

**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 2015 года**

Тезисы докладов

28 марта – 1 апреля 2016 года

г. Екатеринбург
2016

Глубокоуважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в работе научной сессии Института физики металлов УрО РАН по итогам 2015 года, которая состоится 28 марта– 1 апреля 2016 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

© ИМФ УрО РАН

Содержание

Электронные свойства конденсированных сред

Негомогенное распределение атомов металлов и кислорода в оксидных наночастицах.

*В.Б. Выходец, Е.А.А. Jarvis, Т.Е. Куренных, И.В. Бекетов,
С.И. Обухов, О.М. Саматов, А.И. Медведев,
А.Э. Давлетшин, Т.Н. Whyte* 14

Кумулянтное t -разложение для сильнокоррелированных фермионов.

А. К. Журавлев 16

Спиральный магнитный порядок, электронные корреляции и фазовое расслоение в металлических системах.

П.А. Игошев, Т.В. Антипин, В.Ю. Ирхин 18

Переходы плато-плато квантового эффекта Холла в полупроводниковых гетероструктурах на основе арсенида галлия.

*А.С. Клепикова, Ю.Г. Арапов,
С.В. Гудина, В.Н. Неверов, А.П. Савельев, Г.И. Харус,
Н.Г. Шелушинина, М.В. Якунин* 20

Свойства радиационно-аморфизованных сплавов $Nd_2Fe_{14}B$ и $Er_2Fe_{14}B$.

*А.Н. Пирогов, А.Е. Теплых, Ю.Г. Чукалкин,
С.Г. Богданов, Н.В. Кудреватых, Ю.Н. Скрябин,
А.В. Андреев* 22

Реализация в компьютерных кодах метода когерентного потенциала для расчета электронной структуры и магнитных свойств соединений, характеризующихся непренебрежимыми статическими электронными корреляциями и спин-орбитальным взаимодействием.	
<i>М.А. Коротин, Н.А. Скориков</i>	24
Фокусировка фононов и фононный транспорт в монокристаллических пленках.	
<i>И.И. Кулеев, И.Г. Кулеев, С.М. Бахарев, В.В. Устинов</i>	26
Описание экспериментальных свойств низкоразмерных магнетиков на основе первопринципных расчетов параметров модели Гайзенберга.	
<i>З.В. Пчёлкина, С.В. Стрельцов</i>	28
Структура и физико-механические свойства конденсированных сред	
Теория зернограничной диффузии атомов на переходной стадии между С- и В-режимами диффузионного отжига.	
<i>А.Г. Кесарев, В.В. Кондратьев, И.Л. Ломаев</i>	30
Влияние частичной замены иттрия кальцием на структуру и свойства сверхпроводника $Y_{0.9}Ca_{0.1}Ba_2Cu_3O_{6.8}$.	
<i>Ю.В. Блинова, Л.А. Черепанова, Т.П. Криницина, Е.И. Кузнецова, С.В. Сударева, С.Г. Титова, С.В. Пряничников, М.В. Дегтярев</i>	32

**Прогнозирование размера аустенитного зерна
конструкционных сталей, микролегированных
несколькими карбонитридообразующими элементами,
на основе кинетического моделирования.**

А.Ю. Пасынков, И.И. Горбачёв, В.В. Попов 34

**Определение и прогнозирование плотности
дислокаций и распухания методом нейтронографии
высокого разрешения в облученных нейтронами
оболочках ТВЭЛ.**

*В.И. Воронин, Б.Н. Гощицкий, В.В. Сагарадзе,
Э.З. Валиев, Н.В. Проскурнина, Н.В. Катаева* 36

**Мегапластическая деформация магния
при комнатной температуре: методики, структура,
текстура и механические свойства.**

*А.Ю. Волков, О.В. Антонова, Б.И. Каменецкий,
А.В. Александров, А.Л. Соколов, Д.А. Комкова* 38

**Влияние высокого давления на пластичность
хрупких материалов.**

*В.П. Пилюгин, Б.А. Гринберг, М.А. Иванов,
Т.П. Толмачёв, А.М Власова, А.В Плотников* 40

**Термоупругие мартенситные превращения
в сплавах системы TiNi-TiCu.**

*В.Г. Пушин, Н.Н. Куранова, А.В. Пушин, В.В. Макаров,
А.В. Королев, Н.И. Коуров* 42

**Термоупругие и магнитоупругие мартенситные
превращения в сплавах системы Ni-Mn-Ga.**

*В.Г. Пушин, Е.Б. Марченкова, Е.С. Белослудцева,
Н.Н. Куранова, А.Н. Уксусников, В.А. Казанцев,
Н.И. Коуров, А.В. Королев, А.Г. Попов* 44

Динамическая прочность и механизмы разрушения субмикроструктурных алюминиевых сплавов, полученных методом динамического канально-углового прессования. <i>А.Н. Петрова, И.Г. Бродова, С.В. Разоренов</i>	46
Релаксация энергии мегапластической деформации при механическом сплавлении в Fe–Ni-сплавах. <i>В.А. Шабашов, В.В. Сагарадзе, А.В. Литвинов, А.Е. Заматовский</i>	48
Финишная наноструктурирующая фрикционная обработка стальных поверхностей. <i>А.В. Макаров, Л.Г. Кориунов, В.П. Кузнецов, Р.А. Саврай</i>	50
Магнетизм	
Коллинеарное магнитное и сегнетоэлектрическое упорядочение в оксидах $R\text{Mn}_2\text{O}_5$. <i>В.В. Меньшенин</i>	52
Гигантские эффекты магнитоотражения и магнитопротекания света в монокристаллах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Cr}_2\text{Se}_4$. <i>А.В. Телегин, Ю.П. Сухоруков, Н.Н. Лошкарёва, Н.Г. Бебенин, Е.В. Мостовицкова, С.В. Наумов, Р.И. Зайнуллина, В.Д. Бессонов, Е.И. Патраков, А.А. Бучкевич, В.А. Федоров, Т.К. Меницкова</i>	54
Динамика топологических солитонов в движущихся доменных границах. <i>Б.Н. Филиппов, В.В. Зверев, М.Н. Дубовик</i>	56

Магнитный линейный дихроизм в пленке $\text{ViFe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$ в ИК-диапазоне.

Е.В. Мостовщикова, Н.Н. Лошкарёва, С.В. Наумов 58

Магнитокалорический эффект в монокристаллах CdCr_2Se_4 и HgCr_2Se_4 .

Н.Г. Бебенин, Р.И. Зайнуллина, Ю.П. Сухоруков 60

Увеличение размера магнитного полярона как причина необычных транспортных свойств слоистого манганита $\text{La}_{1.2}\text{Sr}_{1.8}\text{Mn}_2\text{O}_7$.

Н.И. Солин 62

Методы и средства структурного анализа и фазового контроля ответственных изделий из аустенитных сталей и сплавов, подверженных деформированию.

М.Б. Ригмант, А.П. Ничипурук, М.К. Корх, М.С. Огнева 64

Новый тип стабильных частицеподобных состояний в киральных магнетиках.

Ф.Н. Рыбаков, А.Б. Борисов, S. Blügel, N.S. Kiselev 66

Фрустрации и фазовые переходы в низкоразмерных магнитных системах.

Ф.А. Кассан-Оглы, А.И. Прошкин 68

Новый метод выявления и визуализации микротрещин в металлических изделиях.

О.А. Булычев, С.А. Шлеенков, А.С. Шлеенков 70

Необычное поведение электросопротивления соединений R_7Rh_3 ($R = Gd, Tb, Ho$) в парамагнитной области, вызванное ближним антиферромагнитным порядком.

Н.В. Баранов, Т. Tsutaoka, Е.Г. Герасимов, П.Б. Терентьев, А.В. Прошкин, А.А. Шерстобитов 72

Осциллирующее межслойное взаимодействие и эффекты близости в сверхрешетках Fe/Cr/Gd.

Е.А. Кравцов, М.А. Миляев, Л.И. Наумова, В.В. Проглядо, М.В. Рябухина, В.В. Устинов 74

Исследование мультиферроника $CuCrO_2$ методом ЯМР ^{53}Cr .

А.Г. Смольников, В.В. Оглобличев, С.В. Верховский, К.Н. Михалев, А.Ф. Садыков, Ю.В. Пискунов, А.П. Геращенко 76

Contents

Electronic properties of condensed matter

Inhomogeneous depletion of metal and oxygen atoms in metal oxide nanoparticles.

V.B. Vykhodets, E.A.A. Jarvis, T.E. Kurennykh, I.V. Beketov, S.I. Obukhov, O.M. Samatov, A.I. Medvedev, A.E. Davletshin, T.H. White 14

Cumulant t -expansion for strongly correlated fermions.

A.K. Zhuravlev 16

Spiral magnetic order, electronic correlations and phase separation in metallic systems.	
<i>P.A. Igoshev, T.V. Antipin, V.Yu. Irkhin</i>	18
Plateau-plateau transitions in the quantum Hall regime in semiconductor heterostructures based on gallium arsenide.	
<i>A.S. Klepikova, Y.G. Arapov, S.V. Gudina, V.N. Neverov, A.P. Saveliev, G.I. Harus, N.G. Shelushinina, M.V. Yakunin</i>	20
Properties of irradiated-amorphous alloys $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ and $\text{Er}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$.	
<i>A. N. Pirogov, A. E. Teplykh, Yu. G. Chukalkin, S. G. Bogdanov, N. V. Kudrevatykh, Yu. N. Skryabin, A. V. Andreev</i>	22
Implementation of coherent potential approximation in computer codes for calculating the electronic structure and magnetic properties of the compounds characterized by not-negligible static electron correlations and spin-orbit coupling	
<i>M.A. Korotin, N.A. Skorikov</i>	24
Phonon focusing and phonon transport single-crystal nanofilms.	
<i>I. I. Kuleyev, I. G. Kuleyev, S. M. Bakharev and V. V. Ustinov</i>	26
Description of experimental properties of low dimensional magnetic materials on the base of first-principle calculated parameters of the Heisenberg model.	
<i>Z.V. Pchelkina, S.V. Streltsov</i>	28

Structure and physico-mechanical properties of condensed matter

Theory of the atomic grain boundary diffusion in a transition stage interposed between C-mode and B-mode of the diffusion annealing.

A.G. Kesarev, V.V. Kondratyev, I.L. Lomayev 30

Effect of partial substitution of calcium for yttrium on the structure and properties of the $Y_{0.9}Ca_{0.1}Ba_2Cu_3O_{6.8}$ superconductor.

Yu.V. Blinova, L.A. Cherepanova, T.P. Krinitsina, E.I. Kuznetsova, S.V. Sudareva, S.G. Titova, S.V. Pryanichnikov, M.V. Degtyare 32

Prediction of austenite grain size of constructional steels micro-alloyed with several carbonitride-forming elements, based on kinetic simulation.

A. Yu. Pasyнков, I. I. Gorbachev, V. V. Popov 34

Measurement and forecasting of swelling and density of dislocations with using of high resolution neutron diffraction in fuel cans irradiated by fast neutrons.

V.I. Voronin, B.N. Goschitskii, V.V. Sagaradze, E.Z. Valiev, N.V. Proskurnina, N.V. Kataeva 36

Severe plastic deformation of magnesium at room temperature: techniques, structure, texture and the mechanical properties.

A.Yu. Volkov, O.V. Antonova, B.I. Kamenetskii, A.V. Alexandrov, A.L. Sokolov, D.A. Komkova 38

Effect of high pressure on the ductility of brittle materials. <i>V.P. Pilyugin, B.A. Grinberg, M.A. Ivanov, T.P. Tolmachev, A.M. Vlasova, A.V. Plotnikov</i>	40
Thermoelastic martensitic transformations in alloys of TiNi–TiCu system. <i>V.G. Pushin, N.N. Kuranova, A.V. Pushin, V.V. Makarov, A.V. Korolev, N.I. Kourov</i>	42
Thermoelastic and magnetoelastic martensitic transformations in alloys of the Ni–Mn–Ga system. <i>V.G. Pushin, E.B. Marchenkova, E.S. Beloshudtseva, N.N. Kuranova, A.N. Uksusnikov, V.A. Kazantsev, N.I. Kourov, A.V. Korolev, A.G. Popov</i>	44
Dynamic strength and mechanisms of spalling of submicrocrystalline aluminum alloys produced by dynamic channel angular pressing. <i>A.N. Petrova, I.G. Brodova, S.V. Razorenov</i>	46
Relaxation energy of megaplastic deformation during mechanical alloying in Fe–Ni alloys. <i>V.A. Shabashov, V.V. Sagaradze, A.V. Litvinov, A.E. Zamatovsky</i>	48
Finishing nanostructuring frictional treatment of steel surfaces. <i>A.V. Makarov, L.G. Korshunov, V.P. Kuznetsov, R.A. Savrai</i>	50

M a g n e t i s m

Collinear magnetic and ferroelectric ordering in RMn_2O_5 oxides.

V.V. Men'shenin 52

Giant magnetotransmission and magnetoreflexion effects in $Hg_{1-x}Cd_xCr_2Se_4$ single crystals.

*A.V. Telegin, Yu.P. Sukhorukov, N.N. Loshkareva,
N.G. Bebenin, E.V. Mostovshchikova, S.V. Naumov,
R.I. Zainullina, V.D. Bessonov, E.I. Patrakov,
A.A. Buchkevitch, V.A. Fedorov, T.K. Menschikova* 54

Dynamics of topological solitons in moving domain walls.

B.N. Filippov, V.V. Zverev, M.N. Dubovik 56

Magnetic linear dichroism in $BiFe_{0.5}Co_{0.5}O_3$ film in IR range.

E.V. Mostovshchikova, N.N. Loshkareva, S.V. Naumov 58

Magnetocaloric effect and inhomogeneity of $CdCr_2Se_4$ and $HgCr_2Se_4$ single crystals.

N.G. Bebenin, R.I. Zainullina, Yu P. Sukhorukov 60

Increasing the size of the magnetic polaron as a reason of unusual transport properties of layered $La_{1.2}Sr_{1.8}Mn_2O_7$ manganite.

N.I. Solin 62

Methods and tools for structural analysis and phase control of critical parts of austenitic steels and alloys subjected to deformation.

*M.B. Rigmant, A.P. Nichipuruk,
M.K. Korkh, M.S. Ogneva* 64

New type of stable particlelike states in chiral magnets. <i>F.N. Rybakov, A.B. Borisov, S. Blügel, N.S. Kiselev</i>	66
Frustrations and phase transitions in low-dimensional magnetic systems. <i>F.A. Kassan-Ogly, A.I. Proshkin</i>	68
A new method for detection and visualization of microcracks in metal products. <i>O.A. Bulychev, S.A. Shleenkov, A.S. Shleenkov</i>	70
Unusual behavior of the electrical resistivity of $R_7\text{Rh}_3$ ($R = \text{Gd, Tb, Ho}$) in the paramagnetic region caused by short-range antiferromagnetic order. <i>N.V. Baranov, T. Tsutaoka, E.G. Gerasimov, P.B. Terentev, A.V. Proshkin, A.A. Sherstobitov</i>	72
Oscillating interlayer coupling and proximity effects in Fe/Cr/Gdsuperlattices. <i>E.A. Kravtsov, M.A. Milyaev, L.I. Naumova, V.V. Proglyado, M.V. Ryabukhina, V.V. Ustinov</i>	74
NMR ^{53}Cr study of multiferroic CuCrO_2. <i>A.G. Smol'nikov, V.V. Ogloblichev, S.V. Verkhovskii, K.N. Mikhalev, A.F. Sadykov, Yu.V. Piskunov, A.P. Gerashchenko</i>	76

Негомогенное распределение атомов металлов и кислорода в оксидных наночастицах

В.Б. Выходец¹, Е.А.А. Jarvis³, Т.Е. Куренных¹, И.В. Бекетов², С.И. Обухов¹, О.М. Саматов², А.И. Медведев², А.Э. Давлетшин¹, Т.Н. Whyte³

¹Лаборатория нанокompозитных мультиферроиков

²Институт электрофизики УрО РАН

³Loyola Marymount University, Los Angeles, USA

Получены данные о негомогенном распределении ионов кислорода в кристаллических наночастицах Al_2O_3 и кубического диоксида циркония, стабилизированного иттрием. Ядро частиц имеет стехиометрический состав, а в наружном монослое атомы кислорода отсутствуют. Информация получена с помощью оригинального подхода, который включает синтез нанопорошков, обогащенных изотопом O-18, и измерение в них средних концентраций O-16 и O-18 с помощью методики ядерного микроанализа. Этот подход позволяет измерить отклонения от стехиометрии в кристаллической решетке наночастиц и определить пространственное положение кислородного дефицита в наночастицах на высоком метрологическом уровне: регистрируемые отклонения от стехиометрии находятся на уровне процентов, а локальность измерений сопоставима с межатомным расстоянием. Нанопорошки были синтезированы с помощью высокотемпературной технологии – лазерным испарением керамической мишени, эксперименты проводились на порошках с размером частиц от 4 до 30 нм. Для обоих оксидов кислородный дефицит зарегистрирован при температуре синтеза нанопорошков. Для диоксида циркония было также установлено, что отклонения от стехиометрии сохраняются и при комнатной

температуре. Аналогичный результат по распределению ионов кислорода вблизи поверхности монокристалла диоксида циркония был получен в работе с помощью теории функционала плотности (DFT) для термодинамически равновесного состояния кристалла. Согласно DFT, кислородный дефицит в диоксиде циркония приводит к кардинальным изменениям плотности состояний (DOS) кристалла. Если для стехиометрического оксида она соответствует диэлектрику, то для кристалла с дефицитом кислорода поверхностные DOS подобны таковым для чистого металлического циркония. Таким образом, оксидные наночастицы, сформированные лазерным испарением, отличаются от массивных образцов не только по удельной поверхности, но и по среднему содержанию кислорода в кристаллической решетке и электронным свойствам.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 15-03-06617) и УрО РАН (проекты 12-И-2-2041 и 15-17-2-10). Результаты опубликованы в [1–4].

- [1] V.B. Vykhodets, E.A.A. Jarvis, T.E. Kurennykh, I.V. Beketov, S.I. Obukhov, O.M. Samatov, A.I. Medvedev, A.E. Davletshin. *Surface Science* 2014, v. 630, p. 182–186.
- [2] V.B. Vykhodets, E.A.A. Jarvis, T.E. Kurennykh, I.V. Beketov, S.I. Obukhov, O.M. Samatov, A.I. Medvedev, A.E. Davletshin, T.H. Whyte. *Surface Science* 2016, v. 644, p. 141–147.
- [3] В.Б. Выходец, Т.Е. Куренных, О.М. Самагов, С.И. Обухов, И.В. Бекетов, А.И. Медведев. *Тез. докл. XLIV международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, 2014, с. 114.*
- [4] В.Б. Выходец, Т.Е. Куренных, О.А. Нефедова. *Diagnostics, resource and mechanics of materials and structures* 2015, вып. 5, с. 31–44.

Кумулянтное t -разложение для сильнокоррелированных фермионов

А.К. Журавлев

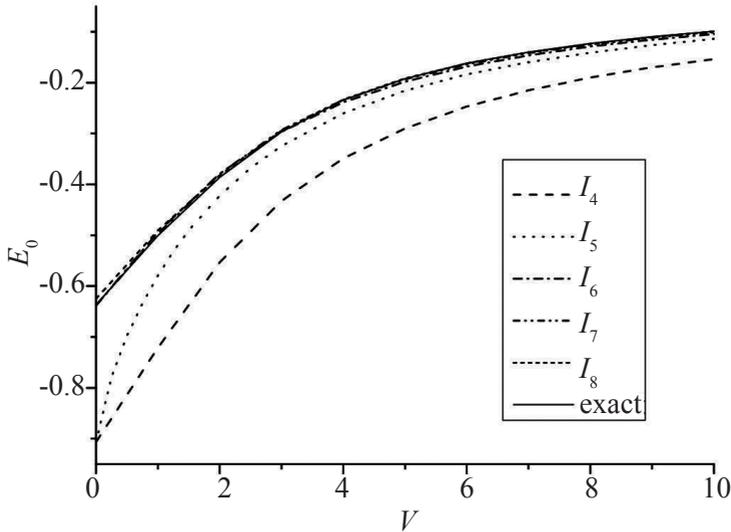
Лаборатория квантовой теории конденсированного состояния

Существует теорема Хорна и Вайнштейна, формально позволяющая вычислить энергию основного состояния квантовой системы. Пусть даны гамильтониан \mathbf{H} и некоторое затравочное состояние $|\Phi_0\rangle$. Определим моменты $\mu_n = \langle \Phi_0 | H^n | \Phi_0 \rangle$ и введем вспомогательную функцию $E(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{I_{n+1}}{n!} (-t)^n$, где величины $I_{n+1} = \mu_{n+1} - \sum_{p=0}^{n-1} C_n^p I_{p+1} \mu_{n-p}$ — кумулянты. Тогда $E_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} E(t)$ является минимальным собственным значением уравнения Шредингера $H|\Psi_0\rangle = E_0|\Psi_0\rangle$ при условии, что $\langle \Psi_0 | \Phi_0 \rangle \neq 0$.

Однако эта теорема не нашла практического применения для взаимодействующих электронов на решетке или в молекуле по двум причинам: 1) сложность вычисления кумулянтов I_n резко возрастает с увеличением n для сколько-нибудь реалистичной модели, 2) трудно получить заслуживающую доверия оценку предела $E(t \rightarrow \infty)$, зная лишь конечное число кумулянтов.

В данной работе разработан метод автоматического вычисления кумулянтов, подходящий для широкого класса моделей сильно коррелированных электронов. Проведено исследование имеющихся в литературе методов вычисления предела $E(t \rightarrow \infty)$ и предложен новый метод, несколько более эффективный, чем лучший из существующих. В качестве иллюстрации возможностей метода точно вычислены все кумулянты до 8-го порядка для полузаполненной модели бесспиновых фермионов. Для одно-, двух- и трехмерной версий этой модели получены быстро сходящиеся

с ростом числа известных кумулянтов последовательности приближений для энергии основного состояния; для одномерного случая проведено сравнение с известным точным решением (см. рисунок).



Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Электрон», № 01201463326). Результаты опубликованы в [1, 2].

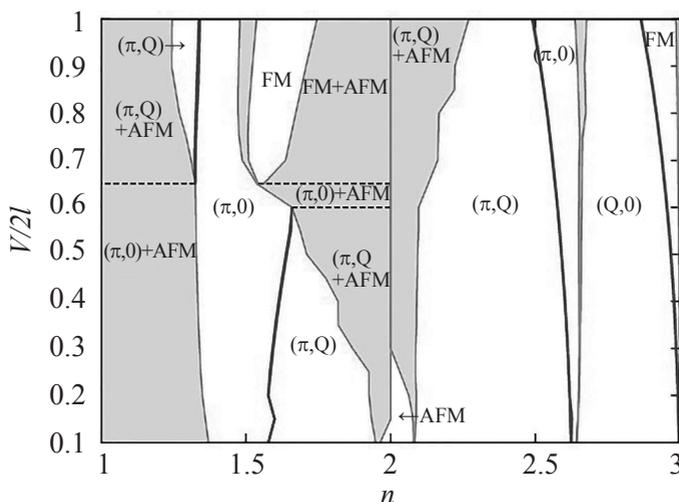
- [1] А.К. Журавлев. *Сб. тез. XVI Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества, Екатеринбург, 2015, с. 212.*
- [2] А.К. Zhuravlev. *ArXiv:1510.05857 (2015).*

Спиральный магнитный порядок, электронные корреляции и фазовое расслоение в металлических системах

П.А. Игошев, Т.В. Антипин, В.Ю. Ирхин

Лаборатория квантовой теории конденсированного состояния

Получены магнитные фазовые диаграммы основного состояния металлических систем для различных кубических решеток (ПК, ОЦК, ГЦК) без вырождения электронного спектра и для квадратной решетки в случае орбитального вырождения (см. рисунок).



Магнитная фазовая диаграмма основного состояния периодической модели Андерсона для квадратной решетки в обобщенном приближении Хартри–Фока в переменных концентрации n – гибридизация V , $U = 12t$, $\varepsilon_d = -0.4t$.

Исследовано формирование спирального магнитного порядка для предельных случаев сильно локализованного

d -состояния и сильного кулоновского взаимодействия, но слабо локализованного d -состояния. Показано, что в последнем случае имеет место значительная область фазового расслоения и спирального порядка. Для кубических решеток подробно исследована роль корреляций и показано, что приближение Хартри–Фока существенно переоценивает энергию парамагнитной фазы, и лишь незначительно — энергию всякой магнитной фазы. Результаты позволяют объяснить особенности магнитного порядка в многоорбитальных соединениях переходных металлов.

Работа поддержана проектами ОФН РАН 12-Т-2-1001, 12-Т-3-1001, 14-2-НП-273 (УрО РАН), проектами РФФИ 12-02-00632-а, 14-02-31603-мол-а. Результаты опубликованы в [1–5].

- [1] P.A. Igoshev, M.A. Timirgazin, V.F. Gilmutdinov, A.K. Arzhnikov, V.Yu. Irkhin. *JMMM*, 2015, v. 383, p. 2–7.
- [2] P.A. Igoshev, M.A. Timirgazin, V.F. Gilmutdinov, A.K. Arzhnikov, V.Yu. Irkhin. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2015, v. 27, p. 446002.
- [3] П.А. Игошев, М.А. Тимиргазин, А.К. Аржников, В.Ю. Ирхин. *Письма в ЖЭТФ*, 1013, т. 98, 172–177.
- [4] П.А. Игошев, Т.В. Антипин, В.Ю. Ирхин. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 2015, т. 11, с. 619–624.
- [5] P.A. Igoshev, M.A. Timirgazin, A.K. Arzhnikov, V.Yu. Irkhin. *Moscow International Symposium on Magnetism «MISM-2014»*. *Books of Abstracts*, 2014, с. 651.

Переходы плато-плато квантового эффекта Холла в полупроводниковых гетероструктурах на основе арсенида галлия

А.С. Клепикова¹, Ю.Г. Арапов², С.В. Гудина², В.Н. Неверов¹,
А.П. Савельев², Г.И. Харус², Н.Г. Шелушина², М.В. Якунин²

¹Лаборатория углеродных наноматериалов

²Лаборатория полупроводников и полуметаллов

Проведены исследования продольной и холловской компонент тензора магнитосопротивления для гетероструктур с одиночной и двойной квантовой ямой InGaAs/GaAs после ИК-подсветки в режиме целочисленного квантового эффекта Холла (рис.1). Области квантовых фазовых переходов плато-плато проанализированы на основе современных представлений гипотезы двухпараметрического скейлинга.

Анализ температурной зависимости максимальных (пиковых) значений продольной проводимости (рис.2) позволил оценить величину второго (irrelevant) критического индекса, μ_σ , для

0^+ -пика в структуре с одиночной квантовой ямой InGaAs/GaAs и для пиков 1^- и 1^+ в структуре с двойной квантовой ямой InGaAs/GaAs.

В комбинации с первым (relevant) критическим индексом, κ , результаты следующие: $\kappa = 0.25 \pm 0.04$ (при $T < 2\text{K}$); $\mu_\sigma \approx 1.2$ для 0^+ -пика в одиночной квантовой яме, $\kappa = 0.21 \pm 0.02$; $\mu_\sigma \approx 1.0$

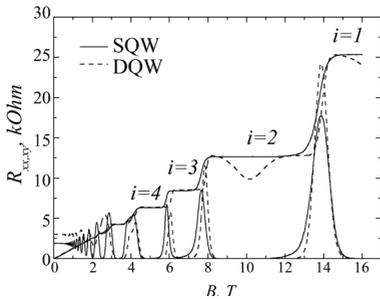


Рис.1. Зависимости $R_{xx}(B)$ и $R_{xy}(B)$ при $T=0,05\text{ K}$ для образцов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ с одиночной и двойной квантовой ямой после засветки инфракрасным светом.

для пиков 1^- и 1^+ в двойной квантовой яме. Полученные величины μ_σ по порядку величины соответствуют экспериментально найденным ранее значениям, но существенно превышают значения, получаемые из численных расчетов. Полученные величины κ говорят о наличии короткомасштабного примесного потенциала электрон-электронного взаимодействия в исследованных образцах [1–3].

Работа выполнена в рамках государственного задания «Спин» № 01201463330 (проекты №12-П-2-1051 и №14-2-НП-33) и при поддержке РФФИ (проекты № 14-02-31164 и № 14-02-00151).

- [1] Ю.Г. Арапов, С.В. Гудина, А.С. Клепикова, В.Н. Неверов, Н.Г. Шелушинина, М.В. Якунин. *ФТП*, 2015, т.49, №2, с. 186-191.
- [2] Ю.Г. Арапов, С.В. Гудина, А.С. Клепикова, В.Н. Неверов, Г.И. Харус, Н.Г. Шелушинина, М.В. Якунин. *ФНТ*, 2015, т.41, №2, с.139-146.
- [3] Ю.Г. Арапов, С.В. Гудина, В.Н. Неверов, С.М. Подгорных, А.П. Савельев, М.В. Якунин. *ФНТ*, 2015, т. 41, № 3, с. 289–303.

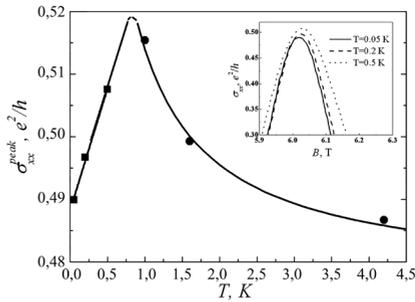


Рис.2. Максимумы проводимости, σ_{xx}^{peak} , как функция температуры для пика 1^+ (переход 3→4) в освещенном образце с двойной квантовой ямой InGaAs/GaAs. На вставке: магнитопольевые зависимости продольной проводимости для пика 1^+ .

Свойства радиационно-аморфизованных сплавов $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$ и $\text{Er}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$

А.Н. Пирогов¹, А.Е. Теплых¹, Ю.Г. Чукалкин¹, С.Г. Богданов¹,
Н.В. Кудреватых², Ю.Н. Скрябин¹, А.В. Андреев³

¹Лаборатория нейтронных исследований вещества

²Институт естественных наук, Уральский федеральный университет, Екатеринбург

³Институт физики Академии наук, Прага, Чехия

Одна из идей увеличения намагниченности постоянных магнитов на основе сплавов Nd–Fe–V заключается в создании композитного материала, состоящего из нанозерен обменно-связанных магнитотвердой и магнитомягкой фаз. Для этого нужно получить полностью аморфное состояние сплава Nd–Fe–V, а затем с помощью последующей обработки достичь однонаправленного когерентного роста нанозерен. В этой связи актуальным является поиск новых способов аморфизации таких сплавов и изучение свойств возникшего структурного состояния.

Мы облучили сплавы $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$ и $\text{Er}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$ быстрыми нейтронами до флюенса 1.2×10^{20} н/см². Нейтронограммы свидетельствуют (рис. 1), что достигнуто аморфное состо-

яние фазы $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$. Узкие рефлексы на рис. 1б происходят от рассеяния нейтронов на частицах железа.

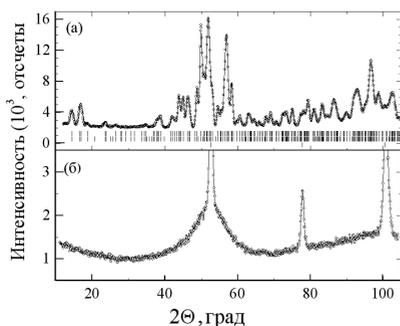


Рис. 1. Нейтронограммы $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$ до и после облучения флюенсом 1.2×10^{20} н/см². Точки – эксперимент, линия – расчет, штрихи – угловые положения ядерных и магнитных рефлексов.

Проведенные нами измерения основных магнитных свойств аморфных $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и $\text{Er}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ показали, что намагниченность насыщения фазы $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ почти не изменилась, а температура Кюри понизилась на 100 К по сравнению с их значениями в кристаллическом образце. Коэрцитивная сила уменьшилась, практически до нуля.

Мы установили, что кристаллическое состояние образцов $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и $\text{Er}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ восстанавливается после отжига при 735 К. Коэрцитивная сила резко возрастает после отжига в интервале 800 – 1000 К (рис. 2).

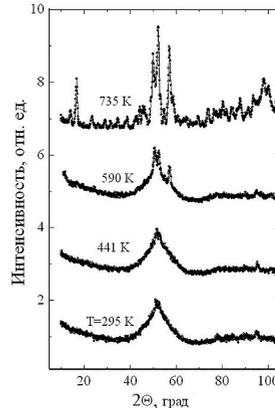


Рис. 2. Эволюция нейтронограмм сплава $\text{Er}_2\text{Fe}_{13.8}\text{B}$ в процессе изохронных отжигов. Нейтронограммы смещены по вертикальной оси для ясности.

Государственное задание, тема «Поток», РФФИ (проект № 12-02-12065-офи_м). Результаты опубликованы в [1–4].

- [1] A.E. Teplykh, Yu.G. Chukalkin, S. Lee, S.G. Bogdanov, N.V. Kudrevatykh, E.V. Rosenfeld, Yu.N. Skryabin, Y. Choi, A.V. Andreev, A.N. Pirogov. *JALCOM*, 2013, v. 581, p. 423–430.
- [2] Yu.G. Chukalkin, A.E. Teplykh, N.V. Kudrevatykh, K.N. Choo, S. Lee, A.V. Andreev, A.N. Pirogov. *JALCOM*, 2014, v. 615, p. 75–78.
- [3] Ю. Г. Чукалкин, А. Е. Теплых, Н. В. Кудреватых, С. Г. Богданов, К. Н. Чу, С. Ли, А. В. Андреев, А. Н. Пирогов. *ФММ*, 2015, т. 116, № 3, с. 254–259.
- [4] В. И. Бобровский, В.И. Воронин, А.Н. Пирогов, Ю.Г. Чукалкин. *Вестник РФФИ*, 2015, №2 (86), с. 72–78.

Реализация в компьютерных кодах метода когерентного потенциала для расчета электронной структуры и магнитных свойств соединений, характеризующихся непренебрежимыми статическими электронными корреляциями и спин-орбитальным взаимодействием

М.А. Коротин, Н.А. Скориков
Лаборатория рентгеновской спектроскопии

Созданная компьютерная программа [1] предназначена для расчета спектральных и магнитных свойств соединений с наличием неупорядоченных примесей и/или нестехиометрических твердых растворов методом когерентного потенциала, впервые реализованного в формализме температурных функций Грина в базе локализованных функций Ванье. В программу заложена возможность учета как статических кулоновских корреляций в d - и f -электронных оболочках атомов, так и спин-орбитального взаимодействия.

Продемонстрирована широкая функциональность данной программы для теоретического описания спектральных и магнитных свойств разнообразных систем на примерах нестехиометрических ($\text{CaCo}_{1.86}\text{As}_2$ [2], LaMnO_{3-x} [3], $\text{SrFeO}_{2.5}$ [4], PuO_{2-x} [5], UO_{2+y} [5]) и легированных ($\text{TiO}_2:\text{Fe}$, $\text{GdNi}_2:\text{Mn}$) соединений и твердых растворов NiO-ZnO .

Для примера кратко опишем [5], как созданная программа метода когерентного потенциала была применена для исследования электронной структуры сверхстехиометрического диоксида урана $\text{UO}_{2.12}$, содержащего избыточный кислород как примесь внедрения. В качестве модели для элементарной ячейки $\text{UO}_{2.12}$ рассматривался кластер Виллиса. Пошагово исследованы изменения и физические причины изменений в электронной структуре и магнетизме

при изменении состава от UO_2 к $\text{UO}_{1.87}$ (нестехиометрия по кислородной подрешетке), $\text{UO}_{1.87}\text{O}'_{0.13}$ (нестехиометрия по кислородной подрешетке + примесь внедрения в специальные узлы кластера Виллиса), и, наконец, к $\text{UO}_{1.87}\text{O}'_{0.13}\text{O}''_{0.12}$ (нестехиометрия по кислородной подрешетке + примеси внедрения в два типа специальных узлов кластера Виллиса). В отличие от подхода сверхячейки, где примеси пространственно упорядочены в кристалле, и вычисленный спектр имеет изоляторный характер, метод когерентного потенциала, где примеси равномерно распределены в узлах ячейки, приводит к металлическому характеру спектра $\text{UO}_{2.12}$. Для выбора модели (сверхячейка — когерентный потенциал), подходящей для описания спектральных и магнитных свойств сверхстехиометрического диоксида урана, необходимы экспериментальные измерения проводимости.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ 14-12-00473.

- [1] М.А. Коротин, Н.А. Скориков. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015619063 Yeti. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 24 августа 2015 г.*
- [2] М.А. Korotin, Z.V. Pchelkina, N.A. Skorikov, V.I. Anisimov, A.O. Shorikov. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2015, v. 27, № 045502 (5 pages).
- [3] М.А. Korotin, N.A. Skorikov. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, v. 383, p. 23–26.
- [4] М.А. Коротин, В.М. Зайнуллина, В.Л. Кожевников. *Письма в ЖЭТФ*, 2015, т. 102, вып.5, с. 339–343.
- [5] Michael Korotin. *Book of Abstracts of International Symposium and Workshop “Electronic Structure Theory for the Accelerated Design of Structural Materials”*, National University of Science and Technology “MISiS”, Moscow, Russia, 25–30 October 2015, p. 77.

Фокусировка фононов и фононный транспорт в монокристаллических пленках

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

¹Лаборатория кинетических явлений

²Лаборатория электрических явлений

Актуальными проблемами для микроэлектроники являются определение ориентаций плоскостей пленок и направления потока тепла, обеспечивающие максимальный или минимальный теплоотвод от элементов полупроводниковых микросхем. Работы [1–3] посвящены исследованию этой проблемы. В них рассмотрено влияние фокусировки фононов на фононный транспорт в монокристаллических пленках с различным типом анизотропии упругой энергии. При низких температурах, когда длина свободного пробега фононов оказывается порядка толщины пленки, то ее теплопроводность становится зависящей от направлений теплового потока и ориентаций плоскостей пленок.

Анализ фононного транспорта в монокристаллических пленках показал, что для достаточно широких пленок с положительной анизотропией упругой энергии (LiF, GaAs, Ge, Si и YAG) максимум теплопроводности реализуется для ориентации {100}, а минимум – для ориентации {111}. Для пленок с отрицательной анизотропией упругой энергии (CaF₂, NaCl, YIG) – ситуация обратная: максимум теплопроводности реализуется для ориентации {111}, а минимум – для ориентации {100}.

Использование предложенного нами метода учета фокусировки фононов позволило адекватно описать экспериментальные зависимости теплопроводности кремниевых пленок от температуры с толщинами от 0.02 до 1.6 мкм в температурном интервале от 20 до 350 К (рис. 1).

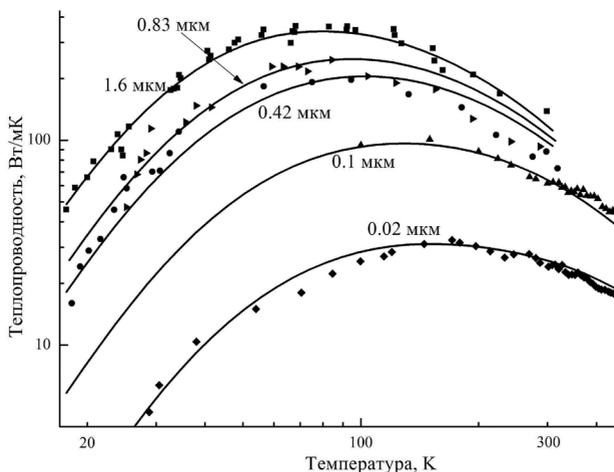


Рис. 1. Температурные зависимости теплопроводности кремниевых пленок различных толщин. Символы – экспериментальные данные.

Показано, что при комнатных температурах вклад граничного рассеяния в теплосопротивление пленок с толщинами 0.1 и 0.02 мкм достигает 17 и 58% соответственно. При температуре 20 К анизотропия теплопроводности максимальна. При переходе от пленки с ориентацией $\{111\}$ к $\{100\}$ теплопроводность увеличивается более, чем в 2 раза. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации работы кремниевых микросхем.

Работа выполнена по плану РАН в рамках темы «Спин» при поддержке программы ОФН РАН грант №12-Т-2-1018, а также гранта ведущей научной школы НШ-14.120.14.1540.

- [1] И.И. Кулеев, И.Г. Кулеев, С.М. Бахарев. *ЖЭТФ*, 2014, т. 146, с. 525–539.
- [2] I.I. Kuleyev, I.G. Kuleyev, S.M. Bakharev. *Phys. stat. sol. (b)*, 2015, т. 252, с. 323–332.
- [3] И. И. Кулеев, С. М. Бахарев, И. Г. Кулеев, В. В. Устинов. *ЖЭТФ*, 2015, т. 147, с. 736–749.

Описание экспериментальных свойств низкоразмерных магнетиков на основе первопринципных расчетов параметров модели Гайзенберга

З.В. Пчёлкина¹, С.В. Стрельцов²

¹Лаборатория рентгеновской спектроскопии

²Лаборатория оптики металлов

Значения межатомных обменных взаимодействий J_{ij} являются одними из основных магнитных характеристик системы. В приближении среднего поля J_{ij} можно извлечь из подгонки экспериментальных данных по магнитной восприимчивости под закон Кюри–Вейсса. Такая оценка сильно зависит от заложенной спиновой модели (димеры, цепочки, лестницы и др.), которая, как правило, базируется на структурных особенностях рассматриваемой системы.

В данном исследовании для описания экспериментальных свойств низкоразмерных магнетиков предпринимаются следующие шаги: 1) проводится расчет электронной структуры реальных соединений без подгоночных параметров; 2) вычисляются параметры обменных взаимодействий и интегралы перескока для $3d$ -ионов в изучаемых соединениях; 3) делается вывод о подходящей спиновой модели Гайзенберга; 4) модель Гайзенберга с расчетными обменными параметрами решается численными методами, затем вычисляются намагниченность и магнитная восприимчивость; 5) рассчитанные характеристики сравниваются с экспериментом.

В результате теоретических расчетов получены значения обменных взаимодействий в низкоразмерных системах на основе $3d$ -металлов: CaV_2O_4 , минерал францесит $\text{Cu}_3\text{Y}(\text{SeO}_3)_2\text{O}_2\text{Cl}$, NaO_2 , молекулярный магнетик Mn_4 . Предложены подходящие спиновые модели. Решение данных

моделей методами точной диагонализации и квантового Монте-Карло дало возможность вычислить наблюдаемые характеристики, такие как намагниченность и восприимчивость.

Полученные результаты позволяют, основываясь на расчетах электронной структуры без подгоночных параметров, установить микроскопический механизм обменных взаимодействий в реальных соединениях и описать экспериментально наблюдаемые величины [1–5].

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ-13-02-00374, РФФИ-13-02-00050, гранта Министерства образования и науки России МК-3443.2013.2, программы фундаментальных исследований УрО РАН, проекты № 12М-23-2054, № 12-Р-2-1017.

- [1] Z.V. Pchelkina, I.V. Solovyev. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2015, v. 27, p. 26001.
- [2] K.V. Zakharov, E.A. Zvereva, P.S. Berdonosov, E.S. Kuznetsova, V.A. Dolgikh, L. Clark, C. Black, P. Lightfoot, W. Kockelmann, Z.V. Pchelkina, S.V. Streltsov, O.S. Volkova, A.N. Vasiliev. *Physical Review B*, 2014, v. 90, p. 214417.
- [3] S.V. Streltsov, Z.V. Pchelkina, D.I. Khomskii, N.A. Skorikov, A.O. Anokhin, Yu.N. Shvachko, M.A. Korotin, V.I. Anisimov, V.V. Ustinov. *Physical Review B*, 2014, v. 89, p. 14427.
- [4] I.V. Solovyev, Z.V. Pchelkina, V.V. Mazurenko. *CrystEngComm.*, 2014, v. 16, p. 522—531.
- [5] З.В. Пчелкина, И.В. Соловьев. *Сб. Тез. докл. Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-14), Екатеринбург, 2013, с. 61.*

Теория зернограничной диффузии атомов на переходной стадии между С и В режимами диффузионного отжига

А.Г. Кесарев, В.В. Кондратьев, И.Л. Ломаев

Лаборатория прочности

В рамках оригинального подхода, использующего асимптотические методы решения дифференциальных уравнений, дана теория зернограничной атомной диффузии (ЗГД) на переходных стадиях кинетики между С- и В-режимами отжига в наноструктурных и субмикроструктурных (СМК) материалах, получаемых методами интенсивной пластической деформации (ИПД), для часто используемого в экспериментах условия тонкопленочного (мгновенного) источника диффузанта. Принципиальным в этой теории является учет приграничных зон ускоренного массопереноса, возникающих при ИПД. Используя качественный анализ и численные расчеты, выполненные в рамках общей диффузионной задачи Сузуоки, предложено выражение для плотности слоевой концентрации

$$A_{app}(y, t) = Q \exp\left(-\sqrt{\frac{D_1}{D_g}} \frac{y}{\delta}\right) \left[\frac{\delta}{\sqrt{\pi D_g t}} \exp\left(-\frac{y^2}{4D_g t}\right) + \sqrt{\frac{D_1}{D_g}} \operatorname{erfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{D_g t}}\right) \right],$$

приемлемое для широкой области времен отжига

$$t < 4\delta^2/D_1.$$

Здесь Q – поверхностная плотность диффузанта на свободной поверхности образца в начале отжига; δ – ширина границы; D_g , D_1 – коэффициенты ЗГД атомов в границе зерна и вблизи нее; y – расстояние от свободной поверхности; t – время.

Проведен анализ особенностей ЗГД, обусловленных приграничными зонами и спецификой диффузионного источника. Показано, что вблизи источника отток в приграничную зону повышает среднюю слоевую концентрацию, а вдали от него – ее понижает. Для ряда недавно изучавшихся СМК-материалов даны оценки глубины насыщения приграничных диффузионных зон. Сделан вывод о том, что влияние этих зон на ЗГД становится существенным и должно учитываться в материалах со стабилизированной (например, при легировании примесями) СМК-структурой.

Из того факта, что выражение для плотности слоевой концентрации (как и для профиля зернограничной концентрации) в установленной области времен отжига определяется только максимальным значением коэффициента квазиобъемной диффузии D_1 , следует важный вывод о применимости нашего подхода для описания ЗГД в обычных поликристаллах с равновесными границами зерен на переходной стадии между **С**- и **В**-режимами отжига, когда строгие решения диффузионной задачи имеют весьма громоздкий вид.

Работа выполнена в рамках темы «Деформация» №01201463327 и при частичной финансовой поддержке УрО РАН (проект № 15-17-2-11). Результаты опубликованы в [1, 2].

- [1] А.Г.Кесарев, В.В.Кондратьев, И.Л.Ломаев. *ФММ*, 2015, т.116, №3, с. 237–246.
- [2] V.V.Kondratyev, A.G.Kesarev, I.L.Lomaev. *Diffusion Foundations*, 2015, v. 5, p. 129–143. .

Влияние частичной замены иттрия кальцием на структуру и свойства сверхпроводника $Y_{0,9}Ca_{0,1}Ba_2Cu_3O_{6,8}$

Ю.В. Блинова¹, Л.А. Черепанова², Т.П. Криницина¹,
Е.И. Кузнецова¹, С.В. Сударева¹, С.Г. Титова²,
С.В. Пряничников², М.В. Дегтярев¹

¹Лаборатория прецизионных сплавов и интерметаллидов

²Институт металлургии УрО РАН, Екатеринбург

При эксплуатации ленточных композиционных сверхпроводников на основе $YBa_2Cu_3O_y$ (Y123) необходимо, чтобы структура и критический ток напыленных пленок Y123 были устойчивы к воздействию внешней среды, и при охлаждении до рабочих температур сверхпроводника резкие изменения параметров решетки и коэффициентов теплового расширения (КТР) были минимальны. Добиться этого можно, используя неизовалентное замещение Y/Ca и варьируя содержание кислорода. Так, для состава $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_3O_y$ с $x=0.05-0.10$ и $y=6.9-6.8$ изменения параметров ячейки и КТР при охлаждении минимальны, критический же ток максимален.

В данной работе методами рентгенографии, электронной микроскопии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) проведено сравнение структуры двух массивных образцов $YBa_2Cu_3O_{6,8}$ и $Y_{0,9}Ca_{0,1}Ba_2Cu_3O_{6,8}$ с целью выявления причин благоприятного влияния кальция на эксплуатационные свойства сверхпроводника Y123. Образцы приготовлены путем традиционного керамического синтеза.

Расчет параметров кристаллической структуры по рентгенографическим данным показал, что замещение Y/Ca приводит к слабому изменению параметров элементарной

ячейки, но заметному изменению длин связей – росту апикального расстояния (высоты пирамиды CuO_5) и увеличению степени расщепления BaO -слоя. При этом линейные и объемные КТР значительно меньше зависят от температуры в области 80 – 300 К, что делает материал $\text{Y}(\text{Ca})_{123}$ перспективным для использования в сверхпроводящих устройствах.

По данным РФЭС и просвечивающей электронной микроскопии, Ca частично входит в решетку $\text{Y}(\text{Ca})_{123}$ на места Y , что приводит к образованию пластинок фазы Y_2BaCuO_5 по $(001)_{\text{Y}(\text{Ca})_{123}}$ кристаллографически связанных с матрицей $\text{Y}(\text{Ca})_{123}$; результатом является увеличение микротвердости материала. Кальций также повышает стабильность фазы $\text{Y}(\text{Ca})_{123}$ по отношению к воздействию окружающей среды за счет взаимодействия с примесными атомами O , C и группой OH^- с образованием частиц CaO , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3 по границам зерен.

Работа выполнена по теме «Кристалл» (№ г.р. 01201463333) при поддержке проекта УрО РАН 15-17-2-16. Результаты опубликованы в [1–3].

- [1] Ю.В. Блинова, Л.А. Черепанова, Т.П. Криницина, Е.И. Кузнецова, С.В. Сударева, С.Г. Титова, С.В. Пряничников, М.В. Дегтярев, Е.П. Романов. *ФММ*, 2016, т. 117, № 2.
- [2] А.В. Фетисов, Г.А. Кожина, С.Х. Эстемирова, В.Я. Митрофанов, С.А. Упоров, Л.Б. Ведмидь, С.В. Пряничников, Л.А. Черепанова, С.Г. Титова, Ю.В. Блинова. *Бутлеровские сообщения*, 2015, т. 44, № 10, с. 21–25.
- [3] Ю.В. Блинова, С.В. Сударева, Т.П. Криницина, Е.И. Кузнецова, Л.А. Черепанова, С.Г. Титова, С.В. Пряничников. *Тез. докл. V Международной конференции «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости ФПС'15», Москва, 2015, с. 226–227.*

Прогнозирование размера аустенитного зерна конструкционных сталей, микролегированных несколькими карбонитридообразующими элементами, на основе кинетического моделирования

А.Ю. Пасынков, И.И. Горбачёв, В.В. Попов

Лаборатория диффузии

Разработан метод [1–2] и создана программа [3–4] для моделирования эволюции комплексных карбонитридов нескольких составов в многокомпонентных сплавах на основе железа при термической обработке. Пример результатов моделирования растворения ансамблей частиц VC, NbC и TiC показан на рис.1. Представленный алгоритм во многом основан на подходах, предложенных нами ранее, но, в отличие от прошлых моделей, позволяет учесть возможность образования новых карбонитридных выделений.

Эта особенность дает возможность более широкого использования предложенного метода кинетического моделирования для прогнозирования фазового и структурного состояния сталей, легированных карбонитридообразующими элементами, поскольку в таких сталях выделяющиеся на границах зерен карбонитридные частицы могут сдерживать рост зерна. Чтобы оценить эти возможности, на основе данных кинетического моделирования с использованием различных теоретических моделей был рассчитан ожидаемый размер аустенитного зерна после выдержки для температурного диапазона, соответствующего области температур нагрева под прокатку. Проведенное сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показало их удовлетворительное согласие.

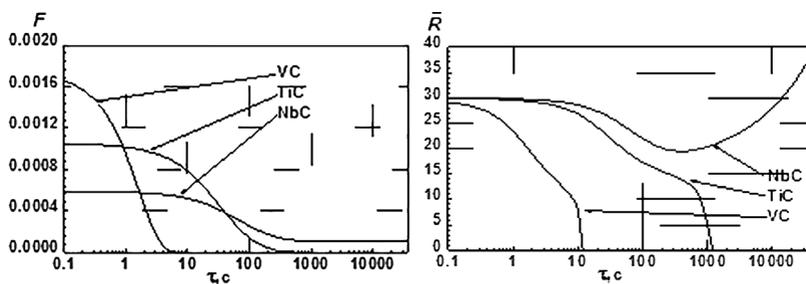


Рис.1. Изменение объемной доли F и среднего радиуса \bar{R} частиц в процессе отжига низколегированной стали с V, Nb и Ti при температуре 1100 °С.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Спин» № г/р 01201463330 при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН (проект № 15-9-2-44) и проекта РФФИ № 16-38-00164 мол_а.

- [1] И.И. Горбачев, В.В. Попов, А.Ю. Пасынков. *ФММ*, 2015, т. 116, с. 377–387.
- [2] И.И. Горбачев, А.Ю. Пасынков, В.В. Попов. *ФММ*, 2015, т. 116, с. 1184–1191.
- [3] И.И. Горбачев, В.В. Попов, А.Ю. Пасынков. *Свид. о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2014616057, 10.06.2014.*
- [4] И.И. Горбачев, В.В. Попов, А.Ю. Пасынков. *Свид. о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2015663347, 16.12.2015.*

Определение и прогнозирование плотности дислокаций и распухания методом нейтронографии высокого разрешения в облученных нейтронами оболочках ТВЭЛ

В.И. Воронин¹, Б.Н. Гощицкий¹, В.В. Сагарадзе²
Э.З. Валиев¹, Н.В. Проскурнина¹, Н.В. Катаева²

¹Лаборатория нейтронных исследований вещества

²Лаборатория механических свойств

Отработана методика экспериментального анализа структурного состояния облученных оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) атомного реактора БН-600. Анализ осуществляется методом нейтронографии высокого разрешения без предварительной подготовки образцов, что позволяет существенно ускорить процесс анализа и снизить радиационную нагрузку на персонал.

Показано [1–3], что плотность дислокаций изменяется по мере работы ТВЭЛ в реакторе БН-600. Впервые получена зависимость плотности дислокаций от температуры облучения и повреждающей дозы быстрых нейтронов (рис. 1).

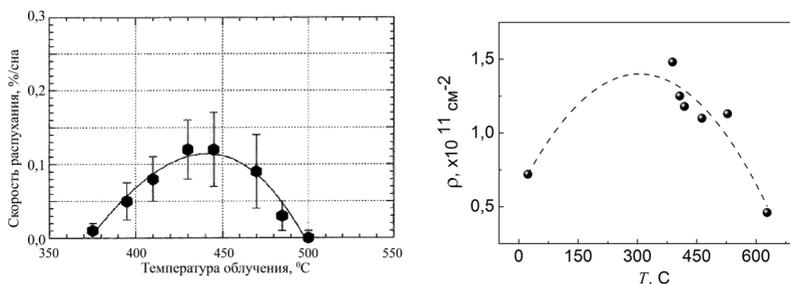


Рис. 1. Скорость распухания (слева) и плотность дислокаций (справа) холоднотемпературной аустенитной стали (оболочки ТВЭЛ) в зависимости от температуры нейтронного облучения.

Полученные результаты позволяют прогнозировать и контролировать изменение плотности дислокаций и скорости распухания реакторных стержней в процессе эксплуатации в ядерных реакторах.

Работа выполнена с использованием УНУ «НМК ИФМ» в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Поток», № 01201463334).

- [1] V.I. Voronin, E.Z. Valiev, I.F. Berger, B.N. Goschitskii, N.V. Proskurnina, V.V. Sagaradze, N.F. Kataeva, *J. Nucl. Mater.*, 2015, v. 459, p. 97–102.
- [2] В.И. Воронин, Э.З. Валиев, И.Ф. Бергер, Б.Н. Гощицкий, В.В. Сагарадзе, Н.В. Проскурнина *Сб. Тез. докл. Научного семинара «Материалы активных зон реакторов на быстрых нейтронах», Алушта, 2015, с. 56.*
- [3] В.И. Воронин, И.Ф. Бергер, Э.З. Валиев, А.В. Козлов. *Сб. Тез. докл. 11 Международного Уральского Семинара “Радиационная физика металлов и сплавов», Кыштым, 2015, с. 35.*

Мегапластическая деформация магния при комнатной температуре: методики, структура, текстура и механические свойства

А.Ю. Волков, О.В. Антонова, Б.И. Каменецкий,
А.В. Александров, А.Л. Соколов, Д.А. Комкова

Лаборатория прочности

Магний и его сплавы представляют интерес для практики, однако их использование затруднено вследствие недостаточной пластичности при комнатной температуре. На сегодняшний день наиболее распространенной методикой деформации магния является равноканальное угловое прессование (РКУП).

В данном исследовании разработаны и используются следующие методики мегапластической деформации (МПД) магния: поперечное выдавливание [1] и гидроэкструзия в оболочке (рис.1) [2]. Максимальная истинная деформация образцов после гидроэкструзии составляла $e \sim 3.2$ [3]; в ходе поперечного выдавливания и последующей холодной прокатки достигнуто $e \sim 8.5$ [4]. Показано, что в результате МПД происходит измельчение зерна приблизительно на три порядка: от нескольких миллиметров в исходном слитке до нескольких микрометров в полученных образцах. Активного двойникования не наблюдается. Обнаружена высокая пластичность деформированных образцов: пластина толщиной 1 мм может быть прокатана при комнатной температуре до фольги толщиной 10 мкм; удлинение до разрыва экструдированных прутков составляет $\sim 20\%$ (рис.2). Полученные результаты обсуждаются с точки зрения иерархии наблюдаемых структурных состояний [5].

Результаты исследования могут быть использованы на практике: в машиностроении, биологии и медицине.

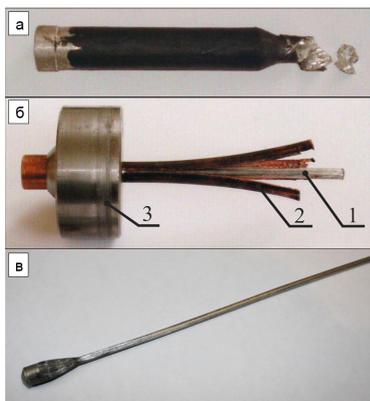


Рис.1. Гидроэкструзия магния при комнатной температуре: а – традиционная технология; б – использование нашей разработки; в – полученный пруток \varnothing 2 мм.

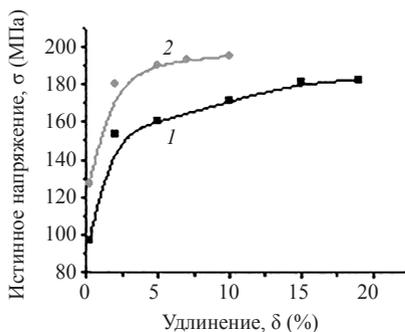


Рис.2. Деформационные кривые образцов: после гидроэкструзии (1); после гидроэкструзии и дополнительного волочения (2).

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема Деформация», № 01201463327) и при частичной поддержке УрО РАН (проект № 15-17-2-11).

- [1] Б.И. Каменецкий, А.Ю. Волков, А.Л. Соколов и др. *Патент РФ №2563077, Бюл. №26, 20.09.2015.*
- [2] А.Ю. Волков, А.В. Александров, И.В. Клюкин. *Секрет производства (ноу-хау) ИФМ УрО РАН, Свидетельство №13, 30.05.2013.*
- [3] A.Yu. Volkov, I.V. Kliukin. *Mater. Sci. and Eng. A, 2015, v. 627, p.56–60.*
- [4] O.V. Antonova, A.Yu. Volkov, B.I. Kamenetskii et al. *Mater. Sci. and Eng. A, 2016, v.651, p.8–17.*
- [5] А.Ю. Волков, О.В. Антонова, Б.И. Каменецкий и др. *ФММ, 2016, т.117, №5, в печати.*

Влияние высокого давления на пластичность хрупких материалов

В.П. Пилюгин¹, Б.А. Гринберг¹, М.А. Иванов², Т.П. Толмачёв¹,
А.М. Власова¹, А.В. Плотников¹

¹Лаборатория физики высоких давлений

² Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАНУ,
Киев, Украина

На ряде малопластичных и хрупких материалов – Mg, SiO₂, Si, Ge, Ni₃Ge, Ni₃Al, Ni₃Fe изучено действие высокого давления с целью повышения их пластичности. Показано, что давление в 10–14 ГПа при комнатной и низкой температурах позволяет проводить на хрупких материалах деформацию высоких степеней без разрушения. Установлено, что в условиях высокого давления в хрупких материалах можно осуществлять деформационное фрагментирование и тем самым получать нанокристаллическое состояние. Кроме того, в условиях высокого давления на диоксидах кремния и диоксидах германия можно проводить компактирование порошков в зависимости от их исходного структурного состояния. Исследовали материалы с различными структурами, в частности для диоксида кремния – стекло, кварцевое стекло или горный хрусталь. В случае кристаллического кварца SiO₂ скомпактированные образцы непрозрачны и имеют сетку трещин (рис.1), в случае стекла (исходно аморфного SiO₂) компактанты представляют собой цельные прозрачные пластинки. Результат барического компактирования стекла объясняется наличием свободного объема, присущего аморфным материалам, что и обуславливает их течение при сильном сжатии и низкой температуре.

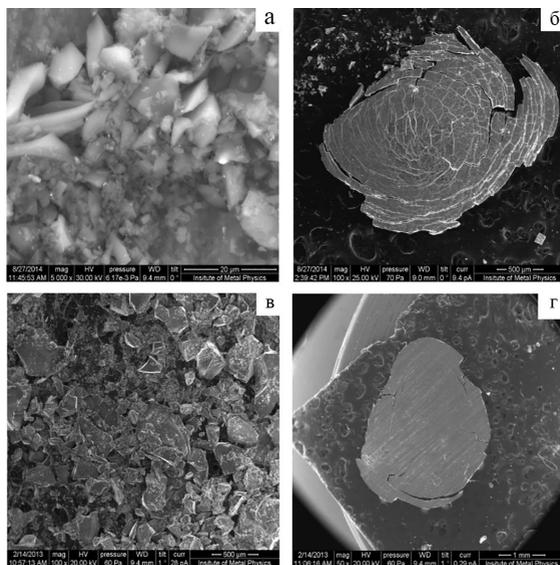


Рис.1. Частицы исходного порошка кристаллического SiO_2 – а; скомпактированный деформацией под высоким давлением образец из порошка кристаллического SiO_2 – б; частицы исходного порошка аморфного (стекло) SiO_2 – в; скомпактированный деформацией под высоким давлением образец из порошка аморфного SiO_2 – г.

Результаты опубликованы в [1–4].

- [1] Б.А. Гринберг, М.А. Иванов, В.В. Рыбин, О.А. Елкина, А.М. Пацелов, О.В. Антонова, А.В. Иноземцев, Т.П. Толмачев. *Деформация и разрушение материалов*, 2012, т. 8, с. 2–13.
- [2] В.П. Пилюгин, Б.А. Гринберг, Т.П. Толмачёв, Т.М. Гапонцева, Ю.В. Соловьёва. А.И. Анчаров. *Сб. материалов Межд. конф. Забабахинские научные чтения XII*, Снежинск, 2014, с. 219.
- [3] А.М. Власова, В.П. Пилюгин, Б.А. Гринберг, О.В. Антонова. *Деформация и разрушение материалов*, 2015, т. 7, с. 2–9.
- [4] Б.А. Гринберг, М.А. Иванов, С.В. Кузьмин, В.А. Лысак. *Изд. ВТУ, Волгоград*, 2016, 205 с.

Термоупругие мартенситные превращения в сплавах системы TiNi –TiCu

В.Г. Пушин¹, Н.Н. Куранова¹, А.В. Пушин², В.В. Макаров³,
А.В. Королев⁴, Н.И. Коуров⁵

¹Лаборатория цветных сплавов

²Лаборатория механических свойств

³Отдел электронной микроскопии

⁴Лаборатория ферромагнитных сплавов

⁵Лаборатория низких температур

Впервые построены полные диаграммы термоупругих мартенситных превращений $B2 \leftrightarrow B19'$, $B2 \leftrightarrow B19 \leftrightarrow B19'$, $B2 \leftrightarrow B19$ в мелкозернистых сплавах прецизионного квазибинарного состава в широком интервале содержания меди TiNi–TiCu ($Cu \leq 25$ ат.%) (рис. 1а) и ультрамелкозернистых сплавах ($Cu \leq 34$ ат.%), закаленных из расплава (рис. 1б). Сравнение полученных и известных в литературе данных и их критический анализ позволили установить основные причины их несовпадения. Они, с одной стороны, связаны с термической или деформационно-термической историей сплавов, а с другой – с несовершенством методов диагностики критических температур, особенно на второй стадии ТМП $B19 \leftrightarrow B19'$. По рентгенодифрактометрическим данным были установлены фазовый состав и температурно-концентрационные изменения параметров $B2$ -аустенита, моноклинной решетки $B19'$ -мартенсита для сплавов с содержанием меди до 15 ат.%, мартенсита с орторомбической решеткой $B19$ для сплавов от 8 до 35 ат.% меди. Определены особенности микроструктуры аустенита, мартенситных фаз и охрупчивающих включений типа Ti_2Ni . Установлено, что фазы $B19$ и $B19'$ имеют пакетную морфологию кристаллов, попарно двойникованных по I типу преимущественно

по плоскостям (111) и (011). Отличительной особенностью внутренней структуры кристаллов $B19'$ -мартенсита является наличие в них нанодвойников по (001). В мартенсите всех сплавов не наблюдались двойники II типа $\langle 011 \rangle$. Измерены механические свойства и эффекты памяти формы сплавов. Показано, что измельчение зеренной структуры и квазибинарного химического состава сплавов позволяет повысить их механические свойства и сохранить эффекты памяти.

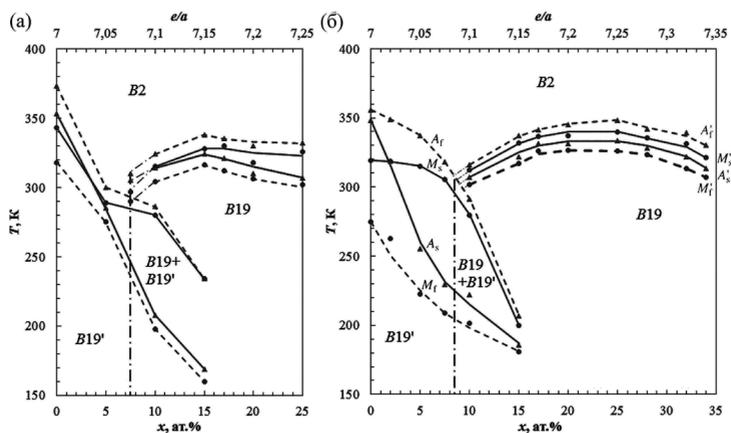


Рис. 1. Диаграммы мартенситных превращений в $Ti_{50}Ni_{50-x}Cu_x$.

Работа выполнена при финансовой поддержке по гранту РФФИ № 15-12-10014. Результаты опубликованы в [1, 2].

[1] В.Г. Пушин, Н.Н. Куранова, В.В. Макаров, А.В. Пушин, А.В. Королёв, Н.И. Коуров. *ФММ* 2015, т. 116, с. 1281–1293.

[2] В.Г. Пушин, Н.Н. Куранова, А.В. Пушин. *МИТОМ*, 2015, №. 12, с. 39–45.

Термоупругие и магнитоупругие мартенситные превращения в сплавах системы Ni–Mn–Ga

В.Г. Пушин¹, Е.Б. Марченкова¹, Е.С. Белослудцева¹,
Н.Н. Куранова¹, А.Н. Укусников¹, В.А. Казанцев²,
Н.И. Коуров³, А.В. Королев⁴, А.Г. Попов⁴

¹Лаборатория цветных сплавов

²Лаборатория нейтронных исследований вещества

³Лаборатория низких температур

⁴Лаборатория ферромагнитных сплавов

Впервые построены полные диаграммы фазовых магнитных и термоупругих мартенситных превращений, установлены их последовательности и типы кристаллических структур ($B2$, $L2_1$, $2M$, $10M$, $14M$) в сплавах $Ni_{50}Mn_{50-x}Ga_x$ и $Ni_{50+x}Mn_{25-x}Ga_{25}$. Измерены температурный гистерезис, объемные и линейные эффекты превращения (рис. 1).

Методами *in situ* (с использованием нагрева) рентгенофазового анализа и просвечивающей электронной микроскопии показано, что все сплавы имели атомно-упорядо-

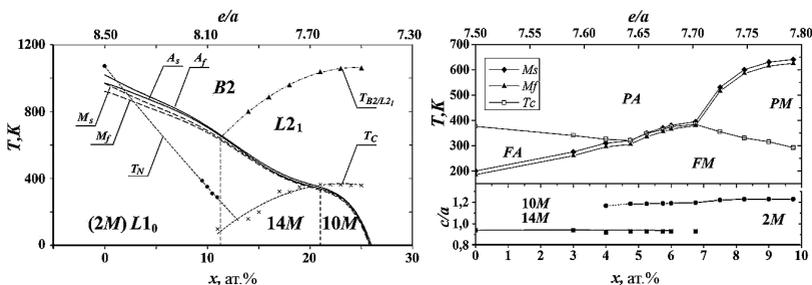


Рис. 1. Диаграммы магнитных и мартенситных превращений в сплавах систем $Ni_{50}Mn_{50-x}Ga_x$ (слева) и $Ni_{50+x}Mn_{25-x}Ga_{25}$ (справа) с концентрационной зависимостью эффективной степени тетрагональности c/a мартенсита. Обозначены фазовые поля парамагнитных (P) и ферромагнитных (F) состояний аустенита ($B2$, $L2_1$) и мартенсита ($2M$, $10M$, $14M$).

ченную по типу $B2$ - или $L2_1$ -сверхструктуру, а количество возможных избыточных фаз, наблюдаемых в виде отдельных изолированных включений, не превышало 2–3%. При комнатной температуре сплавы системы $Ni_{50+x}Mn_{25-x}Ga_{25}$ (при $x > 7$ ат.%) и $Ni_{50}Mn_{50-x}Ga_x$ (при $x < 11.5$ ат.%) имели, по данным рентгенодифрактометрии, структуру немодулированного тетрагонального мартенсита ($2M$). Мартенсит сплавов $Ni_{50+x}Mn_{25-x}Ga_{25}$ ($4 \leq x \leq 7$ ат.%) и $Ni_{50}Mn_{50-x}Ga_x$ (при $x > 21$ ат.%) отличала длиннопериодная $10M$ -структура, а сплавов $Ni_{50+x}Mn_{25-x}Ga_{25}$ (при $x < 7$ ат.%) и $Ni_{50}Mn_{50-x}Ga_x$ ($11.5 \leq x \leq 21$ ат.%) – длиннопериодная $14M$ - структура. Определены параметры решеток аустенитных и мартенситных фаз и системы двойникового сдвига. Установлены особенности пакетной морфологии мартенсита. Показано, что высокообратимый термоупругий характер мартенситных превращений в сплавах воспроизводится при многократном термоциклировании преимущественно за счет механизма псевдоупругого двойникового. Дана интерпретация аномальной тетрагональности термоупругого ферромагнитного мартенсита в сплавах.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке по гранту РФФИ №14-02-00379). Результаты опубликованы в [1, 2]

- [1] В.Г. Пушин, Н.И. Коуров, А.В. Королев, Е.Б. Марченкова, Н.Н. Куранова, Е.С. Белослудцева. *ФТТ*, 2015, т. 57, с. 43–49.
[2] Е.С. Белослудцева, Н.Н. Куранова, Е.Б. Марченкова, А.Г. Попов, В.Г. Пушин. *Письма в ЖТФ*, 2016, т. 42, вып. 2, с. 37–43.

Динамическая прочность и механизмы разрушения субмикроструктурных алюминиевых сплавов, полученных методом динамического канально-углового прессования

А.Н. Петрова¹, И.Г. Бродова¹, С.В. Разоренов²

¹Лаборатория цветных сплавов

²ИПХФ РАН, Черноголовка

Экспериментально определены механические характеристики субмикроструктурных (СМК) Al-сплавов разных систем легирования при динамическом нагружении плоскими ударными волнами. СМК-состояние материалов получено методом динамического канально-углового прессования, уникальность которого определяется сверхвысокой скоростью деформации – 10^4 – 10^5 с⁻¹ и сложным напряженным состоянием материала в результате комплексного воздействия ударных волн и интенсивной деформации простым сдвигом. В ударно-волновых экспериментах крупнокристаллические (КК) образцы и образцы с СМК-структурой толщиной ~2 мм нагружались ударом плоской алюминиевой пластины толщиной ~0.4 мм, разогнанной до скорости 620 ± 30 м/с. Во всех экспериментах регистрировались профили скорости свободной поверхности $u_{fs}(t)$ на оси образца с помощью лазерного Доплеровского измерителя скорости VISAR [1]. Таким образом были испытаны: алюминий А7 с рекристаллизованной структурой, сплавы – АМц (Al–Mn) и А5083 (Al–Mg–Mn), со смешанной структурой, состоящей из ячеек с малоугловыми границами и зерен с большеугловыми границами (БУГ), сплав В95 (Al–Zn–Mg–Cu) с фрагментированной структурой с БУГ. Характеристики упруго-пластического перехода при ударно-волновом нагружении со скоростью $(1.2-3) \cdot 10^5$ с⁻¹ этих материалов измерены впервые. Путем анализа экспериментальных профилей скорости свободной поверхности образцов (рис.1) были определены: динамический предел упругости σ_{HEL} , ди-

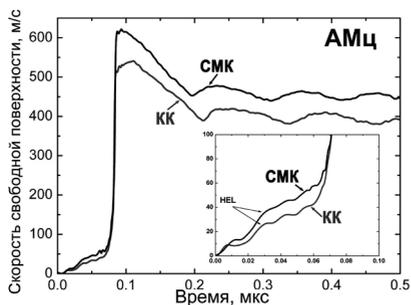


Рис.1. Волновые профили КК- и SMK-алюминиевых сплавов АМц.

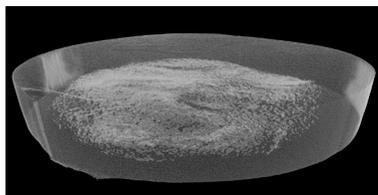


Рис.2. Объемное изображение образца, сохраненного после нагружения ударными волнами, с внутренними порами.

намический предел текучести Υ и откольная прочность материалов σ_{sp} . Обнаружено, что при переходе всех исследованных материалов в SMK-состояние (размер кристаллитов 200–700 нм) σ_{HEL} повышается в 1,5 раза, а Υ – в 1,1-1,7 раза. Откольная прочность SMK-сплавов повышается на 7-9% по сравнению с КК-материалами и составляет 1.32–1.66 ГПа [1, 2]. Неразрушающим методом объемной рентгеновской томографии исследовано внутреннее строение SMK-образцов с отколом (рис.2), рассчитана характеристика пористости материала, определены геометрические параметры откола. Полученные результаты указывают на целесообразность использования SMK Al-сплавов в конструкциях, испытывающих динамические нагрузки.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Структура» №01201463331 при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект №14-02-31341 мол_а, №15-02-03225).

- [1] И.Г. Бродова, А.Н. Петрова, С.В. Разоренов, Е.В. Шорохов. *ФММ*, 2015, Т. 116, №5, с. 548–556.
- [2] И.Г. Бродова, А.Н. Петрова, С.В. Разоренов, О.П. Плехов, Е.В. Шорохов. *Деформация и разрушение материалов*, 2015, №11, с. 27–33.

Релаксация энергии мегапластической деформации при механическом сплавлении в Fe–Ni-сплавах

В.А. Шабашов, В.В. Сагарадзе, А.В. Литвинов,
А.Е. Заматовский

Лаборатория механических свойств

В работах А.М. Глезера показано, что в условиях мегапластической деформации металлических систем при понижении подвижности носителей пластической деформации может произойти смена канала релаксации механической энергии от динамической рекристаллизации в сторону фазовых переходов, например, перехода от кристаллического к аморфному состоянию.

В настоящем исследовании на бинарных и специально легированных Fe–Ni-сплавах установлено, что в процессе механического сплавления в зависимости от химической активности и подвижности элементов происходит смена канала релаксации большой механической энергии от динамического старения к сдвиговому $\alpha \rightarrow \gamma$ -переходу [1].

В экспериментах по деформационно-индуцированному растворению интерметаллидных частиц $Ni_3Al(Ti)$ в матрице состаренных сплавов Fe–Ni–Al(Ti) установлен рост объема механосплавления (DC_{Ni}) с увеличением скорости деформации (рис. 1а) вследствие уменьшения конкуренции динамического старения в процессе сплавообразования.

При механическом сплавлении интерметаллидных частиц $Ni_3Zr(Si)$ с ГЦК-матрицей сплавов Fe–Ni–Zr(Si), а также частиц Ni в механических смесях Fe–Ni + Ni установлено отсутствие или понижение зависимости кинетики растворения частиц от скорости деформации (рис. 1а) и смена канала диссипации энергии деформации по пути сдвигового $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения (рис. 1б).

Установленные закономерности механосплавления обусловлены уменьшением времени действия динамического старения, а также снижением химической активности (Ni и Si) и диффузионной подвижностью (Zr) элементов механосплавления. Полученные результаты дают новые представления о структурообразовании при диссипации энергии большой пластической деформации в сплавах железа.

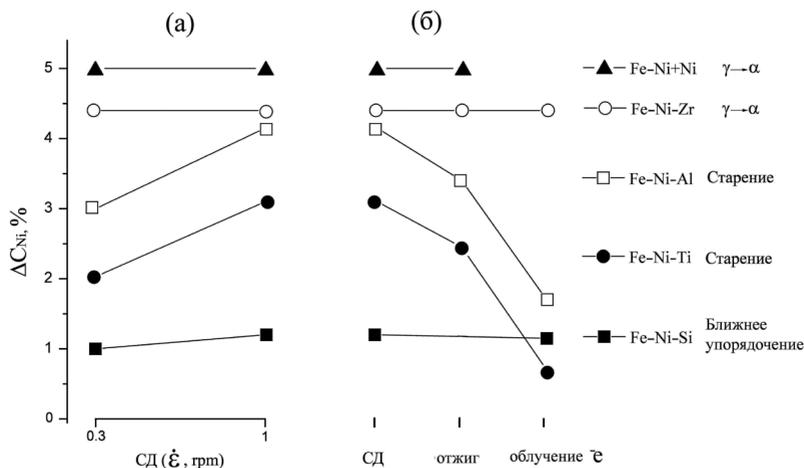


Рис.1. Изменение содержания Ni в ГЦК-матрице Fe-Ni-Me (Ni, Zr, Al, Ti, Si) сплавов при МС (а) и каналы релаксации при отпуске 160°C и облучении электронами (б).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №14-13-00908).

[1] В.А. Шабашов, В.В. Сагарадзе, А.В. Литвинов, А.Е. Заматовский. *ФММ. 2015. Т. 116. № 9. С. 918–927.*

Финишная наноструктурирующая фрикционная обработка стальных поверхностей

А.В. Макаров¹, Л.Г. Коршунов², В.П. Кузнецов³, Р.А. Саврай⁴

¹Лаборатория механических свойств

²Лаборатория физического металловедения

³Институт материаловедения и металлургии, УрФУ,
г. Екатеринбург

⁴Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург

Разработаны материаловедческие основы фрикционных обработок, формирующих на поверхности сталей градиентные наноструктурированные слои с повышенными механическими и трибологическими характеристиками при одновременном обеспечении наношероховатости ($Ra < 100$ нм) поверхности (двойные нанотехнологии) [1-8]. Рассмотрены трибологические аспекты наноструктурирующих обработок деформирующим индентором, связанные с обоснованием их технологических условий для формирования высококачественной поверхности, а также с применением обработок для улучшения трибологических свойств сталей мартенситного и аустенитного классов [2, 3, 5–7]. По данным микроиндентирования, наноструктурирующие обработки увеличивают способность поверхностного слоя противостоять упругому и пластическому деформированию. Это ограничивает развитие различных механизмов изнашивания (микрорезания, схватывания, пластического оттеснения) и устраняет характерный для закаленной крупнокристаллической стали период приработки. Финишные обработки поверхностным пластическим деформированием скользящими инденторами в отличие от некоторых других способов наноструктурирования обладают высоким потенциалом промышлен-

ного использования в современном машиностроительном производстве [5, 8].

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России по теме «Структура» № 01201463331 (проект № 15-9-12-45) при поддержке РФФИ (проект № 15-08-07947).

- [1] A.V. Makarov, R.A. Savrai, E.S. Gorkunov, A.S. Yurovskikh, I.Yu. Malygina, N.A. Davydova. *Physical mesomechanics*, 2015, v. 18, № 1, p. 43–57.
- [2] А.В. Макаров, П.А. Скорынина, А.Л. Осинцева, А.С. Юровских, Р.А. Саврай. *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты*, 2015, №4 (69), с. 80–92.
- [3] А.В. Макаров. *Фрикционная наноструктурирующая обработка стальных поверхностей*. В кн. *Конструкционные и функциональные материалы на металлической основе*. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014, 252 с. Глава 4, с. 109–157.
- [4] А.В. Макаров, Л.Г. Коршунов, Р.А. Саврай, Н.А. Давыдова, И.Ю. Малыгина, Н.Л. Черненко. *ФММ*, 2014, т. 115, № 3, с. 324–336.
- [5] V.P. Kuznetsov, A.V. Makarov, S.G. Psakhie, R.A. Savrai, I.Yu. Malygina, N.A. Davydova. *Physical mesomechanics*, 2014, v. 17, № 4, p. 250–264.
- [6] А.В. Макаров. *Технологические приёмы обеспечения износостойкости деталей, образующих пары трения*. В кн. *Трибология: международная энциклопедия. Т. VI. Технологические методы повышения надёжности работы подвижных трибосопряжений*. Санкт-Петербург: Нестор-История, 2013, 404 с. Раздел 5, с. 122–152.
- [7] A.V. Makarov, N.A. Pozdeeva, R.A. Savrai, A.S. Yurovskikh, I.Yu. Malygina. *Journal of Friction and Wear*, 2012, v. 33, No. 6, p. 433–442.
- [8] В.П. Кузнецов, А.В. Макаров, А.Е. Киряков, Р.А. Саврай, А.В. Анিকেев. *Патент РФ № 2458777, Бюл. № 23, 20.08.2012.*

Коллинеарное магнитное и сегнетоэлектрическое упорядочение в оксидах $R\text{Mn}_2\text{O}_5$

В.В. Меньшенин

Лаборатория теоретической физики

Материалы, в которых в некоторых температурных интервалах сосуществуют несколько параметров дальнего порядка различной физической природы, интенсивно исследуются в последние годы. К таким материалам относятся, например, мультиферроики, где одновременно могут существовать дальний магнитный и сегнетоэлектрический порядок. Поскольку в мультиферроиках удастся управлять магнитным состоянием с помощью электрического поля, а электрической поляризацией с помощью магнитного поля, то эти соединения представляют интерес для прикладных разработок. Особые усилия направлены на поиск материалов, в которых связь между магнитной и сегнетоэлектрической подсистемой является сильной. Модельным классом таких систем являются оксиды $R\text{Mn}_2\text{O}_5$ (R -редкоземельный ион, Bi , Y), в которых электрическая поляризация возникает только после появления дальнего магнитного порядка.

Экспериментально обнаружено, что сегнетоэлектрический дальний порядок появляется в системе только тогда, когда редкоземельный элемент оказывается тяжелее неодима. Более того, сегнетоэлектрический порядок появляется в несоизмеримой по одному направлению магнитной структуре и достигает максимального значения в соизмеримой антиферромагнитной фазе. С другой стороны, если переход из парамагнитного состояния происходит в соизмеримую магнитную структуру, то ситуация не так однозначна. Так, в соединении PrMn_2O_5 переход происходит в фазу с волновым вектором \mathbf{k} , тогда как в

соединении BiMn_2O_5 переход осуществляется в фазу **к**. Однако в оксиде PrMn_2O_5 электрической поляризации нет, тогда как в BiMn_2O_5 она появляется. При этом неприводимые представления пространственной группы $R\bar{3}m$ парамагнитной фазы, по которым происходит переход в этих соединениях, для указанных волновых векторов совпадают.

Проведен теоретико-групповой анализ коллинеарных магнитных фаз и сегнетоэлектрического упорядочения, возникающих в результате фазовых переходов в магнитные структуры из парамагнитного состояния, в соединениях RMn_2O_5 . Установлено, что дальний магнитный порядок в PrMn_2O_5 и BiMn_2O_5 [1, 2] характеризуется разными неприводимыми представлениями группы кристаллической симметрии этих оксидов. Показано, что фазовый переход в PrMn_2O_5 в магнитную структуру оказывается переходом второго рода, в котором спиновые флуктуации повышают симметрию в точке перехода, что заведомо запрещает появление электрической поляризации. В оксиде BiMn_2O_5 дальний сегнетоэлектрический порядок может возникнуть только в результате двух близких по температуре магнитных переходов, в которых хотя бы один из переходов будет переходом первого рода. Полученные результаты позволяют прогнозировать возможность сегнетоэлектрического упорядочения не только в несоизмеримых магнитных фазах, но и для коллинеарного магнитного порядка.

Работа выполнена по бюджетной теме «Квант» № госрегистрации 01201463332.

[1] В.В. Меньшенин. *ЖЭТФ*, 2015, т.147, с.1179.

[2] В.В. Меньшенин. *ЖЭТФ*, 2016, т.149, с.165.

Гигантские эффекты магнитоотражения и магнитопропускания света в монокристаллах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Cr}_2\text{Se}_4$

А.В. Телегин¹, Ю.П. Сухоруков², Н.Н. Лошкарёва²,
Н.Г. Бебенин³, Е.В. Мостовщикова², С.В. Наумов²,
Р.И. Зайнуллина³, В.Д. Бессонов², Е.И. Патраков³,
А.А. Бучкевич², В.А. Фёдоров⁴, Т.К. Менщикова⁴

¹Лаборатория квантовой наноспинтроники

²Лаборатория магнитных полупроводников

³Лаборатория электрических явлений

⁴Лаборатория высокочистых веществ, ИОНХ, Москва

Изучена связь оптических свойств монокристаллов шпинелей с зонной структурой и выяснены механизмы формирования магнитооптических свойств в неполяризованном свете в инфракрасном диапазоне спектра.

Исследованию оптических свойств хромхалькогенидных шпинелей посвящено много работ, в том числе в инфракрасном (ИК) диапазоне, однако вопросы формирования оптического отклика в неполяризованном свете на внешнее магнитное поле в ряду от HgCr_2Se_4 до CdCr_2Se_4 оставались не выясненными. В работе изучены концентрационные, температурные и магнитополевые зависимости магнитоотражения и магнитопропускания естественного света и эффекта Керра в монокристаллах ферромагнитных шпинелей $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Cr}_2\text{Se}_4$ ($0 < x < 1$). Монокристаллы были выращены методом химических транспортных реакций в ИОНХ РАН. Определены конкурирующие физические механизмы, ответственные за гигантские эффекты магнитоотражения и магнитопропускания света в шпинелях $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Cr}_2\text{Se}_4$ ($0 < x < 1$). В магнитопропускании – это сдвиг края поглощения при длине волны $\lambda < 2$ мкм, изменение интенсивности внутритрицентрических оптических переходов ($2 < \lambda < 6$ мкм)

и изменение взаимодействия света со свободными носителями заряда ($\lambda > 6$ мкм) под действием магнитного поля. В магнитоотражении – сдвиг края поглощения при $\lambda < 5$ мкм, взаимодействие света со свободными носителями заряда ($5 < \lambda < 15$ мкм) и смещением минимума отражения в области фоновой полосы при $\lambda > 15$ мкм. Особенности зонной структуры p -типа шпинелей приводят к заметной анизотропии наблюдаемых эффектов как в прошедшем, так и в отраженном свете. Величина эффектов сильно зависит от концентрации Cd, начиная с $x > 0.1$, и типа проводимости кристалла, что обусловлено изменением электронной структуры шпинели в ряду $\text{HgCr}_2\text{Se}_4 - \text{CdCr}_2\text{Se}_4$. Магнитопропускание достигает ~ 80 %, а магнитоотражение от -4 % до $+3$ % в поле 3.5 кЭ в инфракрасной области спектра, что имеет важное значение для создания ИК-магнитооптических устройств.

Работа выполнена в рамках госзадания ФАНО России (тема «Спин» №01201463330), при частичной поддержке гранта Минобразования РФ №14.Z50.31.0025. Результаты представлены в [1–5].

- [1] A.V. Telegin, Yu.P. Sukhorukov, N.N. Loshkareva et al. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2015, v. 383, p. 104–108.
- [2] Ю.П. Сухоруков, А.В. Телегин, Н.Г. Бебенин и др. *ЖЭТФ*, 2015, т. 148, № 3, с. 503–513.
- [3] Ю.П. Сухоруков, Н.Н. Лошкарёва, А.В. Телегин, Е.В. Мостовщикова. *Оптика и спектроскопия*, 2014, т. 116, № 6, с. 73–79.
- [4] Ю.П. Сухоруков, А.В. Телегин, Н.Г. Бебенин и др. *Письма в ЖЭТФ*, 2013, т. 98, № 6, с. 353–356.
- [5] А.В. Телегин, Ю.П. Сухоруков, В.Д. Бессонов, Е.А. Ганьшина. *Патент РФ № 2497166, Бюл. № 30 27.10.2013.*

Динамика топологических солитонов в движущихся доменных границах

Б.Н. Филиппов¹, В.В. Зверев², М.Н. Дубовик¹

¹Лаборатория микромагнетизма

²Физическо-технический институт, УрФУ, Екатеринбург

На основе микромагнитного подхода выполнено трехмерное компьютерное моделирование динамических процессов, происходящих в движущейся доменной границе, находящейся в магнитно-мягкой магнитно-одноосной пленке с плоскостной анизотропией. Показано, что движение сопровождается топологическими перестройками распределения намагниченности [1]. Эти перестройки представляют собой «быстрые» процессы, включающие рождение и уничтожение пар вихрей и антивихрей, пар сингулярных (блоховских) точек; трехсолитонные процессы; смену ориентации намагниченности в корах вихрей/антивихрей с рождением и уничтожением блоховской точки. При этом сохраняются значения топологических зарядов двух типов. Быстрые процессы с рождением и уничтожением блоховских точек часто сопровождаются генерацией спиновых волн. Динамический сценарий топологических перестроек зависит от выбора начального распределения намагниченности (наличие или отсутствие блоховских линий и точек [1–5]). Вычислены скорости движения, соответствующие различным сценариям перестройки структуры доменной границы. Установлено, что в процессе движения в доменной границе, изначально трансляционно-инвариантной вдоль оси легкого намагничивания, могут возникать переходные структуры.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Магнит», № 01201463328) при частичной поддержке УрО РАН (проект № 15-9-2-33).

- [1] В.В. Зверев, Б.Н. Филиппов, *ФТТ*, 2016, т. 58, с. 473–484.
- [2] B.N. Filippov, M.N. Dubovik, V.V. Zverev, *JMMM*, 2015, v. 374, p. 600–606.
- [3] М.Н. Дубовик, В.В. Зверев, Б.Н. Филиппов, *ФММ*, 2014, т. 115, с. 1226–1235.
- [4] V.V. Zverev, M.N. Dubovik, B.N. Filippov, *Solid Stat. Phen.*, 2014, v. 215, p. 421–426.
- [5] В.В. Зверев, Б.Н. Филиппов, М.Н. Дубовик, *ФТТ*, 2014, т. 56, с.1725–1734.

Магнитный линейный дихроизм в пленке $\text{BiFe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$ в ИК-диапазоне

Е.В. Мостовщикова, Н.Н. Лошкарева, С.В. Наумов

Лаборатория магнитных полупроводников

Проведено изучение оптических свойств (спектров оптической плотности $D(E)$) пленок $\text{BiFe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$ с толщиной 230 и 1400 нм, измеренных в среднем и ближнем ИК-диапазоне в неполяризованном и линейно-поляризованном свете [1].

В спектрах $D(E)$ обеих пленок, измеренных в неполяризованном свете, обнаружены полосы поглощения при $E \sim 0.2$ и ~ 0.7 эВ, связанные с суперпозицией двухфононного и двухмагнного поглощения и $d-d$ -переходами в ионах Fe или Co соответственно.

В спектрах $D(E)$, измеренных в линейно-поляризованном свете, обнаружены полосы поглощения, которые отсутствуют в спектрах в неполяризованном свете, и положение которых различается в зависимости от ориентации вектора электрического поля \mathbf{E} электромагнитной волны относительно оптической оси (о.а.) пленки. Данные полосы связаны с неоднородным зарядовым состоянием, выражающимся в существовании ферроэлектрических доменов и доменных стенок, проводимость которых выше, чем в домене. Более проводящие доменные границы можно рассматривать как наноразмерные включения в диэлектрической матрице, на которых происходит рассеяние света, и в спектрах $D(E)$ возникают резонансные полосы поглощения. Различие положения полос, которое наиболее ярко проявляется в спектре линейного дихроизма в виде осциллирующего характера кривой, связано с различием размеров ферроэлектрических доменов и,

соответственно, доменных границ в разных кристаллографических направлениях.

Приложение внешнего магнитного поля при $T=300$ К или в процессе охлаждения до $T=80$ К приводит к изменению положения резонансных полос поглощения в спектрах $D(E)$, которое различно в зависимости от направления магнитного поля (рис.1). Наблюдаемый магнитный линейный дихроизм связан с изменением под действием поля соотношения длин короткой и длинной стороны ферроэлектрических доменов.

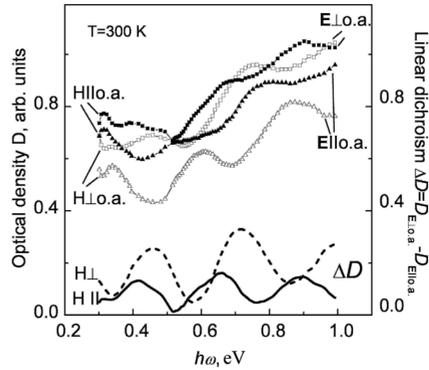


Рис.1. Спектры оптической плотности (символы) и линейного магнитного дихроизма (линии) пленки $\text{BiFe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$.

Обнаруженный линейный магнитный дихроизм позволяет рекомендовать тонкие пленки Со-замещенного феррита висмута в качестве нового функционального материала для магнито-оптоэлектроники.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Спин» № 01201463330) при частичной поддержке проекта Президиума УрО РАН 15-9-2-4, РФФИ 14-03-00432.

- [1] E.V. Mostovshchikova, N.N. Loshkareva, S.V. Naumov, V.A. Khokhlov, A.Yu. Prokhorov, A.V. Pashchenko, A.S. Korneevetc. *Appl. Phys. A*, 2015, v. 120, P. 239–246.

Магнитокалорический эффект в монокристаллах CdCr_2Se_4 и HgCr_2Se_4

Н.Г. Бебенин¹, Р.И. Зайнуллина¹, Ю.П. Сухоруков²

¹Лаборатория электрических явлений

²Лаборатория магнитных полупроводников

Исследована зависимость магнитокалорического эффекта в ферромагнитных шпинелях CdCr_2Se_4 и HgCr_2Se_4 , описываемых моделью Гейзенберга, от температуры и магнитного поля H . В магнитном поле $H=15$ кЭ максимум изменения энтропии, $|\Delta S(H)|$, индуцированного полем, составляет величину $1.4 - 1.5$ Дж/(кг К) (рис.1), что близко к значениям, наблюдавшимся в манганитах лантана. При температуре, равной среднему значению температуры Кюри, $\Delta S(H)$ является линейной функцией $H^{2/3}$: $-\Delta S(H) = \alpha H^{2/3} - \beta$, (рис.2). Показано, что T_C можно определить как температуру, при которой это соотношение наилучшим образом описывает полученные нами экспериментальные данные.

Для исследованных шпинелей определено стандартное отклонение σ_{T_C} температуры Кюри, которое оказалось равным 2.5 К для CdCr_2Se_4 ($T_C=130$ К) и 4 К в случае HgCr_2Se_4 ($T_C=112$ К). Видно, что магнитный фазовый

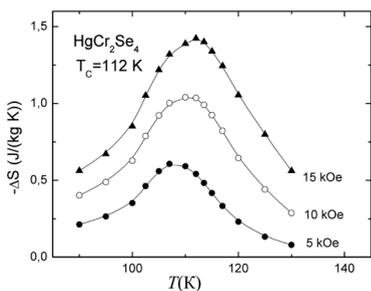


Рис.1.

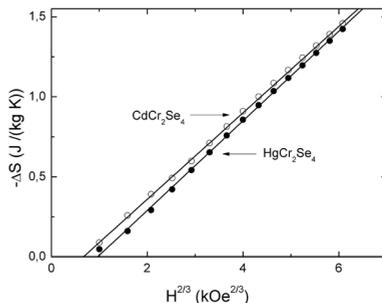


Рис.2.

переход в исследованных монокристаллах характеризуется значительным размытием.

Сравнение полученных экспериментальных данных с теоретическими результатами для модели Гейзенберга в приближении среднего поля показывает, что указанное приближение завышает изменение энтропии в магнитном и, следовательно, не пригодно для количественного анализа магнитокалорического эффекта.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН – проекты №№ 12-П-2-1034, гранта РФФИ 13-02-00007 и гранта НШ 6172.2012.2.

[1] N.G. Bebenin, R.I. Zainullina, Yu.P. Sukhorukov. *JMMM*, 2015, v. 387, p. 127–130.

Увеличение размера магнитного полярона как причина необычных транспортных свойств слоистого манганита $\text{La}_{1.2}\text{Sr}_{1.8}\text{Mn}_2\text{O}_7$

Н.И. Солин

Лаборатория магнитных полупроводников

В настоящее время нет единого мнения относительно микроскопических механизмов, вызывающих колоссальное магнитосопротивление (КМС) манганитов. В теории манганитов одни полагают поляроны носителями тока даже в металлическом состоянии, другие считают важным конкуренцию зарядового и орбитального упорядочения с двойным обменом. Эксперименты по рассеянию нейтронов, фотоэмиссионной и туннельной спектроскопии показывают сохранение поляронов ниже T_C и увеличение размера поляронов как причину перехода в металлическое состояние и КМС-манганитов.

В работе обсуждаются результаты собственных и известных из литературы исследований магнитных и электрических свойств монокристаллов слоистого манганита $\text{La}_{1.2}\text{Sr}_{1.8}\text{Mn}_2\text{O}_7$. Они являются частью общего класса квазидвумерных $2D$ -манганитов $(\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x)_{n+1}\text{Mn}_n\text{O}_{3n+1}$ с $n=2$, которые представляют структуру из магнитных двойных слоев MnO_2 , разделенных вдоль оси c немагнитными слоями $(\text{LaSr})_2\text{O}_2$. Они обладают необычными для кубических манганитов ($n=\infty$) свойствами – высокими значениями магнитосопротивления вблизи T_C , анизотропией и неметаллическим поведением электросопротивления и др.

В работе [1] предполагается, что вследствие квазидвумерности поляронная проводимость в слоистых манганитах сохраняется в низкотемпературном металлоподобном состоянии, что транспортные свойства $\text{La}_{1.2}\text{Sr}_{1.8}\text{Mn}_2\text{O}_7$ обусловлены

увеличением размера поляронов (превращением малых поляронов в большой) при уменьшении температуры и наложении магнитного поля. При замещении La^{+3} на Sr^{+2} лишний электрон в $\text{La}_{1.2}\text{Sr}_{1.8}\text{Mn}_2\text{O}_7$ локализуется на ионах Mn, образует «малый» магнитный полярон с энергией кулоновской блокады $E_{\text{cul}} \sim 1/R_{\text{pol}}$. Электросопротивление обусловлено прыжками (туннелированием) между поляронами, а магнитосопротивление – увеличением размера поляронов. При высоких температурах (из-за малой величины энергии активации термоэда манганитов) и ниже T_C (в металлоподобном состоянии) концентрация носителей слабо зависит от температуры. Электросопротивление в этом случае имеет активационный вид, $\rho(T, H) \sim \sigma_0^{-1} \times \exp(W_H(T, H)/kT)$, приблизительно описывается со слабо зависящим от температуры предэкспоненциальным фактором σ_0^{-1} , и $\rho(T, H)$ в основном определяется энергией активации прыжка $W_H \sim E_{\text{cul}} \sim 1/R_{\text{pol}}$, т.е. изменениями размера поляронов. В рамках этой модели проанализированы транспортные свойства монокристаллов $\text{La}_{1.2}\text{Sr}_{1.8}\text{Mn}_{2(1-z)}\text{O}_7$ с дефицитом Mn и монокристаллов $\text{La}_{1.2}\text{Sr}_{1.8}\text{Mn}_2\text{O}_7$ (по данным из литературных источников). Упрощенная модель проводимости поляронов объясняет основные особенности магнитотранспортных свойств $\text{La}_{1.2}\text{Sr}_{1.8}\text{Mn}_2\text{O}_7$: увеличение $\rho(T)$ при низких температурах, анизотропию электросопротивления, подавление ее магнитным полем, высокие значения отрицательного магнитосопротивления вблизи температуры Кюри по сравнению с кубическими манганитами, отрицательное магнитосопротивление во всей области температур, отсутствие расходимости длины ферромагнитных корреляций при T_C . Результаты описываются в рамках модели разделения фаз.

Работа выполнена в рамках государственного задания УрО РАН программа no. 15-9-2-4.

[1]. N.I. Solin. *JMMM*, 2016, v. 401, p. 677–683.

Методы и средства структурного анализа и фазового контроля ответственных изделий из аустенитных сталей и сплавов подверженных деформированию

М.Б. Ригмант, А.П. Ничипурук, М.К. Корх, М.С. Огнева

Лаборатория магнитного структурного анализа

Обнаружена однозначная связь удельного электрического сопротивления и фазы охрупчивания – мартенсита (M), возникающего при деформировании изделий из аустенитных хромоникелевых сталей в процессе эксплуатационных нагрузений. Разработаны малогабаритные приборы – измерители удельного электрического сопротивления ρ «специализированные Омметры» для оперативного фазового контроля в производственных условиях (рис. 1).

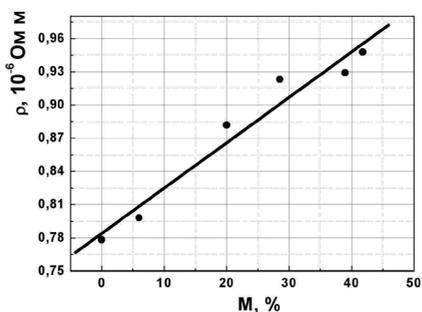


Рис. 1 Зависимость удельного электрического сопротивления (ρ) от процентного содержания фазы мартенсита деформации (M) в хромоникелевой стали.

Разработаны приборы (ИМПАС, ИМПАС-1, ферритометры ФМ-3 и ФХ-3, измеритель мартенсита ИМДС, универсальный прибор ФерроКОМПАС и др.) раннего обнаружения локальных мест зарождения и развития процессов трещинообразования в деталях и механизмах из аустенит-

ных хромоникелевых сталей и сплавов на основе никеля, подверженных воздействию критических нагрузок (рис. 2).



Рис. 2. Универсальный прибор ФерроКОМПАС для локального измерения магнитной проницаемости и процентного содержания ферромагнитных фаз в аустенитных сталях и сплавах.

Предложена уникальная методика фазового контроля трехфазных аустенитных сталей, содержащих кроме фазы аустенита и феррита дополнительно фазу мартенсита деформации. Результаты опубликованы в [1–3].

- [1] М.Б. Ригмант, М.К. Корх, Д.И. Давыдов, Д.А. Шишкин, Ю.В. Корх, А.П. Ничипурук, Н.В. Казанцева. *Дефектоскопия*, №11, 2015, с. 28–42.
- [2] М.К. Корх, М.Б. Ригмант, Д.И. Давыдов, Д.А. Шишкин, А.П. Ничипурук, Ю.В. Корх. *Дефектоскопия*. №12, 2015, с. 20–33.
- [3] М.К. Korkh, D.I. Davidov, J.V. Korkh, M.B. Rigmant, A.P. Nichipuruk, N.V. Kazantseva. *AIP Conference Proceedings 1683* №, p.20097 (4 pp.) 2015.

Новый тип стабильных частицеподобных состояний в киральных магнетиках

Ф.Н. Рыбаков¹, А.Б. Борисов¹, S. Blügel², N.S. Kiselev²

¹Лаборатория теории нелинейных явлений

²Peter Grünberg Institut, Forschungszentrum Jülich, Germany

Найден новый тип термодинамически стабильных магнитных состояний в киральных магнетиках. Такие состояния являются солитонами микромагнитных уравнений, локализованными в трех измерениях вблизи свободной границы образца и могут быть найдены в кристаллах типа $B20$, в частности в сплавах $Mn_{1-x}Fe_xGe$, $Mn_{1-x}Fe_xSi$, $Fe_{1-x}Co_xSi$.

Стабильность нового частицеподобного состояния обусловлена существенным энергетическим барьером, создаваемым киральным поверхностным закручиванием вектора намагниченности. Такой барьер удерживает точку Блоха вблизи свободной поверхности образца на некоторой оптимальной глубине P (рис. 1). Из-за ведущей роли киральности

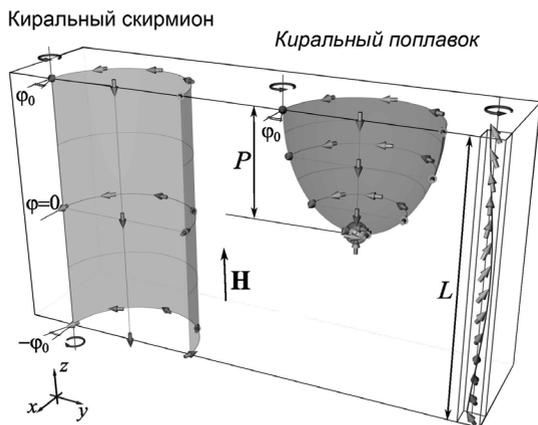


Рис. 1. Структура вектора намагниченности вихревой трубки – кирального скирмиона и нового стабильного состояния в пленке геликоидального магнетика.

для возникновения такого состояния и локализации вблизи поверхности, подобно рыбацкому поплавку на поверхности воды, для этого объекта мы вводим обозначение *киральный поплавок*.

Разработаны новые методы и численные алгоритмы поиска стабильных и метастабильных состояний, вычисления энергетических барьеров в классических спиновых моделях.

Результаты имеют существенное значение для разработки скирмионной беговой памяти (skyrmion racetrack), где подобные квазичастицы выступают носителями информации и перемещаются с помощью спиновых токов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ – проект № 14-02-31012. Результаты опубликованы в [1, 2].

- [1] S.A. Meynell, M.N. Wilson, J.C. Loudon, A. Spitzig, F.N. Rybakov, M.B. Johnson, T.L. Monchesky. *Phys. Rev. B*, 2014, v.90, p. 224419.
- [2] F.N. Rybakov, A.B. Borisov, S. Blugel, N.S. Kiselev. *Phys. Rev. Lett.*, 2015, v.115, p. 117201.

Фрустрации и фазовые переходы в низкоразмерных магнитных системах

Ф.А. Кассан-Оглы, А.И. Прошкин

Лаборатория квантовой теории конденсированного состояния

Обнаружены новые особенности поведения фрустрированных моделей.

Конкуренция между взаимодействиями и магнитным полем может приводить к магнитному упорядочению с пониженной размерностью.

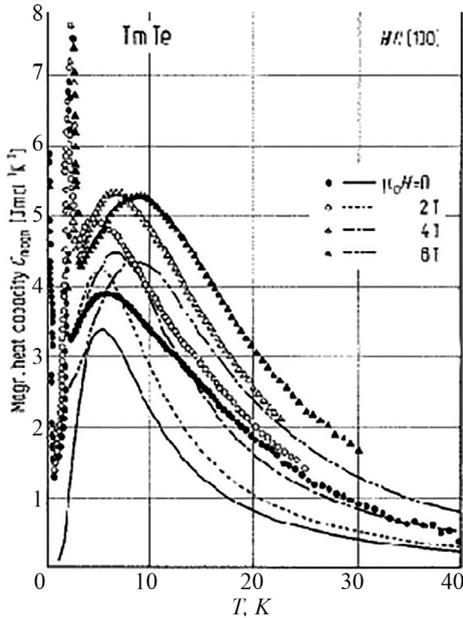
Конкурирующие обменные взаимодействия в одних решетках и моделях могут становиться не конкурирующими в других решетках или моделях.

В любой модели и на любой решетке в непосредственной окрестности точки фрустрации или фрустрационного поля происходит расщепление магнитной теплоемкости на узкий острый пик и пологий максимум, что наблюдается и в реальных $3D$ -магнетиках.

Исследованы модели Изинга и Поттса с взаимодействием между ближайшими и вторыми соседями в магнитном поле на различных решетках: $1D$ -линейной цепочке, квадратной, треугольной, кагоме и шестиугольной.

В рассматриваемых моделях на разных решетках возникают самые разнообразные варианты фазовых переходов и фрустраций – от отдельных точек фрустраций и фрустрационных полей до конечных и бесконечных линий фрустраций в пространстве параметров обменных взаимодействий и внешнего поля.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Квант», № 01201463332). Результаты опубликованы в [1–7].



Магнитная теплоемкость в TmTe.

- [1] F.A.Kassan-Ogly, A.K.Murtazaev, A.K.Zhuravlev, M.K.Ramazanov, A.I.Proshkin. *ЖММ*, 2015, v. 384, p. 247.
- [2] А.К. Муртазаев, А.Б. Бабаев, М.А. Магомедов, Ф.А. Кассан-Оглы, А.И. Прошкин. *Письма в ЖЭТФ*, 2014, т. 100, №.4, с. 267.
- [3] Proshkin A.I., Kassan-Ogly F.A. *ЖММ*, 2015, v. 383, p.13.
- [4] Ф.А. Кассан-Оглы, Б.Н. Филиппов, А.И. Прошкин, А.В. Зарубин. *ФММ*, 2015, т. 116, № 2, p. 1.
- [5] A. V. Zarubin, F. A. Kassan-Ogly, M. V. Medvedev, and A. I. Proshkin. *Solid State Phenomena*, 2015, vs. 233-234, p. 212.
- [6] Ф.А. Кассан-Оглы, Б.Н. Филиппов, А.И. Прошкин, А.В. Зарубин. *ФММ*, 2015, т. 116, № 2, p. 1.
- [7] Ф.А. Кассан-Оглы, А.И. Прошкин. *Сб. трудов Международной конференции «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления»*, Челябинск, 2015, с. 7.

Новый метод выявления и визуализации микротрещин в металлических изделиях

О.А. Булычев¹, С.А. Шлеенков², А.С. Шлеенков¹

¹Лаборатория дефектоскопии

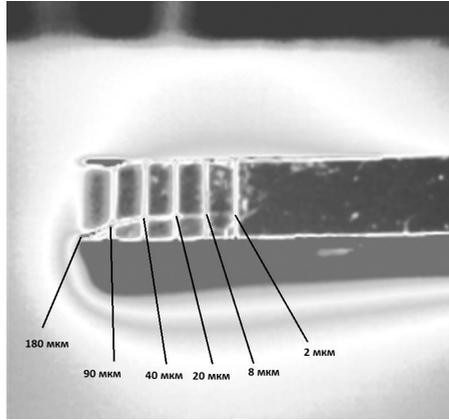
²Лаборатория углеродных наноматериалов

Разработан новый метод выявления и визуализации микротрещин в металлических изделиях путем фиксации температурного рельефа с помощью инфракрасной камеры при возбуждении в них высокочастотных вихревых токов, позволяющий существенно уменьшить технические требования к условиям контроля (дефектоскопии) изделий и заменить трудоемкий порошковый метод.

В последние десятилетия произошел значительный скачок в развитии техники тепловидения (камеры инфракрасной оптики). В этих камерах используются неохлаждаемые матрицы фотоэлементов (количество фоточувствительных пикселей 320х240, температурная чувствительность от 0,01К, частота регистрации изображений до 200 Гц, спектральный диапазон 3÷14 мкм). Нами предлагается использовать такую технику для выявления микротрещин по их тепловому излучению. Процесс контроля заключается в нагревании изделия и фиксации теплового изображения контролируемой поверхности [1–3]. Важно то, что данный способ пригоден для выявления поверхностных трещин как в ферромагнитных, так и в неферромагнитных изделиях. Наиболее перспективным является нагрев изделия с помощью вихревых токов, поскольку скорость нагрева поверхностных слоев высокочастотным методом может достигать до нескольких тысяч градусов в секунду.

Для оценки чувствительности по раскрытию был выбран образец с естественным дефектом с отношением длины

к ширине более десяти. При этом начальная глубина трещины составила 1 мм, начальная ширина 180 мкм, конечная 2 мкм, длина 25 мм. Предварительно ширина трещины измерялась с помощью оптического микроскопа по ее длине в точках пересечения с вертикальными разметочными линиями, вдоль



направления которых, протекали вихревые токи (расстояние между соседними разметочными линиями 5 мм). Нагрев происходил в течение 3 с при частоте возбуждения 180 кГц. Температура образца после нагрева не превышала 70 град. Как видно из рисунка, на термограмме надежно фиксируется раскрытие до величины 8 мкм, что соответствует чувствительности магнитопорошкового метода по уровню Б. Метод рекомендуется для промышленного применения.

Работа выполнена по теме «Диагностика» (“Diagnostics”), номер госрегистрации 01201463329.

[1] О.А.Булычев,С.А.Шлеенков,В.Г.Лисиенко, А.С.Шлеенков. *Дефектоскопия*,2010,№4, с.50–57.

[2] Патент РФ №135421, 2013.

[3] Патент РФ №132894, 2013.

Необычное поведение электросопротивления соединений R_7Rh_3 ($R = Gd, Tb, Ho$) в парамагнитной области, вызванное ближним антиферромагнитным порядком

Н.В. Баранов¹, Т. Tsutaoka², Е.Г. Герасимов³, П.Б. Терентьев³,
А.В. Прошкин³, А.А. Шерстобитов⁴

¹Лаборатория микромагнетизма

²Graduate School of Education, Hiroshima University, Japan

³Лаборатория ферромагнитных сплавов

⁴Лаборатория полупроводников и полуметаллов

Редкоземельные интерметаллические соединения R_7Rh_3 обладают гексагональной кристаллической структурой типа Th_7Fe_3 , в которой редкоземельные ионы занимают три неэквивалентных кристаллографических позиции. При низких температурах в них реализуется антиферромагнитное (АФ) упорядочение и наблюдаются индуцируемые магнитным полем фазовые переходы, которые сопровождаются гигантским магниторезистивным эффектом. В парамагнитном состоянии выше температуры Нееля в соединениях R_7Rh_3 обнаружен отрицательный температурный коэффициент электрического сопротивления. Причины такого поведения были не выяснены. В настоящей работе представлены результаты исследования монокристаллов соединений R_7Rh_3 ($R = Gd, Tb, Ho$) с помощью измерений намагниченности в статических и импульсных полях, а также электросопротивления. Установлена природа отрицательного температурного коэффициента электрического сопротивления редкоземельных антиферромагнетиков R_7Rh_3 ($R = Gd, Tb, Ho$) в парамагнитной области. Показано, что необычное поведение электрических свойств интерметаллидов R_7Rh_3 обусловлено наличием дополнительного вклада в рассеяние электронов проводимости на областях

ближнего антиферромагнитного порядка, существующих в широкой области температур выше температуры Нееля. Установлено, что наряду с гигантским магниторезистивным эффектом в магнитоупорядоченном состоянии приложении магнитного поля при температурах выше температуры Нееля также сопровождается необычно высоким магнитосопротивлением.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН (проекты №№ 12-Т-2-1012, 15-17-2-22). Результаты опубликованы [1 – 5].

- [1] T. Tsutaoka, K. Obata, A.A. Sherstobitov, E.G. Gerasimov, P.B. Terentev, N.V. Baranov. *J. Alloys Comp.*, 2016, v. 654, p.126–132.
- [2] T. Tsutaoka, T. Matsushita, A.V. Proshkin, E.G. Gerasimov, P.B. Terentev, N.V. Baranov. *J. Alloys Comp.*, 2015, v. 628, p. 230–235.
- [3] K. Obata, T. Tsutaoka, A.A. Sherstobitov, E.G. Gerasimov, P.B. Terentev, A.F. Gubkin, N.V. Baranov, *20th International Conference on Magnetism ICM2015, July 5–10 2015. Barcelona, Spain. Book of Abstracts*, 2015, p. TH.C-P53
- [4] T. Tsutaoka, K. Shimomura, N.V. Baranov, A.V. Proshkin, E. G. Gerasimov and P.B. Terentev. *J. Korean Physical Society*, 2013, v. 63, p.563–566.
- [5] T. Tsutaoka, T. Matsushita, N.V. Baranov, A.V. Proshkin, E.G. Gerasimov, P.B. Terentev. *V Euro-Asian Symposium “Trends in Magnetism”: Nanomagnetism. EASTMAG-2013. 15–21 September 2013. Vladivostok. Russia. Book of Abstracts*, p. 294.

Осциллирующее межслойное взаимодействие и эффекты близости в сверхрешетках Fe/Cr/Gd

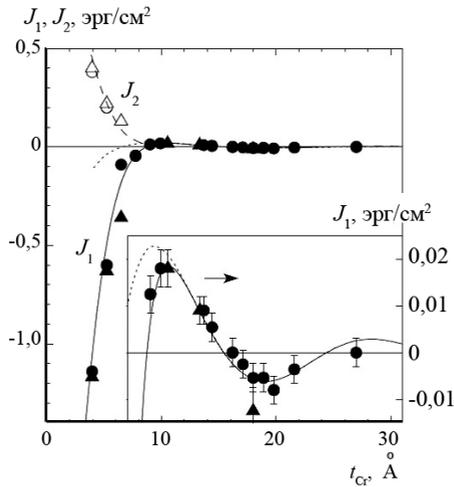
Е.А. Кравцов¹, М.А. Миляев², Л.И. Наумова²,
В.В. Проглядо¹, М.В. Рябухина¹, В.В. Устинов²

¹Лаборатория квантовой наноспинтроники

²Лаборатория электрических явлений

Сверхрешетки Fe/Cr/Gd – искусственная магнитная система, в которой обменное взаимодействие магнитных моментов Fe и Gd может быть контролируемым образом модифицировано при изменении толщины антиферромагнитной прослойки Cr. Комбинированным применением рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения, ферромагнитного резонанса, SQUID-магнитометрии и поляризационной нейтронной рефлектометрии было проведено исследование структурных и магнитных свойств сверхрешеток Fe(35 Å)/Cr(t_{Cr})/Gd(50 Å), где $t_{Cr} = 0 - 60$ Å (см. рисунок).

Было установлено, что введение прослойки Cr приводит к структурным изменениям в слоях Gd: помимо основной ГПУ-фазы по мере увеличения толщины прослойки возникает дополнительная ГЦК-фаза, для которой характерно наличие уменьшенного магнитного момента. Обменное взаимодействие магнитных моментов слоев Fe и Gd через прослойку Cr осциллирует с толщиной прослойки с периодом около 18 Å. Обнаружено, что эффекты близости Fe–Gd приводят к возникновению индуцированного магнитного момента вблизи интерфейсов в слоях Gd при температурах, превышающих температуру Кюри объемного Gd. Величина индуцированного магнитного момента составляет 7 магнетонов Бора на атом в сверхрешетке Fe/ Gd и уменьшается по мере увеличения толщины Cr в сверхрешетках Fe/Cr/Gd.



Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Спин», № 01201463330) и при частичной поддержке комплексной программы УрО РАН (проект № 15-17-2-17), гранта НШ 6172.2012.2, грантов РФФИ 12-02-12054, 14-22-01063.

Результаты опубликованы в [1–3].

- [1] А.Б. Дровосеков, Н.М. Крейнес, А.О. Савицкий, Е.А. Кравцов, Д.В. Благодатков, М.В. Рябухина, М.А. Миляев, В.В. Устинов, Э.М. Пашаев, И.А. Субботин, Г.В. Пруцков. *ЖЭТФ*, 2015, т. 147, с. 1204.
- [2] М.В.Рябухина, Е.А.Кравцов, Д.В.Благодатков, Л.И.Наумова, В.В.Проглядо, Ю.Хайдуков. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2014, т. 10, с. 26.
- [3] М.В.Рябухина, Е.А.Кравцов, Д.В.Благодатков, Л.И.Наумова, Ю.В. Никитенко, В.В.Проглядо, В.В.Устинов, Ю.Хайдуков. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2015, № 1, с. 46.

Исследование мультиферроика CuCrO_2 методом ЯМР ^{53}Cr

А.Г. Смольников, В.В. Оглобличев, С.В. Верховский,
К.Н. Михалев, А.Ф. Садыков, Ю.В. Пискунов, А.П. Геращенко

Лаборатория кинетических явлений

Одной из наиболее типичных фрустрированных магнитных структур является структура с треугольной решеткой и антиферромагнитным взаимодействием между атомами. Такие структуры служат хорошими модельными объектами и активно исследуются как экспериментально, так и теоретически. Именно к этому классу соединений относится CuCrO_2 , в котором ниже $T = 23.6\text{K}$, формируется несоизмеримая с периодом кристаллической решетки магнитная структура.

В данной работе исследовано основное магнитное состояние мультиферроика CuCrO_2 методами ЯМР на атомах хрома в магнитоупорядоченной фазе монокристаллического образца CuCrO_2 . Сложность наблюдения ЯМР на магнитном ионе хрома в упорядоченном состоянии обусловлена малым природным содержанием ЯМР-изотопа ($^{53}\text{Cr} - 9.5\%$) и очень короткими временами спин-спиновой релаксации. Тем не менее нам удалось впервые наблюдать ЯМР ^{53}Cr в исследуемом соединении [1, 2].

В результате работы показано, что полученные значения сверхтонкого поля ($h_{\text{loc,hf}} = -271(3)$ кЭ) и магнитного момента ($\mu = 2.78\mu_B$) соответствуют основному состоянию Cr^{3+} в октаэдрическом окружении атомов кислорода. Из зависимости формы спектра ЯМР ^{53}Cr от задержки между импульсами t_{del} в импульсной последовательности $\tau_{\pi/2} - t_{\text{del}} - \tau_{\pi} - t_{\text{del}} - \text{эхо}$ и наличия дополнительных сигналов от ядер хрома установлено присутствие в решетке различных магнитно-неэквивалентных позиций атомов хрома. Совпадение оценки решеточного

вклада ГЭП в МТЗ с наблюдаемой в эксперименте шириной линии ЯМР Cr позволяет сделать вывод о том, что валентный вклад в ГЭП на позициях ионов Cr^{3+} незначителен (рис. 1).

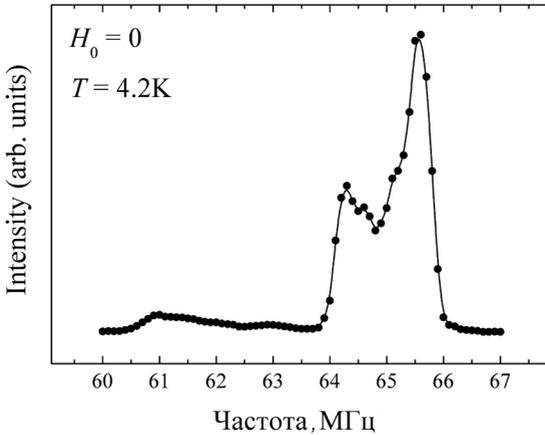


Рис.1. Спектр ЯМР ^{53}Cr в мультиферроике CuCrO_2 в нулевом внешнем магнитном поле $H_0 = 0$ и температуре $T = 4.2\text{K}$.

Данная работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Спин» №01201463330 при поддержке РФФИ проект № 15-02-02000, по проекту фундаментальных исследований УрО РАН №15-9-2-49.

- [1] A. G. Smol'nikov, V. V. Ogloblichev, S. V. Verkhovskii *et al.* *JETP Letters*, 2015, *V.* 102, *No.* 10, *pp.* 674–677.
- [2] А.Г. Смольников, В.В. Оглобличев, А.Ф. Садыков и др. *Естественные и технические науки*, 2015, №10, с. 123–126.

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 №
Формат 60×84 1/16, 4,9 печ. л. Тираж 140 экз.
620137, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18