограмма к (а), ось зоны $[010]\epsilon$.

Образование этого 4Н-модулированного мартенсита является особенностью бинарных сплавов кобальта. Результаты имеют существенное значение для разработки новых жаропрочных сплавов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ № 14-08-00108.

[1] Н.В. Казанцева, Д.И. Давыдов, П.Б. Терентьев, Д.А. Шишкин, С.Л. Демаков, А.С. Юровских, Е.П. Романов. *ФММ*, 2017, (в печати).

[2] Е.П. Романов, Н.В. Казанцева, С.Л. Демаков, Д.И. Давыдов, Д.А. Шишкин. *ДАН*, 2017, №3 (в печати).

[3] Н.В. Казанцева, С.Л. Демаков, М.А. Рыжков, Н.Н. Степанова, М.Б. Ригмант, Д.А. Шишкин, Д.И. Давыдов, Е.П. Романов. *ФММ*, 2015, т. 116, № 6, с. 563–570.

[4] N.V. Kazantseva, N.N. Stepanova, M.B. Rigmant, D.I. Davidov, D.A. Shishkin, E.P. Romanov. *Proceedings of a symposium sponsored by the Minerals, Metals & Materials Society (TMS), USA*, 2015, p. 385–393.

[5] Н.В. Казанцева, С.Л. Демаков, А.С. Юровских, Н.Н. Степанова, Н.И. Виноградова, Д.И. Давыдов, С.В. Лепихин. *ФММ*, 2016, т. 117, № 7, с. 723–731.

[6] D.I. Davidov, N.N. Stepanova, N.V. Kazantseva, M.B. Rigmant, D.A. Shishkin. *AIP Conference Proceedings*, 201, v. 168, p. 020035-1-020035-4.

[7] N.V. Kazantseva. *Proceedings of International conference Intermetallics. 2015, 2015, Bad Staffelstein, Germany*, p. 68.

[8] Н.В. Казанцева, Н.Н. Степанова, Н.И. Виноградова, С.Л. Демаков, А.С. Юровских, Д.И. Давыдов, Д.А. Шишкин, М.Б. Ригмант, Е.П. Романов *ФММ*, 2016, т. 117, № 1, с. 46–52.

Ориентационные соотношения и механизм мартенситного превращения в среднеуглеродистой стали с пакетным мартенситом

В.М. Гундырев¹, В.И. Зельдович², В.М. Счастливец²

¹Лаборатория физики высоких давлений

²Лаборатория физического металловедения

1. Экспериментально определены точные ориентационные соотношения при мартенситном превращении в среднеуглеродистой стали 37ХН3А с реечным (пакетным) мартенситом:

$$\begin{aligned} (011)_{\alpha} &\parallel (1; 0.990; 1.009)_{\gamma} \text{ с точностью } \pm 0.15 \text{ град;} \\ [011]_{\alpha} &\parallel [1; 1.163; -2.133]_{\gamma} \text{ с точностью } \pm 0.15 \text{ град.} \end{aligned}$$

Ориентационные соотношения получились почти такими же, как в сплаве Fe – 31%Ni с двойникованным мартенситом, имеющем близкие параметры решеток.

2. Ориентационные соотношения, рассчитанные по ФТМП таковы:

$$\begin{aligned} (011)_{\alpha} &\parallel (1; 1.021; 1.014)_{\gamma}; \\ [011]_{\alpha} &\parallel [1; 1.114; -2.108]_{\gamma}. \end{aligned}$$

Расчетная ориентировка мартенситной пластины отличается от наблюдаемой на ~1 град. Аналогичное отклонение наблюдается для двойникованного мартенсита.

3. Механизм мартенситного превращения описан следующим образом. Деформация решетки происходит сдвигом по плоскости $(111)_{\gamma}$ в направлении $[112]_{\gamma}$ при дополнительном изменении размеров во взаимно перпендикулярных направлениях $[112]_{\gamma}$, $[111]_{\gamma}$ и $[110]_{\gamma}$. Деформация при инвариантной решетке осуществляется скольжением в мартенсите по плоскости типа $(112)_{\alpha}$ в направлении $[111]_{\alpha}$. Здесь представлен один из 24 кристаллографически эквивалентных вариантов механизма превращения. Помимо данной деформации при инвари-

антной решетке, весьма вероятно дополнительная деформация мартенсита, не меняющая его ориентировки.

4. В реечном мартенсите стали 37ХН3А инвариантная плоскость мартенситного кристалла, полученная из расчетов по ФТМП, отклонена на ~25 град от поверхности мартенситной пластины, которая близка к плоскости $(111)_{\gamma}$. Данный факт связывается с перераспределением углерода между мартенситом и аустенитом, и объясняется обогащением углеродом слоев аустенита, прилегающих к межфазной границе.

Работа выполнена по плану РАН, тема «Структура», № 01201463331, в рамках проекта УрО РАН № 15-17-2-24. Результаты опубликованы в [1–3].

[1] В.М. Гундырев, В.И. Зельдович, В.М. Счастливец. *ДАН*, 2016, т. 468, № 1, 26–28.

[2] В.М. Гундырев, В.И. Зельдович, В.М. Счастливец. *ФММ*, 2016, т.117, № 10, с. 1052–1062.

[3] В.М. Гундырев, В.И. Зельдович, В.М. Счастливец. *Сб. тез. докл. IX Межд. конф. «Фазовые превращения и прочность кристаллов»*, Черногловка, 2016, с. 7.

Эффекты фрикционного наноструктурирования в стали Гадфильда

Л.Г. Коршунов¹, В.В. Сагарадзе², Н.Л. Черненко¹, В.А. Шабашов²

¹Лаборатория физического металловедения

²Лаборатория механических свойств

Обнаружен эффект деформационного растворения карбидов $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ в аустените износостойкой стали 110Г13 (Гадфильда) при сухом трении. Данный эффект проявляется в возникновении на рентгеновских дифрактограммах деформированной трением стали, отпущенной на структуру тонкопластинчатой карбидной фазы, новых линий, принадлежащих аустениту с необычно большим параметром кристаллической решетки ($a=0.3660\text{--}0.3680$ нм). Количество данного аустенита достигает 30–40 об.%, а содержание в нем углерода – 1.4–1.8 мас.%. Возникновение рассматриваемого высоколегированного аустенита является результатом инициированной холодной деформацией растворения дисперсных частиц $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$, что приводит к сильному локальному обогащению аустенита углеродом и марганцем. Вследствие этого деформированный неоднородный по химическому составу аустенит отличается от исходного твердостью и стабильностью к образованию мартенсита [1].

Отпуск стали 110Г13 при 400° С (3 ч) и 600° С (5 мин и 5 ч) и наноструктурирующая деформация вызывают при последующем низкотемпературном трении (в среде жидкого азота) образование в стали большого количества (десятки объемных %) ϵ (ГПУ)-мартенсита. Возникновение данной мартенситной фазы происходит в результате снижения Э.Д.У. и фазовой стабильности стали Гадфильда, которые достигаются за счет совместного действия следующих факторов: низкотемпературного охлаждения до криогенной температуры, уменьшения содержания углерода в аустените при отпуске и наличия высоких сжимающих напряжений в зоне фрикционного контакта [2].

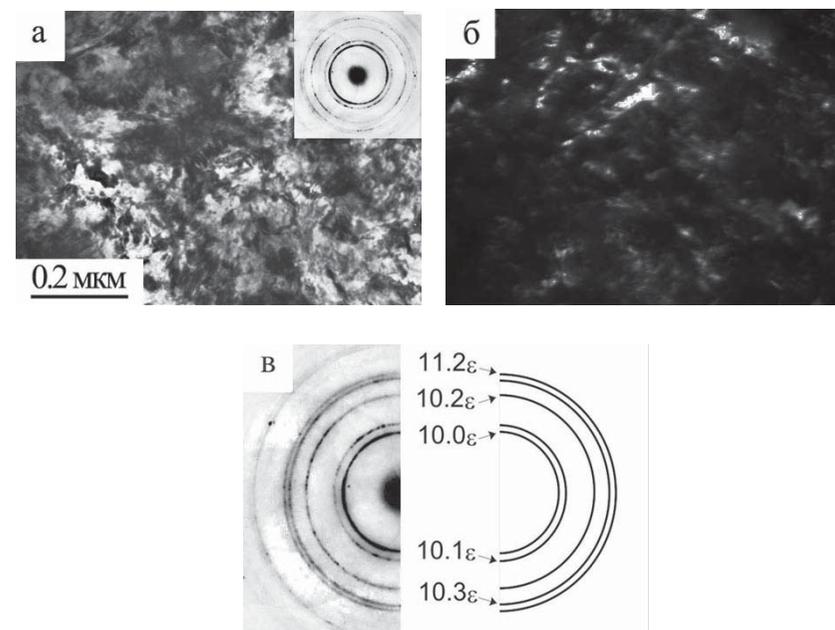


Рис. 1. Электронные микрофотографии и микродифракции стали 110Г13, подвергнутой отпуску и последующему деформированию в жидком азоте: а, б – отпуск 600°С 5 мин, слой толщиной несколько мкм (светлопольное и темнопольное изображения в рефлексах $(10.0)_\epsilon + (10.1)_\epsilon$); в – расшифровка электронограммы рис. 1а.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-13-00908).

[1] Л.Г. Коршунов, В.В. Сагарадзе, Н.Л. Черненко, В.А. Шабашов. *ФММ*, 2015, т. 116, № 8, с. 867–873.

[2] Л.Г. Коршунов, В.В. Сагарадзе, Н.Л. Черненко. *ФММ*, 2015, т. 117, № 8, с. 856–861.

Влияние сильного постоянного магнитного поля на процессы возврата и рекристаллизации в холоднокатаных ферромагнитных сплавах

И.В. Гервасьева, В.А. Милютин

Лаборатория микромагнетизма

Ленты из ферромагнитных сплавов, подвергнутые холодной прокатке на 70–99 %, отжигали в сильном продольном постоянном магнитном поле до 29 Т. Исследовали магнитомягкие сплавы, широко применяемые в промышленности: Fe – 1.5 и 3 (мас.%)Si, Fe–50%Ni, Ni–30%Co. Обнаружено, что приложение внешнего магнитного поля задерживает процессы возврата и ранних стадий рекристаллизации [1–4,8]. Так, при исследовании методом EBSD структуры образцов после отжига при температурах ниже точки Кюри и ниже температуры начала первичной рекристаллизации показано, что качество расфировки линий Кикучи ниже после отжига в магнитном поле. Это свидетельствует о более напряженном состоянии образцов, что также подтверждается более высокими значениями микротвердости в них. Кроме того, обнаружено, что уже на этой стадии преобразования деформационных ячеек в субзерна происходит выбор ориентаций, обусловленный наличием внешнего магнитного поля, которое способствует образованию микрообластей с направлением легкого намагничивания [1, 2]. В дальнейшем при рекристаллизации в области более высоких температур без магнитного поля в образцах, подвергнутых предварительному низкотемпературному магнитному отжигу, объемная доля ориентировок с направлением легкого намагничивания повышается, а размер зерна соответствующих зерен увеличивается. Это происходит при условии, что направление легкого намагничивания совпадает хотя бы с одной из ориентировок, характерных для традиционной текстуры рекристаллизации данного материала [5–7]. Если направление легкого намагничивания не совпадает с получаемой текстурой, то рост зерен в поле задерживается, а острота текстуры уменьшается [5, 7].

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Магнит», № 01201463328) при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-02-31143) и Европейской лаборатории магнитных полей EMFL.

[1] И.В. Гервасьева, В.А. Милютин, Э. Бинон, Д.П. Родионов, Ю.В. Хлебникова, Е.Г. Волкова, Д.А. Шишкин. *ФММ*, 2015, т. 116, №.2, с. 171–178.

[2] I.V. Gervasyeva, E. Beaugnon, V.A. Milyutin, E.G. Volkova, D.P. Rodionov, Yu.V. Khlebnikova, D.A. Shishkin. *Physica B*, 2015, v. 468–469, p. 66–71.

[3] I.V. Gervasyeva, V.A. Milyutin, E. Beaugnon, D.P. Rodionov. *Journ. Supercond. Nov. Magn.*, 2015, v. 28, p. 851–854.

[4] В.А. Милютин. *Вектор науки ТГУ*, 2016, т. 35, №.1, с. 23–28.

[5] И.В. Гервасьева, В.А. Милютин, Э. Бинон, Ю.В. Хлебникова, Д.П. Родионов. *ФММ*, 2016, т. 117, №5, с. 513–518.

[6] I.V. Gervasyeva, V.A. Milyutin, E. Beaugnon, V.V. Gubernatorov, T.S. Sycheva. *Phil. Mag. Letters*, 2016, v. 96, №.8, p. 287–293.

[7] И.В. Гервасьева, В.А. Милютин, Е. Beaugnon, В.А. Казанцев, Ю.В. Хлебникова, Д.П. Родионов. *ЖТФ*, 2016, т. 86, с. 64–69.

[8] V. Milyutin, I. Gervasyeva, E. Beaugnon. *Intern. Conf. on Texture of Materials (ICOTOM-17). Germany, 2014. Abstract book, p. 97. Тольятти, 2016, с. 47–52.*

Разработка высокопрочных и пластичных сплавов Ti-Ni-Hf с высокотемпературными эффектами памяти формы

В.Г. Пушин¹, Н.Н. Куранова¹, А.В. Пушин², А.Н. Укусников¹,
Н.И. Коуров³, Т.Э. Кунцевич¹, Е.С. Белослудцева¹,
Е.Б. Марченкова¹, В.П. Дякина³

¹Лаборатория цветных сплавов

²Лаборатория механических свойств

³Лаборатория низких температур

Впервые получены высокопрочные и пластичные мелко- и ультрамелкозернистые термостабильные квазибинарные сплавы NiTi-NiHf (Hf ≤ 20 ат.%) с высокотемпературным эффектом памяти формы (ЭПФ). Построены полные диаграммы термоупругих мартенситных превращений (рис. 1, 2). Определены фазовый состав, микроструктура, параметры кристаллических решеток аустенита, мартенсита и включений фазы (Ti, Hf)₂Ni. Показано, что B19'-мартенсит имеет пакетную морфологию попарно двойникованных по I типу (111) и (011) когерентных кристаллов, внутренне двойникованных по (001).

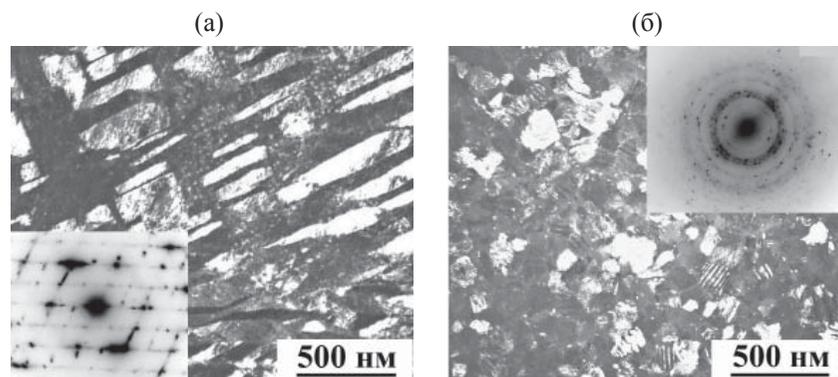


Рис. 1. Темнопольные изображения структуры и микроэлектронogramмы (на вставке) сплавов: Ni₅₀Ti₃₂Hf₁₈ после закалки (а) и Ni₄₅Cu₅Ti₃₂Hf₁₈ после быстрой закалки из расплава и отжига 823 К (б).

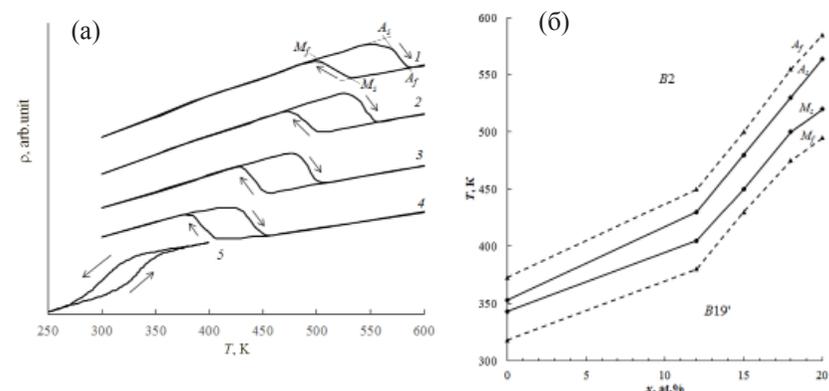


Рис. 2. Температурные зависимости электросопротивления (а) и диаграмма термоупругого мартенситного превращения B2 ↔ B19' (б) в сплавах Ni₅₀Ti_{50-x}Hf_x (1 – 20, 2 – 18, 3 – 15, 4 – 12, 5 – 0 ат.% Hf).

Измерены физико-механические свойства и ЭПФ сплавов. Определены химические и технологические принципы получения термостабильных сплавов. Данные сплавы рекомендуются для применения в качестве материалов с высокотемпературными ЭПФ.

Работа выполнена по госзаданию по теме «Структура» и при финансовой поддержке гранта РНФ № 15-12-10014. Результаты опубликованы в [1–3].

[1] В.Г. Пушин, Н.Н. Куранова, А.В. Пушин, А.Н. Укусников, Н.И. Коуров. *ЖТФ*, 2016, т. 86, вып. 7, с. 51–56.

[2] В.Г. Пушин, Н.Н. Куранова, А.В. Пушин, А.Н. Укусников, Н.И. Коуров, Т.Э. Кунцевич. *ФММ*, 2016, т. 117, № 12, с. 1302–1311.

[3] В.Г. Пушин, А.В. Пушин, Н.Н. Куранова, Т.Э. Кунцевич, А.Н. Укусников, В.П. Дякина, Н.И. Коуров. *ФММ*, 2016, т. 117, № 12, с. 1312–1320.

Механизм и кинетика контролируемых диффузией структурно-фазовых превращений в стареющих Fe–Ni–(Al, Ti) сплавах при холодной мегапластической деформации

В.В. Сагарадзе¹, В.А. Шабашов¹, К.А. Козлов¹, В.А. Завалишин¹, В.П. Пилюгин², Н.В. Катаева¹, А.Р. Кузнецов¹, А.В. Литвинов¹, С.В. Афанасьев¹, А.Е. Заматовский¹, К.А. Ляшков¹

¹Лаборатория механических свойств

²Лаборатория физики высоких давлений

В специально легированных стареющих Fe–Ni–(Al, Ti) сплавах выяснены механизм и кинетика индуцированных мегапластической деформацией прокаткой, сдвигом под давлением структурно-фазовых переходов и определена их зависимость от температуры и скорости деформационного воздействия [1–3]. Показано, что снижение температуры (вплоть до 77 К) и рост скорости деформации определяют смену механизма фазовых превращений: от динамического старения до растворения интерметаллидов (рис. 1). Предложена феноменологическая модель механолегирования, описывающая конкуренцию неравновесного растворения частиц интерметаллидной фазы Ni₃Al(Ti) в металлической матрице и альтернативного динамического старения. Кинетическая кривая деформационного растворения интерметаллидов с учетом релаксации структуры по пути динамического старения описывается выражением [3]

$$\Delta C(\text{Ni}) = K_1(\varepsilon - \varepsilon_{\text{кр}}) + K_2 D,$$

где ε – степень истинной деформации, D – коэффициент диффузии. Установлено, что активность процессов динамического старения обусловлена непрерывностью генерации точечных дефектов деформационного происхождения.

Полученные данные расширяют представление о механизме структурно-фазовых переходов в сплавах при большой

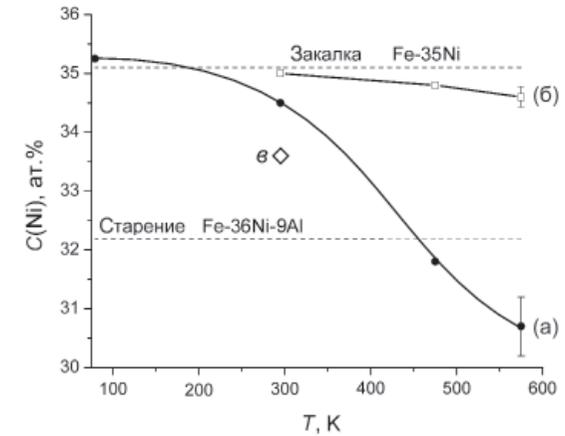


Рис. 1. Влияние температуры деформации на концентрацию никеля $C(\text{Ni})$ в аустенитной матрице предварительно состаренных (при 873 К, 3 ч), сплава Fe–36Ni–9Al (а) и бинарного сплава Fe–35Ni (б).

пластической деформации и имеют большое практическое значение для разработки технологии создания наноструктурированных дисперсно-упрочненных сталей, сплавов и композитов.

[1] V.V. Sagaradze, V.A. Shabashov, N.V. Kataeva, K.A. Kozlov, A.R. Kuznetsov, A.V. Litvinov. *Mat. Let.*, 2016, v. 172, p. 207–210.

[2] V.V. Sagaradze, V.A. Shabashov, N.V. Kataeva, V.A. Zavalishin, K.A. Kozlov, A.R. Kuznetsov, A.V. Litvinov, V.P. Pilyugin. *Phil. Mag.*, 2016, v. 96, Issue 17, p. 1724–1742.

[3] В.А. Шабашов, В.В. Сагарадзе, А.Е. Заматовский, В.П. Пилюгин, К.А. Козлов, А.В. Литвинов, Н.В. Катаева. *ФММ*, 2016, т. 117, № 8, с. 833–844.

Сильнонелинейные локализованные возбуждения в магнетиках и мультиферроиках со спиральной структурой

В.В. Киселев, А.А. Расковалов

Лаборатория теории нелинейных явлений

Представлен цикл работ по исследованию сильнонелинейных солитонов и волн в магнетиках и мультиферроиках со спиральной (полосовой доменной) структурой [1–8].

Для их исследования нами разработана модификация метода обратной задачи рассеяния, позволяющая аналитически описать любое локализованное возбуждение при заданных начальных и краевых условиях в полосовой доменной структуре в рамках модели sine-Gordon [1]. С ее помощью получены новые солитонные и спин-волновые состояния, не поддающиеся исследованию пертурбативными или какими-либо другими ранее известными методами.

Детально исследованы солитонные и мультисолитонные состояния в спиральной магнитной структуре [2, 5, 6]. Показано, что они являются переносчиками макроскопических сдвигов структуры, и при определенных условиях служат зародышами перемагничивания материала. Солитоны неразрывно связаны со структурой. Их движение сопровождается колебаниями и деформациями структуры. Это может проявляться в образовании “предвестников” и “хвостов”, примыкающих к солитонам.

Расчет поглощения мощности однородной накачки при наличии постоянного магнитного поля, перпендикулярного оси магнитной спирали, показал, что частоты пульсаций неподвижных солитонов лежат в энергетической щели спектра стоячих спиновых волн в спиральной структуре [3]. Это можно использовать для обнаружения пульсирующих солитонов в спиральной структуре магнетиков и мультиферроиков.

Проанализированы сценарии возбуждения разных типов солитонов в спиральных (полосовых доменных) магнитных структурах [5, 6, 8].

Результаты анализа солитонов в спиральной (полосовой доменной) структуре перспективно использовать в технологиях наноустройств и микросистемной техники, где магнитные солитоны могут служить базовыми элементами при записи, передаче, сохранении и считывании информации. В мультиферроиках со спиральной структурой солитоны могут найти применение при конструировании приборов и устройств, работающих без потерь энергии из-за протекания токов [7].

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема “Квант”, № 01201463332), при частичной поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН (проекты №№ 12-П-2-1045, 15-8-2-7) и Стипендии Президента РФ для молодых ученых СП-6342.2013.1.

[1] В.В. Киселев, А.А. Расковалов. *ТМФ*, 2012, т. 173, с. 268–292.

[2] В.В. Киселев, А.А. Расковалов. *ФММ*, 2012, т. 113, с. 1180–1192.

[3] В.В. Киселев, А.А. Расковалов. *ЖЭТФ*, 2013, т. 143, с. 313–321.

[4] В.В. Киселев, А.А. Расковалов. *ТМФ*, 2016 г., т. 187, с. 21–38.

[5] В.В. Киселев, А.А. Расковалов. *ЖЭТФ*, 2016, т. 149, с. 1260–1269.

[6] В.В. Киселев, А.А. Расковалов. *ФНТ*, 2016, т. 42, с. 67–74.

[7] В.В. Киселев, А.А. Расковалов. *ФТТ*, 2016, т. 58, с. 485–489.

[8] V.V. Kiselev, A.A. Raskovalov. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2016, v. 84, p. 88–103.

Возможности ЯМР-релаксометрии при определении движения флюида в пористой среде

С.В. Жаков¹, В.В. Лоскутов², Ю.К. Долманский³

¹Лаборатория прикладного магнетизма ИФМ УрО РАН

²Физический факультет, Марийский государственный университет, Йошка-Ола

³ИГФ УрО РАН, лаборатория электрометрии

Возможность извлечения углеводородов напрямую связана с проницаемостью пористой среды, при этом корректное измерение проницаемости можно провести только при движении флюида. Поскольку природная поровая среда имеет неупорядоченную структуру, то даже при постоянной средней скорости движения флюида возникает локальная хаотическая компонента скорости, которая приводит к дополнительной расфазировке спинов и, как следствие, к уменьшению времени поперечной релаксации T_2 .

Эксперименты проводили на природных и искусственных образцах диаметром 38 мм и длиной до 45 мм с помощью ЯМР-релаксометра с резонансной частотой 2,34 МГц. Для измерения T_2 использовали последовательность Карра–Парселла–Мейбума–Гилла (CPMG-последовательность). Градиент магнитного поля вдоль направления движения флюида изменялся в диапазоне $G=0-20$ Гс/см. Эксперименты показали, что среднее время поперечной релаксации $\langle T_2 \rangle$ является наиболее чувствительным параметром к скорости движения флюида. Вклад в $\langle T_2 \rangle$, связанный только с движением флюида, определяется величиной $\langle T_{2V} \rangle$:

$$\frac{1}{\langle T_{2V} \rangle} = \frac{1}{\langle T_2(V) \rangle} - \frac{1}{\langle T_2(V=0) \rangle}; \quad \langle T_2 \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N A_i T_{2i}}{\sum_{i=1}^N A_i},$$

где A_i и соответственно T_{2i} амплитуды и времена релаксации, получаемые при инверсии экспериментальной релаксационной кривой $R(t)$:

$$R(t) = \sum_{i=1}^N A_i \exp(-t / T_{2i}).$$

Основные результаты работы:

1. Показано, что метод спинового эхо позволяет достоверно фиксировать среднюю скорость движения флюида в пористой среде $V \sim 0.05$ мм/с и может быть основой методов определения проницаемости.

2. Построена теоретическая модель, дающая связь скорости движения флюида с измеряемым временем релаксации T_2 , показано, что при малых скоростях параметр $1/\langle T_{2V} \rangle \sim V$.

3. Магнитная проницаемость μ пористой матрицы влияет на величину $1/\langle T_2 \rangle$, увеличивая вклад коротких времен T_2 с ростом μ .

Работа выполнена в рамках темы «Магнит».

[1] V. Loskutov, S. Zhakov. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 101, 2016, p. 692–698.

[2] С.В. Жаков, В.В. Лоскутов, Ю.К. Долманский *Всеросс. научн.-практ. конф. «Ядерно-магнитные скважинные и аналитические методы в комплексе ГИС при решении петрофизических и геологических задач на нефтегазовых месторождениях»* 30.09–2.10 2014, Тверь, Сб. трудов, с. 147–169.

[3] S. Zhakov, V. Loskutov. *Geophysical Research Abstracts*, v. 18, EGU2016-6645-1, 2016, General Assembly 2016. Wien 16-22 April.

[4] V. Loskutov, S. Zhakov, Yu. Dolomansky. *9-th Meeting “NMR in Heterogeneous Systems”*, July 9-13, 2012. – S. Peterburg: “Solo” Publ., 2012. p. 98.

[5] В.В. Лоскутов, С.В. Жаков, Ю.К. Долманский. *XIX Всеросс. конф. «Структура и динамика молекулярных систем»*, 25-30 июня 2012. – Москва: ИФХЭ РАН, 2012, Сб. тез., с. 106.

Магнитострикционное высокоэффективное электромагнитно-акустическое возбуждение ультразвуковых волн без поля смещения

А.В. Михайлов, Ю.Л. Гобов, Я.Г. Смородинский

Лаборатория комплексных методов контроля

Электромагнитный акустический (ЭМА) способ получил наибольшее распространение среди бесконтактных способов возбуждения и регистрации ультразвуковых волн в металлах. Работа ЭМА-преобразователей чаще всего основана на использовании эффекта электродинамического взаимодействия или эффекта магнитострикции. Оба механизма эффективно работают только в дополнительном постоянном магнитном поле смещения, амплитуда которого оказывает наибольшее влияние на эффективность ЭМА-преобразования: для повышения эффективности ЭМА-преобразования необходимо повышать амплитуду поля смещения, что, в свою очередь, требует использования громоздких намагничивающих систем, которые притягиваются к ферромагнетикам с большой силой.

В данной работе исследована эффективность возбуждения ультразвуковых волн ЭМА-методом без использования подмагничивающих полей постоянных магнитов либо электромагнитов. Предложен высокоэффективный способ генерации ультразвуковых волн ЭМА-методом без использования поля смещения, а также высокоэффективные и малогабаритные ЭМА-преобразователи, реализующие данный способ. Способ основан на удвоении частоты излученной ультразвуковой волны по сравнению с частотой поля возбуждающей катушки электромагнитно-акустического преобразователя за счет четности магнитострикционного эффекта (рис. 1).

Результаты имеют существенное значение для создания высокоэффективных, малогабаритных ручных и автоматизированных средств ЭМА-диагностики [1–2].

Работа выполнена в рамках государственного задания «Технологии и сканирующие системы неразрушающего

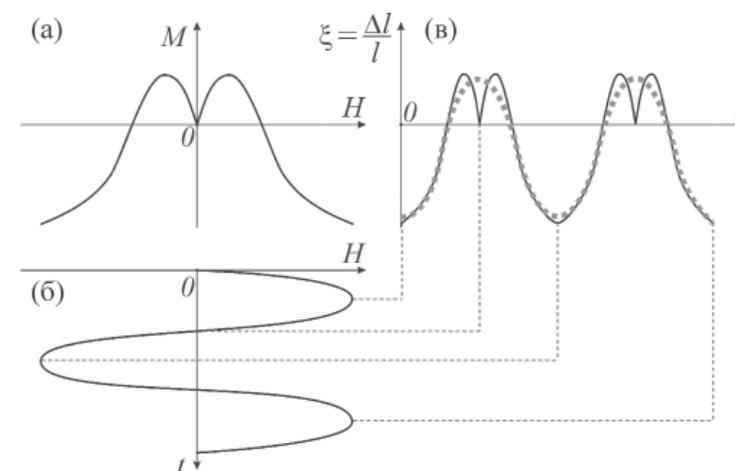


Рис. 1. Иллюстрация четности магнитострикционного эффекта: а – зависимость коэффициента магнитострикции $M=f(H)$ от магнитного поля H ; б – изменение напряженности магнитного поля $H=f(t)$; в – деформация образца ξ .

контроля изделий из новых конструкционных материалов и диагностика объектов, работающих в сложных и экстремальных условиях (шифр «Диагностика») № 01201463329».

[1] Ю.Л. Гобов, А.В. Михайлов, Я.Г. Смородинский. *Дефектоскопия*, 2016, №12, с. 32–37.

[2] А.В. Михайлов, Ю.Л. Гобов, Я.Г. Смородинский. *Материалы XXIX Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)»*, Екатеринбург, 2016, с. 344–349.

Эффект Яна-Теллера и адиабатическое охлаждение вблизи точки кроссовера

Е.В. Розенфельд

Лаборатория теоретической физики

Рассматривается встроенный в классическую матрицу (решетку) ансамбль квантовых двухуровневых систем с расщеплением уровней $\Delta(p)$, зависящих от внешнего параметра p и исчезающих в точке кроссовера $\Delta(p=0)=0$. При появлении в решетке искажений γ растет ее упругая энергия $r\gamma^2$ и возникает пропорциональное γ взаимодействие между уровнями:

$$\hat{H}_0(p, \gamma) = \left(E_0 - \frac{1}{2} \Delta(p) \right) |1\rangle\langle 1| + \left(E_0 + \frac{1}{2} \Delta(p) \right) |2\rangle\langle 2| + \gamma (|1\rangle\langle 2| + |2\rangle\langle 1|) + r\gamma^2.$$

Энергии уровней такой системы равны

$$E_{1,2} = E_0 \mp \frac{1}{2} \delta(p, \gamma) + r\gamma^2, \quad \delta(p, \gamma) = \sqrt{\Delta(p)^2 + 4\gamma^2},$$

и легко видеть, что вблизи кроссовера – при $|r\Delta(p)| < 1$ – расщепление уровней в точке минимума энергии основного состояния E_1 не зависит ни от p , ни от γ : $\delta \equiv r^{-1}$. Похожая особенность возникает и при конечных температурах: пока $rk_B T < 1$, расщепление уровней в состоянии, осуществляющем минимум *средней* энергии системы \bar{E} , зависит только от температуры: $\delta \equiv D_{\bar{E}}(T)$, где функция $D_{\bar{E}}(T)$, определяется при минимизации \bar{E} . Аналогично, пока $rk_B T < .5$, расщепление в состоянии, осуществляющем минимум *свободной* энергии F , является функцией одной только температуры $\delta \equiv D_F(T)$ независимо от значений p и γ .

Такая зависимость энергии системы от деформации матрицы приводит к двум нетривиальным следствиям. Во-первых, уже в области довольно высоких температур $.5 < rk_B T < 1$ абсолютный минимум *средней* энергии каждой отдельной

системы достигается в состоянии с искаженной решеткой, хотя энергия основного состояния имеет минимум в отсутствие искажений. В результате в этой области температур легко развиваются флуктуации – виртуальные локальные искажения решетки. Эффект возникает из-за большого расщепления уровней, обеспечивающего относительно малый статистический вес возбужденного состояния, а потому и низкое значение средней энергии. Однако по той же причине это состояние не соответствует минимуму *свободной* энергии. Последний сдвигается в область $|\gamma| > 0$ (т.е. возникает кооперативный эффект Яна-Теллера) только при более низких температурах $rk_B T < .5$.

Во-вторых, как уже упоминалось, внутри области существования эффекта Яна-Теллера, которая определяется условиями $rk_B T < .5$ и $\Delta(p) < D_F(T)$, расщепление уровней δ в термодинамическом равновесии зависят только от температуры. Это означает, что температура и энтропия (зависящая только от δ/T) взаимно однозначно связаны, и поэтому при адиабатическом изменении $\Delta(p)$, вблизи кроссовера температура всей системы не меняется. Другими словами, это означает, что ансамбль двухуровневых систем, обычно работающий как холодильник при адиабатическом сближении уровней, превращается в термостат в области существования эффекта Яна-Теллера [1].

Работа выполнена в рамках бюджетного финансирования по теме «квант» № 01201443331.

[1] E.V. Rosenfeld. *Solid State Comm.*, 2016, v. 243 p. 55–59.

Спиновые клапаны с синтетическим антиферромагнетиком: изменение однонаправленной анизотропии и управление функциональными параметрами

В.В. Устинов¹, М.А. Миляев¹, Л.И. Наумова¹, В.В. Проглядо², Т.А. Чернышова¹, И.Ю. Каменский¹, Т.П. Криницина³

¹Лаборатория электрических явлений

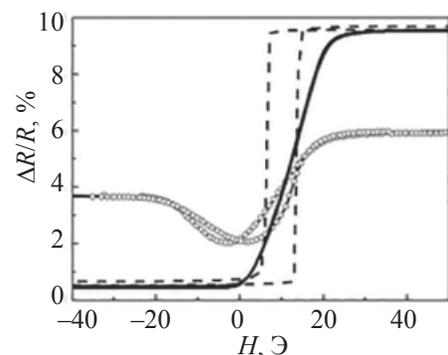
²Лаборатория квантовой наноспинтроники

³Лаборатория прецизионных сплавов и интерметаллидов

Спиновые клапаны Ta/NiFe/CoFe/Cu/CoFe/Ru/CoFe/FeMn/Ta с синтетическим антиферромагнетиком (САФ) синтезированы методом магнетронного напыления. САФ представляет собой структуру Ф2/Ru/Ф1, в которой ферромагнитные слои Ф1 и Ф2 связаны антиферромагнитным обменным взаимодействием через прослойку рутения.

Показано, что варьирование толщин слоев Ф1 и Ф2 позволяет управлять обменным сдвигом H_{ex} высокополевой петли гистерезиса. Максимальный обменный сдвиг и наибольший рабочий интервал температур для спиновых клапанов были получены при минимальной разнице толщин слоев Ф1 и Ф2 [1]. На основе магниторезистивных измерений и данных визуализации магнитной структуры проведено исследование закономерностей появления одно- и двухфазного спин-флоп состояния в САФ [2, 3].

Предложен оригинальный способ изменения анизотропии путем термомагнитной обработки в однофазном спин-флоп состоянии [4]. На рисунке показаны полевые зависимости магнитосопротивления для спинового клапана до (штриховая линия) и после



термомагнитной обработки в однофазном (линия) и двухфазном (светлые символы) спин-флоп состоянии. Для спинового клапана и микрообъектов на его основе получены значения функциональных параметров (температурной стабильности, гистерезиса и магниторезистивной чувствительности), не уступающие лучшим мировым аналогам.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Спин», № 01201463330), при финансовой поддержке программы УрО РАН (проект № 15-9-2-22), Министерства образования и науки РФ (гранты № 14.Z50.31.0025.), РФФИ (проект № 16-02-00061).

[1] М.А. Миляев, Л.И. Наумова, В.В. Проглядо, Т.А. Чернышова, Д.В. Благодатков, И.Ю. Каменский, В.В. Устинов. *ФММ*, 2015, т. 116, с. 1129–1136.

[2] M. Milyaev, L. Naumova, T. Chernyshova, V Proglyado, I. Kamensky, and V. Ustinov. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016 Issue: 99, с. 2301104.

[3] Л.И. Наумова, М.А. Миляев, Т.А. Чернышова, В.В. Проглядо, Н.С. Банникова, Т.П. Криницина, В.В. Устинов. *Естественные и технические науки*, 2015, т. 10, с. 92–96.

[4] М.А. Миляев, Л.И. Наумова, Т.А. Чернышова, В.В. Проглядо, Н.А. Кулеш, Е.И. Патраков, И.Ю. Каменский, В.В. Устинов. *ФММ*, 2016, т. 117, с. 1227–1233.

Магнитные структуры мультиферроиков

А.Н. Пирогов¹, А.Е. Теплых¹, В.Д. Пархоменко¹, С.Г. Богданов¹,
Ю.Н. Скрябин¹, Д.Г. Келлерман², В.Я. Шур³, Е.В. Владимирова³,
М.А. Семкин³, Н.В. Урусова³, А.С. Волегов³, С. Ли⁴

¹Лаборатория нейтронных исследований вещества

²Лаборатория квантовой химии и спектроскопии, Институт химии твердого тела УрО РАН

³Физический факультет, Уральский федеральный университет, Екатеринбург

⁴Лаборатория нейтронных исследований, Корейский институт атомной энергии, Тайжон, Южная Корея

Мультиферроики – это класс кристаллических материалов, в которых одновременно существуют, по крайней мере, два из трех типов порядка: ферромагнетик (или антиферромагнетик), ферроэлектрик и ферроэластик. Можно выделить три группы мультиферроиков, различающихся соотношением между температурами возникновения поляризации и магнитного упорядочения. В одной из групп магнитное упорядочение устанавливается при более низкой температуре, чем возникает поляризация, в другой группе имеет место обратное соотношение между этими температурами. В третьей группе температуры совпадают. Соотношение между температурами возникновения поляризации и установления магнитного порядка указывает на величину взаимодействия между этими степенями свободы.

Выполнены магнитные и нейтронографические измерения мультиферроиков из трех вышеуказанных групп: $0.9\text{BiFeO}_3 + 0.1\text{BaTiO}_3$; $\text{Ni}_{3-x}\text{Co}_x\text{V}_2\text{O}_8$ с $x = 0.1, 0.3$ и 0.5 ; LiMPO_4 , где $\text{M} = \text{Mn, Fe, Co}$ и Ni . Изучено их структурное состояние и магнитное упорядочение. Установлено, что существует корреляция в температурной эволюции структурных параметров и намагниченности. Показано, что сосуществование магнитного и ферроэлектрического порядков имеет место лишь в определенных магнитных структурах (рис. 1).

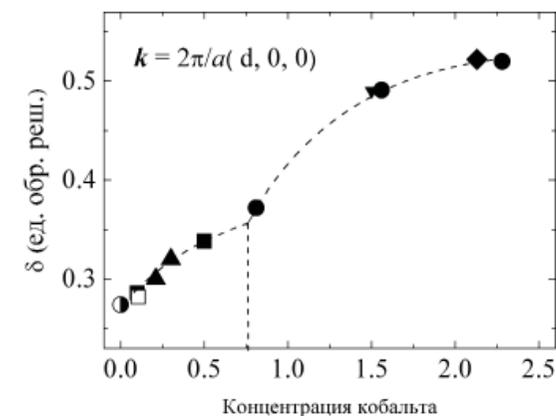


Рис. 1. Концентрационная зависимость волнового вектора магнитной структуры $\text{Ni}_{2.5}\text{Co}_{0.5}\text{V}_2\text{O}_8$ при 1.8 К. Магнитный и ферроэлектрический порядки сосуществуют при $x \leq 0.7$.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы ФАНО (тема «Поток», № 01201463334) и проекта РФФИ № 13-02-00720. Результаты опубликованы в [1–4].

[1] S. Lee, H. Lee, Y.-N. Choi, M.A. Semkin, A.E. Teplykh, Yu.N. Skryabin, W.-H. Li, A.N. Pirogov. *JMMM*, 2016, v. 397, p. 225–229.

[2] S. Lee, M.A. Semkin, A.N. Pirogov. *Materials Science Forum*, 2016, v. 845, p. 38–41.

[3] M. Semkin, K.-Y. Choi, H. Sim, N. Urusova, A. Volegov, J. Barykina, D. Kellerman, J.-G. Park and A.N. Pirogov. *AIP Conference Proceedings*, 2016, v. 1767, p. 020035–8.

[4] M.A. Semkin, N.V. Urusova, D.G. Kellerman, A.P. Nosov, S. Lee and A.N. Pirogov. *KnE Materials Science*, 2016, v. 2016, p. 135–141.

Перспективы снижения магнитных потерь в магнитопроводах стержневых трансформаторов

В.И. Пудов¹, Ю.Н. Драгошанский²

¹Лаборатория термомангнитной обработки

²Лаборатория микромагнетизма

Разработана лазерная методика и определены оптимальные условия снижения магнитных потерь (14–18 %) в трансформаторных магнитопроводах из анизотропных сталей марок 3408, 3409, что является важным при создании электротехнических и диагностических магнитных устройств.

Новая методика значительного снижения магнитных потерь (на 14–18 %) в магнитопроводах стержневых **трансформаторов** разработана на основе эффективного результата улучшения электромагнитных характеристик при локальной лазерной обработке и отжиге **лент** магнитомягких сплавов. Результаты достигнуты за счет лазерной (ЛЛО), термической (ТО) и термомангнитной (ТМО) обработок [1, 2]. Эти обработки дробят основные 180° домены в продольных элементах трансформатора и перестраивают 180° домены типа А в 90° домены типа С в поперечно ориентированных их элементах. Перестройка доменной структуры в поперечных элементах магнитопровода происходит за счет поперечно ориентированных растягивающих напряжений, возникающих между сжатыми зонами ЛЛО, изменяющих продольную одноосную магнитную анизотропию на поперечную двухосную анизотропию (рис. 1). Такая оптимизация магнитной структуры приводит к уменьшению скоростей смещения доменных границ и, соответственно, к уменьшению затрат энергии на вихревые токи при перемагничивании. Она также обеспечивает прохождение магнитного потока вдоль направлений легкого намагничивания во всем объеме магнитопровода [3, 4], что приводит к перемагничиванию материала малозатратным механизмом смещения доменных границ взамен более энергозатратного механизма вращения намагниченности. Эффект

обработок увеличивается (до 18%) с ростом размера зерна и степени текстурованности стали.

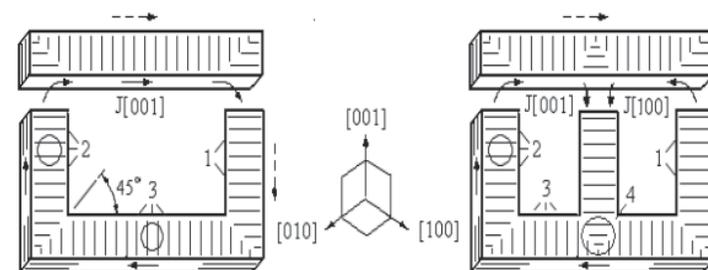


Рис. 1. Схема оптимального формирования деформационных зон ЛЛО в отдельных и П-образных пластинчатых элементах шихтованных магнитопроводов.

Полученные результаты служат основой перспективного развития разных магнитопроводов, составляющих большую массу в переменноточковых электротехнических устройствах.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Фундаментальные проблемы науки физики материалов и электрофизики», тема «Магнит» № 01201463328 и частично по проекту УрО РАН № 15-17-2-53.

[1] В.И. Пудов, Ю.Н. Драгошанский. Патент РФ № 2565239, Бюл. № 29, 20.10.2015.

[2] В.И. Пудов, Ю.Н. Драгошанский. Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки, 2016, т. 21, с. 776–779.

[3] Ю.Н. Драгошанский, В.И. Пудов. Там же, с. 974–977.

[4] В.И. Пудов, Ю.Н. Драгошанский. ФТТ, 2016, т. 58, с. 252–258.

Микроволновые свойства 3D-наноккомпозитов с частицами 3d-металлов и палладия

А.Б. Ринкевич¹, Д.В. Перов¹, М. Пардави-Хорват², М.И. Самойлович³

¹Лаборатория углеродных наноматериалов

²Университет Дж. Вашингтона, США

³ЦНИТИ “Техномаш”, Москва

Выполнены исследования микроволновых свойств магнитных 3D-наноккомпозитных материалов на основе искусственных опаловых матриц с субмикронными сферами из аморфного SiO₂ диаметром 250 нм, модифицированных путем введения наноразмерных частиц 3d-переходных металлов и палладия в межсферические пустоты [1–4]. Измерения частотных зависимостей модулей коэффициентов отражения и прохождения были произведены в диапазоне частот от 26 до 38 ГГц при комнатной температуре.

На основе данных об отражении и прохождении электромагнитных волн были определены спектры ферромагнитного резонанса и антирезонанса для нескольких наноккомпозитов, имеющих различный химический состав, содержащих наночастицы Fe, Ni, Co и Pd. Показано, что амплитуда пика ферромагнитного резонанса меньше для наноккомпозитов, содержащих частицы Pd, чем для наноккомпозитов с частицами переходных металлов без палладия [1, 3, 4]. При этом наличие частиц Pd приводит также к уменьшению ширины резонансной линии (рис. 1).

Поскольку коэффициенты отражения и прохождения электромагнитных волн для исследованных наноккомпозитов меняются в широком диапазоне значений, то данный класс материалов может найти применение при создании управляемых магнитным полем радиотехнических устройств миллиметрового диапазона.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН (проект № 15-9-2-12) и гранта Минобрнауки РФ № 14.Z50.31.0025.

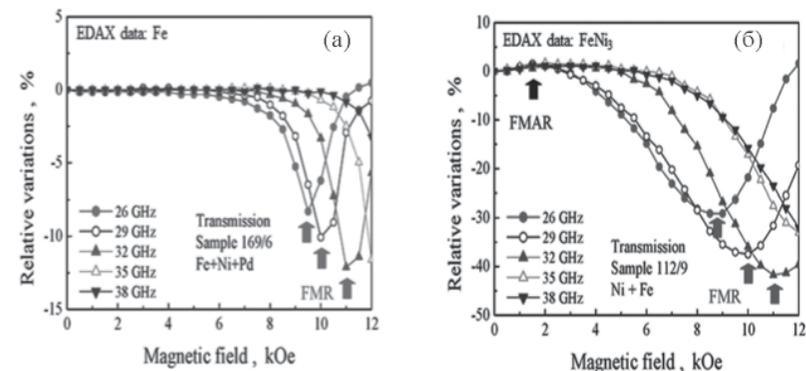


Рис. 1. Зависимости модулей коэффициентов прохождения для наноккомпозитных материалов с различным наполнением: а – Fe, Ni и Pd; б – Fe и Ni.

[1] A.B. Rinkevich, M. Pardavi-Horvath, M.I. Samoylovich, D.V. Perov. *IEEE Trans. Magn.*, 2016, v. 52, p. 2300410.

[2] G.S. Makeeva, O.A. Golovanov, M. Pardavi-Horvath, A.B. Rinkevich. *J. Appl. Phys.*, 2013, v. 113, p. 173901.

[3] M. Pardavi-Horvath, G.S. Makeeva, O.A. Golovanov, A.B. Rinkevich. *APS March Meeting, Baltimore, Maryland, USA, 2013*, <http://meetings.aps.org/link/BAPS.2013.MAR.W16.8>

[4] A.B. Rinkevich, M. Pardavi-Horvath, M.I. Samoylovich, D.V. Perov. *European Microwave Week 2014, Rome, Italy*, p. 1206–1209.

Магнитооптические и магнитотранспортные свойства мультислойных наноструктур Co/Cu

И.Д. Лобов¹, М.М. Кириллова², А.А. Махнев², Л.Н. Ромашев³,
А.В. Королев⁴, М.А. Миляев³, В.В. Проглядо³, В.В. Устинов³

¹Лаборатория квантовой наноспинтроники

²Лаборатория оптики металлов

³Лаборатория электрических явлений

⁴Лаборатория ферромагнитных сплавов

На серии мультислойных структур $\text{Co}15 \text{ \AA}/\text{Cu}(t_x)$ с переменной толщиной слоя меди (8–27 \AA) определены параметры интерфейсного рассеяния электронов проводимости: времена релаксации $\tau_i^{(\downarrow)}$, вероятности рассеяния $P_i^{(\downarrow)}$ и коэффициент спиновой асимметрии рассеяния γ . Показано, что с увеличением толщины слоев Cu наибольшие изменения параметров τ_i и P_i происходят в spin-up токовом канале.

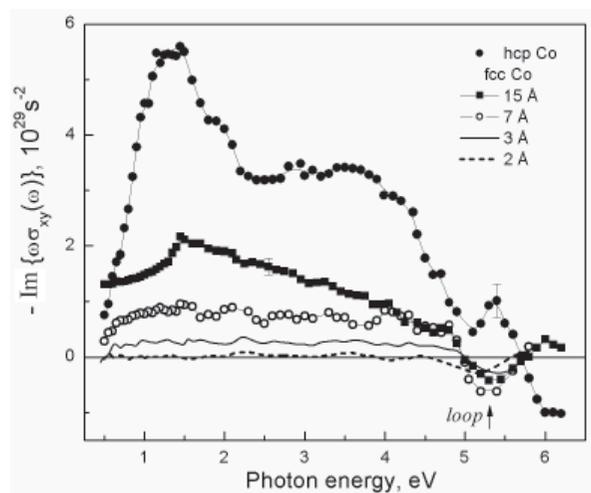


Рис. 1. Частотная зависимость мнимой части недиагональной компоненты тензора оптической проводимости массивного ГПУ-Со и сверхрешеток $\text{Co}(t_x, \text{ \AA})/\text{Cu}(9.6 \text{ \AA})$ ($t_x, \text{ \AA}$: 15, 7, 3, 2). Стрелкой (\uparrow) обозначена осцилляционная структура «петля».

На магнитооптических зависимостях $\omega \text{Im} \sigma_{xy}(\omega)$ мультислойных наноструктур с тонкими слоями кобальта (3–15 \AA) в ультрафиолетовой области спектра ($\hbar\omega = 5\text{--}6.2$ эВ) обнаружена предсказанная ранее теоретически полоса осцилляционного типа («петля»), обусловленная обменным расщеплением $3d$ -зоны ГЦК-Со (рис. 1) [1, 2].

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Спин», № 01201463330) при частичной поддержке РФФИ (проект № 16-02-00061-а), Программы УрО РАН «Фундаментальные основы технологий наноструктур и наноматериалов» (проект № 15-9-2-22) и Минобрнауки РФ (грант 14.Z50.31.0025).

[1] I.D. Lobov, M.M. Kirillova, A.A. Makhnev, M.A. Milyaev, L.N. Romashev, V.V. Ustinov. *JMMM*, 2015, v. 389, p. 169–175.

[2] И.Д. Лобов, М.М. Кириллова, А.А. Махнев, Л.Н. Ромашев, А.В. Королев, М.А. Миляев, В.В. Проглядо, Н.С. Банникова, В.В. Устинов. *ФТТ*, 2017, т. 59, с. 54–62.

Однонаправленная анизотропия в слоистых кобальтитах $R\text{BaCo}_2\text{O}_{5.5}$ ($R=\text{Eu}, \text{Gd}$)

Н.И. Солин¹, С.В. Наумов¹, Е.В. Мостовщикова¹, С.В. Телегин¹,
А.В. Королев²

¹Лаборатория магнитных полупроводников

²Лаборатория ферромагнитных сплавов

Работа посвящена выяснению природы однонаправленной анизотропии (ОА), при которой электросопротивление ρ зависит не только от величины напряженности магнитного поля (H), но и от его знака, в слоистых кобальтитах $R\text{BaCo}_2\text{O}_{5.5}$. Кобальтиты являются ферромагнетиками (ФМ) с магниторезистивными свойствами с $T_C \sim 270\text{--}280$ К, антиферромагнетиками (АФМ) с ФМ-кластерами ниже $T_N \sim 210$ К. Эффект ОА в магниторезистивных соединениях вызывает интерес из-за новых возможностей управления процессом проводимости в устройствах спинтроники. При охлаждении в магнитном поле $H_{\text{охл}}$ при $T_N < T < T_C$ петли гистерезиса электросопротивления $\rho(H)$ смещены относительно $H=0$ и имеют вид ОА (на рисунке: $\rho(H)$, $\text{GdBaCo}_2\text{O}_{5.5}$), как и петли гистерезиса намагниченности $M(H)$.

Результаты объясняются обменным взаимодействием J_p , возникающим между АФМ-матрицей и внедренной в нее ододоменной (ОД) ФМ-частицей (модель Майклдждона и Бина). ОД-частица закрепляет намагниченность на границе раздела ФМ–АФМ-фаз, вызывая смещение H_E петли гистерезиса $M(H)$, если магнитное поле охлаждения $H_{\text{охл}}$ не очень велико.

Исследованиями магнитных, транспортных, оптических [1, 2] свойств $R\text{BaCo}_2\text{O}_{5.5}$ ($R=\text{Eu}, \text{Gd}$) оценены основные параметры ОА: обменная энергия интерфейса J_p , поле обменного сдвига H_E , размеры ОД-частиц. Значение H_E увеличивается при понижении температуры, убывает с увеличением $H_{\text{охл}}$. $H_E(T)$ описывается присущей для соединений с ОА экспоненциальной зависимостью от температуры: $H_E \sim \exp(-T/T^*)$. Особенности поведения $H_E(H, T)$ объясняются спецификой фазового расслоения в кобальтитах.

Угловые зависимости ρ описываются присущим для ОА выражением: $\rho(\theta) \sim \sin\theta$, где угол $\theta=0$ соответствует направлению H , при котором образец был охлажден (вставка на рисунке: символы – эксперимент, линия – расчет, $\text{EuBaCo}_2\text{O}_{5.5}$).

В слоистых кобальтитах обнаружен эффект обучения (training effect), присущий соединениям с ОА: при циклическом изменении магнитного поля обменное поле уменьшается.

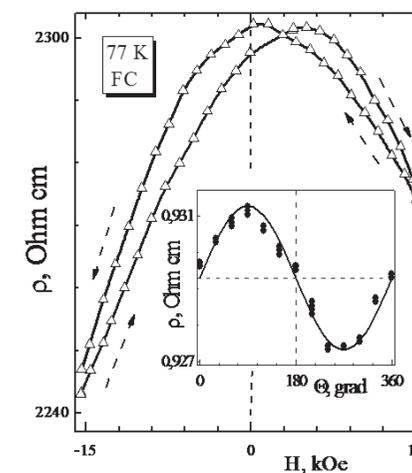
Особенностью кобальтитов является их неравновесность при низких температурах. Со временем электросопротивление возрастает, а намагниченность убывает. Результаты обсуждаются в связи с кинетическими явлениями при фазовом переходе 1-го рода ФМ–АФМ.

Полученные результаты по однонаправленной анизотропии находятся в разумном согласии с моделью Майклдждона и Бина.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО («Спин», № 01201463330) и РФФИ (грант № 14-02-00432).

[1] Н.И. Солин, С.В. Наумов, С.В. Телегин, А.В. Королев. *Письма в ЖЭТФ*, 2016, т.104, с. 44–51.

[2] Е.В. Мостовщикова, С.В. Наумов, Н.И. Солин, С.В. Телегин. *Письма в ЖЭТФ*, 2016, т.104, с. 236–241.



Гигантская магнитострикция при переходе антиферромагнетик – ферромагнетик в $\text{La}_{0.75}\text{Sm}_{0.25}\text{Mn}_2\text{Si}_2$

Н.В. Мушников, Е.Г. Герасимов, В.С. Гавико, К.А. Язовских

Лаборатория ферромагнитных сплавов

Установлено, что магнитный фазовый переход антиферромагнетик – ферромагнетик (AF–F), наблюдаемый в интерметаллиде $\text{La}_{0.25}\text{Sm}_{0.75}\text{Mn}_2\text{Si}_2$ при увеличении температуры либо при приложении магнитного поля, сопровождается большой положительной объемной магнитострикцией $\omega = \Delta V/V = 2.8 \times 10^{-3}$, а также сильной анизотропной деформацией решетки: отрицательной вдоль кристаллографической c -оси и положительной в базисной плоскости кристалла. Показано, что магнитострикция связана с изменением межслойного Mn–Mn обменного взаимодействия при переходе. В области малых магнитных полей и объемная и анизотропная магнитострикция пропорциональны квадрату намагниченности. Индуцированное магнитным полем скашивание магнитных моментов приводит к максимальным магнитоупругим

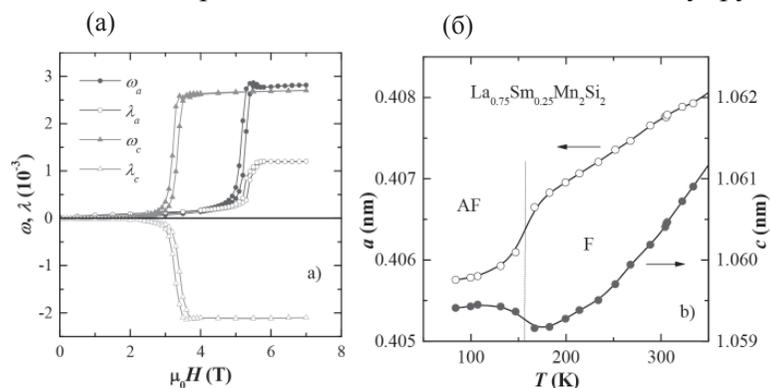


Рис. 1. Полевые зависимости объемной (ω) и анизотропной (λ) магнитострикции монокристалла $\text{La}_{0.25}\text{Sm}_{0.75}\text{Mn}_2\text{Si}_2$ при приложении магнитного поля вдоль c -оси (треугольники) и в базисной плоскости (кружки) – а. Температурная зависимость параметров решетки вблизи области спонтанного AF–F-перехода – б.

деформациям при приложении поля вдоль c -оси кристалла. Экспериментальные значения констант магнитоупругой связи хорошо согласуются с оценками на основе термодинамических соотношений. Вблизи температуры спонтанного перехода индуцированный магнитным полем переход AF–F может быть реализован в относительно небольших магнитных полях, что делает данные соединения привлекательными для практических приложений. Ферромагнитная фаза характеризуется пониженными значениями констант магнитострикции, несмотря на то, что в каждом отдельном слое Mn упорядочение магнитных моментов при переходе AF–F практически не изменяется. Полученные результаты свидетельствуют о том, что магнитоупругие эффекты в $\text{La}_{0.25}\text{Sm}_{0.75}\text{Mn}_2\text{Si}_2$ обусловлены изменением взаимной ориентации результирующих магнитных моментов марганца в соседних слоях [1–3].

Работа выполнена в рамках проекта РФФ 15-12-10015.

[1] N.V. Mushnikov, E.G. Gerasimov. *J. Alloys Compounds*, 2016, v. 676, p. 74–79.

[2] N.V. Mushnikov, E.G. Gerasimov, E.V. Rosenfeld, P.B. Terentyev, V.S. Gaviko. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2012, v. 324, p. 3410–3412.

[3] N.V. Mushnikov, E.G. Gerasimov, P.B. Terentyev, V.S. Gaviko, K.A. Yazovskikh, A.M. Aliev. *J. Magn. Magn. Mater.*, in press.

Неоднородное магнитное состояние и спиновая динамика в электронно-допированных кубических манганитах по данным ЯМР

З.Н. Волкова¹, А.Ю. Гермов¹, С.В. Верховский¹, К.Н. Михалёв¹,
А.П. Геращенко¹, А.В. Королев²

¹Лаборатория кинетических явлений

²Лаборатория ферромагнитных сплавов

Электронно-допированные манганиты с перовскитной структурой являются идеальными объектами для изучения механизма двойного обмена – ферромагнитного (ФМ) взаимодействия допированных электронов с локализованными спинами антиферромагнитно (АФ) упорядоченной решетки ионов Mn^{4+} . В последние годы интерес к этим оксидам значительно возрос, поскольку был обнаружен переход диэлектрик – металл в кубическом $SrMnO_3$ при уровне электронного допирования $\sim 2\%$ за счет гетеровалентного замещения Sr^{2+} на La^{3+} .

В настоящей работе из анализа ЯМР-спектров ^{55}Mn показано, что в манганитах $Sr_{1-x}La_xMnO_3$ ($0 \leq x \leq 0.04$) и $SrMnO_{3-y}$ ($y < 0.01$) имеет место неоднородное магнитное состояние, представляющее собой АФ-матрицу с включениями ФМ-кластеров, хорошо описываемых с помощью модели магнитных поляронов. Температура Кюри магнитных поляронов превышает температуру Нееля АФ-матрицы. Энергия термически активированных перескоков магнитных поляронов увеличивается с ростом концентрации вакансий в подрешетке кислорода для манганитов $SrMnO_{3-y}$, что исключает переход в металлическое состояние с ростом y . Получены данные о зарядовом распределении на позициях кислорода в АФ-матрице.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Спин» № 01201463330, по проекту фундаментальных исследований УрО РАН № 15-9-2-49. Результаты опубликованы в [1–5].

[1] А.Ю. Гермов, З.Н. Волкова, К.Н. Михалёв, С.В. Верховский, А.В. Королев, Е.И. Константинова, И.А. Леонидов, В.Л. Кожевников. *Письма в ЖЭТФ*, 2015, т. 102, в. 11, с. 847–851.

[2] A. Trokiner, S. Verkhovskii, Z. Volkova, A. Gerashenko, K. Mikhalev, A. Germov, A. Yakubovskii, A. Korolev, V. Dabrowski, A. Tyutyunnik. *Physical Review B*, 2016, v. 93, p. 174413.

[3] А.Ю. Гермов, З.Н. Волкова, К.Н. Михалёв, С.В. Верховский, А.В. Королев, Е.И. Голдырева, И.А. Леонидов, В.Л. Кожевников. *Тезисы доклада на XVI Всероссийской школе-семинаре по проблемам физики конденсированного состояния, Екатеринбург, 12–19 ноября 2015 г.*, с. 104.

[4] A. Germov, K. Mikhalev, A. Korolev, E. Konstantinova, I. Leonidov. *Book of Abstracts of XVIII International Scientific School “Actual problems of magnetic resonance and its application”*, Kazan, 26-30 October, 2015. p. 89–91.

[5] З.Н. Волкова, А.Ю. Гермов, К.Н. Михалёв, С.В. Верховский. *Тезисы доклада на 15 Международной школе-конференции «Проблемы физики твердого тела и высоких давлений»*, Сочи, 14-24 сентября 2016 г., с. 92–93.

Особенности структурного превращения в сплавах FePd и FePd–Ni и их влияние на магнитные гистерезисные свойства

Н.И. Власова, А.Г. Попов, Н.М. Клейнерман, В.В. Сериков,
В.С. Гавико, Л.А. Сташкова, Н.Н. Щеголева, О.А. Головня

Лаборатория ферромагнитных сплавов

Методами поляризационно-оптической и электронной микроскопии [1–3], рентгеноструктурного анализа [2–5], мессбауэровской спектроскопии [4–7] и магнитометрии исследованы структурные превращения в сплавах FePd и $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50-x}\text{Ni}_x$ ($x = 4$ и 8 ат %). Установлено, что процесс упорядочения ГЦК-(A1) фазы (пространственная группа – $Fm\bar{3}m$) в фазу $L1_0$ ($P4/mmm$) сопровождается появлением тетрагональной неупорядоченной фазы A6 ($I4/mmm$), упорядоченной фазы $L1_2$ ($Pm\bar{3}m$) и дополнительных областей различного состава и степени тетрагональности (рис. 1). Такое неоднородное структурное состояние является причиной низких значений максимальной коэрцитивной силы на зависимостях $H_c(t_{\text{отж}})$ в этих сплавах (рис. 2).

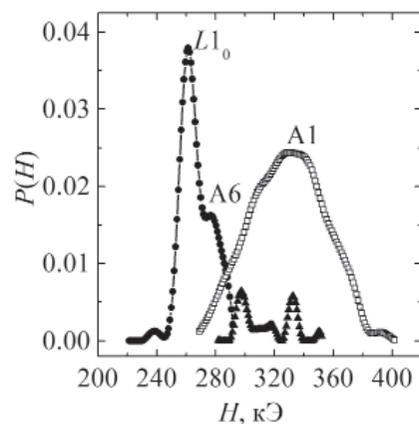


Рис. 1. Распределения $P(H)$ интенсивности мессбауэровских спектров сплава FePd после интенсивной пластической деформации (A1) и отжига при 450 °C, 40 ч ($L1_0$ и A6).

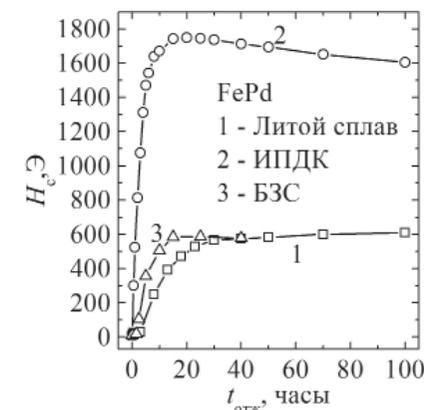


Рис. 2. Зависимость H_c образцов литых (1), деформированных (2) и быстрозакаленных (3) сплавов FePd от времени отжига при 450 °C.

Работа выполнена в рамках программы Президиума УрО РАН (проекты № 09-П-2-1035 и №15-9-2-19) и проекта РФФИ № 07_02_92180_НЦНИ_а.

[1] Н.И. Власова, Н.Н. Щеголева, А.Г. Попов, Г.С. Кандаурова. *ФММ*, 2010, т. 110, с. 470–485.

[2] N.I. Vlasova, V.S. Gaviko, A.G. Popov, N.N. Shchegoleva, L.A. Stashkova, D.V. Gunderov, X. Sauvage. *Solid State Phenom.*, 2011, v. 168–169, p. 392–395.

[3] N.I. Vlasova, A.G. Popov, N.N. Shchegoleva, V.S. Gaviko, L.A. Stashkova, G.S. Kandaurova, D.V. Gunderov. *Acta Mater.*, 2013, v. 61, p. 2560–2570.

[4] A.G. Popov, N.I. Vlasova, V.S. Gaviko, N.M. Kleinerman, V.V. Serikov, O.A. Golovnia. *Proc. The 24th International Workshop on Rare-Earth and Future Permanent Magnets and their Applications (REPM2016), Darmstadt, Germany, 2016, p. 425–433.*

[5] N.I. Vlasova, N.M. Kleinerman, V.V. Serikov, A.G. Popov. *J. Alloys Compd.*, 2014, v. 583, p. 191–197.

[6] N.M. Kleinerman, V.V. Serikov, N.I. Vlasova, A.G. Popov. *Известия РАН, сер. физическая*, 2017, т. 81, № 7 (в печати).

[7] A.G. Popov, N.I. Vlasova, V.S. Gaviko, N.M. Kleinerman, V.V. Serikov, O.A. Golovnia. *J. Alloys Compd.* 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.160>.

ИФМ УрО РАН приступил к изданию научно-образовательной
серии «Физика конденсированных сред»



Каждая книга этой серии посвящена отдельному разделу физики твердого тела. Книги рассчитаны на широкий круг читателей, но в первую очередь будут полезны студентам, бакалаврам и магистрам, начинающим свой научный путь.

В настоящее время вышли из печати:

1. Х.М. Биккин, И.И. Ляпилин. **Неравновесная термодинамика и физическая кинетика.**
2. Т.Г. Рудницкая, Ю.А. Изюмов. **Элементарные частицы и фундаментальные взаимодействия.**
3. А.Б. Борисов. **Начала нелинейной механики.**
4. В.В. Киселев. **Квантовая макрофизика.**
5. Л.Е. Карькина, Л.И. Яковенкова. **Моделирование атомной структуры дефектов в кристаллах.**
6. Б.Н. Филиппов, И.И. Косицына, М.А. Гервасьев. **Упрочнение и защита поверхности металлов.**
7. А.П. Танкеев, М.А. Борич. **Дифференциальные уравнения математической физики для начинающих.**
8. А.Б. Борисов, В.В. Зверев. **Введение в регулярную и хаотическую динамику.**
9. В.М. Счастливцев, В.И. Зельдович. **Физические основы металловедения.**

Ответственный за выпуск
доктор физ.-мат. наук **А.П. Носов**

РОССИЯ, Институт физики металлов УрО РАН,
620137, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18
Телефон: (343) 374-02-03 Факс: (343) 374-52-44
E-mail: physics@imp.uran.ru

Отпечатано на ризографе ИФМ УрО РАН. Заказ № 11
Формат 60×84 1/16, 4,9 печ. л. Тираж 140 экз.
620137, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18