

**Индукцированные магнитным полем фазовые переходы в высокоанизотропных ферримагнетиках  $RFe_5Al_7$**

Н.В. Мушников<sup>1</sup>, Е.В. Розенфельд<sup>1</sup>, Д.И. Горбунов<sup>2</sup>, Ш. Ямамото<sup>2</sup>, Й. Возница<sup>2</sup>, К. Стром<sup>3</sup>  
А.В. Андреев<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>2</sup>Лаборатория сильных магнитных полей HLD-EMFL, Дрезден, Германия

<sup>3</sup>Немецкий электронный синхротрон DESY, Гамбург, Германия

<sup>4</sup>Институт физики Чешской академии наук, Прага, Чехия

Проведены измерения магнитных свойств и рентгеновского магнитного циркулярного дихроизма (XMCD) ферримагнитных монокристаллов интерметаллидов  $RFe_5Al_7$  ( $R = Tb, Dy, Ho, Tm$ ). На кривых намагничивания вблизи температуры магнитной компенсации обнаружены скачки намагниченности, величина и критическое поле которых сильно зависят от температуры. Предложена модель намагничивания ферримагнетика с двумя магнитными подрешетками, связанными слабым межподрешеточным обменным взаимодействием. Получены аналитические выражения для кривой намагничивания и критического поля спин-переориентационного перехода. Построена магнитная фазовая диаграмма и определены магнитные структуры, реализующиеся в разных полях при различных температурах. С использованием XMCD в магнитных полях до 30 Тл получено прямое экспериментальное доказательство когерентного скачкообразного вращения магнитных моментов 3d- и 4f-подрешеток

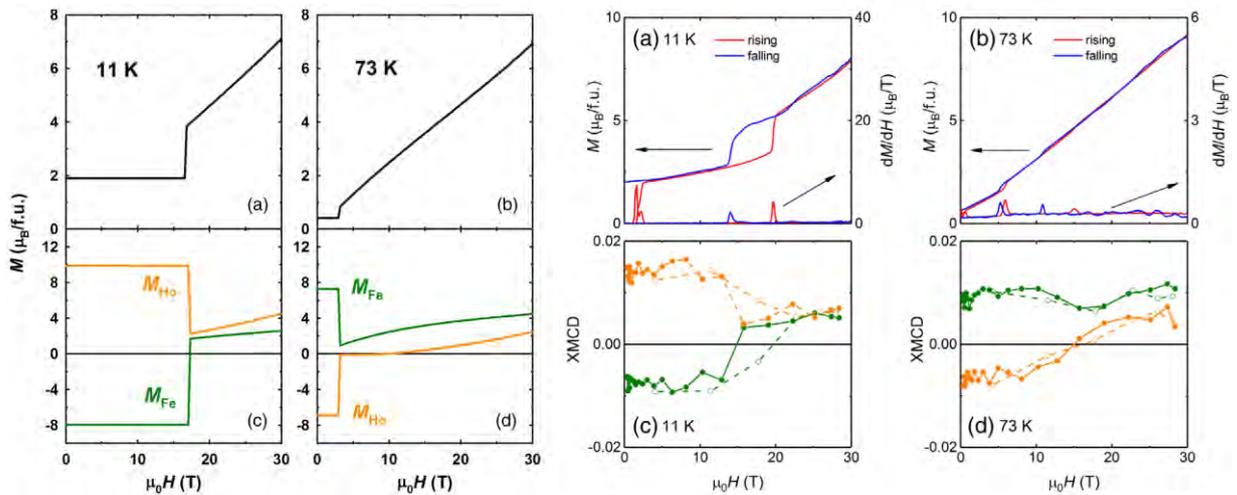


Рисунок - 1 Рассчитанные полевые зависимости намагниченности  $HoFe_5Al_7$  и магнитных моментов подрешеток Fe и Ho при температурах ниже (11 К) и выше (73 К) температуры компенсации

Рисунок - 2 Измеренные полевые зависимости намагниченности и сигнала XMCD от подрешеток Fe (зеленый цвет) и Ho (желтый цвет) монокристалла  $HoFe_5Al_7$

1. High-field soft-x-ray dichroism of a hard ferrimagnet with easy-plane anisotropy / Sh. Yamamoto, D.I. Gorbunov, I.F. Diaz-Ortega, A. Miyata, T. Kihara, Y. Kotani, T. Nakamura, N.V. Mushnikov, A.V. Andreev, H. Nojiri, J. Wosnitza // *Phys. Rev. B.* — 2021. — V. 104. — P. 064405 (7 p).

1.3.2. *Физика конденсированных сред и физическое материаловедение.*  
Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФМ УрО РАН Рег.№ АААА-А18-118020290129-5, Шифр «Магнит».

## Новые фазы и уникальные баро- и деформационно-индуцированные термообратимые магнитные и структурные фазовые превращения в низкомодульных сплавах с эффектами памяти формы систем B2–Ti-Ni, L2<sub>1</sub>–Ni-Mn-Ga, D0<sub>3</sub>–Cu-Al-Ni

В.Г. Пушин, Н.Н. Куранова, Е.Б. Марченкова, В.В. Макаров, А.Э. Свирид, А.Н. Уксуеников, Ю.М. Устюгов, А.В. Королев, В.В. Марченков, В.П. Пилюгин

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

Используя высокие давления (до 12 ГПа), мегапластическую деформацию и нагрев, обнаружены новые баро- и деформационно-индуцированные фазы и обратимые магнитные и структурные фазовые превращения в низкомодульных атомноупорядоченных сплавах с памятью формы трех наиболее перспективных для практического применения систем Ti-Ni, Ni-Mn-Ga, Cu-Al-Ni с разным структурным типом аустенитной фазы (B2, L2<sub>1</sub>, D0<sub>3</sub>). Впервые установлено, что высокobarическая обработка сжатием, не изменив размер зерен, приводит к ориентационным бароупругим мартенситным превращениям по ступенчатой последовательности через длиннопериодные метастабильные фазы к конечным двойникованным стабильным фазам. Обратные превращения в аустенитную фазу при нагреве являются структурнообратимыми, обеспечивают восстановление исходной ориентации зерен и, соответственно, эффекты памяти формы. Дальнейшая мегапластическая деформация вызывает фазовые превращения наряду с радикальным измельчением зерен, сопровождаемые ступенчатым понижением ранга сверхструктуры фаз при атомном и магнитном разупорядочении, и аморфизацией. Нагрев позволяет управлять в широких пределах эффектами памяти формы, свойствами и размером зерен.

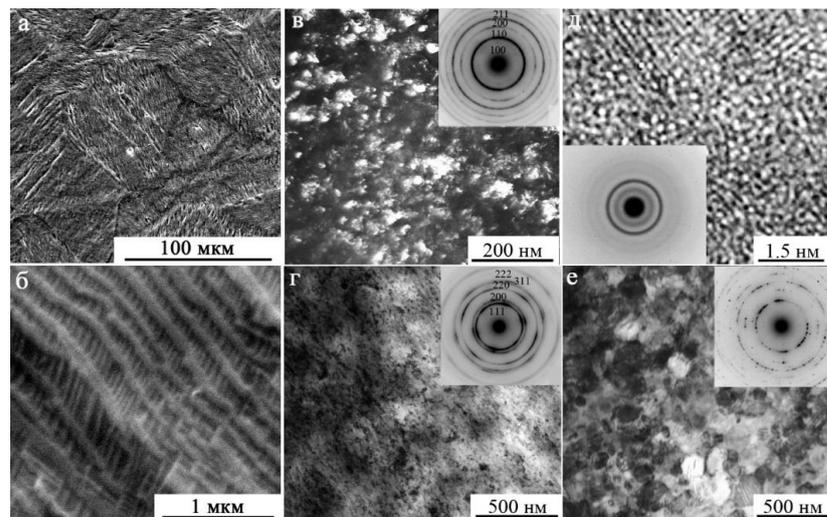


Рисунок - 1 Электронно-микроскопические изображения мартенсита сплавов после барообработки (РЭМ: а, б, в – 6 ГПа), последующей мегапластической деформации в наноструктурное состояние (ПЭМ: в – 3 ГПа, г – 5 ГПа) или аморфное состояние (прямое разрешение ПЭМ: д – 7 ГПа), а также отжига, восстанавливающего рекристаллизованное ультрамелкозернистое состояние (ПЭМ: е)

[Structural and Phase Transformations and Physical and Mechanical Properties of Cu-Al-Ni Shape Memory Alloys Subjected to Severe Plastic Deformation and Annealing](#) [Текст] / А.Е. Свирид, В.Г. Пушин, Н.Н. Куранова, В.В. Макаров, Ю.М. Устюгов // *Materials*. — 2021. — V. 14. — P. 4394—4416.

*1.3.2. Физика конденсированных сред и физическое материаловедение.*

*Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФМ УрО РАН Рег.№ АААА-А18-118020190116-б, Шифр «Структура».*

# Магнитный порядок и спиновая динамика $5f$ электронов в монокристалле урана

В.В. Оглобличев<sup>1</sup>, С.В. Верховский<sup>1</sup>, А.В. Мирмельштейн<sup>2</sup>, Ю.В. Пискунов<sup>1</sup>, А.Ф. Губкин<sup>1</sup>, А.Ю. Гермов<sup>1</sup>, А.В. Андреев<sup>3</sup>, А.М. Потапов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>2</sup>Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина, г. Снежинск

<sup>3</sup>Институт высокотемпературной электрохимии Уральского отделения РАН,

<sup>4</sup>Институт физики, Академия наук Чешской Республики, Прага, Чешская Республика

В работе методами ЯМР исследован магнитный порядок и спиновая динамика  $5f$  электронов урана в монокристалле урана (UN). Показано, что спектры ЯМР на ядре  $^{14}\text{N}$  в магнитоупорядоченной фазе объясняются в рамках модели антиферромагнитного упорядочения типа  $I$ , соответствующего  $1k$ -структуре при наличии доменной структуры. Установлено, что в магнитном поле 9.28 Тл наблюдается разный объем магнитных доменов, в которых магнитные моменты урана лежат вдоль и перпендикулярно направлению магнитного поля. Обнаружено, что при низких температурах скорость спин-решеточной релаксации описывается законом Корринги. Это свидетельствует о формировании ферми-жидкостного состояния. Показано, что в парамагнитной области зависимость энергии спиновых флуктуаций  $\Gamma_{\text{ЯМР}}(T)$  близка к зависимости  $\Gamma(T) \propto T^{0.5}$ , характерной для концентрированных систем Кондо. Полученные в работе данные, крайне важны для объяснения магнитных и транспортных свойства соединений на основе  $f$ -электронных элементов.

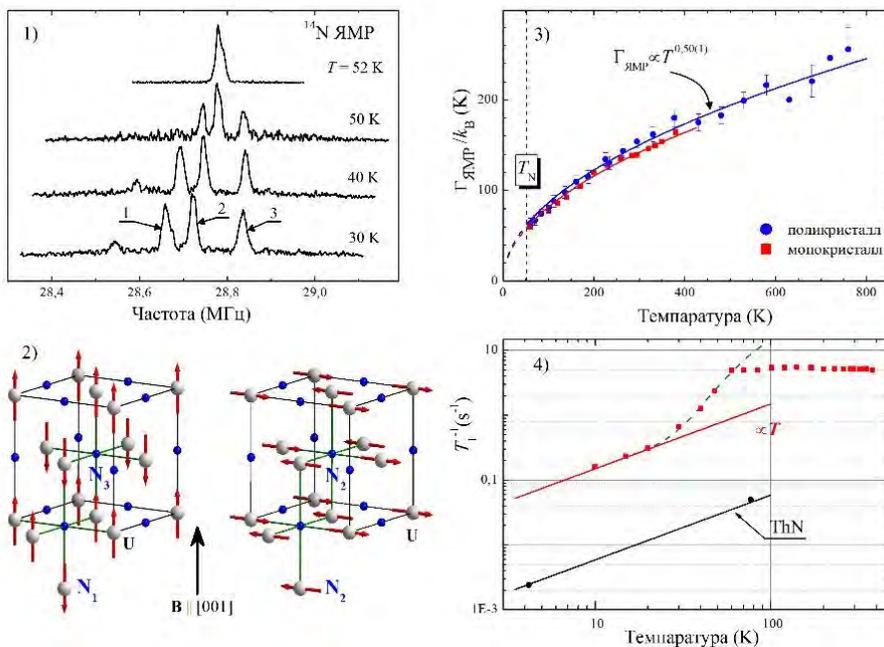


Рисунок – 1 Спектры ЯМР на ядре  $^{14}\text{N}$ . 2. Магнитная структура и варианты магнитных доменов. 3. Зависимость энергии спиновых флуктуаций  $5f$ -электронов урана. 4. Формирование ферми-жидкостного состояния при низких температурах и сравнение результатов с монокристаллом тория.

[5f-electron magnetism in single crystal UN probed by  \$^{14}\text{N}\$  NMR](#) [Текст] / V.V. Ogloblichev<sup>1</sup>, S.V. Verkhovskii<sup>1</sup>, A.V. Mirmelstein<sup>0</sup>, Y.V. Piskunov<sup>1</sup>, A.Y. Germov<sup>1</sup>, A.M. Potapov<sup>0</sup>, A.F. Gubkin<sup>2</sup>, A.V. Andreev<sup>0</sup> // Physical Review B. — 2021. — V. 104. — P. 155148—155159

1.3.2. Физика конденсированных сред и физическое материаловедение.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (Проект № 18-72-10022).

## Управление электронными свойствами микроскопических кристаллических образцов с помощью приложенного давления

И.В. Коробейников<sup>1</sup>, Н.В. Морозова<sup>1</sup>, С.В. Овсянников<sup>2</sup>, Е.Г. Шкварина<sup>1</sup>,  
А.А. Титов<sup>1</sup>, А.Н. Титов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>2</sup>Баварский геологический институт, Байройтский университет, г. Байройт, Германия

Проведено экспериментальное исследование эффекта приложенного давления на электронные свойства микроскопических полупроводниковых и полуметаллических образцов. Показана принципиальная возможность контролируемого изменения типа электропроводности кристаллов  $ZrTe_2$ ,  $ZrSe_3$ ,  $HgTe$ ,  $\zeta-Mn_2O_3$  и сплавов кремний-германий с помощью приложенного давления. Полученные результаты открывают путь к созданию новых технологий для нанoeлектроники. Для термоэлектриков семейства  $(Bi,Sb)_2(Te,Se)_3$  и  $SnTe$ , а также для квазидвумерного  $ZrSe_3$  было показано, что приложенное давление может существенно улучшить их термоэлектрические параметры за счет значительных изменений в электронной структуре. Эффекты приложенного давления могут быть реализованы на практике в термоэлектрических генераторах, использующих, например, тонкопленочные термоэлементы с внутренними напряжениями.

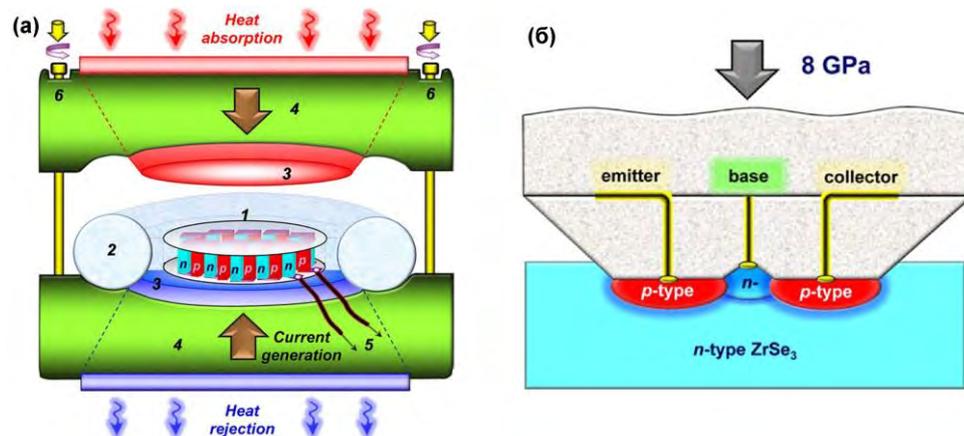


Рисунок - 1 Возможные модели применения установленных эффектов. (а) Простая модель термоэлектрического преобразователя (б) Схематический вид сбоку микроскопического  $p-n$ -транзистора.

1. [Stress-controlled n-p conductivity switch based on intercalated  \$ZrTe\_2\$](#)  / N. V. Morozova, I. V. Korobeynikov, E. G. Shkvarina, A. A. Titov, A. N. Titov, S. V. Ovsyannikov // Applied Physics Letters. — 2021. — V. 119. — P. 53103.
2. [Colossal enhancement of the thermoelectric power factor in stress-released orthorhombic phase of  \$SnTe\$](#)  / N. V. Morozova, I. V. Korobeynikov, S. V. Ovsyannikov // Applied Physics Letters. — 2021. — V. 118. — P. 103903.

1.3.2. Физика конденсированных сред и физическое материаловедение.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФМ УрО РАН Рег.№ АААА-А18-118020190098-5, Шифр «Электрон».

# Наиболее значимые результаты исследований ИФМ УрО РАН в 2021 году, выполняемые в рамках государственного задания

## Магнитные состояния, фазовые превращения и остаточное магнитосопротивление в интеркалированных соединениях $\text{Fe}_x\text{TiS}_2$

Н.В. Баранов<sup>1</sup>, Н.В. Селезнева<sup>2</sup>, Е.М. Шерокалова<sup>2</sup>, А.С. Волегов<sup>1</sup>, А.А. Шерстобитов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>2</sup>Институт естественных наук и математики УрФУ, г. Екатеринбург

Структурная и концентрационная обусловленность магнитных состояний и транспортных свойств слоистых соединений  $\text{Fe}_x\text{TiS}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.75$ ) исследована с помощью рентгеновской и нейтронной дифракции, измерений намагниченности, электросопротивления и магнитосопротивления. Установлено, что в системе  $\text{Fe}_x\text{TiS}_2$  с увеличением содержания Fe реализуются различные магнитные состояния в следующей последовательности: спиновое и кластерное стекло при  $x < 0.25$ , антиферромагнитный (AFM) порядок при  $x \approx 0.25-0.28$ , состояние кластерного стекла при  $x \approx 0.33$ , AFM при  $x \approx 0.45-0.5$  и ферримагнитное упорядочение при  $x > 0.5$ . Изменения магнитного состояния  $\text{Fe}_x\text{TiS}_2$  с концентрацией Fe сопровождаются немонотонными изменениями остаточного магнитосопротивления и коэрцитивной силы с максимальными абсолютными значениями в соединениях с AFM упорядочением. Большие значения коэрцитивной силы ( $H_c$  до 50 кЭ при 2 К) в соединениях  $\text{Fe}_x\text{TiS}_2$  с исходным AFM состоянием указывают на большую роль в процессах перемагничивания внутреннего обменного смещения, что представляет интерес для разработки новых магнитотвердых материалов, не содержащих дорогостоящих редкоземельных элементов.

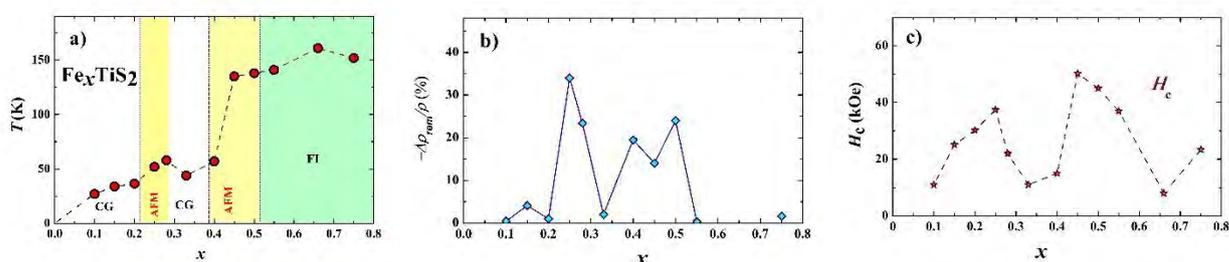


Рисунок - 1  $T-x$  фазовая диаграмма (а), концентрационные зависимости остаточного магнитосопротивления  $\rho_{\text{rem}}/\rho$  при  $T = 4$  К (б) и коэрцитивной силы  $H_c$  при 2 К (с) для соединений  $\text{Fe}_x\text{TiS}_2$

1. [Multiple magnetic states and irreversibilities in the  \$\text{Fe}\_x\text{TiS}\_2\$  system](#) [Текст] / Selezneva N.V., Baranov N.V., Sherokalova E.M., Volegov A.S., Sherstobitov A.A. // Physical Review B. — 2021. — V. 104. — P. 64411—64424.
2. [Remnant magnetoresistance and virgin magnetic state in  \$\text{Fe}\_{0.25}\text{TiS}\_2\$](#)  [Текст] / Selezneva N.V., Baranov N.V., Sherokalova E.M., Volegov A.S., Sherstobitov A.A. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2021. — V. 519. — P. 167480—167487.

1.3.2 Физика конденсированных сред и физическое материаловедение.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФМ УрО РАН Рег.№ АААА-А18-118020290129-5, Шифр «Магнит».

## Особенности динамики фазовых превращений в объемных сплавах на основе FeRh по данным магнитных и структурных измерений

А.А. Ваулин<sup>1</sup>, В.И. Зверев<sup>2</sup>, Р.Р. Гимаев<sup>2</sup>, Т. Миянага<sup>3</sup>, Б.Б. Ковалев<sup>2,4</sup>, А.М. дос Сантос<sup>5</sup>,  
Э. Ловелл<sup>6</sup>, Л.Ф. Коэн<sup>6</sup>, Н.А. Заркевич<sup>7</sup>, А.Ф. Губкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

<sup>3</sup>Университет Хиросаки, г. Хиросаки, Япония

<sup>4</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва

<sup>5</sup>Национальная лаборатория Ок-Ридж, г. Ок-Ридж, США

<sup>6</sup>Имперский колледж, г. Лондон, Великобритания

<sup>7</sup>Лаборатория Эймса, Министерство энергетики США, г.Эймс, США

Проведено нейтронографическое и магнитометрическое исследование систем Fe-Rh легированных Pd в области магнитного фазового перехода первого рода из антиферромагнитного (АФМ) состояния в ферромагнитное (ФМ). Установлено, что структурное состояние в области сосуществования АФМ и ФМ фаз также неоднородно и описывается комбинацией двух структурных доменов кристаллической ОЦК-структуры с различными параметрами элементарной ячейки. Построены детальные температурные зависимости массовой доли АФМ и ФМ фаз, параметров элементарной ячейки и магнитных моментов железа и родия в области АФМ-ФМ фазового перехода при нагревании и охлаждении образца. Показано, что величина гистерезиса зависит от концентрации Pd в легированных сплавах. Данные Холловской магнитометрии хорошо согласуются с данными нейтронной дифракции и дают прямое визуальное представление об эволюции фазового состава образца при нагревании или охлаждении через АФМ-ФМ фазовый переход.

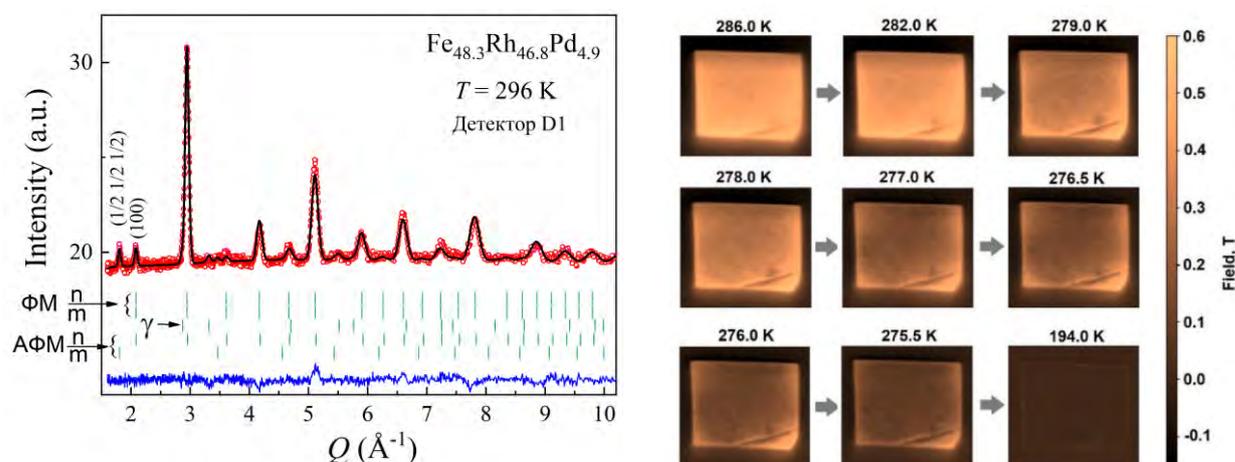


Рисунок - 1 (слева) Результаты уточнение порошковой нейтронограммы, измеренной в области АФМ-ФМ фазового перехода для образца  $\text{Fe}_{48.3}\text{Rh}_{46.8}\text{Pd}_{4.9}$ . Рисками отмечены брэгговские пики от ФМ и АФМ фаз, n - для ядерного и m - для магнитного вкладов,  $\gamma$  - обозначает брэгговские пики от  $\gamma$ -фазы ГЦК. (справа) Серия изображений поверхности образца, полученных методом Холловской магнитометрии при охлаждении образца через температуру АФМ-ФМ фазового перехода.

[Peculiarities of the phase transformation dynamics in bulk FeRh based alloys from magnetic and structural measurements](#) / V.I. Zverev, R.R. Gimaev, T. Miyanaga, A.A. Vaulin, A.F. Gubkin, B.B. Kovalev, A.M. dos Santos, E. Lovell, L.F. Cohen, N.A. Zarkevich // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2021. — V. 522. — P. 167560—167569.

1.3.2 Физика конденсированных сред и физическое материаловедение.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФМ УрО РАН Рег.№ АААА-А18-118020190112-8, Шифр «Поток».

## Магнитные свойства и остаточные механические напряжения в пластически деформированной эвтектоидной стали с различной морфологией перлита

А.Н. Сташков, Е.А. Щапова, А.П. Ничипурук

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

Установлено, что форма цементита и величина межпластинчатого расстояния в пластически деформированной эвтектоидной стали У8 влияют на магнитные свойства и остаточные механические напряжения. Впервые из полевых зависимостей обратимой магнитной проницаемости определены магнитоупругие поля  $H_\sigma$  и рассчитаны остаточные механические напряжения, количественные значения которых удовлетворительно согласуются с данными рентгеноструктурного анализа. Установлено, что остаточные механические напряжения в эвтектоидной стали с глобулярным перлитом меньше, чем в стали с пластинчатым перлитом. Предложена магнитная методика неразрушающей оценки остаточных механических напряжений в эвтектоидной стали с различной морфологией перлита.

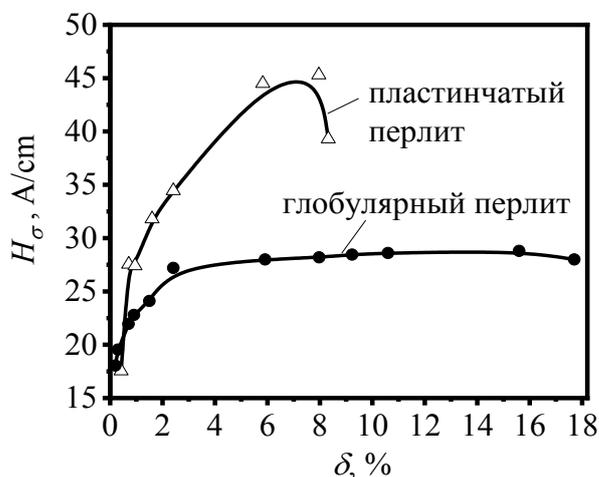


Рисунок 1 - Зависимости магнитоупругих полей ( $H_\sigma$ ) от значения относительного удлинения образцов ( $\delta$ ) для эвтектоидной стали У8 с различной формой перлита

[Magnetic Properties and the Structure of Eutectoid Steel with Different Pearlite Morphology / E. A. Schapova, A. N. Stashkov, S. V. Afanas'ev, and A. P. Nichipuruk // Physics of Metals and Metallography. — 2021. — V. 122. — P. 742—748.](#)

2.3.2.2. Многокритериальный связной анализ, обеспечение и повышение прочности, ресурса, живучести, надежности и безопасности машин, машинных и человеко-машинных комплексов в междисциплинарных проблемах машиноведения и машиностроения. Научные основы конструкционного материаловедения  
Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФМ УрО РАН Рег.№ АААА-А18-118020690196-3, Шифр «Диагностика».

# Разработка портативной радиометрической системы и методик ее применения в медицинской радионуклидной диагностике

Панкин С.В., Сюрдо А.И.

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

Разработана универсальная портативная радиометрическая система (ПРС), включающая несколько миниатюрных детекторных модулей на основе твердотельных фотоумножителей и программное обеспечение и обеспечивающая функционирование в трех режимах: гамма-зондирование, 2D- сканирование и динамическая сцинтиграфия (Рис. 1). Компоненты каждого детекторного модуля ПРС подобраны так, чтобы достичь максимальной чувствительности, а общая капсульная конструкция защищает их от повреждений и воздействия стерилизующих растворов. ПРС может эффективно применяться в радионуклидной диагностике при исследовании протяженных и малых объектов и систем, коротких и длительных процессов, а также 2D-визуализацию распределения введенного радиофармпрепарата (РФП) как при стандартной, так при пониженной его исходной активности.

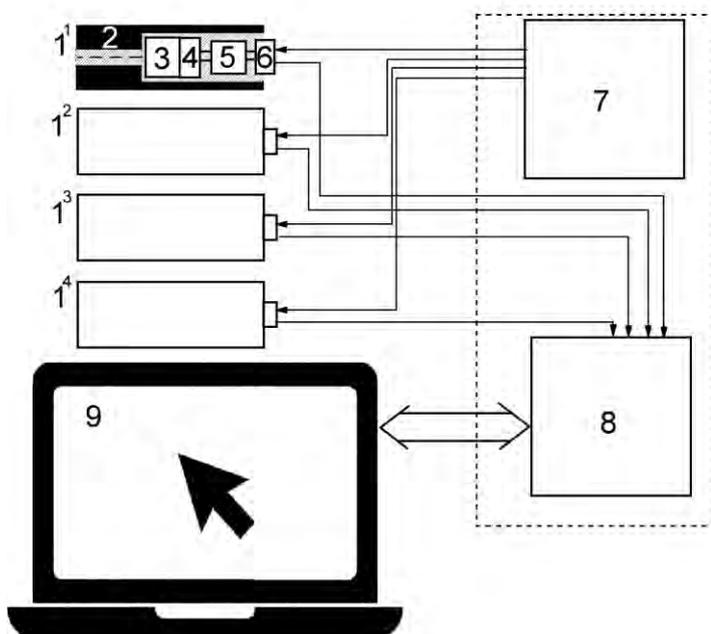


Рисунок 1 – блок-схема портативной радиометрической системы, где:  
11, 12, 13, 14 – детекторные модули ПРС, 2 – коллиматор, 3 – сцинтилляционный кристалл, 4 – SiPM, 5 – предусилитель, 6 – разъем, 7 – источник питания, 8 – микроконтроллер, 9 – ПК

1. [Портативная радиометрическая система, ее основные элементы и варианты применения](#) [Текст] / Панкин С.В.<sup>1</sup>, Сюрдо А.И.<sup>1</sup> // Дефектоскопия. — 2021. — V. 10. — P. 55—61.
2. [Портативная радиометрическая система и возможности ее применения в дакриосцинтиграфии](#) [Текст] / Панкин С.В.<sup>2</sup>, Сюрдо А.И.<sup>2</sup> // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2021. — V. 64. — P. 680—687.
3. [Портативная радиометрическая система для медицинской радионуклидной диагностики: структура и основные возможности применения](#) [Текст] / С.В. Панкин<sup>2</sup> // Биомедицинская радиоэлектроника. — 2021. — V. 24. — P. 47—55.

## 2.4.1.7. Физические методы диагностики в медицине

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФМ УрО РАН Рег.№ АААА-А19-119062590007-2. Шифр «Экспертиза».

## Тонкая структура доменных границ в ферромагнитных плёнках Co (0001) с перпендикулярной анизотропией.

И.М. Изможеров<sup>1</sup>, В.В. Зверев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

С помощью безмоделных микромагнитных расчётов показано, что доменные границы (ДГ) в Co(0001), имеющие вихревую структуру содержат блоховские линии (БЛ), имеющие сложную трёхмерную структуру, определяемые вихревой структурой доменных границ. Показано что в равновесном состоянии в доменной структуре Co (0001) могут существовать метастабильные ДГ с большим числом БЛ, содержащими в своей структуре блоховские точки (БТ). Исследованы процессы с участием таких БЛ при намагничивании/размагничивании плёнки квазистатически изменяющимися полями различных направлений (параллельными плоскости плёнки, перпендикулярными и наклонными). Исследована внутренняя структура БЛ в таких плёнках, выявлен критерий появления БЛ, содержащей БТ в метастабильных ДГ. Построена аналитическая модель распределения намагниченности в вертикальной блоховской линии.

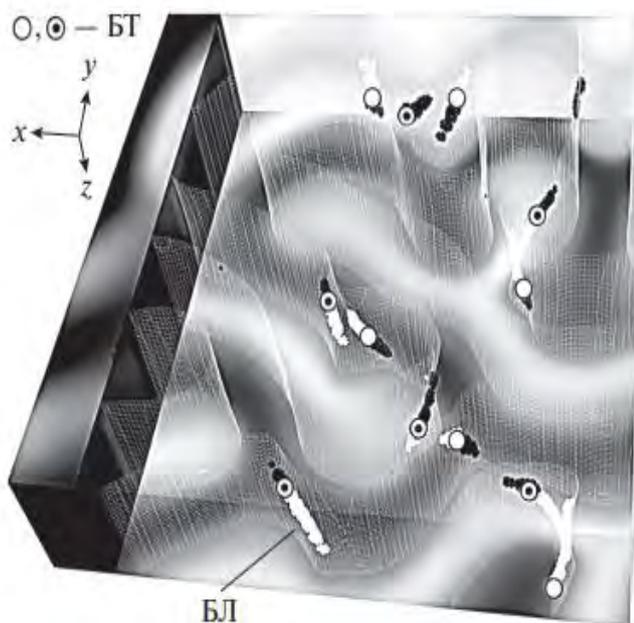


Рисунок - 1 Пространственные положения БЛ, включающих в себя БТ, внутри образца до наложения внешнего магнитного поля. Темные (светлые) области соответствуют лабиринтным доменам с  $m_z > 0$  ( $m_z < 0$ ); сетчатая поверхность описывается уравнением Маркеры “кружок” и “кружок с точкой” изображают БТ с разными топологическими зарядами

[Transformations of the Domain-Wall Fine Structure in the Course of Magnetization Change Processes in Co\(0001\) Film](#) [Текст] / I. M. Izhozherov<sup>1</sup>, E. Zh. Baikenov<sup>2</sup>, V. V. Zverev<sup>2</sup> // Physics of Metals and Metallography. — 2021. — V. 122. — P. 213—222.

*1.3.2 Физика конденсированных сред и физическое материаловедение.*

*Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФМ УрО РАН Рег.№ АААА-А19-119070890020-3. Шифр «Сплавы».*

## Спин флоп переход в искусственных коллинеарных ферримагнетиках

Н.О. Антропов, Е.А. Кравцов, М.В. Макарова, В.В. Проглядо,  
Н.Г. Бебенин, М.А. Миляев, В.В. Устинов

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

На основе сверхрешеток Fe/Gd были получены искусственные антиферромагнетики, в которых, путем введения прослойки Pd, удалось на несколько порядков уменьшить поля спин-флоп перехода. Комбинированным применением рефлектометрии поляризованных нейтронов и низкотемпературной магнитометрии было проведено систематическое исследование магнитной структуры сверхрешеток Fe/Pd/Gd в зависимости от толщины прослойки Pd, температуры и магнитного поля. Анализ рассеяния нейтронов с переворотом спина подтвердил формирование неколлинеарной магнитной фазы при температурах ниже 50 К в магнитных полях порядка 500 Э. Показано, что, варьируя толщину прослойки Pd, можно контролируемым образом изменять параметры межслойного обменного взаимодействия.

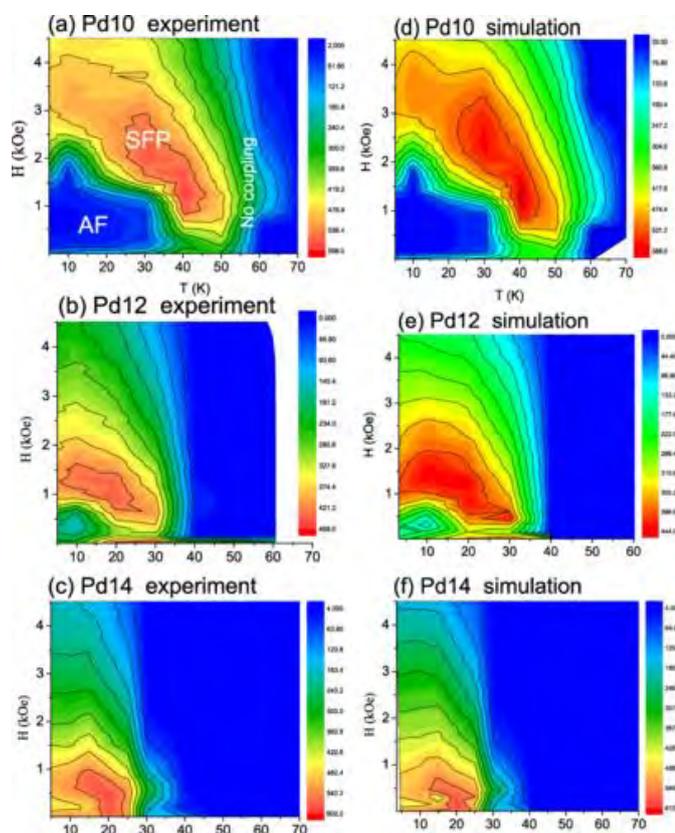


Рисунок - 1 (а-с) Экспериментальные карты (H, T) рассеяния нейтронов с переворотом спина на брегговском сверхрешечочном пике для образцов с различной толщиной палладия и (d-f) Результаты математического моделирования.

[Tunable spin-flop transition in artificial ferrimagnets](#) [Текст] / N. O. Antropov<sup>2</sup>, E. A. Kravtsov<sup>2</sup>, M. V. Makarova<sup>2</sup>, V. V. Proglyado<sup>1</sup>, T.Keller<sup>0</sup>, I. A. Subbotin<sup>0</sup>, E. M. Pashaev<sup>0</sup>, G. V. Prutskov<sup>0</sup>, A. L.Vasiliev<sup>0</sup>, Yu. M. Chesnokov<sup>0</sup>, N. G. Bebenin<sup>1</sup>, M. A. Milyaev<sup>1</sup>, V. V. Ustinov<sup>1</sup>, B.Keimer<sup>0</sup>, Yu. N. Khaydukov<sup>0</sup> // Physical Review B. — 2021. — V. 104. — P. 54414—54420.

1.3.2 Физика конденсированных сред и физическое материаловедение.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФМ УрО РАН Рег.№ АААА-А18-118020290104-2. Шифр «Спин».

# Анализ микроволновых резонансных свойств композитных сред с нано- и микрогазмерными ферромагнитными частицами различной формы

Д.В. Перов, А.Б. Ринкевич

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

С использованием экспериментальной методики, основанной на теории распространения электромагнитных волн в пространственно-ограниченных средах, получены частотные и полевые зависимости коэффициентов отражения и прохождения волн для образцов композитных сред с ферромагнитными частицами различной формы. Показано, что в такого рода средах наблюдается сильная зависимость глубины проникновения электромагнитных волн от поля намагничивания, обусловленная ферромагнитным резонансом. В сочетании со сравнительно малой диэлектрической проницаемостью композитных сред, это приводит к существенным (до 50%) изменениям коэффициентов отражения и прохождения, что дает основание рассматривать эти материалы в качестве перспективных для практического применения в микроволновых устройствах, управляемых магнитным полем. Предложена теоретическая модель для определения эффективной комплексной магнитной проницаемости композитных сред с ферромагнитными частицами в виде эллипсоидов вращения общего вида, дающее адекватное описание их резонансных особенностей.

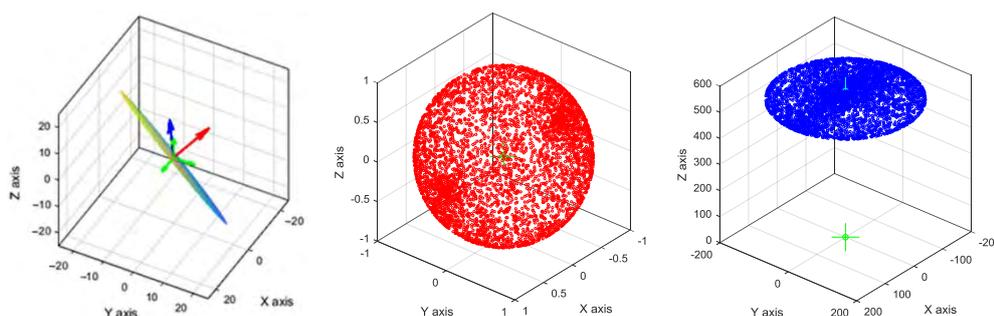


Рисунок - 1 Положение векторов нормали (красный) и постоянной намагниченности (синий) относительно ортов декартовой системы координат (зеленый) для одиночной ферромагнитной частицы в виде эллипсоида вращения с соотношением размеров полуосей 25:25:1 и распределения направлений соответствующих векторов для ансамбля из 5000 таких частиц с различной пространственной ориентацией.

[Ferromagnetic Resonance and Antiresonance in Composite Medium with Flakes of Finemet-Like Alloy](#) / D. V. Perov, A. B. Rinkevich // *Nanomaterials*.—2021.—V.11.—1748.

[Transmission, Reflection and Dissipation of Microwaves in Magnetic Composites with Nanocrystalline Finemet-Type Flakes](#) / A. B. Rinkevich, D. V. Perov, Yu. I. Ryabkov // *Materials*.—2021.—V.14.—3499.

[Microwave refraction coefficient of composite with flakes of Fe-Si -Nb-Cu-B alloy](#) / A. B. Rinkevich, Yu. I. Ryabkov, D. V. Perov, O. V. Nemytova // *JMMM*.—2021.—V.529.—167901.

[Определение эффективной магнитной проницаемости нанокомпозитных сред](#) / А. Б. Ринкевич, Д. В. Перов // Докл. Рос. акад. наук. Физ., техн. науки.— 2021.—Т.499.—С.22—24.

[Прохождение микроволн через композитный материал с частицами из сплава Fe-Si-Nb-Cu-B](#) / А. Б. Ринкевич, Ю. И. Рябков, Д. В. Перов, Я. А. Пахомов, Е. А. Кузнецов // ФММ.—2021.—Т.122.—С.377—383.

*1.3.2 Физика конденсированных сред и физическое материаловедение.*

*Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФМ УрО РАН Рег.№ АААА-А19-119012990095-0. Шифр «Функция».*

## Структура и свойства алюмоматричных композитов, армированных графеном

И.Г. Бродова<sup>1</sup>, И.Г. Ширинкина<sup>1</sup>, Д.Ю. Распоиенко<sup>1</sup>, А.Н. Петрова<sup>1</sup>,  
Л.А. Елшина<sup>2</sup>, С.В. Разоренов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>2</sup>Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>3</sup>Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка

С помощью методов сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения изучены морфологические и размерные характеристики структурных составляющих композитов на основе алюминия с микродобавкой (0.1-0.2% мас.%) графена, синтезированных в расплаве технического алюминия под слоем солевого расплава. Рассмотрена трансформация литой структуры композита AlGr после динамического сжатия и динамического канально-углового прессования. Установлено, что композиты с деформированной субмикроструктурной структурой имеют твёрдость в 1.5 раза выше, чем деформированный в таких же условиях алюминий, и в 2.5 раза выше, чем литой композит. Впервые измерены динамические свойства композитов в диапазоне скоростей деформации  $10^3$ - $10^5$  с<sup>-1</sup>. Из данных ударно-волнового эксперимента определено, что упруго-пластические характеристики (предел упругости Гюгонио и динамический предел текучести) композитов выше соответствующих характеристик неармированного алюминия на 35-40%. Предложены механизмы, объясняющие упрочняющую роль графена.

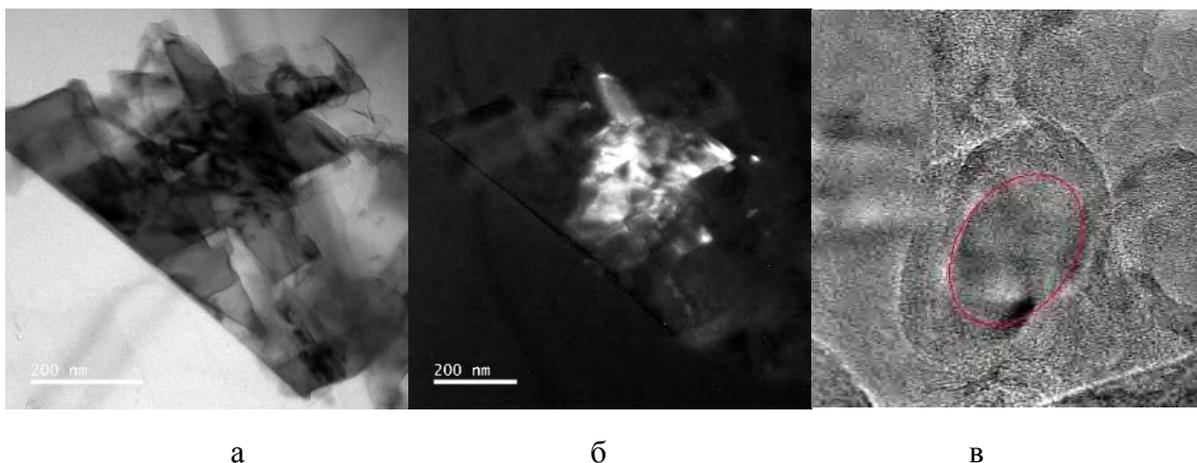


Рисунок - 1 Фрагмент нанопластинки графена в деформированном композите AlGr :а-светлопольное изображение; б-темнопольное изображение в рефлекс (100) графена : в-прямое разрешение кристаллической решётки графена (обратное Фурье преобразование изображения  $d=0.31785$ )

[Mechanical properties of submicrocrystalline aluminium matrix composites reinforced by “in situ” graphene through severe plastic deformation processes / I.G.Brodova, A.N.Petrova, I.G.Shirinkina, D.Yu.Rasposienko, L.A.Yolshina, R.V.Muradymov, S.V.Razorenov, E.V.Shorokhov // . Journal of Alloys and Compounds.—2021.—V.859.—P.158387—158395.](#)

*1.3.2 Физика конденсированных сред и физическое материаловедение.*

*Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФМ УрО РАН Рег.№ АААА-А18-118020190116-6. Шифр «Структура».*

# Термодинамические сверхпроводящие параметры наноразмерных кристаллов IrTe<sub>2</sub>, определенные из температурной зависимости критической плотности тока в собственном поле

С. Парк<sup>1</sup>, С.Я.Ким<sup>1</sup>, Г.С.Чой<sup>1,2</sup>, Е.Ф. Таланцев<sup>3</sup>, Дж.С.Ким<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт фундаментальных наук, Поханг, Корея

<sup>2</sup>Пхоханский университет науки и технологии, Поханг, Корея

<sup>3</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

Халькогениды переходных металлов обладают уникальными физическими свойствами, например, недавно обнаруженной ненасыщаемой магниторезистивностью в WTe<sub>2</sub>. В данной части опубликованной работы [1], которая выполнялась в кооперации тринадцати исследовательских организаций и университетов из четырех стран, в которой исследовались структурно-фазовый переход, атомная структура и практически все сверхпроводящие свойства в коррелированных Ван-дер-Ваальсовских кристаллах IrTe<sub>2</sub>, утоненных до наноразмерных толщин, наша часть работы заключалась в анализе температурной зависимости сверхпроводящих критических токов в собственном поле,  $J_c(sf, T)$ , и определении из этих зависимостей основных термодинамических параметров сверхпроводящего состояния. Анализ показал, что образующийся в наноутоненных IrTe<sub>2</sub> кристаллах полосовой зарядовый порядок приводит к значительному усилению связи куперовских пар, с величины  $\frac{2\Delta(0)}{k_B T_c} = 3.5$ , являющейся типичным значением для объемных IrTe<sub>2</sub>, легированных Pt, до  $\frac{2\Delta(0)}{k_B T_c} = 5.3$ , полученных в наноутоненных образцах IrTe<sub>2</sub>.

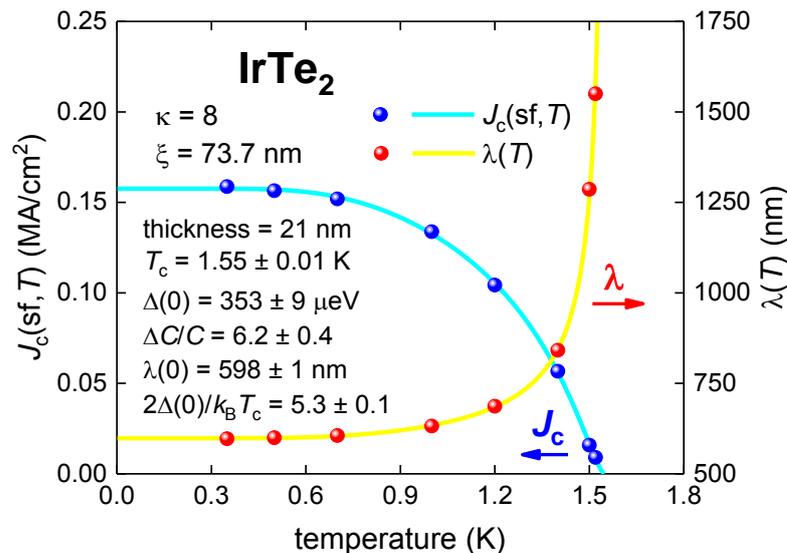


Рисунок - 1 Критическая плотность сверхпроводящего тока в собственном поле,  $J_c(sf, T)$  (синим), и Лондоновская глубина проникновения магнитного поля,  $\lambda(T)$  (желтым), в наноутоненном кристалле IrTe<sub>2</sub> (толщиной 21 нм), в котором сверхпроводимость инициируется упорядочением полосовой зарядовой плотности, где  $\kappa$  - параметр Гинзбурга-Ландау,  $\xi(0)$  - длина когерентности,  $\Delta(0)$  - энергетическая щель,  $\Delta C/C$  - прыжок электронной теплоемкости при сверхпроводящем переходе,  $T_c$  - температура перехода.

[Superconductivity emerging from a stripe charge order in IrTe<sub>2</sub> nanoflakes](#) / S. Park, S.Y. Kim, H.K. Kim, M.J. Kim, T. Kim, H. Kim, G.S. Choi, C. J. Won, S. Kim, K. Kim, E.F. Talantsev, K. Watanabe, T. Taniguchi, S.-W. Cheong, B.J. Kim, H.W. Yeom, J. Kim, T.-H. Kim, J.S. Kim // Nature Communications. — 2021. — V. 12. — P. 3157—3164.

1.3.2 Физика конденсированных сред и физическое материаловедение.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФМ УрО РАН Рег.№ АААА-А18-118020190104-3. Шифр «Давление».

## Структурные факторы повышения кавитационной стойкости аустенитных сталей и металлокерамических композитов

Ю.С. Коробов<sup>1</sup>, А.В. Макаров<sup>1</sup>, Н.В. Лежнин<sup>1</sup>, В.А. Сирош<sup>1</sup>, Х.Л. Алван<sup>2</sup>,  
М.А. Филиппов<sup>3</sup>, В.И. Шумяков<sup>2</sup>, Н.Н. Соболева<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

<sup>3</sup>Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург

Разработаны оригинальная установка (патент РФ 2710480) и методика оценки кавитационной стойкости материалов при наложении ультразвука и разности электрических потенциалов. При анализе причин различий кавитационной стойкости высокохромистых материалов и покрытий выявлены структурные и технологические факторы, определяющие сопротивление эрозионному разрушению. На этой основе предложены пути повышения кавитационной стойкости аустенитных сталей и металлокерамических композитов за счет совершенствования их составов, структуры и уменьшения пористости. Впервые установлена сильная зависимость эрозионной стойкости аустенитных сталей от интенсивности развивающегося под действием кавитации мартенситного превращения, которое способствует повышению кавитационной стойкости. Для металлокерамических композитов выявлена зависимость интенсивности износа от типа матрицы (Co, Ni), дисперсности и вида упрочняющей фазы (карбиды W, Cr). Результаты приняты для использования на электростанции Дора (Багдад, Ирак), применяются при реализации международного проекта IRA-SME по программе M-ERA.NET по лазерной наплавке высокоэнтропийных сплавов.



Рисунок - 1 Оригинальная схема испытаний



Рисунок - 2 Корреляция между эрозионным износом и интенсивностью мартенситного превращения при кавитации

[The effect of martensitic transformation on the cavitation erosion resistance of a TIG-deposited Fe-Cr-C-Al-Ti layer](#) [Текст] Yu.S. Korobov, H.L. Alwan, M.A. Filippov, N.N.Soboleva, I.A. Alani, S., A.V. Makarov, V.A. Sirosh // Surface and coatings technology. — 2021. — V. 421. — P. 127391—127403.

Патент РФ № 2710480. Установка для испытания на кавитационную эрозию / В.И. Шумяков, Ю.С. Коробов, Х.Л. Алван, Н.В. Лежнин, А.В. Макаров, М.С. Девятьяров. Опубл. 26.12.2019 бюл. № 36.

[Comparative Analysis of Cavitation Resistance of Deposited/Sprayed Layers of Carbides, Stainless Steels and Metastable Austenite](#) / H. L. Alwan, Yu. Korobov, D. Elkind, V. Sirosh, A. Makarov. March 2021, IOP Conference Series Materials Science and Engineering. — 2021. — V. 1079. — P. 52073—52078.

[Применение разработанной методики оценки кавитационного воздействия для анализа эрозионной стойкости металлокерамических газотермических покрытий](#) / H. L. Alwan, A. V. Makarov, N. N. Soboleva, Yu. S. Korobov, V. I. Shumyakov, N. V. Lezhnin, and V. A. Zavalishin // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. — 2021. — V. 15. — P. 62—69.

1.3.2 Физика конденсированных сред и физическое материаловедение.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФМ УрО РАН Рег.№ АААА-А19-119070490049-8. Шифр «Лазер».

# Авторезонансное возбуждение динамических магнитных структур переменным спиновым током в наномагнетиках

А.Г. Шагалов<sup>1</sup>, L. Friedland<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>2</sup>Racah Institute of Physics, Hebrew University of Jerusalem, Jerusalem, Israel

Показано, что авторезонансная генерация солитонообразных магнитных структур возможна из однородного состояния намагниченности если частота переменного спинового тока накачки медленно меняется со временем проходя в некоторый момент через частоту однородного ферромагнитного резонанса системы. Обнаружено, что модуляционная неустойчивость возбужденных состояний играет ключевую роль в возникновении пространственно-неоднородных структур, которые в дальнейшем остаются в фазе с осциллирующей накачкой, если амплитуда осциллирующего спинового тока превышает определенную критическую величину (эффект авторезонанса). В дальнейшем, с уменьшением частоты накачки, амплитуда магнитных солитонов растет вплоть до создания зародышей перемагничивания, которые, при определенных условиях, вызывают перемагничивание всего образца. На рисунке 1 показаны два сценария развития процесса авторезонансного возбуждения.

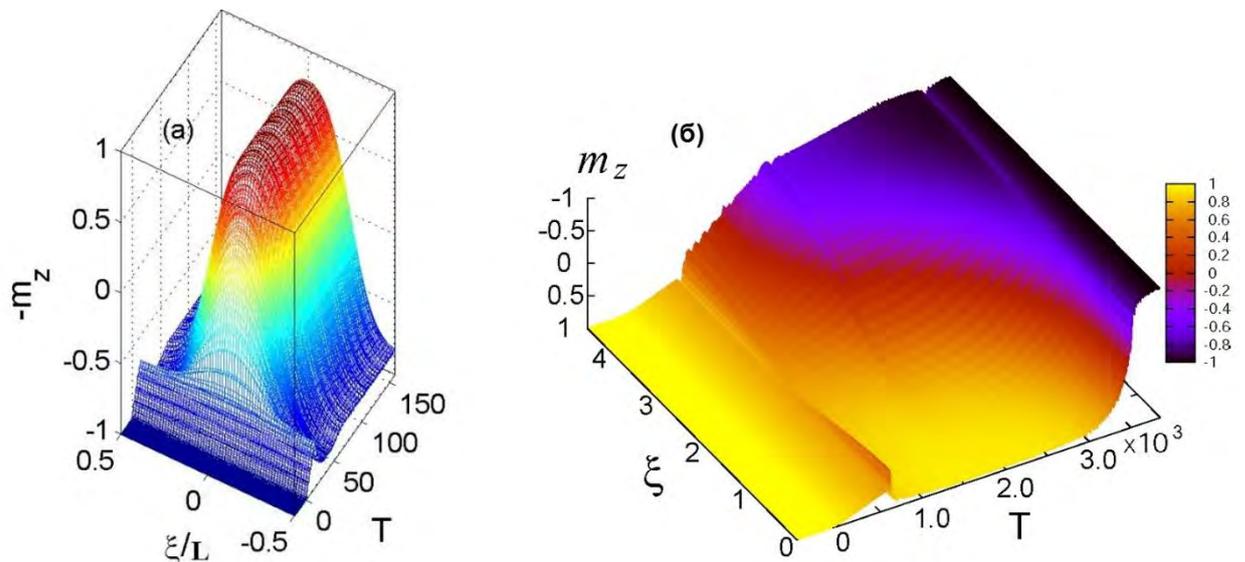


Рисунок - 1 Сценарии авторезонансного возбуждения: (a) генерация изолированного магнитного солитона, (b) индуцированное перемагничивание сегмента нанопровода длины  $L = 4.5$ , На рисунке использованы безразмерные переменные:

$$\xi = x/\delta, \quad \delta = \sqrt{A/K}, \quad T = (\lambda K/M)t, \quad \mathbf{m} = \mathbf{M}/M$$

[Transient precessing domain structures in finite-size nanomagnets and inversion of magnetization](#)  
/ L. Friedland, A.G. Shagalov // Phys.Rev.B.—2021.—V.104.—P.054405.

1.3.2 Физика конденсированных сред и физическое материаловедение.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФМ УрО РАН Рег.№ АААА-А18-118020190095-4. Шифр «Квант».

# Влияние электрон-электронного взаимодействия и легирования дырками на электронную структуру слоистых сверхпроводящих никелатов $RNiO_2$

И.В. Леонов

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

В рамках метода DFT+DMFT описано влияние эффекта кулоновских корреляций, допирования и деформации решетки на электронную структуру, обменные взаимодействия и магнитные свойства слоистых никелатов  $RNiO_2$  ( $R$ - редкоземельный ион). Продемонстрирована существенная орбитально-зависимая локализация  $Ni e_g$  состояний, с перенормировкой  $m^*/m \sim 3$  и 1.3 для  $Ni x^2-y^2$  и  $z^2$  состояний (для  $Sr x=0$ ). При замещении  $R^{3+}/Sr^{2+}$ , в области  $Sr x \sim 0.2$  в системе происходит переход Лифшица, сопровождающийся изменением вектора магнитных корреляций с 3D  $G$ -типа (111) на 2D  $C$ -тип (110). Показана фрустрация магнитных моментов для  $Sr x \sim 0.2$ , что соотносится с областью формирования сверхпроводимости,  $Sr x \sim 0.15$ . Полученные результаты демонстрируют критическую важность планарных спиновых флуктуаций для объяснения сверхпроводимости в  $RNiO_2$ . Показано, что сжатие в плоскости  $ab$  приводит к увеличению ширины  $Ni x^2-y^2$  зоны и, как следствие, делокализации  $x^2-y^2$  состояний. Как результат, это приводит к подавлению магнитного упорядочения  $C$ -типа для  $Sr x > 0.3$ . Предложена 2-х зонная  $Ni x^2-y^2$  и  $z^2$  модель допированного диэлектрика Мотта. Показана аномальная чувствительность свойств системы к выбору величины обменного взаимодействия Хунда,  $J$ , и к изменению параметров кристаллической структуры.

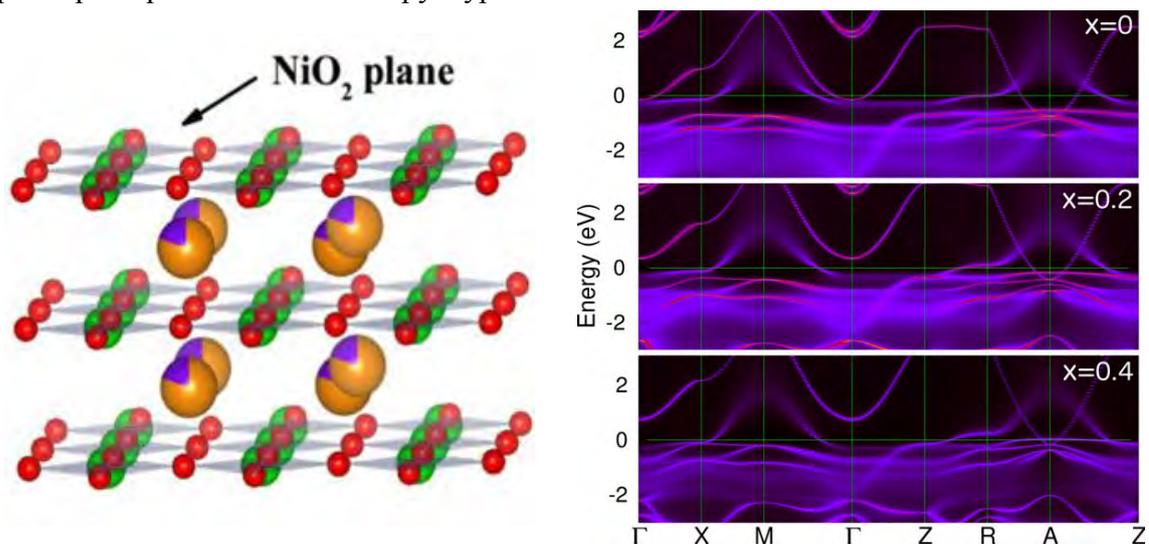


Рисунок - 1 Кристаллическая структура серии соединений слоистых никелатов  $RNiO_2$  (Левая панель).  $k$ -разрешенная спектральная функция  $(Nd,Sr)NiO_2$  в парамагнитном состоянии в зависимости от величины допирования  $Sr x$ , вычисленная в DFT+DMFT для  $T = 290$  К (Правая панель).

- 1 [Effect of lattice strain on the electronic structure and magnetic correlations in infinite-layer  \$\(Nd,Sr\)NiO\_2\$](#)  / I. Leonov // Journal of Alloys and Compounds. — 2021. — V. 883. — P. 160888—160896.
- 2 [Exchange interactions and sensitivity of the Ni two-hole spin state to Hund's coupling in doped  \$NdNiO\_2\$](#)  / X. Wan, V. Ivanov, G. Resta, I. Leonov, and S. Y. Savrasov // Physical Review B.—2021.— V.103.—P. 75123—75131.

1.3.2 Физика конденсированных сред и физическое материаловедение.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФМ УрО РАН Рег.№ АААА-А18-118020190098-5. Шифр «Электрон».



## Применение магнитных наночастиц для биоинженерии и наномедицины

Минин А.С.<sup>1</sup>, Уймин М.А.<sup>1</sup>, Конев А.С.<sup>1</sup>, Зубарев И.В.<sup>2</sup> Демин А.М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, г. Москва

<sup>3</sup>Институт органического синтеза имени И.Я. Постовского УрО РАН, г. Екатеринбург

На базе магнитных наночастиц со структурой металлическое ядро (сплав FeCo) - углеродная оболочка, модифицированных аминогруппами, были сконструированы магнитоуправляемые белковые мембраны. При помощи магнитного поля эти мембраны можно поддерживать на плаву в питательной среде. Была показана возможность применять эти мембраны (рисунок 1) для создания псевдотрехмерных гетерогенных (состоящих из разных клеточных линий) культур клеток, что позволяет изучать различные особенности межклеточного взаимодействия [1].

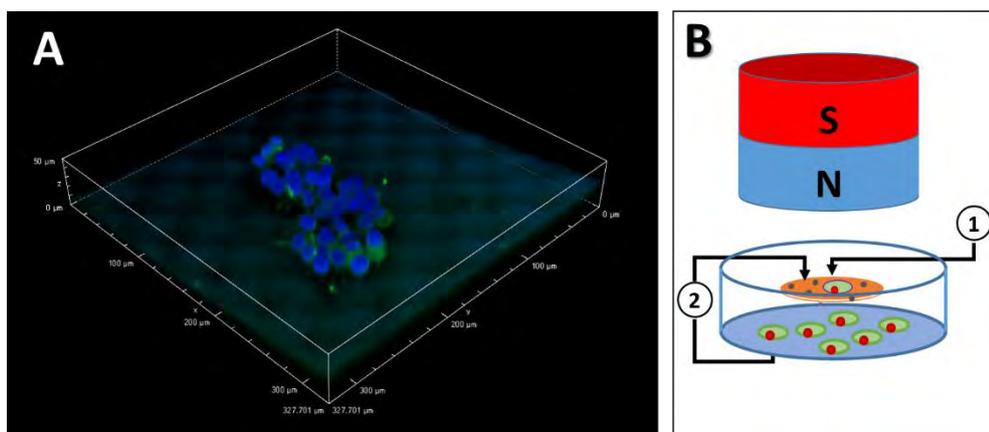


Рисунок 1 А - Клетки культуры MiaPaca-2, растущие на белковой магнитоуправляемой мембране, насыщенной наночастицами FeCo@C. В – схема эксперимента: 1 – мембрана с магнитными НЧ, 2 – клетки разных культур, растущие на мембране и на дне чашки, выделяющие различные биологически-активные молекулы в среду

Кроме этого, изучалось так же прямое взаимодействие магнитных наночастиц с живыми клетками. Исследованы наночастицы Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> синтезированные золь-гель методом в ИОС УрО РАН и газофазным методом в ИФМ УрО РАН. Продемонстрировано накопление магнитных наночастиц в клетках, что может позволить селективно выделять их из среды [2, 3].

[Development of a cell co-cultivation system based on protein magnetic membranes, using a MSLA 3D printer](#) [Текст] / A.Minin<sup>3</sup>, I.Blatov<sup>o</sup>, S.Rodionov<sup>o</sup>, I.Zubarev<sup>o</sup> // Bioprinting. — 2021. — V. 23. — P. 150—158.

Modification of chemically and physically obtained Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic nanoparticles with l-Lys for cell labeling [Текст] / Demin A.M., Kandarakov O.F., Minin A.S., Kuznetsov D.K., Uimin M.A., Shur V.Y., Belyavsky A.V., Krasnov V.P. // Russian Chemical Bulletin. — 2021. — V. 70. — P. 1199—1208 Q4

*1.3.2 Физика конденсированных сред и физическое материаловедение.*

*Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФМ УрО РАН Рег.№ АААА-А18-118020290129-5, Шифр «Магнит».*

# Теоретическое и экспериментальное обоснование создания новых технологий автоматизированной идентификации поверхностных дефектов в ферромагнитных материалах.

А.В. Никитин, Ю.Л. Гобов, А.В. Михайлов, А.С. Петров, С.Э. Попов

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

Разработана методика восстановления геометрических параметров поверхностных дефектов ферромагнетиков и определения их расположения на любой поверхности пластины при последовательном нормальном (к поверхности пластины) и тангенциальном намагничивании, по результатам измерения трех компонент магнитного поля. Показано, что при нормальном намагничивании поверхность магнитомягкого ферромагнетика является эквипотенциальной поверхностью. В этом случае магнитные преобразователи, расположенные над поверхностью ферромагнитной пластины, содержащей дефекты (рисунок 1а) получают сигналы только от дефектов на этой поверхности. Дефекты на противоположной поверхности экранируются магнитомягким материалом (рисунок 1б). При тангенциальном намагничивании исследуемой пластины сигналы от дефектов на любой поверхности пластины фиксируются магнитными преобразователями (рисунок 1в). Таким образом, поочередно намагничивая ферромагнитную деталь (пластину) в нормальном и тангенциальном направлениях и измеряя на некотором расстоянии от детали компоненты магнитного поля, можно автоматически различать поверхностные дефекты потери сплошности металла, расположенные на ближайшей к магнитным преобразователям поверхности детали, от дефектов, расположенных на противоположной поверхности. Предлагаемые методики проверены экспериментально.

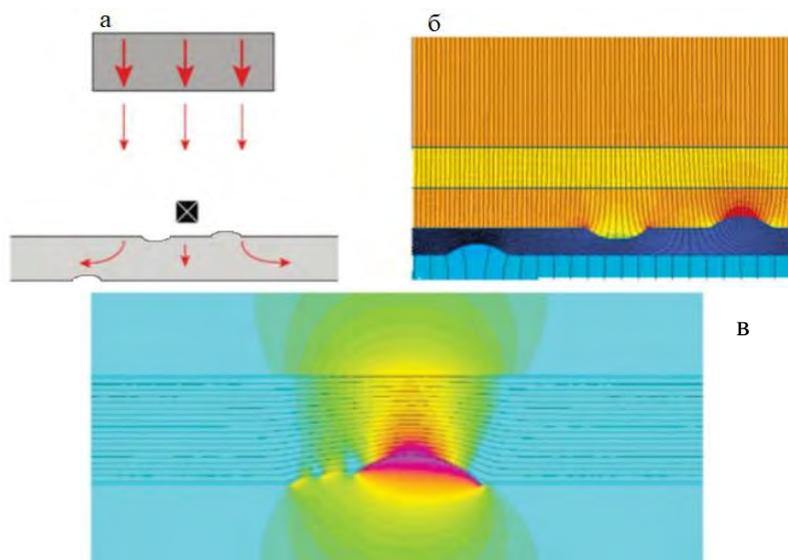


Рисунок - 1 Схема расположения датчиков магнитного поля (а); распределение силовых линий статического магнитного поля для различных типов поверхностных дефектов при нормальном (б) и тангенциальном (в) намагничивании (продемонстрирован эффект «огибания» силовых линий поверхности дефекта)

[Reconstructing the topography of surface defects of ferromagnets in a normal magnetization field](#) / Yu. L. Gobov, S. E. Popov // Russian journal of nondestructive testing. — 2021. — V. 57. — P. 303—309.

2.3.2.2. Многокритериальный связной анализ, обеспечение и повышение прочности, ресурса, живучести, надежности и безопасности машин, машинных и человеко-машинных комплексов в междисциплинарных проблемах машиноведения и машиностроения. Научные основы конструкционного материаловедения Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФМ УрО РАН Рег.№ АААА-А18-118020690196-3, Шифр «Диагностика».

## Гибкие спиновые клапаны: межслойное взаимодействие, магнитная анизотропия и деформационная чувствительность

Л.И. Наумова, Р.С. Заворницын, М.А. Миляев, И.К. Максимова, А.А. Захаров, Т.А. Чернышова, В.В. Проглядо, В.В. Устинов

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

На гибких полимерных подложках изготовлены обладающие эффектом гигантского магнитосопротивления многослойные наноструктуры типа «спиновый клапан» и объекты микронных размеров на их основе. Найдена композиция многослойного буферного слоя, который позволяет эффективно снизить влияние шероховатости полимерной подложки на магнитосопротивление и характер межслойного взаимодействия в спиновом клапане. Показано, что спиновые клапаны с низкострикционным сплавом в свободном и сплавом с ненулевой магнитострикцией в закрепленном ферромагнитном слое обладают большим магнитосопротивлением, слабым гистерезисом перемагничивания свободного слоя и высокой чувствительностью магнитосопротивления к деформации изгиба (рис. 1). Выявлен характер зависимости деформационной чувствительности характеристик спинового клапана от интенсивности взаимодействия между магнитными слоями и способа расположения осей магнитной анизотропии по отношению к вектору деформации. Полученные зависимости использованы при конструировании сенсора изгиба (рис. 2).

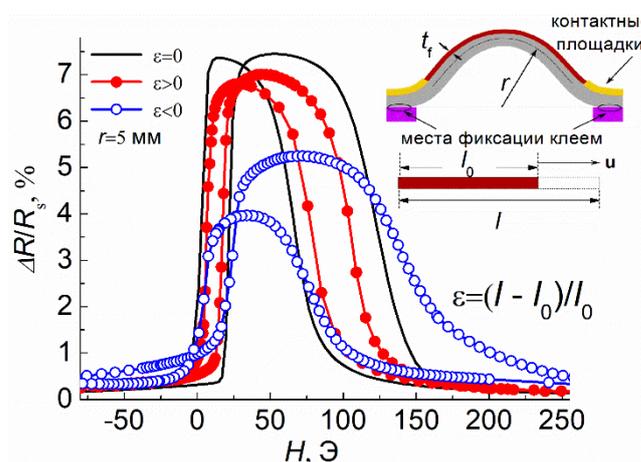


Рисунок – 1. Полевые зависимости магнитосопротивления микрополоски спинового клапана до деформации и в состоянии изгиба. На вставке показана форма держателя с микрополоской наноструктуры толщины  $t_f$  на подложке толщины 60 мкм.  $r$  – радиус кривизны подложки.  $u$  – вектор деформации.

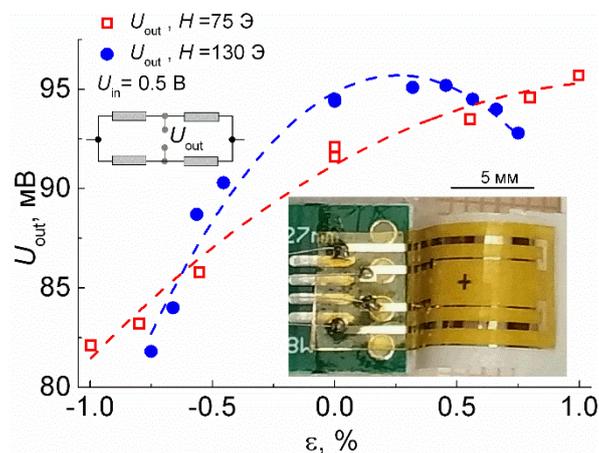


Рисунок – 2. Зависимости выходного напряжения сенсора изгиба от относительной деформации, полученные при разных величинах приложенного магнитного поля. На вставках – электрическая схема и фотография сенсора.

[Гибкие спиновые клапаны: межслойное взаимодействие и деформационная чувствительность](#) / Наумова Л.И., Чернышова Т.А., Заворницын Р.С., Миляев М.А., Максимова И.К., Проглядо В.В., Захаров А.А., Устинов В.В. // Физика металлов и металловедение. — 2021. — V. 122. — P. 1149—1157.

1.3.2 Физика конденсированных сред и физическое материаловедение.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФМ УрО РАН Рег.№ АААА-А18-118020290104-2. Шифр «Спин».

## Способ оценки уровня ударной вязкости изделий из закаленной на бейнит конструкционной стали

А.Ю. Калетин<sup>1</sup>, Ю.В. Калетина<sup>1</sup>, Ю.Н. Симонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь

Разработан способ неразрушающего контроля уровня ударной вязкости и ресурса эксплуатации изделий из среднеуглеродистых конструкционных сталей, термообработанных методом изотермической закалки в бейнитном интервале температур. На основании исследований особенностей структуры и механических свойств сталей после закалки на бейнит впервые обнаружена четкая корреляция величины доли углерода в остаточном аустените относительно общего содержания углерода в стали и уровнем ударной вязкости. Способ заключается в рентгенографическом определении количества углерода в остаточном аустените и вычислении величины доли углерода, содержащегося в остаточном аустените, для контролируемого изделия и получении значения ударной вязкости изделия при сравнении этих данных с кривыми, построенными для образцов-эталонов, подвергнутых изотермической закалке при температурах и выдержках во всем интервале бейнитного превращения. Графики построены в координатах «время изотермической выдержки» – «доля углерода в остаточном аустените (величина ударной вязкости)» для стали, используемой при производстве контролируемых изделий.

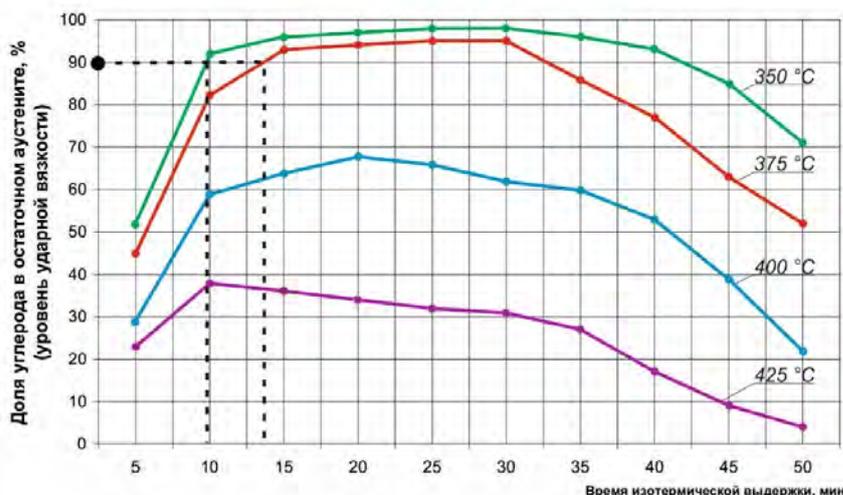


Рисунок - 1 Диаграмма-эталон стали 38ХС, построенная для изотермической закалки. Доля углерода в остаточном аустените образцов, закаленных при  $T = 375^{\circ}\text{C}$ , время выдержки 13 мин, составляет 90% (обозначено черной точкой на оси ординат), и соответствует значению КСУ = 1,1 МДж/м<sup>2</sup>.

Патент РФ Способ оценки уровня ударной вязкости изделий из закаленной на бейнит конструкционной стали / А.Ю. Калетин, Ю.В. Калетина, Ю.Н. Симонов; заявитель и патентообладатель ИФМ УрО РАН. – Патент № 2760634, заявл. 03.11.2020; опубл. 29.11.21, Бюл. № 34.

*1.3.2 Физика конденсированных сред и физическое материаловедение.*

*Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФМ УрО РАН Рег.№ АААА-А18-118020190116-6. Шифр «Структура».*

# Создание текстурованных лент-подложек из тройных сплавов на медно-никелевой основе с добавкой Fe, Cr, Mn, V, W, Ta, Nb или Mo для высокотемпературных сверхпроводящих кабелей второго поколения

Ю.В. Хлебникова, В.М. Счастливец, И.В. Гервасьева,  
Т.Р. Суаридзе, Ю.Н. Акшенцев, Л.Ю. Егорова

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

Получены ленты из сплавов Cu–40% Ni–Me (Me=Fe, Cr, Mn, V, W, Ta, Nb или Mo), которые могут быть использованы в качестве подложек для эпитаксиального нанесения на них функциональных слоев при производстве высокотемпературных сверхпроводящих материалов второго поколения. Решена задача управления кристаллографической текстурой деформации и рекристаллизации тройных сплавов на медно-никелевой основе за счет оптимизации легирования медно-никелевой базы дополнительным элементом, и вариации режимов прокатки и отжига. Сформирован необходимый комплекс механических и антикоррозионных свойств сплавов при сохранении парамагнитности при рабочей температуре высокотемпературного сверхпроводника и совершенной кубической текстуры, близкой к монокристалльной (от 94 до 99% зерен с ориентацией  $\{001\} \langle 100 \rangle \pm 10^\circ$ ), что делает полученные ленты конкурентоспособными для замены широко используемого в настоящее время сплава Ni-4.8%W.

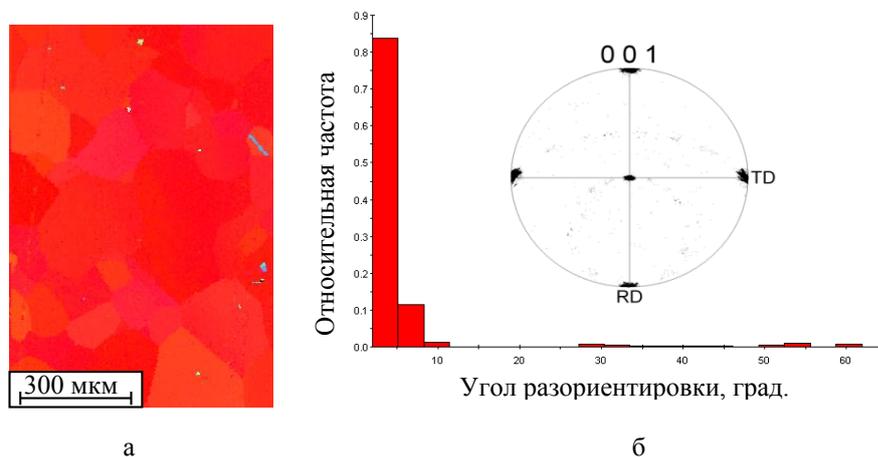


Рисунок - 1 Микрокарта ориентировок зерен (а), полюсная фигура и гистограмма разориентировки границ зерен (б) для сплава Cu–40% Ni–1.2% Cr после рекристаллизационного отжига при 1050°C, 1 ч. Объемная доля кубических зерен с рассеянием  $\pm 10^\circ$  составляет более 97%.

1. Текстурованные ленты-подложки из тройных медно-никелевых сплавов с добавками тантала и вольфрама для эпитаксиального нанесения многослойных композиций / В.М. Счастливец, Ю.В. Хлебникова, Т.Р. Суаридзе, Л.Ю. Егорова, Ю.Н. Акшенцев // Доклады российской академии наук. Физика, технические науки. — 2021. — V. 499. — P. 25—29.
2. Способ изготовления биаксиально текстурированной подложки в виде ленты из тройного сплава на медно-никелевой основе для эпитаксиального нанесения на нее буферных и высокотемпературного сверхпроводящего слоев / Ю.В. Хлебникова, Т.Р. Суаридзе, Ю.Н. Акшенцев; заявитель и патентообладатель ИФМ УрО РАН. – Патент РФ № 2759146; заявл. 16.11.20; опублик. 09.11.21, Бюл. № 31.

## 1.3.2 Физика конденсированных сред и физическое материаловедение.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФМ УрО РАН Рег.№ АААА-А18-118020190116-6. Шифр «Структура».

# Существенные результаты исследований 2021 года

## Квантовые осцилляции магнетосопротивления в гетероструктурах HgCdTe/HgTe/HgCdTe с инвертированным зонным спектром

Боголюбский А.С., Гудина С.В., Неверов В.Н., Туруткин К.В., Подгорных С.М., Шелушина Н.Г., Якунин М.В., Михайлов Н. Н.<sup>1</sup>, Дворецкий С.А.<sup>1</sup>

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

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

При исследованиях в квантующих магнитных полях до 2.5 Тл при низких температурах (2-10) К в системе HgCdTe/HgTe/HgCdTe с широкой квантовой ямой (КЯ) HgTe (20.3 нм) обнаружен сдвиг на  $\pi$  фазы осцилляций Шубникова-де Гааза (ШдГ) в области двукратно вырожденных пиков. Фаза квантовых магнитоосцилляций часто ассоциируется с фазой Берри ( $2\pi n + \pi$ ) и широко используется как аргумент в пользу топологической нетривиальности системы, например, в монослойном графене.

Анализ показал, что в топологически тривиальной системе КЯ HgTe с инвертированным энергетическим спектром аномальный фазовый сдвиг не связан с фазой Берри, а обусловлен специфическим соотношением зонных параметров в подзоне  $\Gamma_1$  зоны  $\Gamma_8$  (зеemanовское расщепление больше циклотронной энергии), что приводит к появлению дополнительного невырожденного уровня в спектре уровней Ландау.

Установлено также, что из-за специфики инвертированного энергетического спектра подзоны  $\Gamma_1$  корректное значение эффективной массы может быть получено только в достаточно сильных магнитных полях, когда полностью снято перекрытие близлежащих уровней Ландау с разными номерами и противоположно направленными спинами.

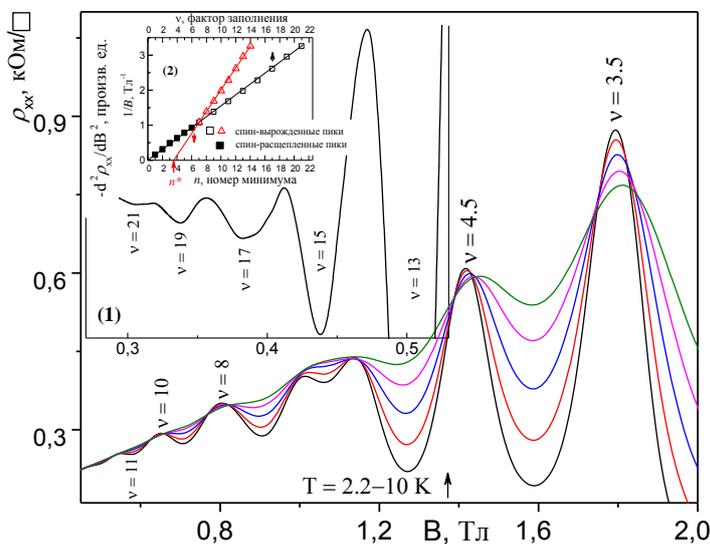


Рисунок 1 – Область осцилляций ШдГ при различных температурах в полях  $B < 2.5$  Тл. На вставках: (1) область спин-вырожденных пиков ( $B < 1$  Тл); (2) построение Берри - значения обратного магнитного поля  $1/B_{\min}$  в зависимости от фактора заполнения  $\nu$  и номера  $n$  минимумов магнетосопротивления.

### Публикации:

[Anomalous phase shift of magneto-oscillations in HgTe quantum well with inverted energy spectrum](#) / Svetlana V.Gudina, Andrei S.Bogoliubskii, Klepikova A.S., Neverov V.N., Turutkin K.V., Podgornykh S.M., Shelushinina N.G., Yakunin M.V., Mikhailov N.N., Dvoretzky S.A. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. —2021. —V. 524. —P. 167655—167660.

[Квантовые осцилляции магнетосопротивления в гетероструктурах HgCdTe/HgTe/HgCdTe с инвертированным зонным спектром](#) / Боголюбский А.С., Гудина С.В., Неверов В.Н., Туруткин К.В., Подгорных С.М., Шелушина Н.Г., Якунин М.В., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А. // Физика твёрдого тела. —2021. —V. 63. — P. 1983—1994.

## Многокомпонентное легирование как регулятор электронного спектра корунда в окрестности энергетической щели

В.М. Зайнуллина, М.А. Коротин

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

Дизайн электронного спектра корунда ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) проводился методом когерентного потенциала, компьютерная реализация которого выполнена в ИФМ УрО РАН. Уникальность работы заключается в теоретическом изучении не только однокомпонентного, но и многокомпонентного легирования корунда. Впервые исследованы спектральные изменения в присутствии как примесей *s*- (Li, Mg), *p*- (C, N, Si, Ga, Ge, Sn) и *4d*- (Zr, Nb, Mo) элементов, так и нестехиометрии по обоим подрешеткам. Разработаны теоретические принципы конструирования многокомпонентно легированного оксида алюминия с определенными значениями энергетической щели. Представлены рекомендации по набору и концентрации примесей в обоих узлах  $\text{Al}_2\text{O}_3$  для обеспечения заранее заданных характеристик электронного спектра в УФ, видимой и ИК областях. Предложенные составы перспективны для применения в качестве альтернативных оксидных диэлектриков и фотоактивных материалов.

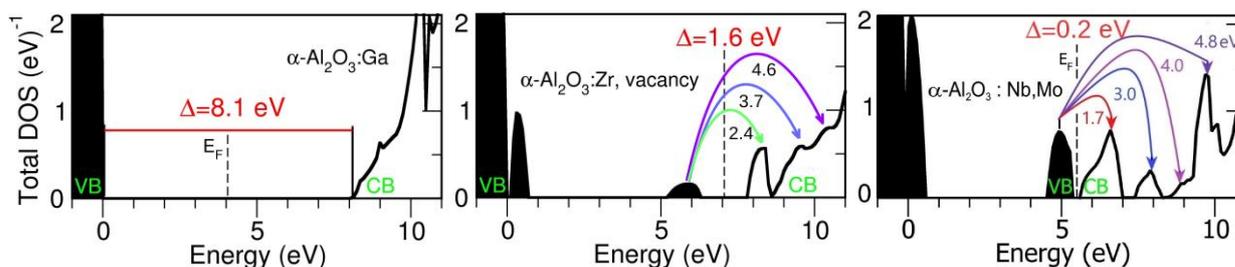


Рисунок - 1 Электронные спектры однокомпонентно и многокомпонентно легированного корунда в окрестности энергетической щели  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , вычисленные методом когерентного потенциала. Цветными стрелками обозначены предсказываемые электронные переходы между примесными (включая вакансионные) состояниями и дном зоны проводимости.

### Публикации:

1. [Influence of Cation Impurities and Both Cation and Anion Nonstoichiometry on Aluminum Oxide Energy Gap Width](#) [Текст] / V. M. Zainullina, M. A. Korotin // JETP Letters. — 2021. — V. 114. — P. 296—302.
2. [Regulation of corundum band gap width by p elements and vacancy co-doping](#) [Текст] / Veronika M. Zainullina, Michael A. Korotin // Journal of Physics and Chemistry of Solids. — 2020. — V. 140. — P. 109357(1)—109357(5).
3. [Energy gap decrease in cation multi-doped aluminum oxide](#) [Текст] / V. Zainullina, M. Korotin. // Physica Status Solidi B. — First published on-line 14 October 2021.

## Диамagnetизм в $\text{Na}_9\text{Bi}_5\text{Os}_3\text{O}_{24}$ с аномальным ян-теллеровскими искажениями.

А.В. Ушаков, Д.И. Хомский<sup>1</sup>, С.В. Стрельцов

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

<sup>1</sup> II институт физики, Университет г. Кёльна, Кёльн, Германия

Теорема Яна-Теллера является одним из фундаментальных законов в физике твердого тела. В соединениях переходных металлов с конфигурациями  $3d^4$ ,  $3d^9$  и  $3d^7$  локальные искажения лигандных октаэдров приводят к понижению электронной энергии. Однако тот факт, что в подавляющем большинстве случаев октаэдры удлинняются, до конца не понятен. В  $\text{Na}_9\text{Bi}_5\text{Os}_3\text{O}_{24}$  было показано, что октаэдры  $\text{Os}^{6+}\text{O}_6$  ( $5d^2$ ) напротив сильно сжимаются, что вызывает расщепление  $t_{2g}$  орбиталей ионов Os и приводит в диамagnetному основному состоянию, противоречащему первому правилу Хунда, когда два  $5d$ -электрона занимают низколежащий  $t_{2g}$  уровень. При этом данный эффект не вызывается структурными особенностями данной решетки, в элементарной ячейке достаточно пространства для того, чтобы реализовать стандартный вариант ян-теллеровских искажений. Показано, что аномальные физические свойства рассматриваемой системы связаны с высокой степенью окисления иона Os и сильной гибридизацией между  $p$  состояниями лиганда и  $d$  орбиталями металла, что вызывает сверхсильные ян-теллеровские искажения, приводящие к нарушению правил Хунда.

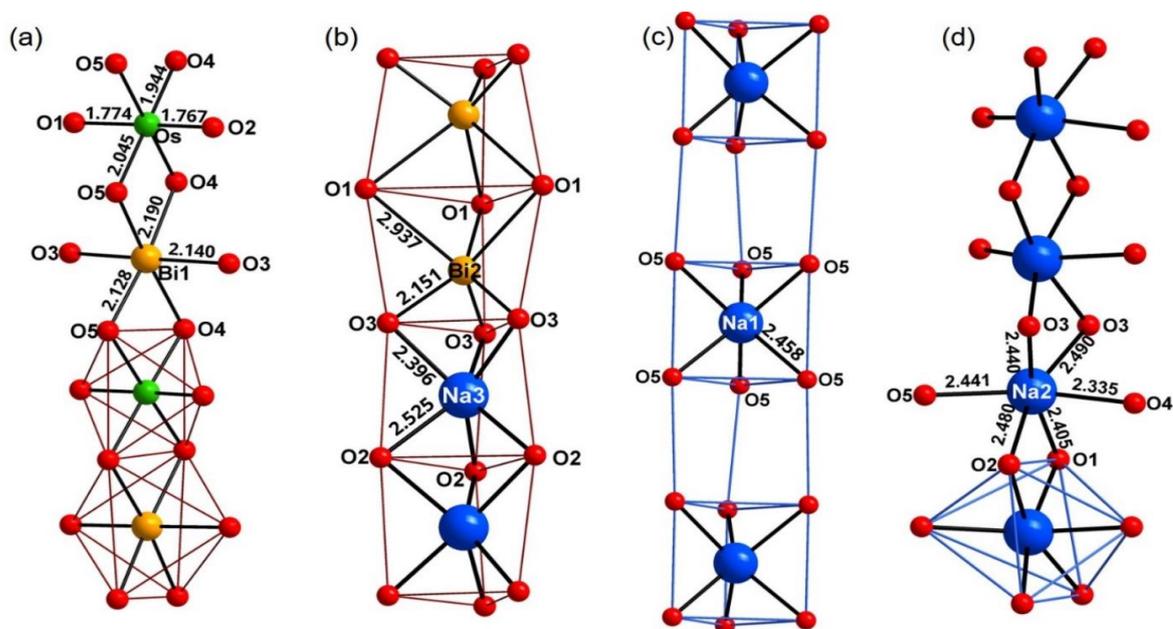


Рисунок 1 - Квазиодномерные блоки в  $\text{Na}_9\text{Bi}_5\text{Os}_3\text{O}_{24}$ : (а) цепочки соединенных через общее ребро  $\text{OsO}_6/\text{BiO}_6$  октаэдров, (б) цепочки чередующихся тригональных призм  $\text{NaO}_6/\text{BiO}_6$ , (с) цепочки чередующихся пустых и заполненных призм  $\text{NaO}_6$  и (д) цепочки соединенных через общее ребро искаженных октаэдров  $\text{NaO}_6$ .

### Публикация:

[Na9Bi5Os3O24: a diamagnetic oxide featuring a pronouncedly Jahn-Teller compressed octahedral coordination of Osmium\(VI\)](#) / G.S. Thakur, H. Reuter, A.V. Ushakov, G. Gallo, J. Nuss, R.E. Dinnebier, S.V. Streltsov, D. I. Khomskii, M. Jansen // *Angewandte Chemie – International Edition*.—2021.—V.60.—P.16500—16505.

## Электронные состояния ионов кобальта в сложных кобальтатах

М. С. Удинцева, А. В. Ефремов, С. В. Наумов, С. Н. Шамин, В. Р. Галахов

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

Проблема спиновых состояний ионов кобальта, которые могут реализоваться в октаэдрах и пирамидах кобальтатах  $\text{LnBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$ , остается объектом интенсивных дискуссий. Известно, что температура спинового кроссовера коррелирует с температурой перехода металл-изолятор, а изменение содержания кислорода определяет относительное количество пирамид и октаэдров. Для кобальтитов  $\text{EuBaCo}_2\text{O}_{5.5}$  и  $\text{EuBaCo}_2\text{O}_{5.25}$  при температурах 300 и 440 К (ниже и выше температуры перехода металл-изолятор) измерены рентгеновские абсорбционные  $K$ -спектры кислорода. Установлено, что уменьшение содержания кислорода в кобальтите, приводящее к замещению ионов  $\text{Co}^{3+}$  ионами  $\text{Co}^{2+}$  и увеличению доли пирамид по отношению к числу октаэдров, сопровождается ростом величины энергетической щели примерно на 0.3 эВ. Изменений спектров с ростом температуры и, следовательно, электронных (в том числе — спиновых) состояний ионов кобальта, не установлено. Первопринципными расчетами зонной структуры показано, что в октаэдрах  $\text{EuBaCo}_2\text{O}_{5.5}$  реализуется низкоспиновое состояние  $\text{Co}^{3+}$ -ионов, в то время как  $\text{Co}^{3+}$ -ионы в пирамидах находятся в высокоспиновом состоянии.

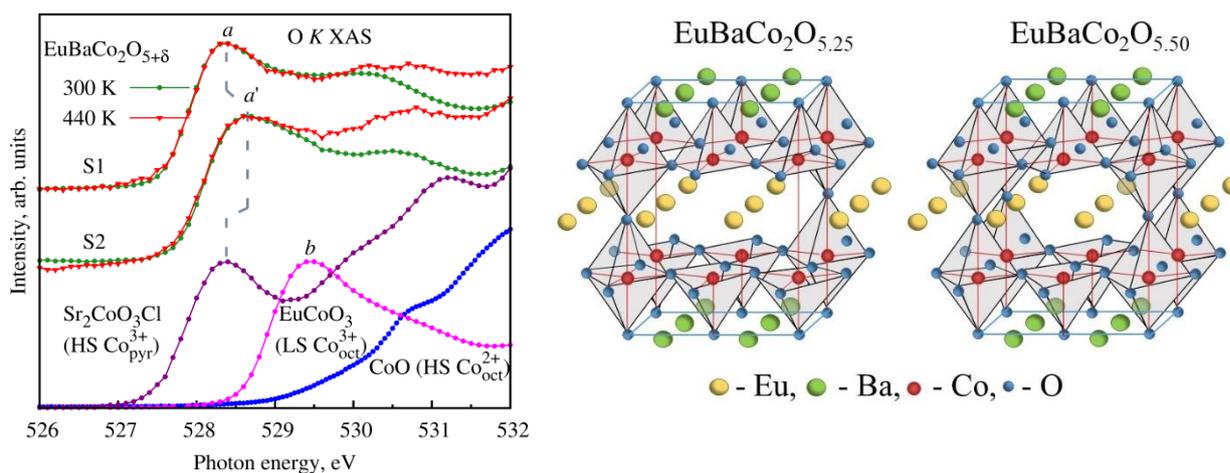


Рисунок - 1 Слева: рентгеновские абсорбционные  $O K$ -спектры  $\text{EuBaCo}_2\text{O}_{5.5}$  (S1) и  $\text{EuBaCo}_2\text{O}_{5.25}$  (S2), измеренные при комнатной температуре и при температуре 440 К. Приведены спектры эталонных соединений:  $\text{Sr}_2\text{CoO}_3\text{Cl}$  (HS- $\text{Co}^{3+}$ -ионы в пирамидах),  $\text{EuCoO}_3$  (LS- $\text{Co}^{3+}$ -ионы в октаэдрах) и  $\text{CoO}$  (HS- $\text{Co}^{2+}$ -ионы в октаэдрах). Справа: структура кобальтитов  $\text{EuBaCo}_2\text{O}_{5.25}$  и  $\text{EuBaCo}_2\text{O}_{5.5}$ .

### Публикации:

1. [Рентгеновская спектроскопия кобальтитов](#) / В. Р. Галахов // Физика металлов и металловедение. — 2021. — V. 122. — P. 91—124.
2. [Электронные состояния ионов кобальта в слоистых кобальтатах  \$\text{EuBaCo}\_2\text{O}\_{5+\delta}\$](#)  / М. С. Удинцева, А. В. Ефремов, Д. Смирнов, А. Макарова, С. В. Наумов, С. Н. Шамин, В. Р. Галахов // Письма в ЖЭТФ.—2021.—Т. 114.—С. 546—550.
3. [Effect of nonstoichiometry on crystal structure, charge and spin states of cobalt ions in  \$\text{Tb}\_{1-y}\text{Ba}\_{1+y}\text{Co}\_{2-x}\text{O}\_{5.5-\delta}\$ : Neutron diffraction and soft X-ray absorption spectroscopy studies](#) / S. V. Naumov, V. I. Voronin, I. F. Berger, M. S. Ushintseva, V. V. Mesilov, B. A. Gizhevskii, S. V. Telegin, V. R. Galakhov // Journal of Alloys and Compounds. — 2020. — V. 817. — P. 152775—152782.

# Сильные электронные корреляции на межузельных магнитных центрах нульмерного электроида $\beta\text{-Yb}_5\text{Sb}_3$

Новосёлов Д.Ю.<sup>1</sup>, Анисимов В.И.<sup>1</sup>, Оганов А.Р.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>2</sup> Сколковский институт науки и технологий, г. Москва

Используя теорию динамического среднего поля (DMFT), мы провели исследования коррелированной природы квантово-ограниченных электронов, локализованных в кристаллических пустотах 0D-электроида  $\beta\text{-Yb}_5\text{Sb}_3$ . В данной работе с помощью максимально локализованных функций Ванье было получено аналитическое описание наполовину заполненных электроидных электронных состояний и установлена высокая степень их локализации, а также показано, что данные состояния обладают магнитным моментом 1 магнетон Бора на одну анионную полость. Мы воспроизвели переход Мотта металл-изолятор, получили экспериментально наблюдаемую запрещённую зону и продемонстрировали уменьшение удельного сопротивления с повышением температуры, типичное для полупроводников. В ходе исследований была рассчитана температурная зависимость магнитной восприимчивости, соответствующая типу Кюри, которая находится в хорошем согласии с экспериментом. Полученные результаты доказывают, что кулоновские корреляции между локализованными анионными электронами играют важнейшую роль в формировании наблюдаемых электронных и магнитных свойств  $\beta\text{-Yb}_5\text{Sb}_3$ .

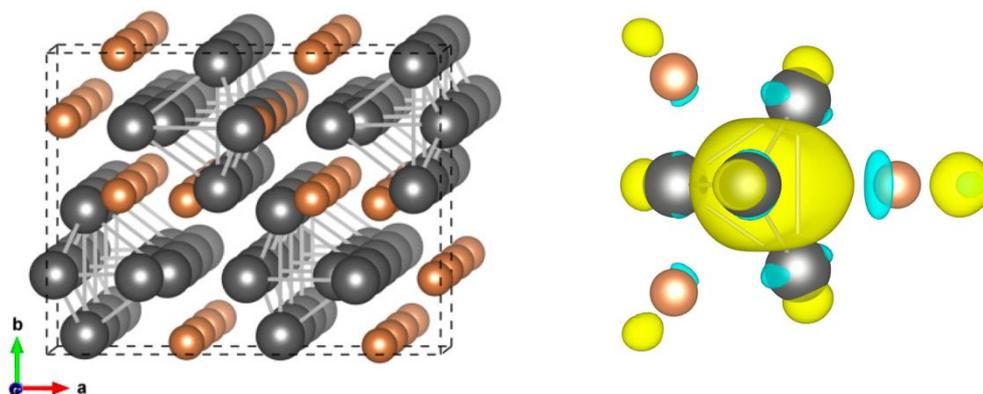


Рисунок 1. Кристаллическая структура  $\beta\text{-Yb}_5\text{Sb}_3$  (слева) и изоповерхность пространственного распределения максимально локализованной функции Ванье, описывающей электроидное состояние.

## Публикация:

[Strong electronic correlations in interstitial magnetic centers of zero-dimensional electride  \$\beta\text{-Yb}\_5\text{Sb}\_3\$](#)  / Dmitry Y. Novoselov<sup>3</sup>, Vladimir I. Anisimov<sup>3</sup>, and Artem R. Oganov<sup>0</sup> // Physical Review B. — 2021. — V. 103. — P. 235126—235131.

# Распространение звука вблизи фазового перехода в магнитоупорядоченную фазу в средах с тетрагональной кристаллической структурой

В.В. Меньшенин

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

Исследовано распространение продольных упругих волн вблизи термодинамического перехода второго рода из парамагнитной фазы в несоизмеримую длиннопериодическую фазу в слоистых системах, имеющих тетрагональную кристаллическую структуру. Установлено, что переменные в действии, характеризующие продольные упругие колебания, являются несущественными при исследовании такого перехода. Сам переход возможен, если перенормировка за счет обменнотриксционной связи параметров, описывающих взаимодействие компонент параметра порядка в действии, не меняет их знак. На основе ренормгруппового анализа в квантовополеовом подходе для продольной упругой волны, распространяющейся в направлении  $[100]$  найден степенной закон температурного изменения скорости звука в критической области, а также смещение точки минимума частоты (а значит, и скорости) относительно точки фазового перехода. Указано, что различие по величине изменения частот продольных упругих волн в критической области, распространяющихся в разных направлениях связано с различием обменнотриксционных констант в слое и между слоями магнитных атомов.

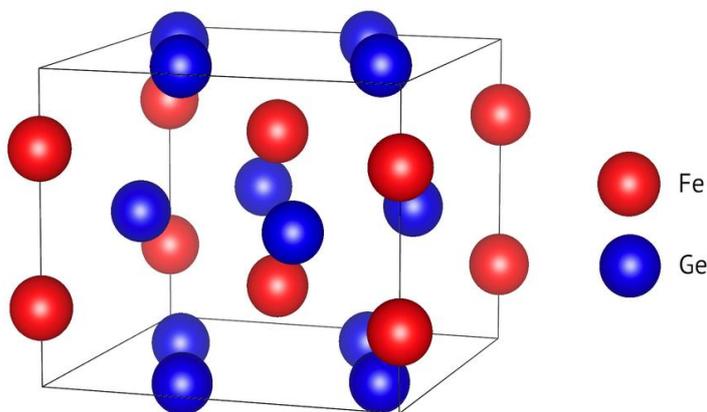


Рисунок 1. Элементарная ячейка дигерманيدا железа  $\text{FeGe}_2$

## Публикация

[Распространение звука в области фазового перехода в магнитоупорядоченную фазу в средах с тетрагональной структурой](#)/ В. В. Меньшенин// Журнал экспериментальной и теоретической физики .-2021.- т.160.-с.95-106.

## Влияние корреляционных эффектов на реализацию слэтеровского сценарий перехода металл-изолятор. Аналитическое исследование

П.А Игошев, В.Ю. Ирхин

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

Основное состояние для невырожденной обобщенной  $t-t'-J$  модели Хаббарда рассматривается в рамках приближения Хартри-Фока и метода вспомогательных бозонов, учитывающего корреляционные эффекты. Критерий перехода металл-изолятор в сценарии Слэтера сформулирован через аналитическое разложение свободной энергии по величине антиферромагнитной (АФМ) щели. В рамках метода вспомогательных бозонов аналитически показано, что в общем случае корреляционные эффекты способствуют переходу первого рода — из состояния парамагнитного металла сразу в состояние антиферромагнитного изолятора, минуя состояние АФМ металла. Для простой и объемноцентрированной кубических решеток переход металл-изолятор является переходом второго рода через фазу АФМ металла. Для квадратной решетки существует интервал значений интегралов переноса между вторыми и первыми соседями  $t'$ , для которого переход металл-изолятор имеет первый род из-за существования сингулярности ван Хофа. Этот интервал очень чувствителен к параметрам модели (например, интегралу прямого обмена) или внешним параметрам.

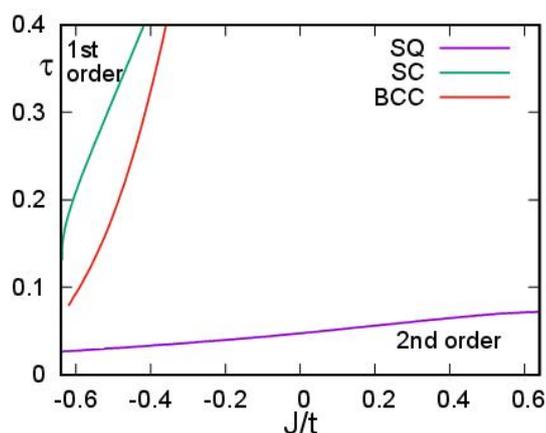


Рисунок - 1. Фазовая диаграмма обобщенной модели Хаббарда в переменных  $J$ - $\tau$ ,  $J$  - интеграл переноса между ближайшими соседями,  $\tau = t'/t$ . Линия разделяет область фазового перехода второго и первого рода. SQ - квадратная, SC - ПК, BCC - ОЦК решетка.

### Публикации:

1. [Metal-insulator transition and antiferromagnetism in the generalized Hubbard model: Treatment of correlation effects](#) [Текст] / P.A. Igoshev, V.Yu. Irkhin // Physical Review B. — 2021. — V. 104. — P. 45109—45124
2. [Metal-Insulator Transition in the Presence of Van Hove Singularities for Bipartite Lattices](#) [Текст] / P. A. Igoshev, V. Yu. Irkhin // Journal Of Experimental And Theoretical Physics. — 2019. — V. 128. — P. 909—918.
3. [Magnetic States and Metal-Insulator in Strongly Correlated Systems \(Scientific Summary\)](#) [Текст] / V. Yu. Irkhin, P. A. Igoshev // JETP Letters. — 2019. — V. 110. — P. 41—53.
4. [Metal-insulator transition in the antiferromagnetic state of the Hubbard model: analytical theory](#) [Текст] / P. A. Igoshev, V. Yu. Irkhin // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — V. 1389. — P. 12081—12090.

# Магнитокалорический эффект в материалах с электронным фазовым расслоением, возникающим в результате перехода первого рода ферромагнетик-антиферромагнетик

П.А Игошев

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

Теоретически исследован магнитокалорический эффект в металлических системах, демонстрирующих магнитные фазовые переходы первого рода. Особое внимание уделено физическим следствиям электронного фазового разделения. Учитываются ферро- и антиферромагнитный (неелевский) порядки, а также их сосуществование. Используя в качестве базового приближения приближение среднего поля (Хартри-Фока), мы вычисляем изменение энтропии в магнитном поле  $\Delta S$  как функцию параметров системы, явным образом выделяя фазовые вклады  $\Delta S_{1,2}$  в металлической системе с разделением фаз. Показано, что в окрестности трикритической точки, соответствующей слиянию границ фазового расслоения, фазовые вклады, участвующие в фазовом расслоении, проявляют необычное поведение - для ферромагнитной фазы намагниченность понижается при увеличении магнитного поля, ферромагнитная фаза дает положительный вклад в изменение энтропии, что соответствует аномальному магнитокалорическому эффекту. Учет зависимости границ раздела фаз от магнитного поля обеспечивает естественное расщепление фазовой области на подобласти, в которых имеются разные температурная зависимость изменения энтропии: переход от одной подобласти к другой приводит к излому, за которым следует быстрый линейный рост изменения энтропии.

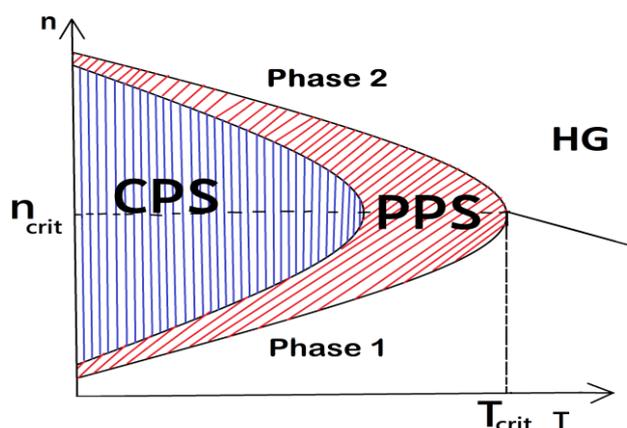


Рис. - 1 Схематическая фазовая диаграмма магнетика в окрестности линии фазового перехода между фазами 1 и 2 в окрестности трикритической точки,  $(T_{\text{crit}}, n_{\text{crit}})$  (в ней меняется род фазового перехода) в переменных  $T$ - $n$ , где  $T$  - температура,  $n$  - электронная концентрация. CPS (complete phase separation) - область, соответствующая наличию фазового расслоения и в магнитном поле и при его отсутствии, PPS (partial phase separation) - область, соответствующая фазовому расслоению при отсутствии магнитного поля и однородному состоянию в магнитном поле. HG - области однородных фаз.

## Публикации:

1. [Emerging mechanisms of magnetocaloric effect in phase-separated metals](#) [Текст] / V.V. Ivchenko, P.A. Igoshev // Physical Review B. — 2021. — V. 104. — P. 24425—24433.
2. [Investigation of magnetocaloric effect: Stoner approximation vs DMFT](#) [Текст] / P.A. Igoshev, I.A. Nekrasov, N.S. Pavlov, T.H. Chinyaev, E.O. Yakupov // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — V. 1389. — P. 12083—12091.
3. [Investigation of the magnetocaloric effect in correlated metallic systems with Van Hove singularities in the electron spectrum](#) [Текст] / P.A. Igoshev, E.E. Kokorina, I.A. Nekrasov // Physics of Metals and Metallography. — 2017. — V. 118. — P. 207—216.

## Влияние облучения заряженными частицами на спектры фотолюминесценции соединений для поглощающих слоев солнечных батарей: $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$

М.А. Сулимов, М.В. Якушев, И.А. Могильников, М.Н. Сарычев<sup>1</sup>, Х. Маркес-Прието<sup>2</sup>, И. Форбс<sup>2</sup>, В.Ю. Иванов<sup>1</sup>, П.Р. Эдвардс<sup>3</sup>, А.В. Мудрый<sup>4</sup>, Ю. Крусток<sup>5</sup>, Р.В. Мартин<sup>3</sup>

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

<sup>1</sup>УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Нортумбрийский университет, г. Ньюкасл-апон-тайн, Великобритания

<sup>3</sup>Университет Стратклайда, г. Глазго, Великобритания

<sup>4</sup>НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, г. Минск, Беларусь

<sup>5</sup>Таллинский технический университет, г. Таллин, Эстония

Исследовано влияние облучения электронами с энергией 10 МэВ при температуре 77К на спектры фотолюминесценции соединений для поглощающих слоев тонкопленочных солнечных батарей:  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  и  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ . Установлено, что для солнечных батарей на основе соединения  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  облучение приводит к уменьшению концентрации носителей заряда и их подвижности, а также к уменьшению энергии активации температурного гашения полосы ФЛ, соответствующей ФВ-переходам. Данный эффект усиливается с увеличением дозы облучения.

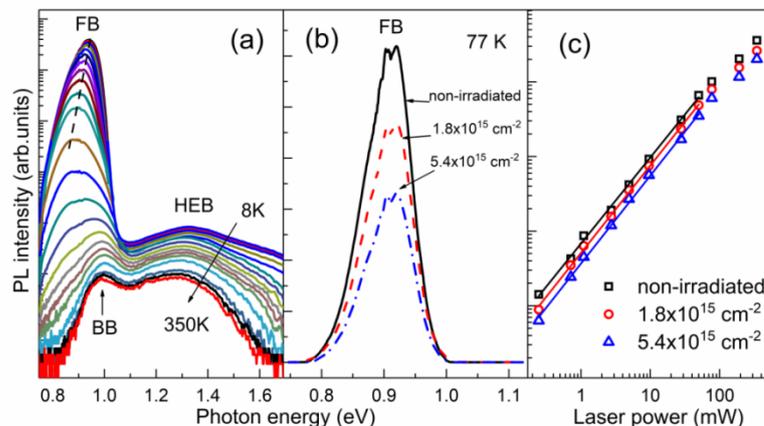


Рисунок - 1 Температурная зависимость спектров ФЛ необлученной батареи со структурой  $\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4/\text{Mo}/\text{стекло}$  (а); спектры ФЛ, измеренные при температуре жидкого азота до и после облучения (б); зависимость интенсивности ФЛ полосы ФВ от мощности возбуждения (в).

### Публикации:

1. [Effects of irradiation of  \$\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{Cu}\_2\text{ZnSnSe}\_4/\text{Mo}/\text{glass}\$  solar cells by 10 MeV electrons on photoluminescence spectra](#) / М.А. Sulimov, М.Н. Sarychev, М.В. Yakushev, J. Marquez-Prieto, I. Forbes, V. Yu. Ivanov, P.R. Edwards, A.V. Mudryi, J. Krustok, R.W. Martin // *Materials Science in Semiconductor Processing*. — 2021. — V. 121. — P. 105301—105305.
2. [Radiative Recombination at Ion-Induced Defects in  \$\text{Cu}\(\text{In,Ga}\)\text{Se}\_2\$  Alloy Thin Films](#) / O. M. Borodavchenko, V. D. Zhivulko, A. V. Mudryi, M. V. Yakushev, I. A. Mogilnikov // *Semiconductors*. — 2021. — V. 55. — P. 168—174.
3. [Stimulated Emission of Thin  \$\text{Cu}\(\text{In, Ga}\)\text{Se}\_2\$  Films Irradiated by Protons](#) / Svitsiankou I.E., Pavlovskii V.N., Lutsenko E.V., Yablonskii G.P., Mudryi A.V., Borodavchenko O.M., Zhivulko V.D., Yakushev M.V. // *Journal of Applied Spectroscopy*. — 2021. — V. 87. — P. 1037—1042.

# Обменное смещение и эффект тренировки обменного смещения в слоистом кобальтите $GdBaCo_2O_{5+\delta}$

Н.И. Солин, С.В. Наумов, А.В. Королев

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

Обнаружено, что эффект тренировки поля обменного смещения - (уменьшение поля обменного смещения  $H_{EB}(N)$  при циклическом изменении напряженности магнитного поля) – сопровождается уменьшением намагниченности ферромагнитных кластеров. Эффект тренировки обусловлен существованием однодоменных ферромагнитных частиц разного объема  $V$  и зависимостью времени релаксации их намагниченности от их объема,  $\tau \sim \exp(K_{an}V/kT)$ . Резкие изменения  $H_{EB}$  и электросопротивления после первых циклов обусловлены близостью энергии мелких однодоменных частиц  $K_{an}V$  к тепловой энергии  $kT$ , где  $K_{an}$ - плотность энергии магнитной анизотропии. Эффект тренировки объясняется процессами установления равновесного состояния спиновой структуры FM/AFM при циклических изменениях магнитного состояния.

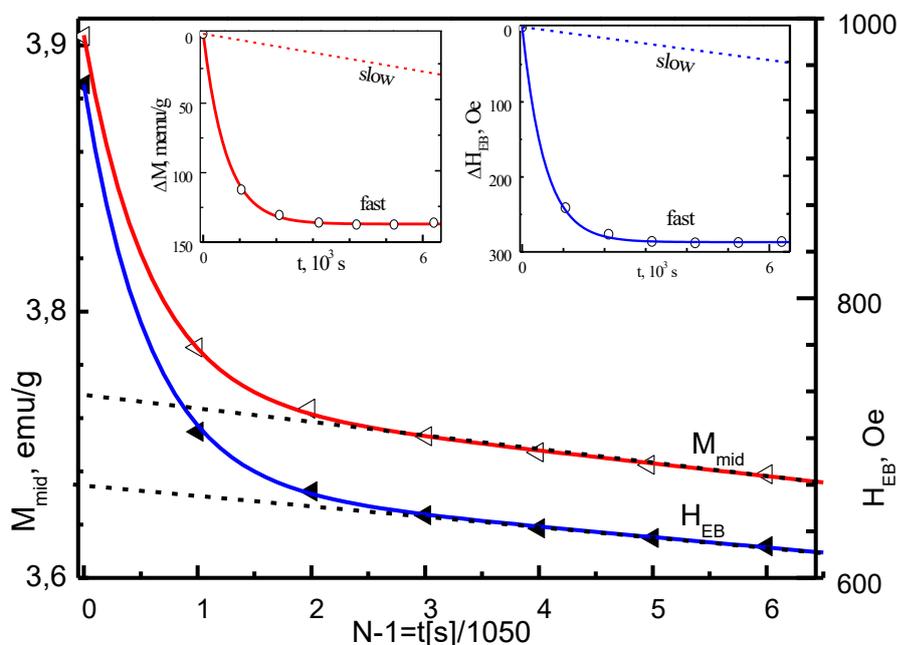


Рисунок – 1 Временные зависимости средней намагниченности  $M_{mid}$ , поля обменного смещения  $H_{EB}$  поликристалла  $GdBaCo_2O_{5.52}$  при циклическом изменении магнитного поля. Символы- результаты эксперимента, сплошные линии расчет (см. [2]).

## Публикации:

1. [Эффект тренировки электросопротивления в обменно-смещенном кобальтите  \$GdBaCo\_2O\_{5.5}\$](#)  / Н.И. Солин, С.В. Наумов // Журнал экспериментальной и теоретической физики 159 №2, p.315 (16 pp.) 2021,
2. [Эффект тренировки обменного смещения в кобальтите  \$GdBaCo\_2O\_{5.5}\$](#)  / Н. И. Солин, С. В. Наумов, С. В. Телегин // Журнал экспериментальной и теоретической физики 155 №2, p.321 (10 pp.) 2019,
3. [Обменное смещение в слоистом кобальтите  \$GdBaCo\_2O\_{5.5}\$](#)  / Н.И. Солин, С.В. Наумов, С.В. Телегин, А.В. Королев // Журнал экспериментальной и теоретической физики 152 №6, p.1386 (8 pp.) 2017

## Коэффициенты диффузии ионов Na в суперионных проводниках Na-7-CB<sub>10</sub>H<sub>13</sub> и Na<sub>2</sub>(CB<sub>9</sub>H<sub>10</sub>)(CB<sub>11</sub>H<sub>12</sub>)

А.В. Скрипов, О.А. Бабанова, Р.В. Скорюнов, А.В. Солонинин, G. Majer<sup>1</sup>, M. Dimitrievska<sup>2</sup>, T.J. Udovic<sup>2</sup>

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

<sup>1</sup>Max-Planck-Institute for Intelligent Systems, Stuttgart, Germany

<sup>2</sup>National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA

Методом спинового эха с импульсным градиентом магнитного поля измерены коэффициенты диффузии ионов Na<sup>+</sup> в новых суперионных проводниках Na-7-CB<sub>10</sub>H<sub>13</sub> и Na<sub>2</sub>(CB<sub>9</sub>H<sub>10</sub>)(CB<sub>11</sub>H<sub>12</sub>) с гидроборатными анионами. Для обоих соединений обнаружены исключительно высокие значения коэффициентов диффузии Na<sup>+</sup> вблизи комнатной температуры. Соединение Na<sub>2</sub>(CB<sub>9</sub>H<sub>10</sub>)(CB<sub>11</sub>H<sub>12</sub>) имеет рекордную ионную проводимость при комнатной температуре среди всех известных твердых ионных проводников, и полученные данные по диффузионной подвижности для него согласуются с измерениями ионной проводимости. Продемонстрировано, что высокие коэффициенты диффузии катионов в исследованных соединениях связаны с быстрым реориентационным (вращательным) движением гидроборатных анионов. Полученные результаты важны для создания твердых электролитов для перспективных электрохимических источников тока.

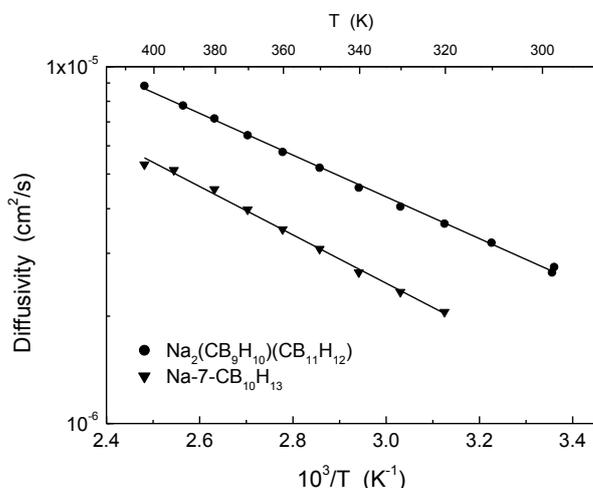


Рис. 1. Зависимость измеренного коэффициента диффузии ионов Na<sup>+</sup> в Na-7-CB<sub>10</sub>H<sub>13</sub> и Na<sub>2</sub>(CB<sub>9</sub>H<sub>10</sub>)(CB<sub>11</sub>H<sub>12</sub>) от обратной температуры. Прямые линии на графике показывают аррениусовскую аппроксимацию.

Результаты получены в рамках научной темы «Функция».

### Публикация:

[Na<sup>+</sup> diffusivity in carbon-substituted \*nido\*- and \*closo\*-hydroborate salts: Pulsed-field-gradient NMR studies of Na-7-CB<sub>10</sub>H<sub>13</sub> and Na<sub>2</sub>\(CB<sub>9</sub>H<sub>10</sub>\)\(CB<sub>11</sub>H<sub>12</sub>\)](#) / A.V. Skripov, G. Majer, O.A. Babanova, R.V. Skoryunov, A.V. Solonin, M. Dimitrievska, T.J. Udovic // Journal of Alloys and Compounds.—2021.—V. 850.—156781. (Q1)

# Влияние упорядочения ионов Pr и Ba в двойных манганитах PrBaMn<sub>2</sub>O<sub>6</sub> на ИК поглощение и эффект магнитопротускания

Е. В. Мостовщикова, Е. В. Стерхов<sup>1</sup>, С. В. Наумов, Н. С. Ермолов, С. А. Упоров<sup>1</sup>, С. Г. Титова<sup>1</sup>

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

<sup>1</sup>Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург

Исследованы магнитные и оптические свойства в ближнем ИК диапазоне двойных слоистых манганитов PrBaMn<sub>2</sub>O<sub>6</sub> с упорядочением ионов Pr и Ba 90, 40 и 0%. Сопоставление магнитных данных и спектров оптической плотности и температурных зависимостей пропускания света в ближнем ИК диапазоне свидетельствует об изменениях в системе носителей заряда в виде перехода металл-изолятор вблизи магнитных фазовых переходов. Температуры и тип магнитных переходов и характер переходов металл-изолятор зависят от степени упорядочения ионов Pr и Ba. Для двойных манганитов PrBaMn<sub>2</sub>O<sub>6</sub> впервые измерен эффект магнитопротускания, который объясняется увеличением доли делокализованных носителей заряда при приложении магнитного поля. Наибольшее значение магнитопротускания (до 12% в поле 8 кЭ) обнаружено с манганите с частичным упорядочением.

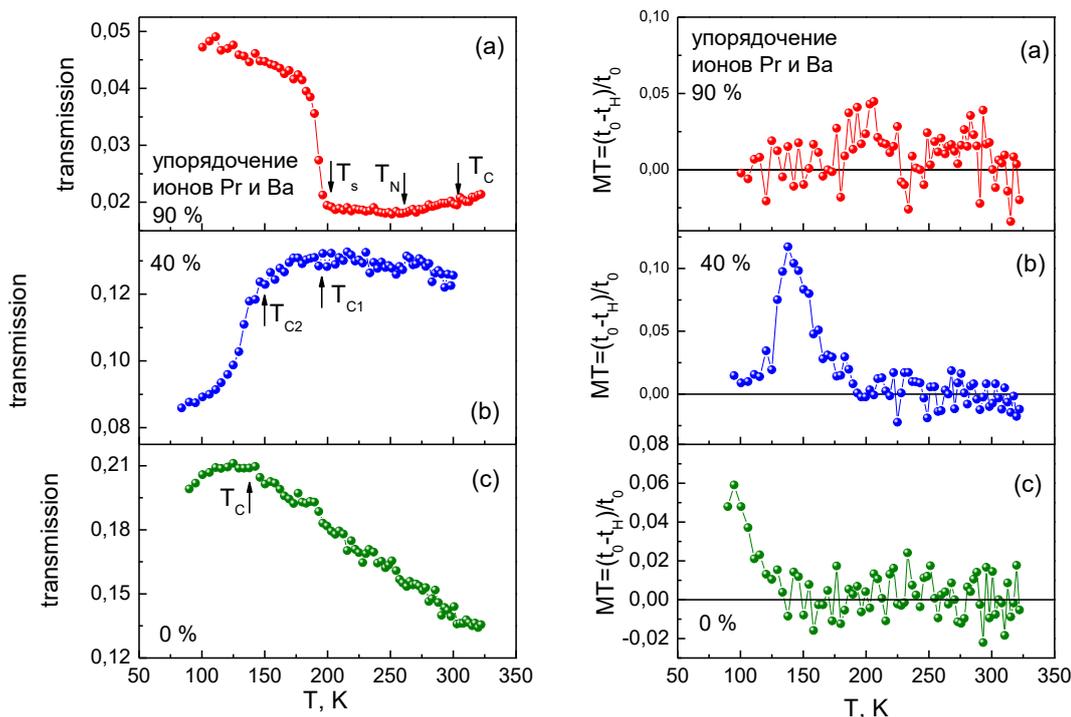


Рисунок - 1 Температурные зависимости пропускания света (слева) и магнитопротускания (справа) при энергии E=0.2 эВ манганитов PrBaMn<sub>2</sub>O<sub>6</sub> с разной степенью упорядочения ионов Pr и Ba

## Публикация:

1. [Effect of A-site ordering on IR absorption and magnetotransmission in PrBaMn<sub>2</sub>O<sub>6</sub> double manganite](#) / E. V. Mostovshchikova, E. V. Sterkhov, S. V. Naumov, N. S. Ermolov, S. A. Uporov, S. G. Titova // Journal of Magnetism and Magnetic Materials.—2021.—V.538.—P.168247.

# Фокусировка фононов и электронный транспорт в монокристаллах калия и наноструктурах на его основе

И. И. Кулеев, И. Г. Кулеев

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

Исследования электронного транспорта в кристаллах калия и наноструктурах на его основе показали, что анизотропия упругой энергии оказывает существенное влияние на электрон-фононную релаксацию в них. Расчет электросопротивления кристаллов калия в рамках теории Блоха-Грюнайзена показал, что при температурах, гораздо меньших температуры Дебая, вклад квазипоперечных фононов в электросопротивление, который ранее не учитывался, в 11.5 раза превышает вклад продольных фононов ( $L$ ). При этом вклад релаксации электронов на сдвиговой компоненте медленной поперечной моды ( $t_2$ ) оказался в 4 раза большим, чем вклад продольных фононов. Исследование фокусировки фононов в нанопроводах и нанопластинах на основе монокристаллов калия показало, что термоэдс увлечения при низких температурах для них становится анизотропной. Причем, с увеличением сечения образца анизотропия термоэдс увлечения изменяется немонотонным образом: при переходе от режима кнудсеновского течения фононного газа она сначала возрастает, достигает максимума, а затем исчезает при переходе к режиму объёмных механизмов релаксации. Этот эффект обусловлен конкуренцией вкладов  $t_2$ -моды и  $L$ -фононов и более сильной релаксацией  $L$ -фононов на электронах.

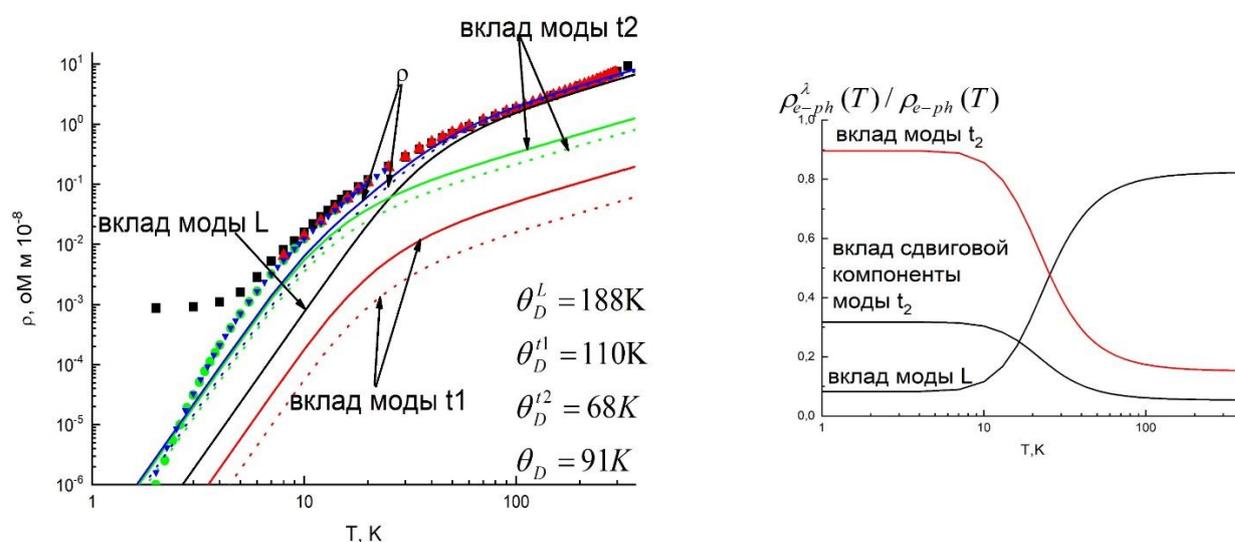


Рисунок - 1 Температурные зависимости электросопротивления. Символы экспериментальные данные. Сплошные кривые - расчет при учете продольной и сдвиговой компоненты взаимодействия. Штриховые кривые расчет при учете только продольной компоненты для всех колебательных мод

## Публикации:

1. The effect of phonon focusing on the electron-phonon relaxation and electron transport in potassium crystals / I.G. Kuleyev, I.I. Kuleyev // Chinese Journal of Physics. — 2020. — V. 68. — P. 886—895.
2. Effect of Phonon Focusing on the Drag Thermopower in Single-Crystal Potassium Nanowires at Low Temperatures / I. I. Kuleyev, I. G. Kuleyev // Physics of Metals and Metallography. — 2021. — V. 122. — P. 75—82.
3. Effect of phonon focusing and shear waves on anisotropy of drag thermopower in potassium nanoplates / Kuleyev I.G., Kuleyev I.I. // Chinese Journal of Physics. — 2021. — V. 72. — P. 351—359.

## Исследование структурных особенностей одномерных металлических наноструктур на основе кобальта методом ядерного магнитного резонанса.

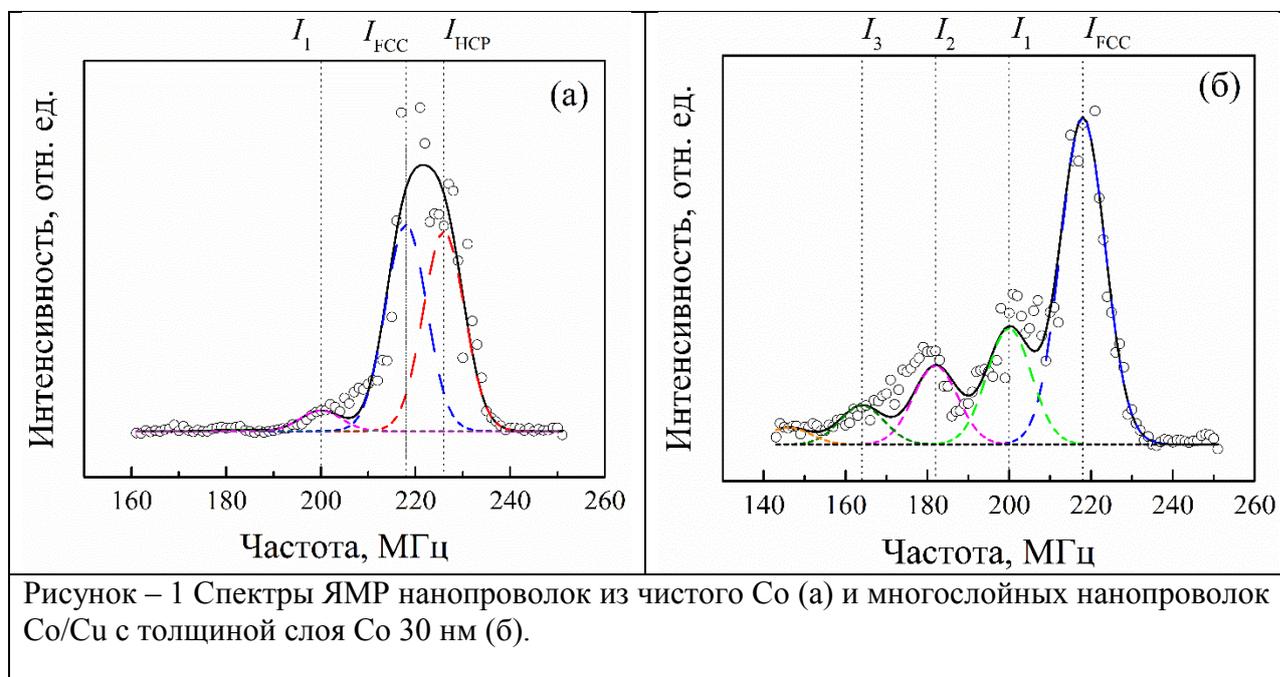
С.А. Чупраков, И.В. Блинов, Д.Л.Загорский<sup>1</sup>, Д.А.Черкасов<sup>1,2</sup>

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

<sup>1</sup>ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 119333 Москва, Ленинский просп., 59

<sup>2</sup>МФТИ, 141701 Московская область, Долгопрудный, Институтский переулок, 9.

Методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР) на ядрах  $^{59}\text{Co}$  исследованы структурные особенности массивов нанопроволок (НП), приготовленных методом матричного синтеза на основе трековых мембран, различных типов: из чистого кобальта, из сплава кобальта с медью и многослойных структур, состоящих из чередующихся слоёв кобальта различной толщины и медных прослоек. Установлено, что Co в однокомпонентных НП образует ГЦК и ГПУ решётки. При добавлении ионов меди в электролит в синтезированных гомогенных НП происходит практически полное исчезновение ГПУ фазы Co. При этом медь осаждается частично в виде наноразмерных кластеров со средним размером 30 атомов. В многослойных НП наблюдается значительная доля ядер кобальта с одним, двумя или более атомами меди в ближайшем окружении по сравнению с гомогенными НП. Определены параметры, характеризующие структуру межслойных границ многослойных НП при различных толщинах слоев кобальта. Установлено, что при увеличении толщины слоя кобальта в НП относительная ширина межслойных границ уменьшается.



### Публикация:

1. [NMR Study of Cobalt-Containing Nanowires of Various Types](#) [Текст] / S. A. Chuprakov<sup>1</sup>, I. V. Blinov<sup>1</sup>, D. L. Zagorskii<sup>0</sup>, D. A. Cherkasov<sup>0</sup> // Physics of Metals and Metallography. — 2021. — V. 122. — P. 869—875.

## Особенности движения натрия в двойных молибдатах $\text{Na}_9R(\text{MoO}_4)_6$ с $R = \text{Al}, \text{Sc}, \text{In}$

А.Л. Бузлуков, И.Ю. Арапова, Я.В. Бакланова<sup>1</sup>, Т.А. Денисова<sup>1</sup>, Н.И. Медведева<sup>1</sup>, А.А.Савина<sup>2,3</sup>, Е.Г.Хайкина<sup>3</sup>, В.А.Морозов<sup>4</sup>, Bogdan I. Lazoryak<sup>4</sup>, Sergey Yu. Stefanovich<sup>4</sup>, Michel Bardet<sup>5,6</sup>, Joke Hadermann<sup>7</sup>

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

<sup>1</sup>Институт химии твердого тела УрО РАН,

<sup>2</sup>Сколковский институт науки и технологий,

<sup>3</sup>Байкальский институт природопользования СО РАН,

<sup>4</sup>Химический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова,

<sup>5</sup>Universite Grenoble Alpes, IRIG, MEM/LRM, F-38000 Grenoble, France

<sup>6</sup>CEA, IRIG, MEM/LRM, F-38054 Grenoble, France

<sup>7</sup>EMAT, University of Antwerp, Groenenborgerlaan 171, Belgium B-2020

Проведены комплексные экспериментальные исследования Na-проводящих оксидов  $\text{Na}_9R(\text{MoO}_4)_6$  с  $R = \text{In}, \text{Sc}, \text{Al}$ . Исследуемые материалы являются ионными проводниками с проводимостью,  $\sigma \sim 10^{-2} \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$  при 800 К. Результаты ЯМР экспериментов на ядрах  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{27}\text{Al}$  и  $^{45}\text{Sc}$  обнаруживают крайне неоднородный характер движения катионов. В частности, в In- и Sc-содержащих системах в области температур 300 – 750 К наблюдается сосуществование *трех* типов движения натрия. Эти процессы активируются при различных температурах и характеризуются существенно различающейся природой и динамическими характеристиками. В  $\text{Na}_9\text{Al}(\text{MoO}_4)_6$  обнаруживается сосуществование *двух* типов движения. Кроме того, в области температур ниже 500 К наблюдаются сильные корреляционные эффекты в движении атомов.

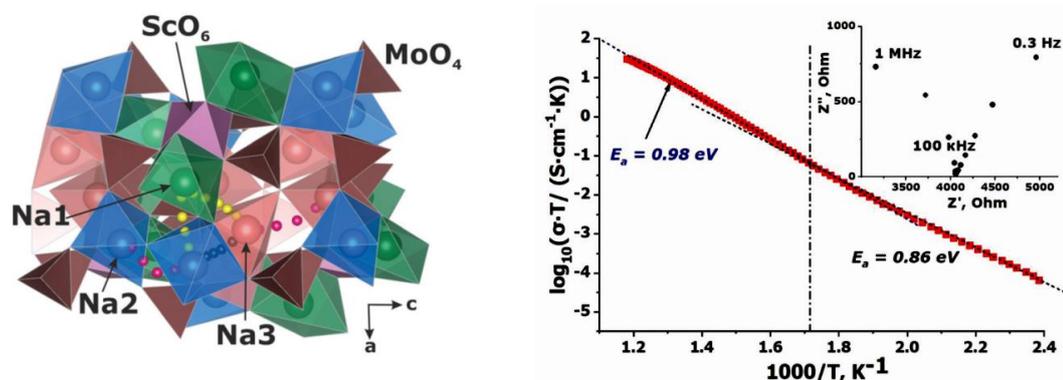


Рисунок - 1 (слева) Фрагмент структуры  $\text{Na}_9\text{Sc}(\text{MoO}_4)_6$ : показаны различные типы ионных перескоков. (справа) Аррениусовский график электропроводности, перегиб при  $T \approx 550$  К обусловлен сменой механизма диффузии натрия.

1. [New Solid Electrolyte  \$\text{Na}\_9\text{Al}\(\text{MoO}\_4\)\_6\$ : Structure and  \$\text{Na}^+\$  Ion Conductivity](#) [Текст] / Aleksandra A. Savina, Vladimir A. Morozov, Anton L. Buzlukov, Irina Yu. Arapova, et al. // Chemistry of materials. — 2017. — V. 29. — P. 8901—8913.
2. [Coexistence of three types of sodium motion in double molybdate  \$\text{Na}\_9\text{Sc}\(\text{MoO}\_4\)\_6\$ :  \$^{23}\text{Na}\$  and  \$^{45}\text{Sc}\$  NMR data and ab initio calculations](#) [Текст] / Anton L. Buzlukov, Irina Yu. Arapova, Yana V. Baklanova, Nadezhda I. Medvedeva, Tatiana A. Denisova, Aleksandra A. Savina, Bogdan I. Lazoryak, Elena G. Khaikina, Michel Bardet // PHYSICAL CHEMISTRY CHEMICAL PHYSICS. — 2020. — V. 22. — P. 144—147.
3.  [\$\text{Na}\_9\text{In}\(\text{MoO}\_4\)\_6\$ : synthesis, crystal structure, and  \$\text{Na}^+\$  ion diffusion](#) [Текст] / Anton L. Buzlukov, Yana V. Baklanova, Irina Yu. Arapova, Aleksandra A. Savina, Vladimir A. Morozov, Michel Bardet, Bogdan I. Lazoryak, Elena G. Khaikina, Tatiana A. Denisova, Nadezhda I. Medvedeva // Ionics. — 2021. — V. 27. — P. 4281—4292.

## Неоднородное магнитное состояние пленок $\text{YFeO}_3$ по данным ЯМР спектроскопии

А.П. Носов, В.В. Оглобличев, В.И. Изюров, Ю.В. Пискунов, А.Г. Смольников, А.Ф. Садыков, С. А. Чупраков, С.С. Дубинин, С.В. Наумов

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

Методами спектроскопии ядерного магнитного резонанса исследованы особенности неоднородного магнитного состояния тонких пленок антиферромагнетика  $\text{YFeO}_3$  при термообработке в атмосфере кислорода и воздуха. Обнаружено существенно неоднородное распределение локальных магнитных полей внутри пленок на масштабах межатомного расстояния, отвечающих положению ядер внутри доменов и в доменных стенках. Установлено, что в исследованных пленках  $\text{YFeO}_3$  присутствуют две магнитно неэквивалентные позиции ионов железа, соответствующие его разным валентным состояниям. Соотношение неэквивалентных позиций железа и степень искажения кристаллической решетки меняются в зависимости от атмосферы термообработки.

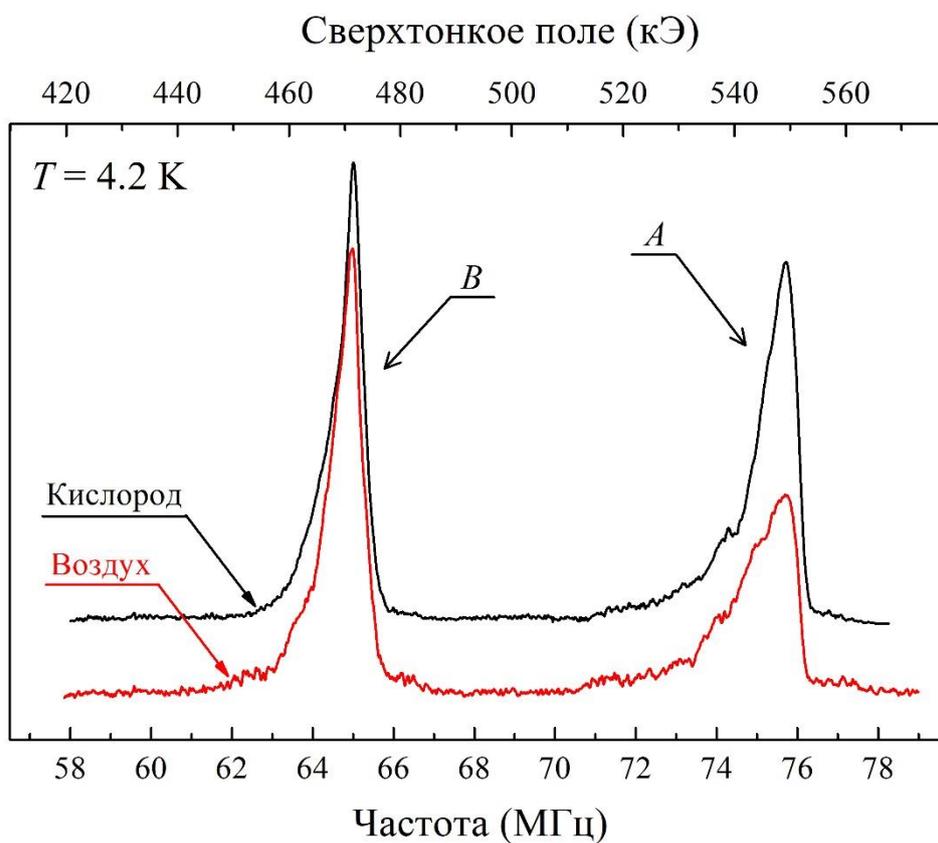


Рисунок - 1. Спектры ЯМР на ядре  $^{57}\text{Fe}$  в нулевом внешнем магнитном поле в пленках  $\text{YFeO}_3$  толщиной 880 нм, термообработанных в течении трех часов при температуре  $800^\circ\text{K}$  в атмосферах кислорода (черная линия) и воздуха (красная линия).

### Публикация:

1. [Inhomogeneous Magnetic State of  \$\text{YFeO}\_3\$  Thin Films According to NMR Spectroscopy Data](#) / V.V.Ogloblichev, V.I.Izyurov, Yu.P.Piskunov, A.G.Smol'nikov, A.F.Sadykov, S.A.Chuprakov, A.P.Nosov // JETP Letters.—2021.—V.114.—No.1-P.29 (6 pp).

## Объёмные Янус-материалы на основе слоистых дихалькогенидов переходных металлов с замещением по подрешётке халькогена.

А.Н.Титов, А.С.Шкварин, А.И.Меренцов, О.В.Бушкова<sup>1</sup>, С.Г.Титова<sup>2</sup>, А.Е.Суслов, А.А.Титов, Н.В.Казанцева, М.С.Постников

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

<sup>1</sup>Институт химии твердого тела УрО РАН.

<sup>2</sup>Институт металлургии УрО РАН

С помощью комплекса экспериментальных методов, включающего, впервые теоретически обоснованный метод измерения ЭДС электрохимической ячейки относительно компонента, не входящего в состав исследуемого материала, метод просвечивающей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, комплекса спектральных методов, включающего XPS, ARPES, в том числе и с резонансным Ti2p-3d, S2p-3d возбуждением, FSM, обнаружено формирование Янус слоёв с идеализированной формулой S-Ti-Se в твёрдом растворе замещения Ti(Se<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>)<sub>2</sub>. Показано, что такого типа твёрдые растворы с замещением по подрешётке халькогена термодинамически можно рассматривать как раствор Янус-слоёв в TiS<sub>2</sub> или TiSe<sub>2</sub>. Показано, что формирование Янус-слоёв приводит к резкому возрастанию энергии Ферми (до 0,5 эВ). Эффект связан с кривизной Янус-слоёв из-за разницы в размерах S и Se. Установлено наличие критической величины кривизны и, соответственно, возрастания энергии Ферми, при превышении которой образование твёрдых растворов становится невозможно. Показано, что повышение жёсткости связи между слоями решётки понижает кривизну Янус-слоёв и в некоторых случаях стабилизирует твёрдые растворы.

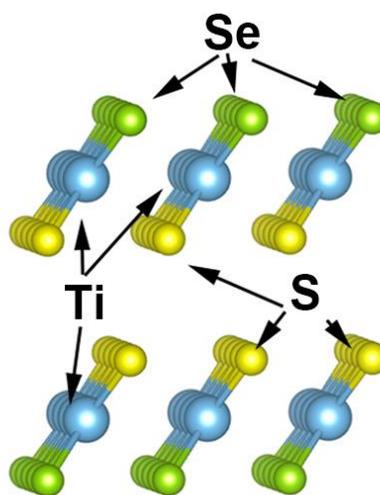
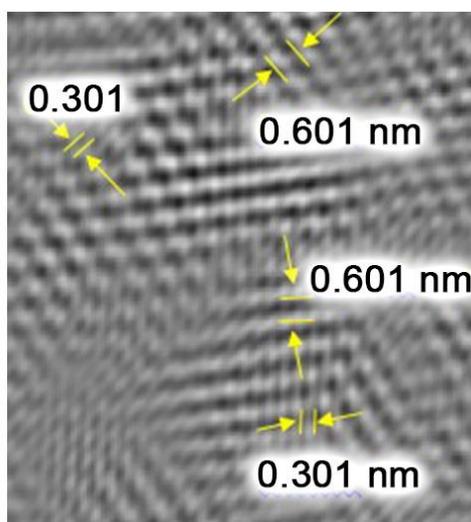


Рисунок - 1 На левой панели IFFT изображение показывает два набора плоскостей с межплоскостными промежутками 0.301 нм и 0.601 нм с поворотом на 60 ° внутри набора. На правой панели – фрагмент кристаллической решетки TiSeS.

### Публикации

1. A.N.Titov, A.S.Shkvarin, A.I.Merentsov, O.V.Bushkova, E.A.Suslov, A.A.Titov, J.Avila, M.C.Asensio, N.V.Kazantseva, M.S.Postnikov “Janus Layers in the TiSe<sub>2</sub>-TiS<sub>2</sub> System” // Chemistry of materials 2021, **33**, 22, 8915 – 8925. DOI: 10.1021/acs.chemmater.1c03232 Q1 IF 9.811
2. А.А.Титов, А.Н.Титов, С.Г.Титова “Влияние поляронного состояния носителей заряда на взаимную растворимость дихалькогенидов титана”//Известия РАН. Серия Физическая **68**, № 11 (2004) 1666-1667.
3. E.A.Suslov, A.A.Doroshek, A.A.Titov, and A.N.Titov “Determination of the Critical Points for Intercalating Systems by the EMF Method Concerning Foreign Metal”// J. Phys. Chem. A 2021, 125, 9, 1981–1986 DOI: 10.1021/acs.jpca.0c08998 Q2 IF 2.781

# Температура кристаллизации, структура и магнитные свойства нанокристаллического сплава Файнмет (FeSiNbCuB)

Н.В. Ершов, Ю.П. Черненко<sup>1</sup>, В.А. Лукшина, О.П. Смирнов<sup>1</sup>, Д.А. Шишкин

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

<sup>1</sup>Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, НИЦ Курчатовский институт, Гатчина

В процессе первичной кристаллизации образцов сплава FeSiNbCuB (Finemet – Файнмет), полученных быстрой закалкой расплава, падающего на вращающийся медный барабан, которая происходит во время отжига при температурах 500 – 600°C, в них формируется нанокристаллическая структура, состоящая из кристаллов  $\alpha$ -FeSi диаметром ~10 нм, окруженных аморфной матрицей, содержащей Fe-Nb-B. Нанокристаллические сплавы Файнмет обладают экстраординарными магнитомягкими свойствами, сочетающими низкие потери на перемагничивание, высокую проницаемость и близкую к нулю магнитострикцию. Нами успешно решена задача выяснения причины ухудшения магнитомягких свойств сплава Fe<sub>73.5</sub>Si<sub>13.5</sub>Nb<sub>3</sub>Cu<sub>1</sub>B<sub>9</sub> по мере увеличения температуры нанокристаллизующего отжига в диапазоне от 520 до 620°C. Показано, что модель случайной магнитной анизотропии с учетом как магнитокристаллической анизотропии, так средних размеров нанокристаллов хорошо описывает изменение магнитных свойств сплавов типа Файнмет в зависимости от температуры, при которой происходит образование нанокристаллов. Причиной уширения петли магнитного гистерезиса (рисунок 1) по мере увеличения температуры нанокристаллизующего отжига является более высокая подвижность атомов кремния по сравнению с атомами железа при их диффузионном перемещении из аморфной фазы в нанокристаллы.

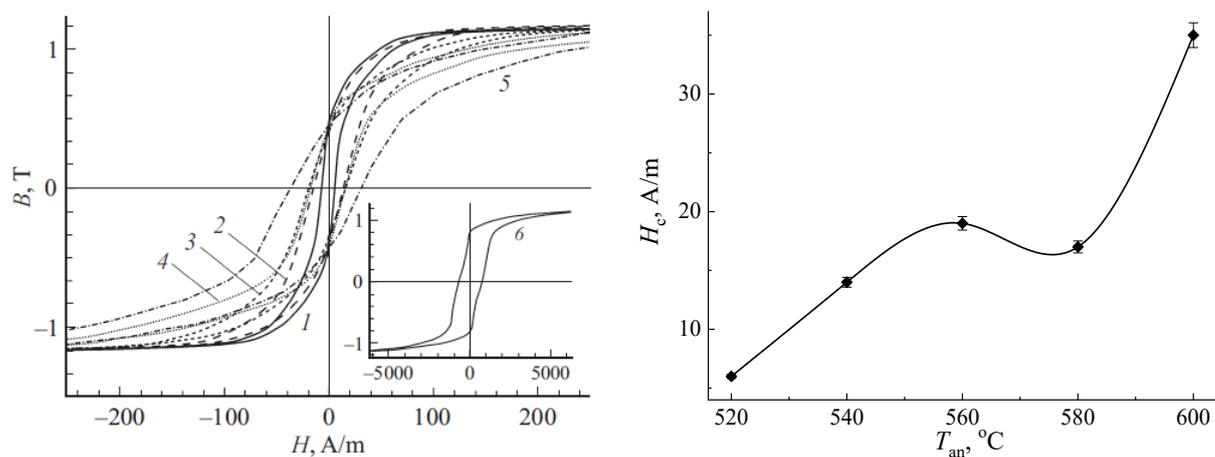


Рисунок – 1 Петли магнитного гистерезиса  $B(H)$  образцов сплава Fe<sub>73.5</sub>Si<sub>13.5</sub>Nb<sub>3</sub>Cu<sub>1</sub>B<sub>9</sub> после кристаллизации в течение 2 h при температурах: 1 – 520, 2 – 540, 3 – 560, 4 – 580, 5 – 600 и 6 – 620°C (на вставке) – слева; и зависимость коэрцитивной силы  $H_c$  от температуры отжига  $T_{an}$  в интервале от 520 до 600°C – справа.

## Публикация:

1. [Влияние температуры продолжительного отжига на структуру и магнитные свойства нанокристаллического сплава FeSiNbCuB.](#) / Н.В. Ершов, Ю.П. Черненко, В.А. Лукшина, О.П. Смирнов, Д.А. Шишкин // Физика твердого тела.—2021.—Том 63. вып. 7.— Р.834—847.

## Магнитострикция и тепловое расширение в нестехиометрических соединениях $TbCo_2Mn_x$

Е.Г. Герасимов, А.А. Инишев, П.Б. Терентьев, В.А. Казанцев, Н.В. Мушников

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

Исследованы магнитострикция и тепловое расширение нестехиометрических соединений  $TbCo_2Mn_x$  ( $0 \leq x \leq 0.6$ ), которые кристаллизуются в кубической решетке типа  $MgCu_2$ , несмотря на значительное отклонение от стехиометрии. В рамках модели молекулярного поля для двухподрешеточного ферримагнетика вычислены внутри и междошрешеточные обменные взаимодействия. Показано, что сильное возрастание температуры Кюри в нестехиометрических соединениях с ростом концентрации Mn обусловлено возрастанием магнитного момента 3d подрешетки и внутриподрешеточного 3d-3d обменного взаимодействия. Установлено, что соединения обладают большой объемной и анизотропной магнитострикцией в широком диапазоне температур. При комнатной температуре соединение  $TbCo_2Mn_{0.4}$  обладает высокой линейной магнитострикцией ( $\sim 400 \cdot 10^{-6}$  в магнитном поле 5 кЭ), что позволяет рассматривать нестехиометрические соединения  $TbCo_2Mn_x$  как перспективные материалы для различных магнитострикционных приложений.

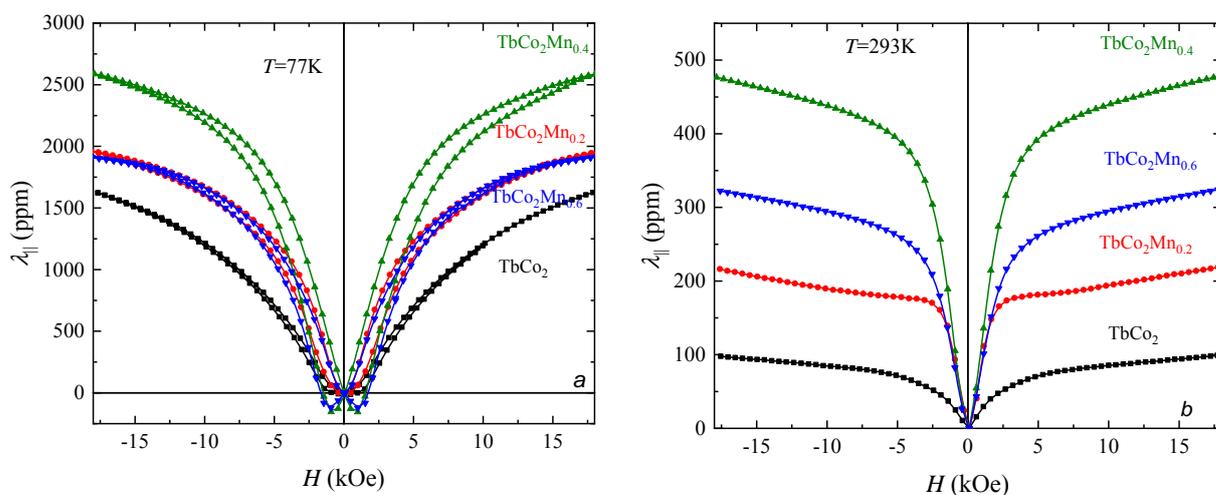


Рисунок - 1 Зависимость линейной магнитострикции от напряженности магнитного поля в нестехиометрических соединениях  $TbCo_2Mn_x$  с различным содержанием марганца при температурах 77K (a) и 293K (b).

### Публикация:

1. [Magnetostriction and thermal expansion of nonstoichiometric  \$TbCo\_2Mn\_x\$  compounds](#) / E.G. Gerasimov, A.A. Inishev, P.B. Terentev, V.A. Kazantsev, N.V. Mushnikov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials.—2021.—V.523.—P.167628.

## Fe<sub>3</sub>Ni присутствует на равновесной фазовой диаграмме Fe-Ni!

Н.Д. Земцова

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

Использование метода сканирующей электронной микроскопии дало возможность **увидеть** частицы избыточной фазы, выделяющейся в процессе закалки сплавов Fe-Ni инварного состава от температуры аустенизации 1100°C. Охлаждение сплавов в жидком азоте обеспечивает  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение с переходом этих частиц в структуру мартенсита. Медленный нагрев до 400°C приводит к развитию обратного  $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения **посредством миграции** межфазной границы  $\gamma/\alpha$ , следовательно, к развитию **прерывистой реакции**. Прерывистые реакции в условиях медленного нагрева приводят к формированию равновесных фаз. Равновесная  $\gamma$ -фаза при 400°C, в соответствии с любой опубликованной в литературе диаграммой состояния Fe-Ni, должна содержать ~40 ат.% Ni. Поэтому сам факт обнаружения прерывистой реакции даёт возможность утверждать, что фазой выделения является Fe<sub>3</sub>Ni. Только выделение этой фазы с повышенным содержанием железа по сравнению с матрицей делает возможным флуктуационное зарождение равновесной  $\gamma$ -фазы, обогащённой никелем, вблизи межфазной границы  $\gamma/\alpha$ .

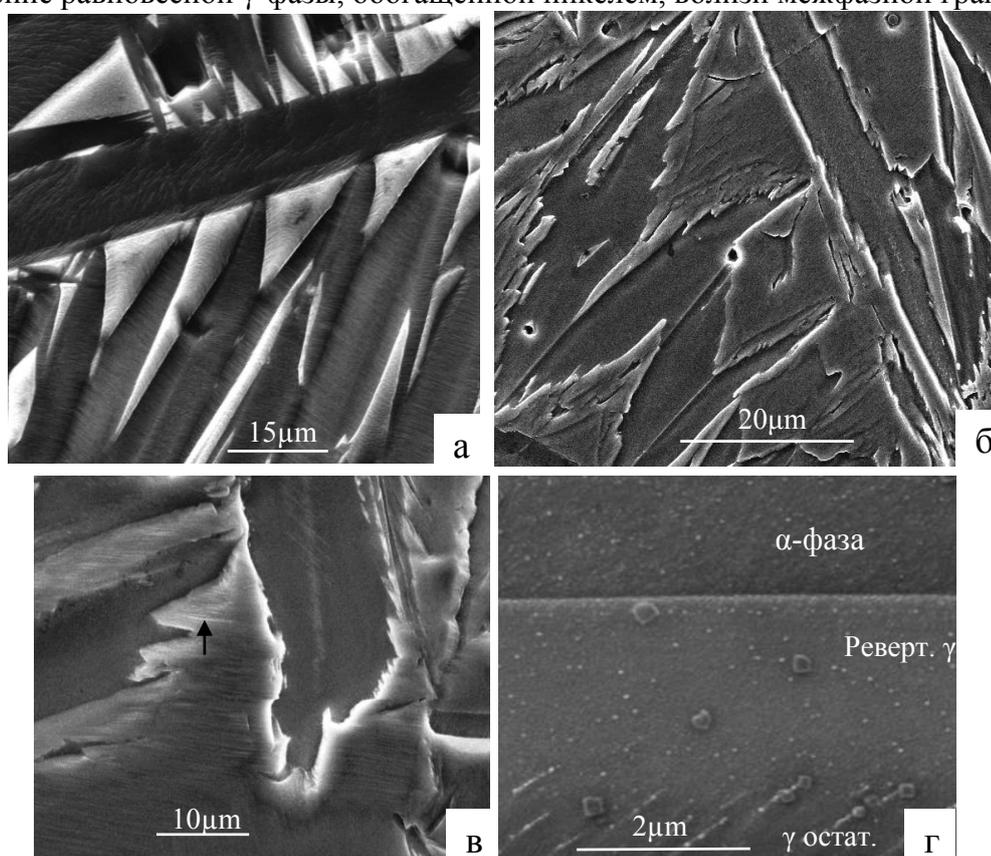


Рисунок – 1 Изображение структуры сплава Fe-32ат.%Ni а) после охлаждения в жидком азоте, границы  $\gamma/\alpha$  ровные; б, в, г) после дополнительного медленного нагрева до 400°C; б, в) границы  $\gamma/\alpha$  «зубчатые»; в) стрелкой указаны частицы фазы Fe<sub>3</sub>Ni на следах скольжения; г) частицы Fe<sub>3</sub>Ni в  $\alpha$ -фазе, ревертированном аустените и на следах скольжения в остаточном аустените.

### Публикации:

1. Земцова Н.Д. [К дискуссии по вопросам представления равновесной фазовой диаграммы Fe-Ni и природы инварного эффекта](#) // Успехи физических наук. — 2018. — Т. 188 (10). — С. 1103-1118.
2. [Миграция  \$\gamma/\alpha\$  межфазных границ - начальная стадия обратного  \$\alpha \rightarrow \gamma\$ -превращения при медленном нагреве метастабильного сплава Fe-32 at.% Ni](#) [Текст] / Земцова Н.Д. // Журнал технической физики. — 2021. — V. 91. — P. 1139—1148.

## Исследования закономерностей высокоскоростной деформации при сжатии металлических цилиндрических оболочек под действием взрыва

В.И. Зельдович, А.Э. Хейфец, И.В. Хомская, **Н.Ю. Фролова**

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

Исследован процесс высокоскоростного сжатия медных и стальных цилиндрических оболочек диаметром от 24 до 130 мм при различной толщине стенки и интенсивности взрывного нагружения. Описаны два структурных механизма потери устойчивости фронта радиальной деформации. Представлена схема структурных изменений, отражающая последовательные стадии процесса сжатия. Выявлена взаимосвязь числа выступов на поверхности оболочек при их гофрировании с интенсивностью взрывного нагружения. Показано, что неустойчивость радиального сжатия исследованных цилиндрических оболочек определяется абсолютным размером оболочки, а не отношением её толщины к радиусу, как это принято считать.

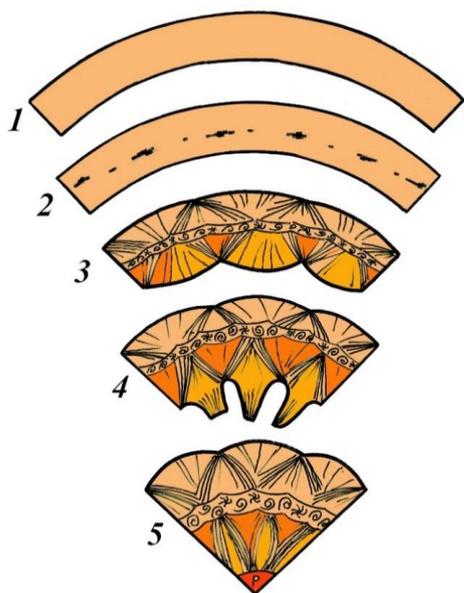


Рисунок - 1 Схема процессов при сжатии оболочки.

Показано, что процесс сжатия цилиндрических оболочек под действием заряда ВВ можно разделить на четыре стадии (Рисунок 1, *четверть поперечного сечения оболочки*). В исходной оболочке (1) под действием ударной волны образуется зона откольных повреждений (2). Поры и трещины откольного происхождения располагаются в средней части по толщине оболочки. При дальнейшем инерционном сжатии происходит высокоскоростная деформация (3-5). Зона откольных явлений расширяется. Поры и трещины заживают при деформации, формируется средняя зона хаотической деформации. Внутренняя и наружная поверхности оболочки теряют форму круга, возникают выступы и вмятины (3), происходит гофрирование. В местах вмятин образуются полосы локализованной деформации, расположенные под углом 45 градусов к поверхности (3). Далее эти процессы продолжаются. На внутренней поверхности оболочки

возникают выбросы (4). На последней стадии выбросы сливаются (5), но сохраняются границы их соприкосновения, похожие на трещины. В центре полученного цилиндра температура может повышаться до температуры рекристаллизации и даже плавления (5). Таким образом, потеря устойчивости фронта радиальной деформации осуществляется по двум структурным механизмам - деформационному и гидродинамическому.

### Публикации:

1. [Metallographic Study of the Convergence of Cylindrical Copper Shells at Different Intensities of Explosive Loading](#) [Текст] / V. I. Zel'dovich, A. E. Kheifets, N. Yu. Frolova, A. A. Degtyarev, E. B. Smirnov, E. V. Shorokhov // *Physics of Metals and Metallography*. — 2021. — V. 122. — P. 566—571.
2. [Деформационные явления при сжатии металлических цилиндрических оболочек. Потеря устойчивости](#) / Зельдович В.И., Фролова Н.Ю., Хейфец А.Э., Хомская И.В., Дегтярев А.А., Шорохов Е.В., Смирнов Е.Б., Долгих С.М., Коваль А.В. // *Физика горения и взрыва*. — 2019. — №4. — С.92-102.

## Изменение структуры и физико-механических свойств сплавов Cu-Pd в ходе A1-B2 превращения после деформации при комнатной и криогенной температурах

О. С. Новикова, О. В. Антонова, А. Ю. Волков

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

Упорядоченные по типу В2 сплавы Cu-Pd вблизи эквиатомного состава нашли применение в качестве мембранного материала для извлечения водорода из газовых смесей, а также в приборостроении. Показано, что получение мембран методом прокатки сокращает время обработки материала за счёт ускорения упорядочения вследствие деформации. Установлено, что отжиг после криодеформации позволяет сформировать в сплаве Cu-47Pd хорошо упорядоченное состояние с размером зерна около 2 мкм. Показано, что формирование зародышей В2-фазы в разупорядоченном закалкой сплаве Cu-50Pd происходит по диффузионно-контролируемому механизму. Экспериментально подтвержден предсказанный нами ранее теоретически вывод о том, что форма зародышей новой фазы определяется температурой превращения: при температуре 350 °С они имеют форму стержней, но становятся сферическими при температуре 500 °С. Показано, что длительный отжиг предварительно деформированного сплава Cu-50Pd при температуре 350 °С приводит к формированию хорошо упорядоченной по типу В2 рекристаллизованной структуры со средним размером зерна ~0.5 мкм.

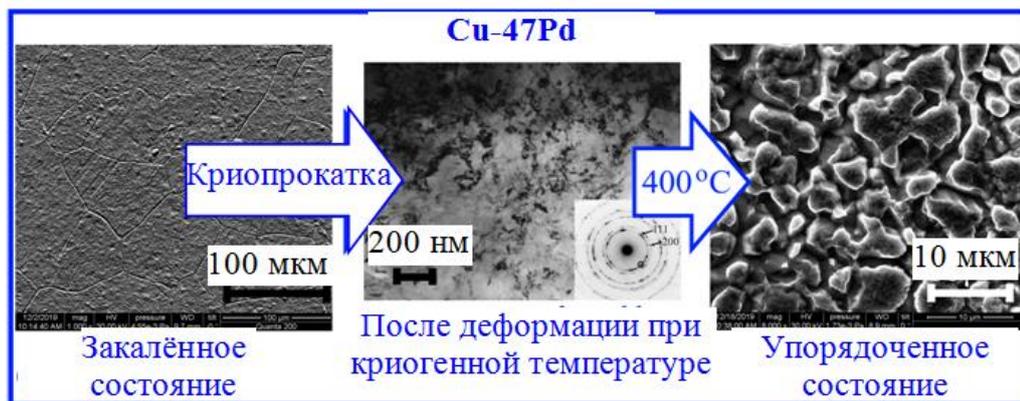


Рисунок - 1 Микроструктуры сплава Cu-47ат.%Pd в различных состояниях

### Публикации:

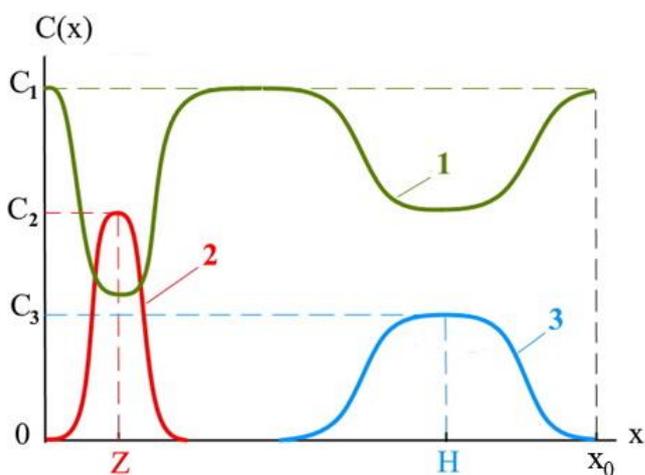
1. [Формирование упорядоченной структуры в сплаве Cu-50Pd \(АТ. %\)](#) [Текст] / Новикова О.С., Антонова О.В., Волков А.Ю.1 // Физика металлов и металловедение. — 2021. — V. 122. — P. 698—704.
2. [Evolution of the microstructure, electrical resistivity and microhardness during atomic ordering of cryogenically deformed Cu-47Pd alloy](#) [Текст] / O.S. Novikova, E.G. Volkova, A.V. Glukhov, O.V. Antonova, A.E. Kostina, B.D. Antonov, A.Yu. Volkov // Journal of Alloys and Compounds. — 2020. — V. 838. — P. 155591—155600.
3. Способ изготовления резистивного материала из упорядочивающего сплава на основе Cu-Pd, патент N 2643733, А.Ю.Волков, О.В.Антонова, О.С.Новикова, А.Е.Костина; 05.02.2018

## Теоретическое исследование структуры центров сегрегации химических компонентов на межкристаллитных границах поликристаллических сплавов замещения.

И.Л. Ломаев

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

Разработана микроскопическая теория сегрегаций химических элементов на межкристаллитных границах сплавов замещения, учитывающая деформационные взаимодействия планарных и точечных дефектов кристаллической структуры сплава. В приближении среднего поля получено интегральное уравнение, описывающее пространственную структуру сегрегаций, в зависимости от атомной структуры межкристаллитных границ и особенностей межатомных взаимодействий компонентов сплава. Проведен анализ структуры сегрегаций на плоских специальных границах наклона на примере двойных сплавов на основе железа. С использованием интегральных соотношений для потенциалов межатомных взаимодействий в рамках общепринятой модели слоя сегрегации постоянной толщины получено уравнение, описывающее планарную структуру центров сегрегации в плоскости межкристаллитных границ наклона. Показано, что структуру сегрегаций можно полностью описать, зная распределение избыточного объема в плоскости границы и ограниченный набор экспериментально измеряемых параметров, характеризующими межатомные взаимодействия компонентов сплава. Теория хорошо согласуется с известными экспериментальными данными.



**Рисунок 1.** Условные распределения концентрации  $C(x)$  химических компонентов в окрестности различных центров сегрегации  $Z$  и  $H$ , расположенных на периоде  $x_0$  в плоскости межкристаллитной границы наклона тройного сплава замещения:

- 1) распределение для основного элемента сплава;
- 2) распределение для первого легирующего элемента с коэффициентом концентрационного расширения кристаллической решетки  $\alpha > 0$ ;
- 3) распределение для второго легирующего элемента, с коэффициентом  $\alpha < 0$ .

$C_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) — максимальные значения концентрации  $i$ -того элемента в плоскости межкристаллитной границы.

### Публикации:

1. [О структуре сегрегаций на специальных границах поликристаллических сплавов замещения](#) / Л.С.Васильев, И.Л.Ломаев, С.Л.Ломаев // Известия Вузов. Физика.— 2021.—№ 10.—С.149—158.
2. [Деформационные взаимодействия в поликристаллических сплавах](#) / Васильев Л. С., Ломаев И. Л., Ломаев С.Л. // Физика металлов и металловедение. — 2020. — V. 121. — P. 1198—1205.
3. [Deformation Interactions in Polycrystalline Alloys](#) / L.S. Vasil'ev, I.L. Lomaev, S.L. Lomaev // Physics of Metals and Metallography. — 2020. — V. 121. — P. 1097—1105.

# Влияние сегрегаций Zn и Mg на зернограничное проскальзывание в Al. Ab initio моделирование

А. Р. Кузнецов, Л.Е. Карькина, Ю.Н. Горностырев

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

Образование сегрегаций Zn и Mg на границах зерен (ГЗ) в Al и их влияние на деформационное поведение поликристаллического Al исследовано теоретически методами первопринципного моделирования. Установлено, что в случае Zn на ГЗ формируется особое структурное состояние (grain boundary complexion), образование которого контролируется как взаимодействием легирующих атомов с ГЗ, так и между собой. Это приводит к образованию широких обогащенных Zn слоев на ГЗ в Al, в отличие от Mg, для которого характерным оказалось образование узких сегрегаций (Рис.1(a)). С целью выяснить влияние сегрегаций на прочностные характеристики поликристаллического Al проведен первопринципный расчет когезионных характеристик и энергетического барьера зернограничного проскальзывания для ГЗ, содержащих сегрегации Zn или Mg. Показано, что сегрегации Zn существенно понижают сопротивление проскальзыванию, в то время как сегрегации Mg повышают его (Рис.1(b)). Полученные результаты позволяют объяснить наблюдаемые экспериментально особенности деформации мелкозернистых сплавов Al, легированных Zn или Mg и, в частности, явление низкотемпературной сверхпластичности в сплаве Al-Zn.

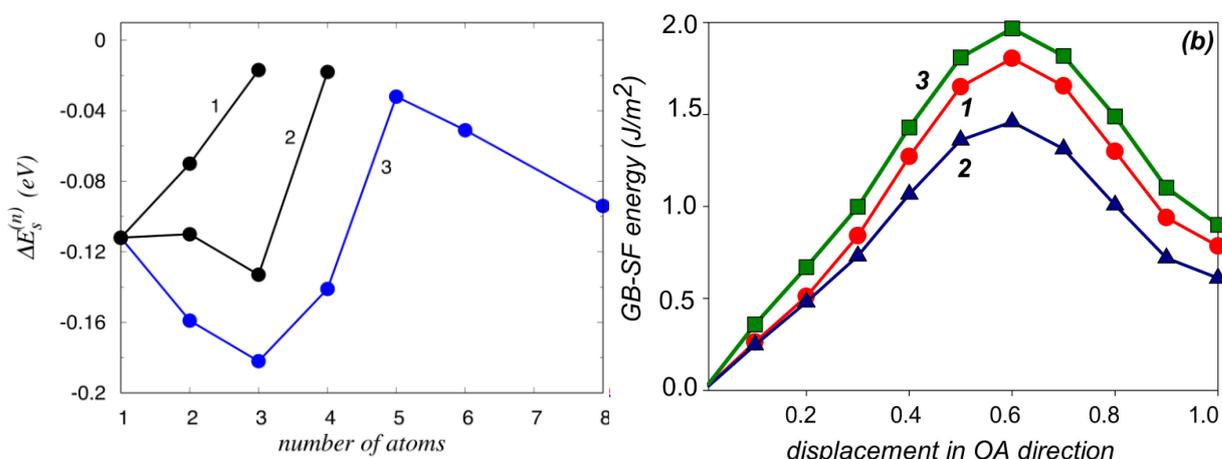


Рисунок - 1 (а) Результаты ab initio расчета изменения энергии сегрегации атомов Zn в зависимости от числа атомных слоев для различных возможных последовательностей заполнений позиций на ГЗ  $\Sigma 5\{013\} \langle 100 \rangle$  в Al. (б) Изменение энергии при жёстком ЗГ сдвиге вдоль наиболее легкого направления в плоскости ГЗ, характеризующее барьер для проскальзывания в чистом Al (1) и сплавах Al-Zn (2) и Al-Mg (3). Учет релаксации решетки приводит к понижению барьера для проскальзывания примерно в три раза.

## Публикации:

[Effects of Zn and Mg Segregations on the Grain Boundary Sliding and Cohesion in Al: Ab Initio Modeling](#) / A. Kuznetsov, L. Karkina, Yu. Gornostyrev, P. Korzhavyi // Metals. – 2021. – V.11.—P. 631—641.

## К теории формирования диффузионной зоны в некоторых задачах поверхностной модификации материалов.

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

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

Найдено асимптотическое решение для описывающее формирование диффузионной зоны для двух случаев поверхностной модификации материалов ионной имплантации и диффузии с поверхности при одновременном ее нагревании. На основе анализа поправочных членов и сопоставлении с численными расчетами дана оценка области применимости полученных решений. Проанализирована роль дрейфовых членов, связанных с градиентами вакансий или температуры. В качестве примеров для первой задачи рассмотрена диффузия после имплантации алюминия в кремний, а для второй – цементирование пластины железа при наличии градиента температуры.

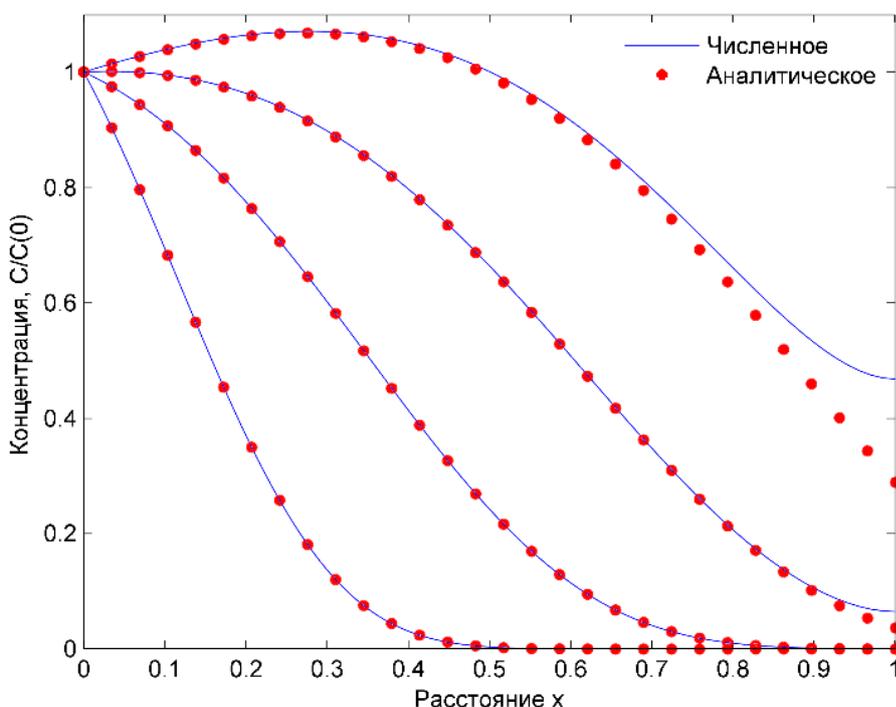


Рисунок - Решение задачи термодиффузии для энергий  $Q = 10$ ,  $Q^* = -10$ , температуры источника  $T_0 = 1000K$ , температуры противоположной границы  $800K$ , времен  $t = 0.25 t_L, 1 t_L, 2.5 t_L, 5 t_L$

### Публикация:

1. [К теории атомной диффузии после ионной имплантации](#) / А.Г. Кесарев, В.В. Кондратьев, И.Л. Ломаев // Физика металлов и металловедение.—2018.—Т. 119.—№ 11. – С. 1160 —1165.
2. [К теории формирования диффузионной зоны при поверхностной модификации материалов учет термодиффузионных эффектов.](#) / А.Г. Кесарев, В.В. Кондратьев, И.Л. Ломаев // Физика металлов и металловедение.—2021.—Т. 122.—№ 2. – С. 1 —7.

# Влияние диаметра сверхпроводящих композитов Nb/Sn/Cu, предназначенных для работы в высоких магнитных полях, на остаточное сопротивление стабилизирующей меди и структуру слоев Nb<sub>3</sub>Sn

И.Л. Дерягина, Е.Н. Попова, Е.И. Патраков

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

Исследование распределения олова в медной матрице многоволоконных сверхпроводящих композитов различных диаметров позволило установить, что падение остаточного сопротивления композитного провода до значений ниже предельно допустимых для стабильной работы сверхпроводника в магнитном поле от 16 Т и выше, вызвано нарушением целостности распределенных Nb барьеров при уменьшении диаметра композита от 1.0 до 0.7 и 0.5 мм и происходящей вследствие этого диффузией Sn в стабилизирующую медь во время диффузионного отжига. Показано, что для сохранения остаточного сопротивления проводника на необходимом уровне ( $RRR > 150$ ) требуется время второй ступени диффузионного отжига снизить от 40 до 20 и 10 часов при уменьшении диаметра композита от 1.0 до 0.7 и 0.5 мм, соответственно.

Исследование структуры слоев Nb<sub>3</sub>Sn показало, что оптимальной для обеспечения высоких значений критической плотности тока ( $J_c$ ) структурой (минимальный средний размер зерна и близость состава фазы к стехиометрии) обладает композит диаметром 0.7 мм. Предложены пути оптимизации термообработки, реализация которых позволит поднять уровень критической плотности тока в сверхпроводниках исследованных диаметров до величины  $J_c = 1500$  А/мм<sup>2</sup> (в поле 16 Тл), заданной спецификацией для Будущего Кольцевого Коллайдера (Future Circular Collider - FCC).

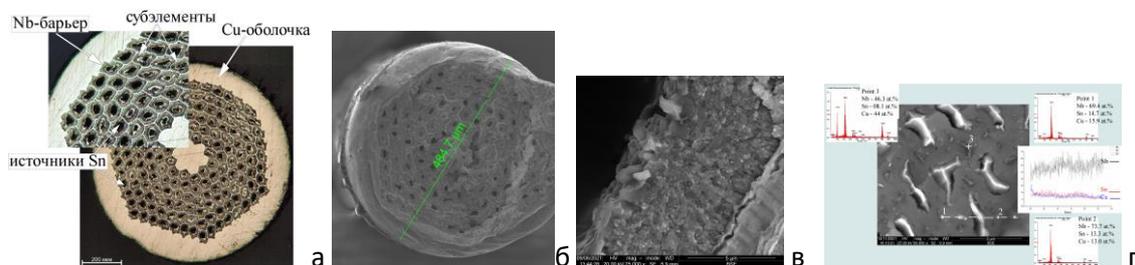


Рисунок - 1 Поперечное сечение шлифа (а) и изломов (б -г) сверхпроводящих композитов диаметром 1 мм (а, в, г) и 0.5 мм (б). Фрагмент слоя Nb<sub>3</sub>Sn с участками остаточного ниобия и данными по микроанализу состава

## Публикации:

1. [The Effect of Diffusion Annealing of Nb<sub>3</sub>Sn-Based Superconductors with Internal Tin Sources on the Conductivity of Stabilizing Copper](#) [Текст] / D. S. Novosilova, M. V. Polikarpova, I. M. Abdyukhanov, I. L. Deryagina, E. N. Popova, E. I. Patrakov, A. S. Tsapleva, M. V. Alekseev // Physics of Metals and Metallography. — 2021. — V. 122. — P. 33—39..
2. Effect of diameter of Internal Tin Nb<sub>3</sub>Sn strands on the structure of superconducting layers / I. Deryagina, E. Popova, E. Patrakov // Materials of European Conference on Applied Superconductivity EUCAS 2021, 5-11 September 2021, Moscow.
3. Effect of Diameter of Nb<sub>3</sub>Sn-based Internal-Tin Wires on the Structure of Superconducting Layers / I. Deryagina, E. Popova, E. Patrakov // IEEE Trans. Applied Superconductivity, 2021, в печати.