

Важнейшие достижения в области физики низких температур за 2024 г.

### Затухание изгибных фононов в двумерных упругих материалах

А.Д. Коковин<sup>1,2</sup>, В.Ю. Качоровский<sup>3</sup>, И.С. Бурмистров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН, Черноголовка

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Долгопрудный

<sup>3</sup>Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

<sup>4</sup>Международная лаборатория физики конденсированного состояния, НИУ Высшая школа экономики, Москва

Разработана теория динамики изгибных деформаций в гибких двумерных материалах с учетом ненулевого натяжения – ситуация, реализуемая экспериментально в наномеханических резонаторах на основе графена и других одноатомных слоев. Изучено затухание изгибных фононов в свободно подвешенных кристаллических мембранах. Продемонстрировано, что перенормировка динамических свойств не включает в себя расходящиеся на ультрафиолете логарифмические вклады, в отличие от статических. Этот факт позволяет найти скейлинговый вид затухания, определить его асимптотическое поведение на малых и больших частотах и получить точное выражение для динамического показателя изгибных фононов в длинноволновом пределе:  $z=2-\eta/2$ . Здесь  $\eta$  – универсальный показатель, управляющий статической перенормировкой изгибной жесткости. Также определен динамический показатель для длинноволновых плоскостных фононов:  $z'=(2-\eta/2)/(1+\eta/2)$ . Полученные результаты сравнены с экспериментами по изучению фононных спектров в графене и динамике наномеханических резонаторов на основе графена. Также была разработана теория затухания изгибных фононов в гибких двумерных кристаллических материалах с конечным натяжением. Продемонстрировано, что наличие ненулевого натяжения сильно уменьшает относительную величину затухания и, следовательно, приводит к параметрическому сужению спектральной линии фононов из-за управляемого механическим натяжением подавления эффектов запаздывания в динамически экранированном межфононном взаимодействии. Предсказана степенная зависимость ширины спектральной линии от температуры и механического натяжения. Предсказанное подавление затухания фононов механическим натяжением может быть причиной высоких показателей добротности механических нанорезонаторов на основе изгибных двумерных материалов.

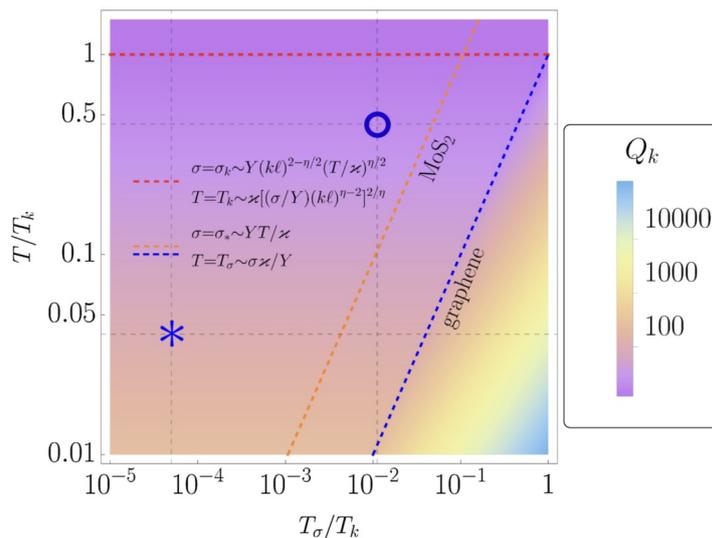


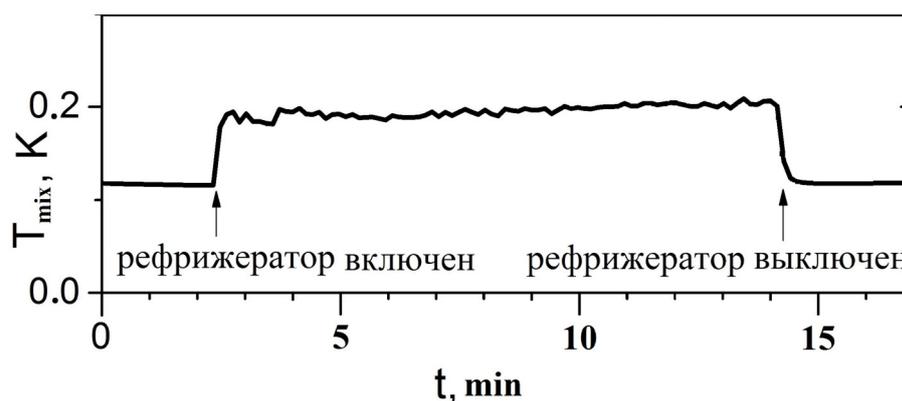
Рис. 1 Цветная карта зависимости фактора добротности линии от температуры  $T$  и натяжения  $\sigma$ , для малых волновых векторов  $k$ . Звездочка и круг обозначают ожидаемую добротность для графена и  $\text{MoS}_2$  с учетом реалистичных параметров.

1. A. D. Kokovin, V. Yu. Kachorovskii, I. S. Burmistrov, "Narrowing of the flexural phonon spectral line in stressed crystalline two-dimensional materials", Phys. Rev. Lett. 133, 136203 (2024)
2. A. D. Kokovin, I. S. Burmistrov, "Attenuation of flexural phonons in free-standing crystalline two-dimensional materials", Phys. Rev. B 110, 125432 (2024)

## Рефрижератор глубокого охлаждения субтерагерцовых детекторов для радиоастрономических исследований

Марухно А. С., ИПФ РАН, Эдельман В. С., ИПФ РАН,  
vsedelman@yandex.ru

Разработана конструкция и изготовлен инновационный криостат растворения с использованием рефрижератора Гиффорда-Мак Магона, производства КНР. Он обеспечивает охлаждение детекторов субтерагерцового диапазона до температуры 0.1К, что обеспечивает максимальную чувствительность приема сигналов на уровне лучших известных образцов. Его использование в САО РАН на телескопе БТА с зеркалом диаметром 6м позволит проводить исследования не только в оптическом, но и в субтерагерцовом диапазоне. Решена проблема, связанная с высоким уровнем вибраций при работе рефрижератора Гиффорда — Мак Магона, приводящая не только к высокому уровню шумов детектора, но и к невозможности достижения предельно низкой температуры. Для этого при включенном рефрижераторе в специальном объеме конденсируется значительное количество жидкого гелия, обеспечивающее при остановке рефрижератора в течение не менее 8 часов работу цикла глубокого охлаждения. Результат воздействия вибраций на температуру охлаждаемого детектора демонстрирует рисунок. Работа особо актуальна в условиях полного эмбарго на поставку криогенного оборудования.



Результаты опубликованы в статье А. С. Марухно, В. С. Эдельман, ПТЭ, №5, 2024г.

## Влияние допирования на структуру сверхпроводящего параметра порядка $\text{Na}(\text{Fe},\text{Co})\text{As}$

Т.Е. Кузьмичева<sup>1</sup>, С.А. Кузьмичев<sup>2,1</sup>, Е.О. Рахманов<sup>3,1</sup>, И.В. Морозов<sup>3</sup>, А.И. Шилов<sup>3</sup>,  
А.В. Муратов<sup>1</sup>, С.Г. Гаврилкин<sup>1</sup>, А. Дегтяренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Центр ВТСП и квантовых материалов им. В.Л. Гинзбурга ФИАН

<sup>2</sup>Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

<sup>3</sup>Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

С помощью спектроскопии некогерентных многократных андреевских отражений исследовано многощелевое сверхпроводящее состояние монокристаллов пниктидов  $\text{Na}(\text{Fe},\text{Co})\text{As}$  недодопированных и передопированных составов. Определены величины микроскопических сверхпроводящих параметров порядка, их температурные зависимости и соответствующие характеристические отношения  $2\Delta(0)/k_B T_c$ . Собранный нами значительная статистика данных однозначно указывает на заметное уменьшение степени предполагаемой анизотропии большой сверхпроводящей щели в передопированных составах при удалении от антиферромагнитной и нематической областей фазовой диаграммы допирования.

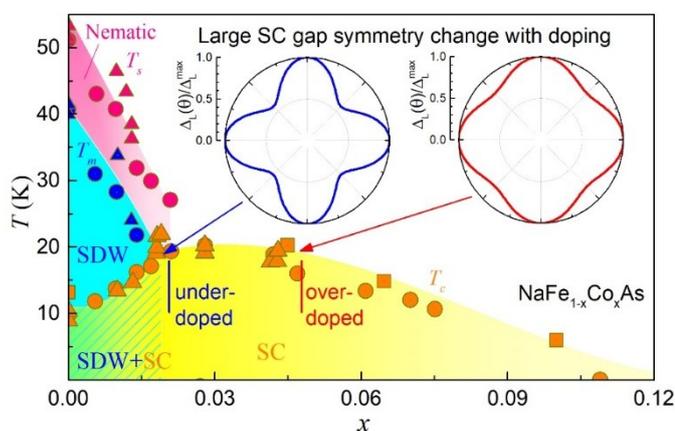


Рис. 1. Фазовая диаграмма пниктида  $\text{NaFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{As}$ . На вставке показана предполагаемая зависимость большой сверхпроводящей щели от направления в  $xy$ -плоскости импульсного для недодопированного (синий цвет) и передопированного (красный цвет), построенная на основе измерений методом спектроскопии многократных андреевских отражений.

1. Superconducting gap structure of slightly overdoped  $\text{NaFe}_{0.955}\text{Co}_{0.045}\text{As}$  pnictides: joint SnS-Andreev spectroscopy and specific heat study, S. Kuzmichev, A. Muratov, S.Gavrilkina, I.Morozov, A. Shilov, Y. Rakhmanov, A. Degtyarenko, T. Kuzmicheva // Eur. Phys. J. Plus. – 2024. – Vol. 139. – No 1. – P. 74. – DOI 10.1140/epjp/s13360-024-04879-9.
2. Doping Evolution of the Superconducting Order Parameter of  $\text{Na}(\text{Fe},\text{Co})\text{As}$  Alkali-Metal Pnictides, S.A. Kuzmichev, I.V. Morozov, A.I. Shilov, Ye.O. Rakhmanov, T.E. Kuzmicheva, JETP Lett. – 2024. – Vol. 120. – No 2, P. 125-132 (2024). – DOI 10.1134/S0021364024602008.

## Повышение эффективности сверхпроводящего спинового клапана

А. А. Камашев<sup>1</sup>, Н. Н. Гарифьянов<sup>1</sup>, А. А. Валидов<sup>1</sup>, В. Е. Катаев<sup>2</sup>, А. С. Осин<sup>3</sup>, Я. В. Фоминов<sup>3</sup>, И. А. Гарифуллин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского ФИЦ Казанский научный центр РАН, 420029 Казань, Россия

<sup>2</sup> Leibniz Institute for Solid State and Materials Research, D-01069 Dresden, Germany

<sup>3</sup> Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН, 142432 Черноголовка, Россия

Авторами предложена новая конструкция структуры сверхпроводящего спинового клапана (ССК) Ф1/Ф2/С, показывающая рекордную эффективность ССК на сегодняшний день. В качестве сверхпроводящего слоя в структурах ССК использовался свинец, а в качестве материала для ферромагнитных слоёв использовался сплав Гейслера (НА)  $\text{Co}_2\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Al}_y$ . Магнитные свойства данного материала зависят от температуры подложки, на которую он наносится. Пленки сплава Гейслера, приготовленные при комнатной температуре подложки ( $\text{HA}^{RT}$ ), обладают малой степенью спиновой поляризации (ССП) и являются слабыми ферромагнетиками. Пленки сплава Гейслера, приготовленные при температурах подложки 600 К и выше ( $\text{HA}^{hot}$ ), обладают высокой ССП и являются сильными ферромагнетиками. В исследованных структурах ССК сплав Гейслера использовался как в качестве материала для Ф1-слоя ( $\text{HA}^{hot}$ ), так и в качестве материала для Ф2-слоя ( $\text{HA}^{RT}$ ). В этом случае  $\text{HA}^{RT}$ -слой выполнял роль своего рода селективного «фильтра» для генерации триплетных компонент сверхпроводящего конденсата в Ф1-слое, что позволило наблюдать более выраженный и настраиваемый эффект близости С/Ф (следовательно, и эффект ССК). В приготовленных структурах ССК удалось пронаблюдать гигантскую величину триплетного эффекта ССК более чем 1 К с рекордной шириной рабочей температурной зоны 0.6 К.

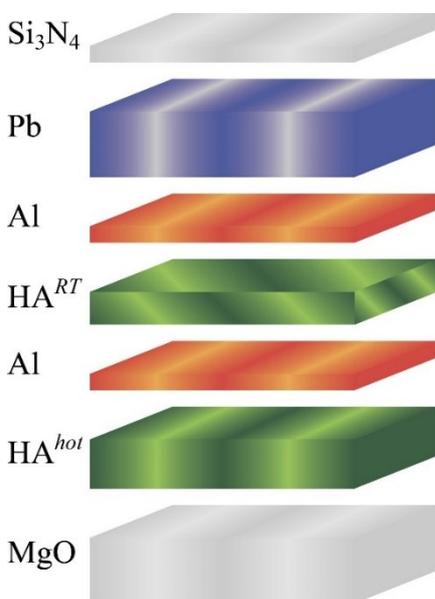


Рис. 1. Структура приготовленных образцов серии  $\text{HA}^{hot}(20 \text{ нм})/\text{Al}(4 \text{ нм})/\text{HA}^{RT}(d_{\text{HA}})/\text{Al}(1.2 \text{ нм})/\text{Pb}(60 \text{ нм})/\text{Si}_3\text{N}_4(85 \text{ нм})$  с варьируемой толщиной  $\text{HA}^{RT}$ -слоя в пределах от 1 до 5 нм.

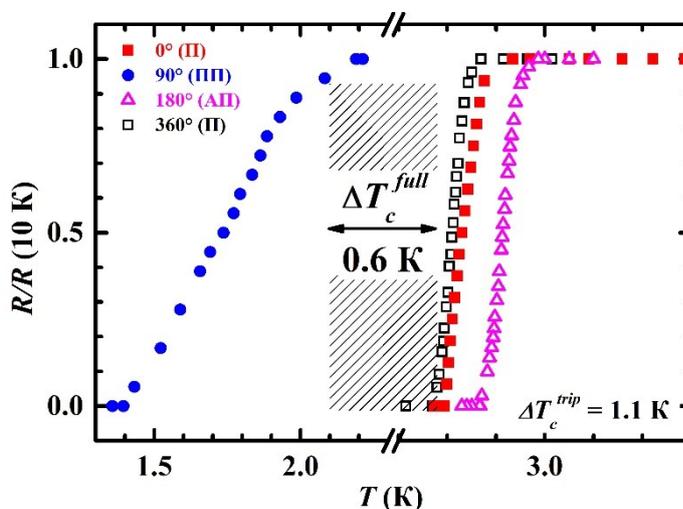


Рис. 2. Кривые сверхпроводящих переходов для П- ( $\alpha = 0^\circ, 360^\circ$ ), ПП- ( $\alpha = 90^\circ$ ) и АП-ориентации ( $\alpha = 180^\circ$ ) намагниченностей Ф-слоев образца  $\text{HA}^{hot}(20 \text{ нм})/\text{Al}(4 \text{ нм})/\text{HA}^{RT}(5 \text{ нм})/\text{Al}(1.2 \text{ нм})/\text{Pb}(60 \text{ нм})$ . Заштрихованная область — ширина рабочей температурной зоны  $\Delta T_c^{full}$ .

A.A. Kamashev, N.N. Garifyanov, A.A. Validov, V. Kataev, A.S. Osin, Ya.V. Fominov, I.A. Garifullin, Expanding the operational temperature window of a superconducting spin valve, *Physical Review B* **109**, 144517, 2024, DOI: 10.1103/PhysRevB.109.144517.

## **Эволюция распространяющихся когерентных импульсов, управляющих одним сверхпроводящим искусственным атомом**

Васенин А.В.<sup>1,2</sup>, Кадырметов Ш.В., Болгар А.Н.<sup>1</sup>, Дмитриев А.Ю.<sup>1,3</sup>, Астафьев О.В.<sup>1,2</sup>

(1) Московский Физико-технический Институт, г. Долгопрудный

(2) Сколковский Университет Науки и Технологий, Сколково

(3) Национальный Университет Науки и Технологий МИСИС, Москва

Электромагнитная волна, распространяющаяся по волноводу с сильно связанным двухуровневым сверхпроводящим искусственным атомом, демонстрирует эволюционирующую суперпозицию с атомом. Осцилляции Раби в атоме являются результатом единичного процесса возбуждения-релаксации, соответствующего поглощению фотона и вынужденному излучению из поля и в него. В этом исследовании мы экспериментально исследовали зависящее от времени поведение поля, передаваемого через волновод с сильно связанным трансмоном. Рассеянные поля хорошо согласуются с предсказаниями "вход-выход"-теории. Мы демонстрируем, что временная эволюция распространяющихся полей из-за взаимодействия содержит всю информацию об атоме. Более того, мы вывели динамику компоненты некогерентного излучения из корреляционной функции первого порядка измеренного поля.

Physical Review Letters, 133(7), p. 073602 (2024), DOI: 10.1103/PhysRevLett.133.073602

# Динамический эффект Холла и фотонное увлечение сверхпроводящих конденсатов

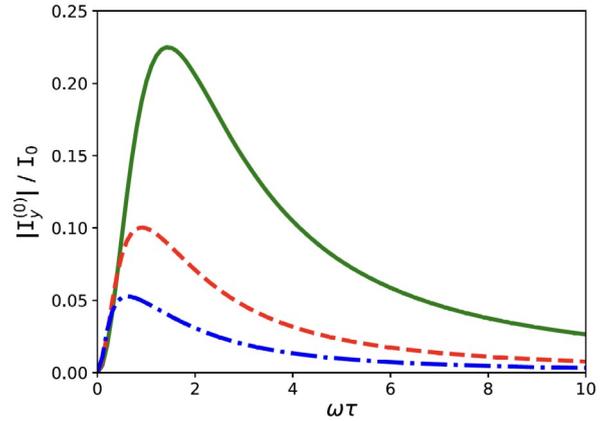
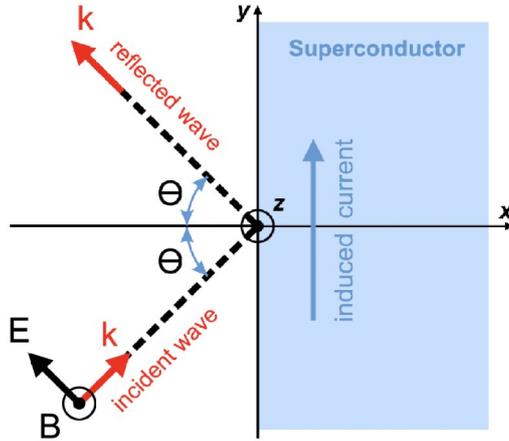
С. В. Миронов<sup>1</sup>, А. С. Мельников<sup>1,2</sup>, А. И. Буздин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Долгопрудный

<sup>3</sup>University Bordeaux, LOMA UMR-CNRS 5798, Talence Cedex, France

**Формулировка результата:** Построена теория феноменологическая эффекта фотонного увлечения в сверхпроводниках, проявляющегося в генерации постоянного электрического тока под действием наклонно падающего электромагнитного излучения. Показано, что эффект обусловлен квадратичным откликом сверхпроводящего тока на поле волны, связанного с генерацией потенциала зарядового разбаланса и осцилляциями модуля сверхпроводящего параметра порядка. Рассчитаны зависимости постоянного сверхпроводящего тока и отклика на второй гармонике от частоты и угла падения волны, а также предложены системы, оптимальные для экспериментального обнаружения предсказанных эффектов.



$$j_{sy} = j_{sy}^{(0)} + j_{sy}^{(\omega)} + j_{sy}^{(2\omega)}$$

$$j_{sy}^{(0)} \propto B_0^2$$

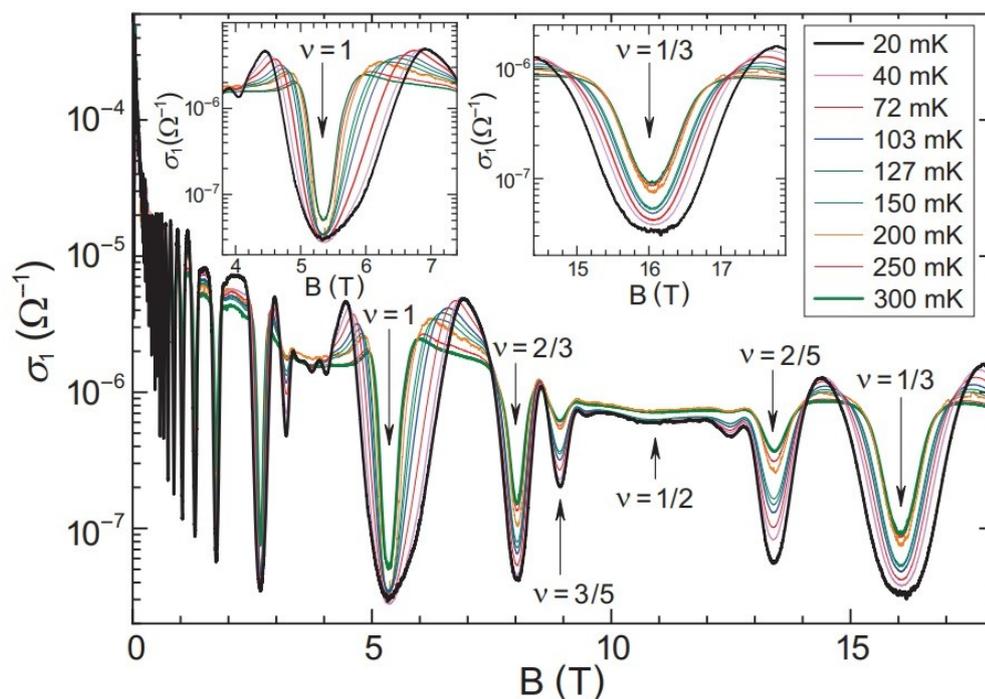
$$j_{sy}^{(2\omega)} \propto B_0^2$$

S. V. Mironov, A. S. Mel'nikov and A. I. Buzdin, "AC Hall Effect and Photon Drag of Superconducting Condensates", Phys. Rev. Lett. **132**, 096001 (2024).

## ВИГНЕРОВСКАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ В ДВУМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ. АКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

И.Л. Дричко<sup>a</sup>, И.Ю. Смирнов<sup>a</sup>, А.В. Суслов<sup>b</sup>, Д.Р. Лидли<sup>c</sup>, Ю.М. Гальперин<sup>d,a</sup>  
<sup>a</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия  
<sup>b</sup> National High Magnetic Field Laboratory Tallahassee, FL, USA  
<sup>c</sup> Department of Physics, University of Warwick, Coventry,, United Kingdom  
<sup>d</sup> University of Oslo, Oslo, Norway

Вигнеровская кристаллизация в двумерных структурах  $n$ -GaAs/AlGaAs,  $p$ -GaAs/AlGaAs и  $p$ -Si/GeSi с высокой подвижностью исследовалась акустическими методами, которые позволили определять частотные зависимости действительной  $\sigma_1$  и мнимой  $\sigma_2$  частей высокочастотной проводимости  $\sigma^{hf} = \sigma_1 - i\sigma_2$ . Кристаллизация носителей заряда наблюдалась по поглощению и изменению скорости поверхностной акустической волны, взаимодействующей с носителями заряда в квантовой яме при низких температурах  $T < 0.3$  К в сильных магнитных полях вблизи чисел заполнения  $\nu < 2$ . Найденные частотные зависимости позволили установить факт образования доменов вигнеровского кристалла в структурах, вычислить их средние размеры, которые оказались равными  $(3-4) \cdot 10^{-4}$  см и определить температуру плавления (100-200) мК в зависимости от магнитного поля.



Зависимость действительной компоненты проводимости  $\sigma_1$  от магнитного поля при разных температурах,  $f = 86$  МГц. На вставках — зависимость  $\sigma_1$  от магнитного поля вблизи чисел заполнения 1 (а) и 1/3 (б)

«Вигнеровская кристаллизация в двумерных структурах в магнитном поле. Акустические исследования», И.Л. Дричко, И.Ю. Смирнов, А.В. Суслов, Д.Р. Лидли, Ю.М. Гальперин ЖЭТФ, 2024, том 166, вып. 5 (11), стр. 1–9.

## Спин зависимое рассеяние оптически ориентированных электронов в n-GaAs.

М. Д. Рагоза, Н. В. Козырев, С. В. Некрасов, Б. Р. Намозов, Ю.Г. Кусраев,  
N. Bart, A. Ludwig, A. D. Wieck.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия  
Lehrstuhl für Angewandte Festkörperphysik, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, Germany

Большинство потенциальных приложений полупроводниковой спинтроники основаны на спин-орбитальном взаимодействии. В силу релятивистской природы взаимодействия, вызываемые им эффекты малы, что затрудняет широкое использование

полупроводников в спиновых устройствах. Поиск спин зависимых эффектов, основанных на других, более сильных взаимодействиях, является важной проблемой спинтроники. Недавно мы провели эксперимент по рассеянию оптически ориентированных по спину носителей заряда в GaAs n-типа. Обнаружено, что сопротивление образца зависит от спиновой поляризации электронов проводимости. Показано, что эта зависимость определяется вкладом обменного рассеяния электронов проводимости на нейтральных донорах в сопротивление

образца. Эффект является четным по отношению к знаку спиновой поляризации носителей тока, что свидетельствует о корреляции спинов оптически ориентированных электронов и электронов, локализованных на донорах. Деполяризация

электронов в магнитном поле (эффект Ханле) позволила выделить вклад обменного рассеяния. При степени поляризации электронов в 1-2 процента этот вклад составляет около 0.16% (Рис 1.), однако может быть на порядок больше при большей поляризации электронов. Характерное поле магнитной деполяризации составляет величину около 1 Э, легко достижимое в миниатюрной катушке с током и модулируемое на высокой частоте.

Проведенные исследования могут оказаться интересны для атомной и ядерной физики, где эксперименты по рассеянию поляризованных по спину электронов на различных мишенях весьма популярны.

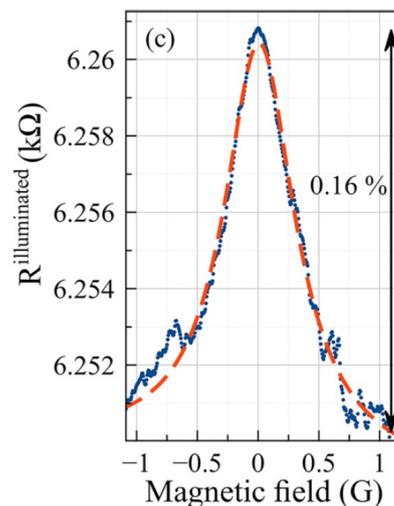


Рис.1. Зависимость электрического сопротивления образца от внешнего магнитного поля в геометрии Фогта, при температуре 1.6 К. Синие точки – эксперимент, красная линия – аппроксимация контуром Лоренца. [1]

M. D. Ragoza, N. V. Kozыrev, S. V. Nekrasov, B. R. Namozov, Yu. G. Kusraev, N. Bart, A. Ludwig and A. D. Wieck, Electrical resistance associated with the scattering of optically oriented spin-polarized electrons in n-GaAs, Phys. Rev. B **109**, L121203 (2024).

# Двухпетлевой гистерезис намагниченности в кристаллах разбавленного крамерсова парамагнетика $\text{Sr}(\text{Y}_{1-x}\text{Dy}_x)_2\text{O}_4$ : электрон-фононное взаимодействие, квантовое туннелирование и кросс-релаксация

Б.З. Малкин<sup>1</sup>, Р.В. Юсупов<sup>1</sup>, И.Ф. Гильмутдинов<sup>1</sup>, Р.Г. Батулин<sup>1</sup>, А.Г. Киямов<sup>1</sup>,  
Б.Ф. Габбасов<sup>1</sup>, С.И. Никитин<sup>1</sup>, Б. Барбара<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Казанский федеральный университет, Кремлевская 18, 420008 Казань, Россия

<sup>2</sup> Institut Néel, CNRS/UGA UPR2940 and Université Grenoble-Alpes, 25 Avenue des Martyrs BP 166, 38042 Grenoble Cedex 9, France

В работе представлены результаты измерений и теоретических исследований динамической намагниченности в свипируемом магнитном поле монокристаллов  $\text{SrY}_2\text{O}_4$ , легированных крамерсовыми ионами  $\text{Dy}^{3+}$  в концентрациях 0.5 ат.% и 0.01 ат.%. Примесные ионы  $\text{Dy}^{3+}$  замещают ионы  $\text{Y}^{3+}$  в двух неэквивалентных кристаллографических позициях  $\text{Y1}(\text{Dy1})$  и  $\text{Y2}(\text{Dy2})$  с одинаковой локальной симметрией  $C_2$ , но сильно различающимися кристаллическими полями. Центры  $\text{Dy1}$  и  $\text{Dy2}$  имеют качественно разную штарковскую структуру, легкоплоскостную и легкоосную магнитную анизотропию, а также быструю и медленную скорости магнитной релаксации, соответственно. При низких температурах наблюдается ярко выраженный двухпетлевой магнитный гистерезис для скоростей развертки поля 1 и 5 мТл/с. Разработана микроскопическая модель, описывающая спектральные, магнитные и кинетические свойства ионов  $\text{Dy}^{3+}$  в позициях  $\text{Y1}$  и  $\text{Y2}$  на основе данных электронного парамагнитного резонанса, лазерной селективной спектроскопии и измерений магнитной релаксации. Разработанный в работе подход к описанию динамического намагничивания в свипируемом поле, включающий зависящие от времени вероятности переходов, обусловленные электрон-фононным взаимодействием, квантовым туннелированием и кросс-релаксацией, а также численное решение основного кинетического уравнения, позволил нам успешно воспроизвести форму петли гистерезиса и ее зависимости от температуры, скорости изменения поля и концентрации парамагнитных ионов (Рис. 1).

В результате исследования обнаружен первый неорганический разбавленный крамерсов парамагнетик, проявляющий свойства, характерные для молекулярных магнитов, и достигнуто глубокое понимание лежащей в его основе физики. В частности, показано, что ступенчатый гистерезис намагниченности четных изотопов диспрозия с легкоосной магнитной анизотропией в узлах  $\text{Y2}$  обусловлен квантовым туннелированием в поперечном магнитном поле, сравнимом с магнитным полем Земли, а вероятности переходов между сверхтонкими подуровнями нечетных изотопов сильно перенормированы вследствие кросс-релаксации.

Представленная работа закладывает основу для дальнейшего развития квантовой теории динамического намагничивания одиночных ионных и одномолекулярных магнитов на базе ионов редкоземельных металлов.

B.Z. Malkin et al, Double-loop hysteresis of multisite dilute  $\text{Sr}(\text{Y}_{1-x}\text{Dy}_x)_2\text{O}_4$  single crystal Kramers paramagnets: Electron-phonon interaction, quantum tunneling, and cross relaxation // Phys. Rev. B. 2024. V. 109, Art. 054434.

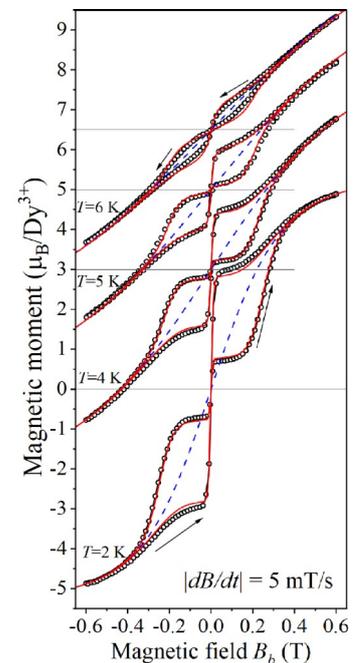


Рис. 1. Результаты измерений (точки, пунктирные линии) и моделирования (сплошные линии) петель гистерезиса кристалла  $\text{SrY}_2\text{O}_4:\text{Dy}$  (0.01 ат.%).

## Магнитные свойства $\text{LiCu}_3\text{O}_3$ – квазидвумерного антиферромагнетика на разбавленной квадратной решётке

С.К. Готовко<sup>1,2</sup>, В.Ю. Иванов<sup>3</sup>, А.А. Буш<sup>4</sup>, В.И. Козлов<sup>4</sup>, Е.Г. Николаев<sup>1</sup>, Л.Е. Свистов<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Москва, 119334, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет ВШЭ, Москва, 101000, Россия

<sup>3</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 119991, Россия

<sup>4</sup> МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454, Россия

\* svistov@kapitza.ras.ru

Структура нового квазидвумерного магнетика  $\text{LiCu}_3\text{O}_3$  содержит «тройки» магнитных плоскостей ионов  $\text{Cu}^{2+}$  ( $S=1/2$ ), находящихся в узлах квадратной решетки. Ионы  $\text{Li}^+$  занимают те же кристаллографические позиции, что и  $\text{Cu}^{2+}$  с разными степенями замещения для внутренней (А) и внешних (В) плоскостей – соответственно 20% и 40% [1]. Такие тройки В-А-В разделены плоскостями немагнитных ионов  $\text{Cu}^+$ , что определяет квазидвумерность  $\text{LiCu}_3\text{O}_3$ . Степень замещения в плоскостях (А) меньше порога протекания в квадратной решётке, поэтому магнитные ионы в таких плоскостях образуют бесконечный кластер, в то время как в плоскостях (В) степень замещения критически близка к порогу протекания. В монокристаллах  $\text{LiCu}_3\text{O}_3$  в результате исследования ЯМР на  $^7\text{Li}$  и измерения намагниченности были обнаружены частичное магнитное упорядочение при температуре  $T_{c1} = 123$  К и необычное состояние подсистемы антиферромагнитных нанокластеров в плоскостях с более сильным разбавлением при  $T_{c2} \approx 30$  К. Плоскости, содержащие конечные нанокластеры проявляют квазипарамагнитные свойства. Тем не менее, при  $T < 30$  К появляется статический вклад от ионов этих кластеров в локальные магнитные поля на ядрах лития, измеренные методом ЯМР. Соединение  $\text{LiCu}_3\text{O}_3$  является перспективным объектом исследования динамики магнитных наноразмерных кластеров.

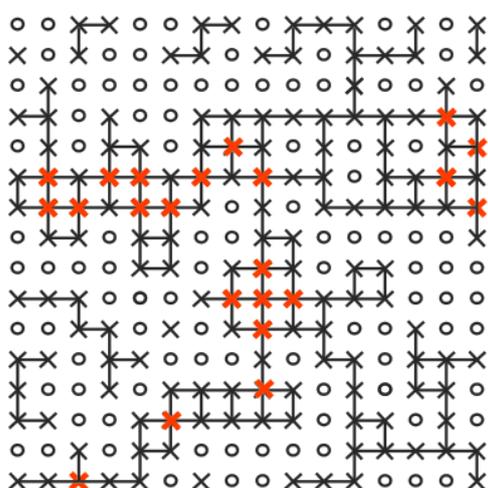


Рис. 1 Схема случайного распределения магнитных ионов  $\text{Cu}^{2+}$  (кресты) и немагнитных ионов  $\text{Li}^+$  (круги) в квадратной плоскости В

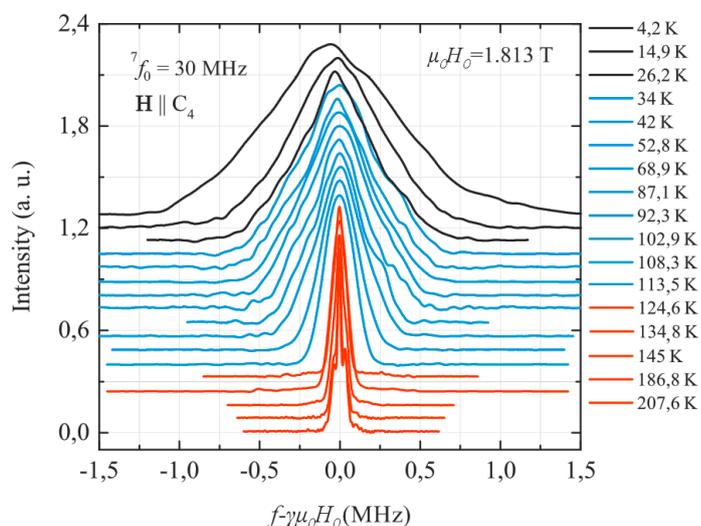


Рис. 2. Спектры  $^7\text{Li}$  ЯМР при разных температурах. Спектры при  $T > T_{c1}$  обозначены красным цветом, при  $T_{c1} > T > T_{c2}$  – синим, при  $T < T_{c2}$  – чёрным.

Physical Review B **109**, 115151 (2024), Magnetic properties of  $\text{LiCu}_3\text{O}_3$ : A quasi-two-dimensional antiferromagnet on a depleted square lattice, A. A. Bush, S. K. Gotovko, V. Yu. Ivanov, V. I. Kozlov, E. G. Nikolaev, and L. E. Svistov, DOI: 10.1103/PhysRevB.109.115151

## Волны плотности заряда, управляемые одноосным напряжением

А. Галло–Франц<sup>1</sup>, В. Л. Р. Жак<sup>1</sup>, А. А. Синченко<sup>1</sup>, П.Д. Григорьев<sup>2</sup> и др.

<sup>1</sup>Лаборатория физики твердых тел, Университет Париж-Сакле, CNRS, Орсе, Франция.

<sup>2</sup>Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Черноголовка

Проведено совместное (теоретическое и экспериментальное) исследование зависимости волны зарядовой плотности (ВЗП) от деформации кристалла на примере трителлуридов редкоземельных металлов. Показано, что небольшая деформация TbTe<sub>3</sub> может оказать существенное влияние на его ВЗП, с ориентационным переходом между двумя перпендикулярными направлениями её волнового вектора, управляемым параметром  $a/c$  - отношением постоянных кристаллической решетки вдоль двух главных осей, с крошечной областью сосуществования вблизи  $a = c$  и без изменения пространственной группы. Температура перехода CDW  $T_c$  показывает линейную зависимость от  $|a-c|$ , в то время как щель в электронном спектре и скачок сопротивления насыщаются вдали от области сосуществования. Дано теоретическое объяснение этим результатам. Такое поведение хорошо объясняется в рамках модели сильной связи, если учесть ещё зависимость электрон-электронного взаимодействия от волнового вектора. Наши результаты ставят под сомнение связь ВКШ между щелью и  $T_c$  в системах RTe<sub>3</sub>. Работа открывает новый путь к изучению сосуществующих или конкурирующих электронных порядков в конденсированном веществе с помощью деформации.

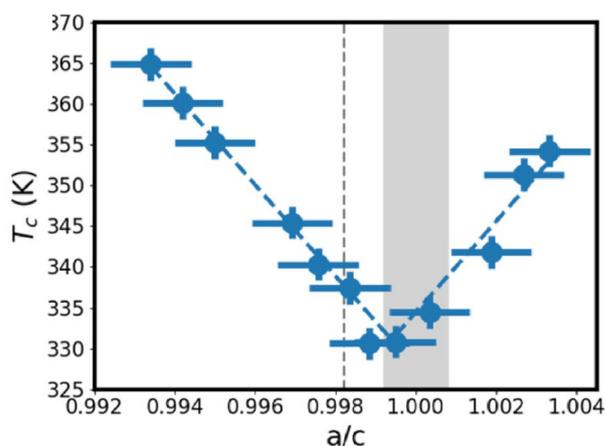


Рис. 1. Влияние одноосной деформации на температуру перехода в состояние с волной зарядовой плотности в TbTe<sub>3</sub>;  $a$  и  $c$  – размер элементарной ячейки вдоль главных осей.

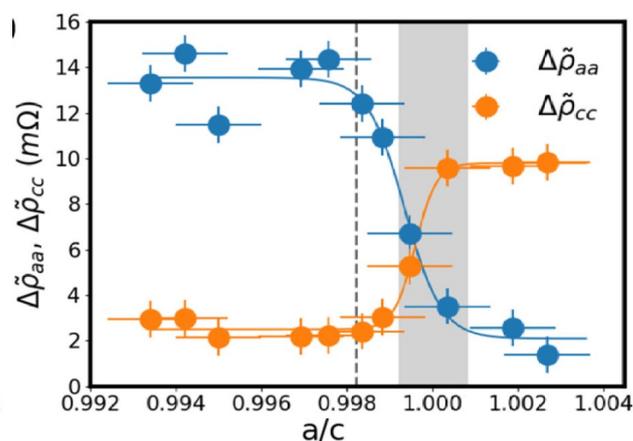


Рис. 2. Зависимость сопротивления вдоль главных осей в проводящей плоскости в TbTe<sub>3</sub> от одноосной деформации, определяемой отношением постоянных решетки  $a/c$ .

[1] A. Gallo-Frantz, A.A. Sinchenko, D. Ghoneim, L. Ortega, P. Godard, P.-O. Renault, P.D. Grigoriev, A. Hadj-Azzem, P. Monceau, D. Thiaudière, E. Bellec, V.L.R. Jacques, D. Le Bolloc'h, *Charge density waves tuned by biaxial tensile stress*, Nature Communications **15**, 3667 (2024).