

Важнейшие результаты исследований
в области физики низких температур в 2025 году

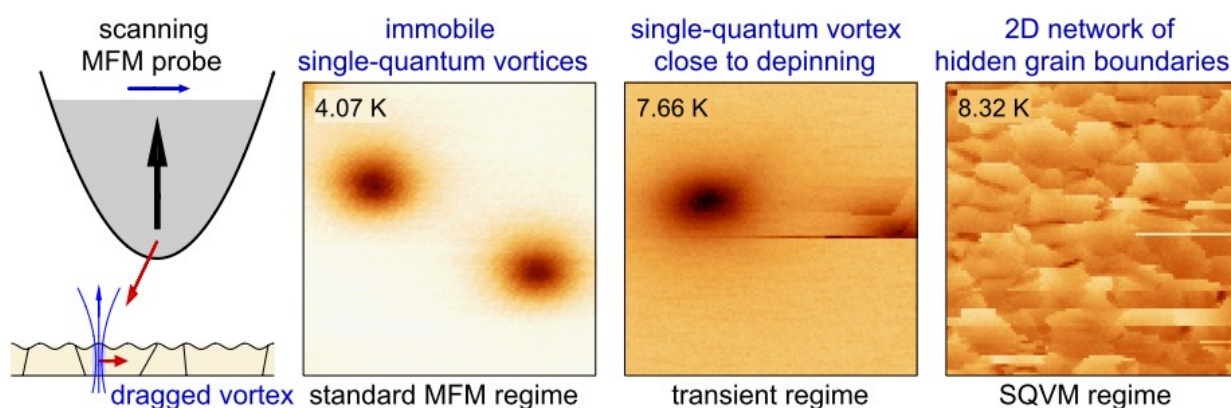
**Исследование потенциала пиннинга в гранулированных
ниобиевых пленках методом сканирующей вихревой микроскопии**

Razmik A. Hovhannisyan, Sergey Yu. Grebenchuk, Semen A. Larionov, Andrey G. Shishkin,
Artem K. Grebenko, Nadezhda E. Kupchinskaya, Ekaterina A. Dobrovolskaya, Olga V. Skryabina,
Alexey Yu. Aladyshkin, Vyacheslav V. Dremov, Igor A. Golovchanskiy, Alexey V. Samokhvalov,
Alexander S. Mel'nikov, Dimitri Roditchev & Vasily S. Stolyarov

Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия
LPEM, UMR-8213, ESPCI Paris, PSL, CNRS, Sorbonne University, Paris (Франция)
ИФМ РАН, Нижний Новгород
МИСИС, Москва
ИФТТ РАН, Черноголовка
ВНИИА им. Н. Л. Духова

Предложен и реализован экспериментально метод исследования дефектов в сверхпроводниках (метод сканирующей вихревой микроскопии), основанный на использовании одиночного вихря, удерживаемого и перемещаемого кантилевером магнитно-силового микроскопа (МСМ), в качестве микроскопического зонда, который взаимодействует различными центрами пиннинга в образце.

Полученные МСМ изображения отражают распределение скрытых границ зерен и других типов протяженных дефектов внутри сверхпроводящей пленки, с которыми взаимодействуют вихри.



1. R. A. Hovhannisyan *et al.*, Commun. Mater., vol. 6, 42 (2025).
2. A. Yu. Aladyshkin *et al.*, Mesosci. Nanotechnol., v. 1, 02001 (2025).

Околокомнатная сверхпроводимость в метастабильном гексагидриде (La,Sc)H₆₋₇, с критической температурой $T_c = 270 - 280\text{K}$

А.В. Садаков¹, В.М. Пудалов¹, О.А. Соболевский¹, Д.В. Семенов², Чжоу Ди², К.С. Перваков¹, Свен Лютер³, Тони Хельм³, И.А. Троян⁴

¹ Центр Высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В.Л. Гинзбурга ФИАН

² Center for High Pressure Science & Technology Advanced Research, Beijing, China

³ Hochfeld-Magnetlabor Dresden (HLD-EMFL) and Würzburg-Dresden Cluster of Excellence, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), Dresden, Germany

⁴ Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова, ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

В данной работе впервые экспериментально показано, что система (La,Sc)H_x является самым перспективным соединением среди гидридов для достижения сверхпроводимости при комнатной температуре. Была обнаружена метастабильная гексагональная фаза (La,Sc)H₆₋₇, у которой наблюдается падения сопротивления до нуля с началом перехода $T_{c_onset} = 274\text{K}$ и $T_{c_offset} = 210\text{K}$ (также имеются ступеньки при температурах 249K и 242K) (Рис.1). При этих же температурах наблюдались особенности в радиочастотном отклике, что дает основания утверждать, что мы имеем дело со сверхпроводящим переходом с рекордно высокой критической температурой.

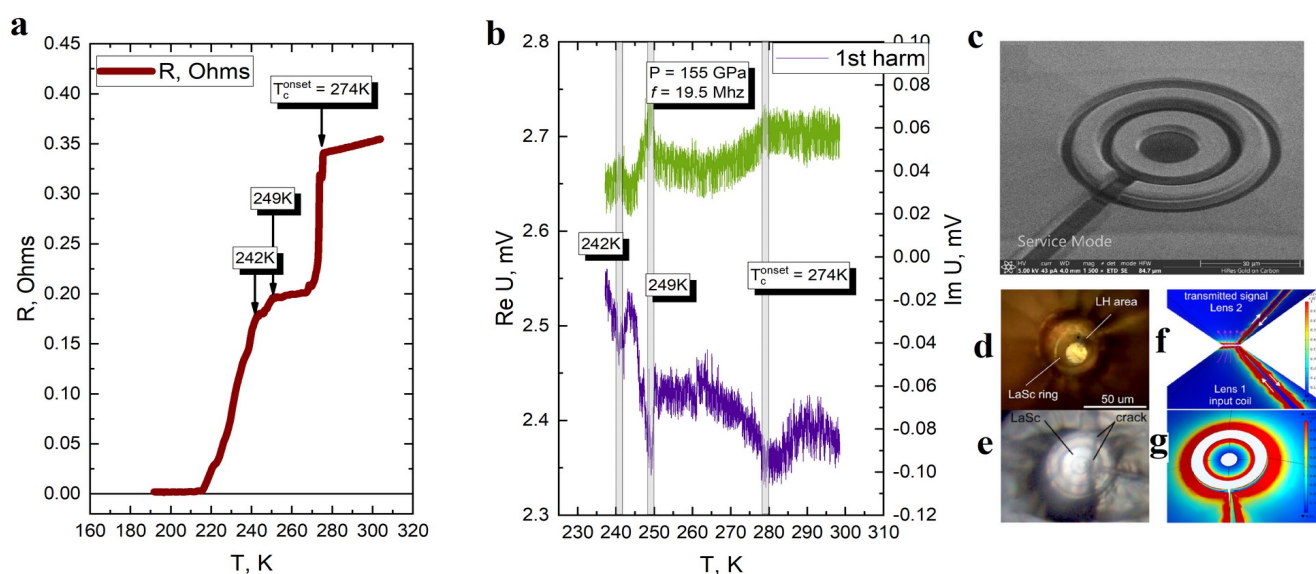


Рис. 1. (a) Температурная зависимость сопротивления $R(T)$ и (b) высокочастотного отклика для образца (La,Sc)H_x с особенностями при температурах 274K, 249K 242K. (c) Сканирующая электронная микроскопия кольцеобразного образца LaSc в центре системы линз Ленца. (d) Оптическое изображение образца после частичного лазерного нагрева. (e) Фотография образца после частичного растрескивания наковальни и падения давления до 155 ГПа. (f) Схема передачи ВЧ-сигнала от Линзы 1 к Линзе 2 через гидридный образец. (g) Цветовая карта соответствует распределению плотности поверхностных потерь (ППП) на металлических поверхностях при частоте возбуждающего тока 200 МГц.

Публикации:

1) Semenok, D. V., Troyan, I. A., Zhou, D., Sadakov, A. V., Pervakov, K. S., Sobolevskiy, O. A., ... & Pudalov, V. M. (2025). Ternary Superhydrides Under Pressure of Anderson's Theorem: Near-Record Superconductivity in (La, Sc) H12. *Advanced Functional Materials*, 35(42), 2504748.

Новая структура сверхпроводящего спинового клапана с управляемым эффектом близости сверхпроводник/ферромагнетик

А.А. Камашев¹, Н.Н. Гарифьянов¹, А.А. Валидов¹, А.С. Осин², Я.В. Фоминов², И.А. Гарифуллин¹

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

² Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН, 142432 Черноголовка, Россия

Создана и исследована новая структура сверхпроводящего спинового клапана (ССК) типа Ф1/И/С/И/Ф2 (Рис. 1). Ключевой особенностью конструкции является целенаправленная модификация границы раздела сверхпроводник/ферромагнетик (С/Ф) с помощью ультратонких диэлектрических прослоек (И), что позволяет управлять параметром прозрачности и, как следствие, эффектом близости С/Ф. Были исследованы структуры ССК Fe/Si₃N₄/Pb/Si₃N₄/Fe, где варьировалась толщина как сверхпроводящих (Pb), так и изолирующих (Si₃N₄) слоев. Проведенная оптимизация этих толщин позволила достичь полного переключения между нормальным и сверхпроводящим состояниями при изменении взаимной ориентации намагниченностей ферромагнитных слоев с антипараллельной на параллельную. Максимальная величина эффекта ССК составила 0.36 К (Рис. 2). Важнейшим достижением является то, что этот значительный эффект наблюдается в относительно малом внешнем магнитном поле величиной 1 кЭ, что выгодно отличает предложенную структуру от известных аналогов. Полученные результаты открывают возможности для разработки новых энергоэффективных спинтронных устройств.



Рис. 1. Структура приготовленных образцов CoO_x(3.5 нм)/Fe(3 нм)/[Si₃N₄/Pb/Si₃N₄]/Fe(3 нм)/Si₃N₄ (85 нм). Толщина слоя Pb (d_{Pb}) варьировалась от 40 до 60 нм, а толщины прилегающих слоев Si₃N₄ ($d_{Si_3N_4}$) — от 0 до 1.2 нм.

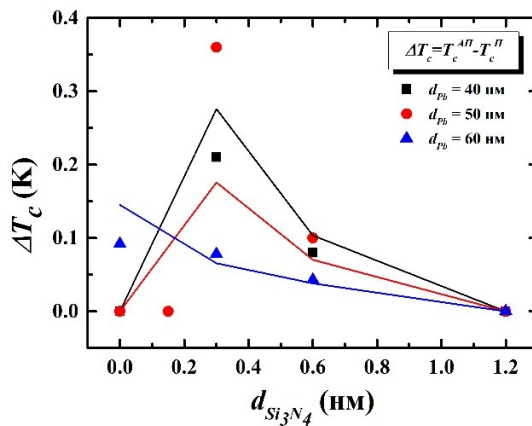


Рис. 2. Зависимость величины эффекта ССК ΔT_c от толщины слоев Si₃N₄ ($d_{Si_3N_4}$) для трёх серий образцов. Сплошные линии — теоретические кривые, рассчитанные согласно теории Фоминова и др. для структур ССК модели Ф1/С/Ф2.

Публикация:

A.A. Kamashev, N.N. Garifyanov, A.A. Validov, A.S. Osin, Ya.V. Fominov, I.A. Garifullin, Superconducting spin valve effect in Fe/Si₃N₄/Pb/Si₃N₄/Fe heterostructures, *Physical Review B* 112, 134509, 2025, DOI: 10.1103/647c-6xj4.

Определение параметров сверхпроводящего и нормального состояния ферроселенидов с изовалентным замещением двумя спектроскопическими методиками

Ю.А. Алещенко¹, С.А. Кузьмичев^{2,1}, Т.Е. Кузьмичева¹, А.Д. Ломоносова¹, И.В. Морозов³, А.В. Муратов¹, И.А. Никитченков^{2,1}, Е.О. Рахманов^{1,3}, А.И. Шилов¹

¹ Центр ВТСП и квантовых материалов им. В.Л. Гинзбурга ФИАН

² Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

³ Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

Впервые двумя спектроскопическими методиками исследованы свойства сверхпроводящей (СП) и нормальной фазы ферроселенидов семейства 122-Se, характеризующихся мезоскопическим разделением магнитной и СП фаз и нетривиальной топологией поверхности Ферми. С помощью туннельной спектроскопии в ферроселенидах с различными типами изовалентного замещения $(\text{K},\text{Na})_{0.9}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$ и $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}(\text{Se},\text{S})_2$ тремя способами подтверждено существование единственной сверхпроводящей щели: напрямую с помощью спектроскопии эффекта некогерентных многократных андреевских отражений (ЭНМАО), с помощью измерений андреевского избыточного тока $I_{\text{exc}}(T)$ в ЭНМАО-режиме, а также на основе температурной зависимости сверхтока $I_c(T)$. Напрямую измерены температурные зависимости микроскопического $\Delta(T)$ и макроскопического $n_s(T)$ СП-параметра порядка. В обоих соединениях показано сходство механизма сверхпроводимости и реализация сильной связи с характеристическим отношением $2\Delta(0)/k_B T_c = 4.1\text{--}4.6 > 3.5$ (Рис. 1). Методами инфракрасной Фурье-спектроскопии и спектроскопической эллипсометрии определены зависимости от температуры параметров сверхпроводящего (СП щель и плазменная частота, магнитная глубина проникновения) и нормального (оптическая проводимость, плазменная частота, скорость рассеяния) состояний монокристаллов $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}(\text{Se}_{0.73}\text{S}_{0.27})_2$ (Рис. 2).

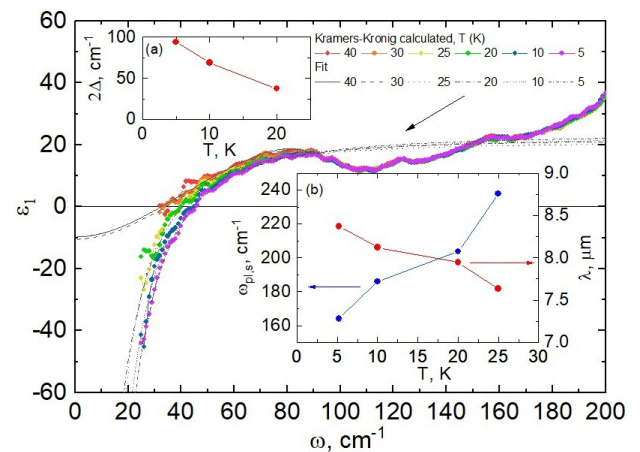
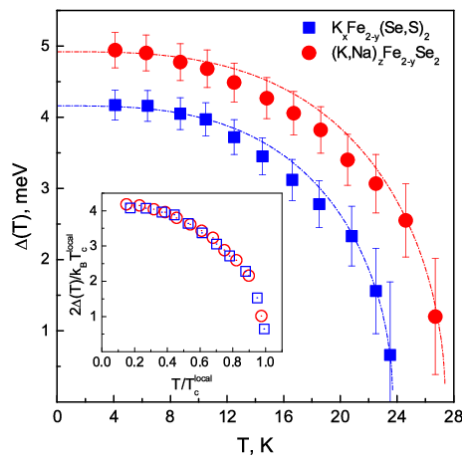


Рис. 1. Температурная зависимость СП-щели $\Delta(T)$ и характеристического отношения $2\Delta(T)/k_B T_c$ (на вставке) в $(\text{K}_{0.8}\text{Na}_{0.2})_{0.9}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$ и $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}(\text{Se}_{0.73}\text{S}_{0.27})_2$ по данным ЭНМАО-спектроскопии.

Рис. 2. Спектры диэлектрической проницаемости ϵ_1 $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}(\text{Se}_{0.73}\text{S}_{0.27})_2$ при различных температурах (точки) и

подгонка к спектрам соотношением $\epsilon_1 \propto -(\omega_{pl,s} / \omega)^2$ (черные линии). Вставка (а): температурная зависимость СП щели (2Δ); вставка (б): температурные зависимости СП плазменной частоты ($\omega_{pl,s}$) и магнитной глубины проникновения (λ).

1) Кузьмичева Т. Е. и др. Сравнение сверхпроводящих свойств ферроселенидов калия с изовалентным замещением // Письма в ЖЭТФ. – 2025. – Т. 121. – №. 8. – С. 696-703.

2) Кузьмичева Т. Е. и др. Однощелевая сверхпроводимость селенидов $(\text{K}_{0.8}\text{Na}_{0.2})_{0.9}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$ и $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}(\text{Se}_{0.73}\text{S}_{0.27})_2$ по данным спектроскопии эффекта многократных андреевских отражений // Физика твердого тела. – 2025. – Т. 67. – №. 6. – С. 1069-1078.

3) Muratov A. et al. Optical Properties of Superconducting $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}(\text{Se}_{0.73}\text{S}_{0.27})_2$ Single Crystals // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2025. – Т. 38. – №. 6. – С. 236 (arXiv:2511.11123).

Динамика моды Хиггса в неупорядоченных сверхпроводниках

П.А. Носов¹, Е.С. Андрияхина², И.С. Бурмистров^{3,4}

¹Department of Physics, Harvard University, USA

²Freie University of Berlin, Dahlem Center of Complex Quantum Systems, Germany

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

⁴Международная лаборатория физики конденсированного состояния, НИУ Высшая школа экономики, Москва

Построена теория пространственно-разрешенной динамики коллективной амплитудной моды Шмидта-Хиггса (SH) в неупорядоченных s-волновых сверхпроводниках и фермионных сверхтекучих жидкостях. Амплитудная коллективная мода проявляется как полюс в SH восприимчивости, которая описывает отклик модуля порядка на его же изменение. Показано, что эта восприимчивость имеет сложную аналитическую структуру в плоскости комплексной частоты. При нулевой температуре найдено, что, когда длина когерентности значительно превышает среднюю длину свободного пробега, (i) отклик SH восприимчивости при фиксированных волновых векторах демонстрирует колебания с частотой 2Δ и затухающие как $1/t^2$, где Δ - сверхпроводящая щель; (ii) субдиффузионные колебания с динамическим показателем $z = 4$, которые проявляются на более поздних временах и на больших расстояниях; и (iii) пространственные колебания при фиксированной частоте затухают экспоненциально, с периодом, который уменьшается по мере приближения частоты к 2Δ сверху. Когда длина когерентности сравнима со средней длиной свободного пробега, появляются дополнительные экспоненциально затухающие колебания при фиксированном волновом векторе на частоте выше 2Δ .

Кроме того, построена теория отклика третьего порядка в токе при действии неоднородного в пространстве электрического поля. Показано, что мода Шмидта-Хиггса индуцирует дополнительный пик в токе генерации третьей гармоники при конечных волновых векторах. Частота этого пика смещена от обычного резонанса при частоте равной Δ , вызванного квазичастичными переходами через сверхпроводящую щель. Таким образом, показано, что неоднородное электрическое поле является необходимым для однозначной идентификации амплитудной коллективной моды.

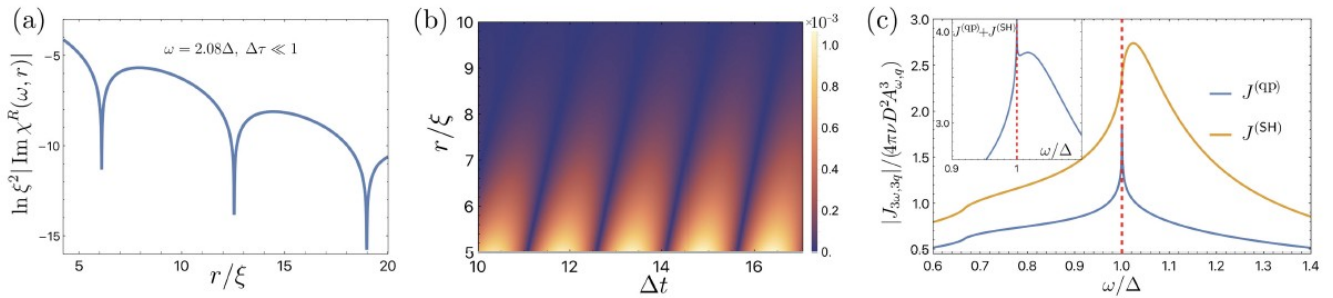


Рис. 1 (а) Пространственные осцилляции в мнимой части SH восприимчивости в двумерном грязном сверхпроводнике. (б) Пространственно-временные осцилляции в модуле SH восприимчивости в двумерном грязном сверхпроводнике. (с). Вклад амплитудной моды (синия линия) и квазичастичный вклад (оранжевая линия) в нелинейный ток. Синия (оранжевая) кривая соответствует вкладу квазичастиц (Шмида-Хиггса). На вставке показан общий ток.

P. A. Nosov, E. S. Andriyakhina, I. S. Burmistrov, "Spatially-resolved dynamics of the amplitude Schmid-Higgs mode in disordered superconductors", *Phys. Rev. Lett.* 135, 056001 (2025)

Все дробные ступеньки Шапиро в резистивной модели с двумя джозефсоновскими гармониками

П.Н. Царев, Я.В. Фоминов

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

Исследованы ступеньки Шапиро — участки постоянного напряжения на вольт-амперной характеристике джозефсоновского контакта, которые появляются в результате синхронизации частоты внутренней динамики сверхпроводящей фазы джозефсоновского контакта с частотой внешнего сигнала. Математически этот эффект фазовой синхронизации может быть описан резистивной моделью джозефсоновского контакта (RSJ), являющейся важным примером нелинейной динамической системы. В стандартной резистивной модели рассматривается джозефсоновский контакт без ёмкости и с синусоидальным ток-фазовым соотношением $I_s(\varphi) = I_1 \sin \varphi$ (содержащим одну джозефсоновскую гармонику) в режиме заданного тока с монохроматической переменной компонентой. Хотя данная модель предсказывает возникновение только целых ступенек Шапиро, известно, что учёт высших джозефсоновских гармоник приводит к появлению ступенек соответствующей дробности. А именно, наличие в ток-фазовой зависимости гармоники с номером k (т.е. слагаемого вида $I_k \sin k\varphi$) приводит к возникновению ступенек Шапиро с дробными номерами вида n/k . Такие дробные ступеньки мы называем тривиальными. Результат нашего исследования состоит в том, что всего двух джозефсоновских гармоник в ток-фазовом соотношении достаточно для возникновения всех возможных дробных ступенек Шапиро в рамках резистивной модели. Это означает, что помимо дробных ступенек со знаменателем $k=2$ (которые в данном случае являются тривиальными), возникают также все нетривиальные вида n/k с произвольными целыми числами n и k (см. иллюстрацию на рис. 1а). Используя методы теории возмущений с обратной связью, мы аналитически находим амплитуды (размеры) этих дробных ступенек. Кроме того, вводя фазовый сдвиг между двумя джозефсоновскими гармониками (что возможно в системах с нарушенной симметрией обращения времени, например, в асимметричном СКВИДе), мы демонстрируем асимметрию между положительными и отрицательными дробными ступеньками, что является проявлением джозефсоновского диодного эффекта (см. иллюстрацию на рис. 1б).

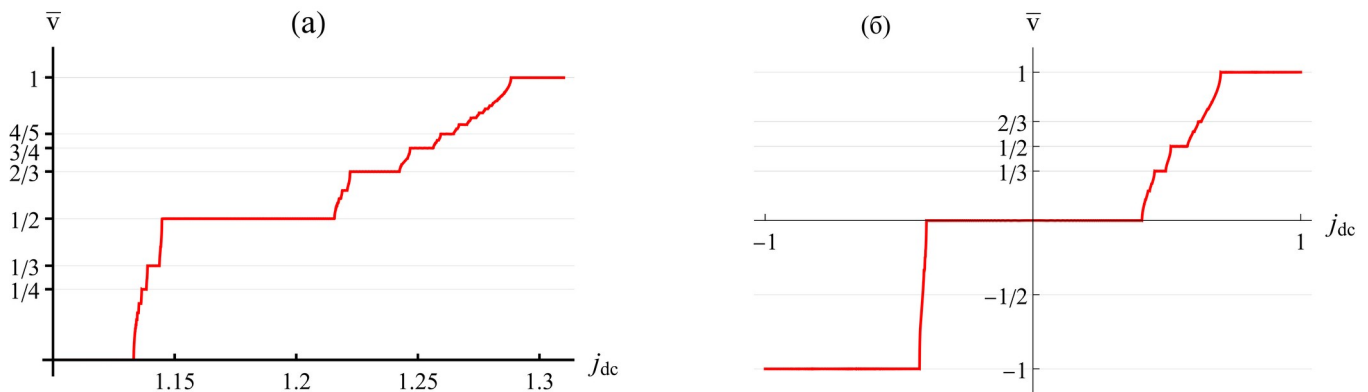


Рис. 1: Дробные ступеньки Шапиро в резистивной модели с двумя гармониками ток-фазового соотношения: $I_s(\varphi) = I_1 \sin \varphi + I_2 \sin 2\varphi$. (а) Вольт-амперная характеристика при наличии внешнего облучения, показывающая наличие не только тривиальных ступенек Шапиро (с целыми и полуцелыми номерами), но также и нетривиальных ступенек более высокой дробности. (б) Вольт-амперная характеристика при наличии также сдвига фаз между двумя джозефсоновскими гармониками. В этом случае имеет место джозефсоновский диодный эффект для всех ступенек Шапиро (как тривиальных, так и нетривиальных), проявляющийся в асимметрии ступенек с номерами, отличающимися знаком. Параметры графика подобраны так, что в области отрицательных напряжений дробные ступеньки очень малы и почти не видны, в то время как в положительной области они хорошо видны.

Pavel N. Tsarev, Yakov V. Fominov, "All fractional Shapiro steps in the RSJ model with two Josephson harmonics", принятая в печать в SciPost Physics (2025).

Стимуляция сверхпроводимости беспорядком в гибридных структурах сверхпроводник - альтермагнетик

М.М.Васякин, А.С.Мельников

Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

Институт теоретической физики им.Л.Д.Ландау, Черноголовка

Показано, что в гибридных структурах сверхпроводник - альтермагнетик рассеяние электронов на примесях приводит к повышению критической температуры сверхпроводящего перехода. Немагнитные примеси при этом приводят к эффективному магнитному рассеянию благодаря механизму, сходному с механизмом спиновой релаксации Дзяконова – Переля.

Альтермагнитное обменное поле:

$$h(\mathbf{p}) = \tilde{h}_0 p_x p_y = h_0 \sin 2\phi,$$

где $h_0 = \tilde{h}_0 p_F^2/2$.

Модельный беспорядок:

$$U(\mathbf{r}) = \sum_i u_0 \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i).$$

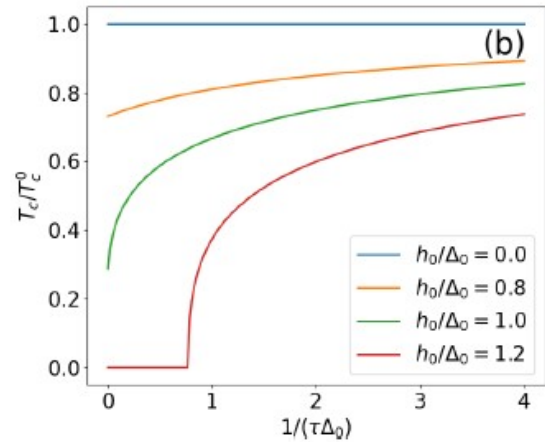
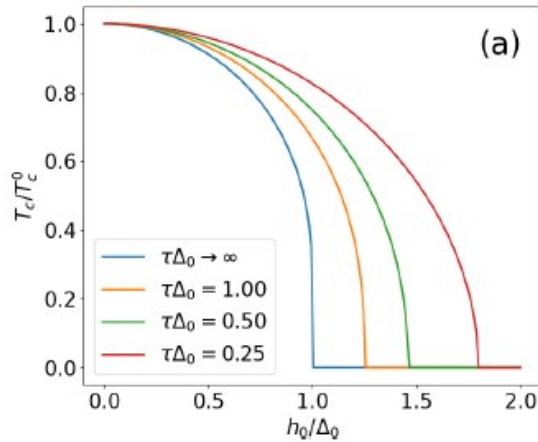
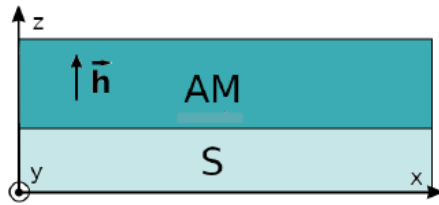


Рис. 10: (а) $T_c(h_0)$ для S/AM бислоя. (б) $T_c(\tau^{-1})$ для S/AM бислоя.

М.М. Vasiakin and A.S. Mel'nikov, Disorder-enhanced superconductivity in altermagnet-superconductor hybrids, PHYSICAL REVIEW B 111, L100502 (2025).

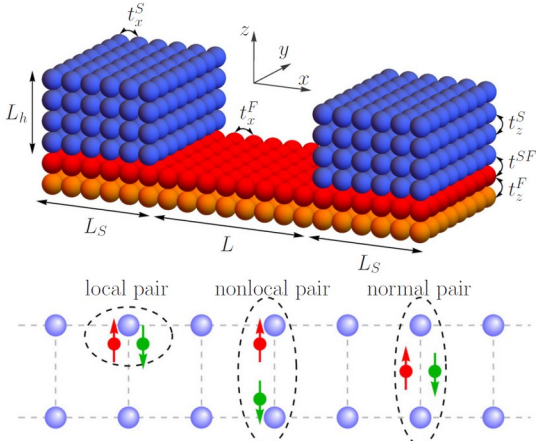
Электрическое управление джозефсоновскими 0- π переходами в магнитных ван-дер-ваальсовых гетероструктурах

Г. А. Бобков¹, Д. С. Рабинович^{1,2}, А. М. Бобков¹, И. В. Бобкова¹

¹Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

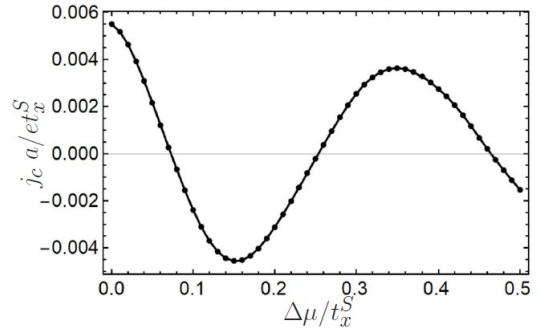
²Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий (РКЦ), Москва, Россия

Возможность управления сверхпроводящим состоянием с помощью внешнего напряжения является одной из ключевых задач для развития сверхпроводящей электроники и спинтроники. В частности, управление переходом между 0- и π -состояниями в джозефсоновских переходах открывает перспективы для создания энергоэффективной криогенной памяти и кубитов. Мы теоретически предсказали новый механизм управления такими переходами в джозефсоновских контактах на основе магнитных ван-дер-ваальсовых бислоев.



Используя аналитический квазиклассический подход и численное моделирование, мы показали, что в таких структурах эффект близости порождает не только обычные (локальные) куперовские пары, но и специфические нелокальные пары, электроны которых локализованы в разных монослоях бислоя. Ключевым свойством этих нелокальных пар является сильная зависимость периода их пространственных осцилляций от разности химпотенциалов монослоев. Эта разность может контролироваться потенциалом затвора, приложенным к одному из слоев.

Мы продемонстрировали, что данное свойство приводит к возможности управления 0- π переходами путем изменения напряжения на затворе. Этот эффект особенно выражен в структурах с антиферромагнитным и ферромагнитным межслоевым упорядочением. Предложенный механизм контроля не связан с изменением плотности электронов, а является уникальным следствием нелокальной природы куперовских пар в ультратонких магнитных гетероструктурах.



Результаты опубликованы в работе G. A. Bobkov, D. S. Rabinovich, A. M. Bobkov, and I. V. Bobkova, Gate-tunable nonlocal Josephson effect through magnetic van der Waals bilayers, Phys. Rev. B 111, 024506 (2025).

Экспериментальное и теоретическое исследование влияния магнитных примесей на переход в A_1 -фазу сверхтекучего ^3He

В.В. Дмитриев¹, М.С. Кутузов², В.С. Михеева^{1,3}, Д.В. Петрова^{1,3}, А.А. Солдатов¹,
Е.В. Суровцев¹, А.Н. Юдин¹

¹Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Москва

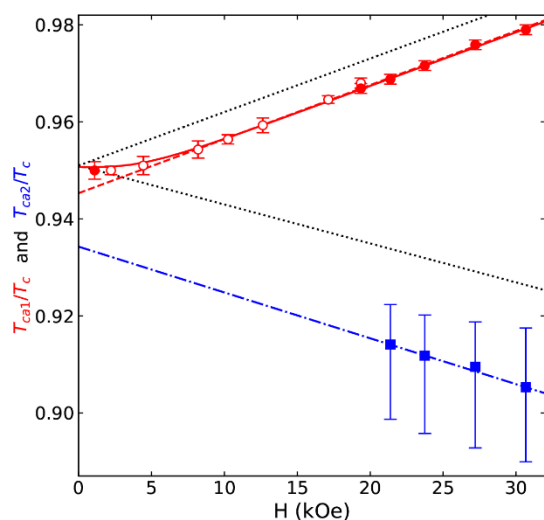
²Metallurg Engineering Ltd., Tallinn, Estonia

³Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва

В работе представлены результаты экспериментов с вибрирующей проволокой в чистом ^3He (без покрытия ^4He) в нематическом аэрогеле. Мы исследовали зависимость расщепления температуры сверхтекучего перехода ^3He в аэрогеле от магнитного поля. В дополнение к нашей предыдущей работе мы использовали более широкий диапазон магнитных полей (до 3.1 Тл) и смогли обнаружить как «верхнюю», так и «нижнюю» температуры сверхтекучего перехода. Твердый парамагнитный слой ^3He на нитях аэрогеля активирует канал магнитного рассеяния квазичастиц жидкости. Согласно теории среднего поля, это должно приводить к линейному расщеплению в сильных полях ($>2-3$ Тл), тогда как в более низких полях расщепление ожидается нелинейным. Нам удалось наблюдать эту нелинейность, однако обнаруженный эффект имел место в гораздо более низких полях относительно предсказанных. Теоретически было рассмотрено влияние корреляций магнитных примесей на температуру сверхтекучего перехода в A_1 -фазу сверхтекучего ^3He в изотропном аэрогеле. Показано, что наличие в системе корреляций в намагниченности примесей также может приводить к возникновению области нелинейной зависимости температуры перехода от величины поля. Найдено, что ширина области нелинейности зависит от радиуса корреляций намагниченности в пленке и магнитной длины пробега квазичастиц жидкости. Данный результат по существу отличается от полученного ранее в рамках теории среднего поля, где область нелинейности определяется величиной поля насыщения пленки твердого парамагнитного ^3He на поверхности аэрогеля. Предложенная теоретическая модель хорошо описывает полученные экспериментальные результаты.

Публикации:

1. V.V. Dmitriev, M.S. Kutuzov, D.V. Petrova, A.A. Soldatov, A.N. Yudin, *Письма в ЖЭТФ* **122**(7), 427 (2025)
2. В.С. Михеева, Е.В. Суровцев, *Письма в ЖЭТФ* **121**(7), 572 (2025)

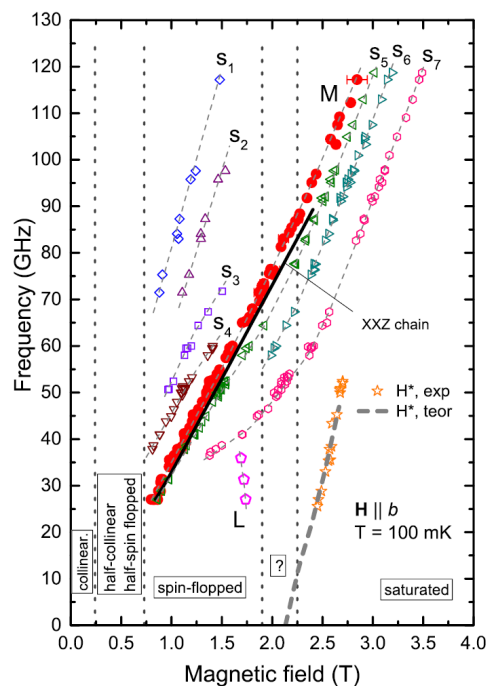
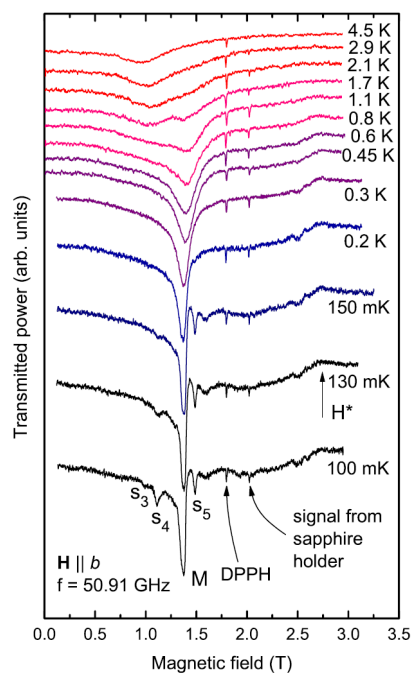


Расщепление A_1 – A_2 в чистом ^3He в нематическом аэрогеле в магнитном поле. Кружки соответствуют T_{ca1} , квадраты – T_{ca2} . Сплошная линия – подгонка теоретической моделью [*JLTP* **135**, 399 (2004)], пунктирная линия – линейная экстраполяция высокополевых данных T_{ca1} к нулевому полю, а штрихпунктирная линия – линейная аппроксимация данных T_{ca2} . Пунктирные линии соответствуют расщеплению A_1 – A_2 в объёмном ^3He , в пересчете на температуру сверхтекучего перехода $0.95T_c$, где температура сверхтекучего перехода в объёмном ^3He $T_c = 2.083$ мК.

МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС УПОРЯДОЧЕННОЙ ФАЗЫ В ЦЕПОЧЕЧНОМ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКЕ Cs_2CoCl_4 .

Т.А. Солдатов, А. И. Смирнов, ИФП РАН им. П.Л. Капицы

Цель работы - проследить, как в области низких температур, при переходе от специфической спин-жидкостной фазы с сильными одномерными корреляциями к упорядоченной фазе с трёхмерным, но “слабым” антиферромагнитным порядком, изменяется спектр спиновых возбуждений. Интрига данной проблемы состоит в том, что с одной стороны, упорядоченная фаза Cs_2CoCl_4 обладает восьмиподрешеточной структурой, что подразумевает образование многомодового спектра антиферромагнитного резонанса. С другой стороны, энергия междоцепочечного взаимодействия очень мала и, можно ожидать лишь слабого изменения спектра на переходе при $T=0.2$ K от одномерно-коррелированного состояния к трёхмерно-упорядоченной фазе. Подробные исследования спектров ЭСР показали, что при понижении температуры от 0.5 до 0.1 K одномодовое поглощение, характерное для основного состояния XXZ-цепочки спинов $S=1/2$, сменяется многомодовым спектром в упорядоченной фазе. Однако, основная часть (90%) спектрального веса остается вблизи резонанса XXZ-цепочки, а многомодовая структура проявляется лишь в виде слабых сателлитов, что разрешает вопрос-интригу данной задачи.



Слева: температурная эволюция линий ЭСР. Справа: частотно-полевая зависимость ЭСР в упорядоченной фазе. Интенсивная мода M – закрашенные символы, слабые сателлиты S_i – незакрашенные. Резонанс XXZ-цепочки - сплошная черная линия.

Полученные результаты экспериментально обнаруживают общую закономерность формирования спектра возбуждений “слабоупорядоченной” фазы квазиодномерного антиферромагнетика: на обменных частотах основная часть спектрального веса остается вблизи резонанса одиночной цепочки, а многоподрешеточная структура проявляется в виде слабых сателлитов.

Работа опубликована Т.А. Soldatov and A.I. Smirnov Antiferromagnetic resonance and two-magnon absorption in an XXZ-chain antiferromagnet Cs_2CoCl_4 . *Phys. Rev. B* 112, 174421 (2025)

**Обнаружение нарушения пространственно-временной симметрии
на экситонах Френкеля в антиферромагнетике Cr₂O₃
методом генерация второй оптической гармоники**

В. В. Павлов¹, М. А. Семина¹, J. Mund², П. А. Усачев¹,

Д. Р. Яковлев^{1,2}, Р. В. Писарев¹, М. Bayer²

¹Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Технический университет Дортмунда, Дортмунд, Германия

Работа посвящена новому магнитоэлектрическому механизму генерации второй оптической гармоники (ГВГ) на узких резонансных линиях – экситонах Френкеля в антиферромагнетике Cr₂O₃. Это первое экспериментальное наблюдение одновременного нарушения симметрии обращения времени (R) и пространственной инверсии (I), приводящего к появлению нелинейной поляризации $\mathbf{P}^{2\omega} = \chi_e^{(3)}(\mathbf{L}) : \mathbf{E}^{\omega} \mathbf{E}^{\omega} \mathbf{B}$ (\mathbf{E}^{ω} – электрическое поле волны, \mathbf{L} – антиферромагнитный вектор), зависящей от магнитного поля \mathbf{B} . Эксперименты проводились в спектральном диапазоне экситонных резонансов ${}^4A_2 \rightarrow {}^2E$, ${}^4A_2 \rightarrow {}^2T_1$ при $T=1.4$ К

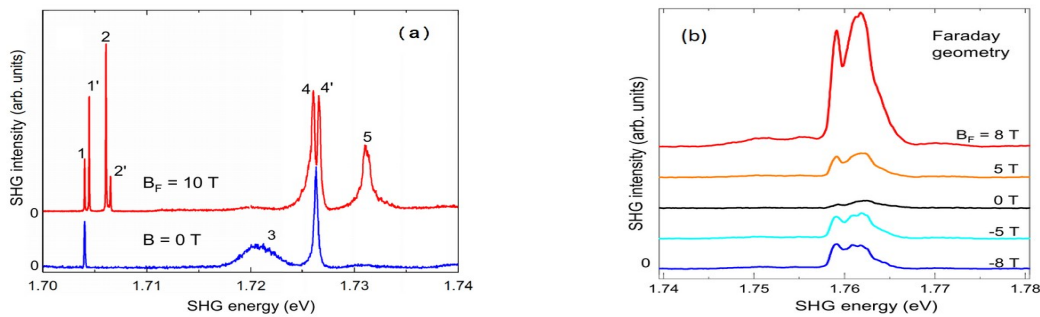


Рис. 1. Спектры ГВГ при $T = 1.4$ К для различных значений внешнего магнитного поля в области экситонов Френкеля ${}^4A_2 \rightarrow {}^2E$ (a) и ${}^4A_2 \rightarrow {}^2T_1$ (b).

Исследовались спектральные зависимости интенсивности ГВГ при различных значениях внешнего магнитного поля (см. Рис. 1), а также поляризационные и полевые зависимости ГВГ [1]. Спектральные и поляризационные зависимости выявили существенную нелинейно-оптическую невязимость, т.е. разницу в интенсивностях сигналов ГВГ при изменении направления внешнего магнитного поля. Детальный теоретический анализ показал, что особенности спектров ГВГ, индуцированной магнитным полем, возникают из-за комбинации двух эффектов – давидовского расщепления, обусловленного электростатическим взаимодействием ионов Cr³⁺, находящихся разных магнитных подрешетках Cr₂O₃, и зеемановского расщепления, обусловленного взаимодействием спиновых моментов ионов Cr³⁺ с магнитным полем. Экспериментальные результаты подтверждены теоретическим анализом, основанным на симметрии однофотонных и двухфотонных процессов во внешнем магнитном поле, что позволило выявить ключевую роль экситонов и магнитоэлектрического взаимодействия в формировании невязимых нелинейно-оптических эффектов. Исследование имеет важное фундаментальное значение для физики низких температур.

Авторы благодарят за финансовую поддержку фонд РФФИ (грант 24-12-00348).

[1] V. V. Pavlov, M. A. Semina, J. Mund, P. A. Usachev, D. R. Yakovlev, R. V. Pisarev, M. Bayer, Time-space symmetry breaking on Frenkel excitons in the antiferromagnet Cr₂O₃ revealed by second harmonic generation, Phys. Rev. B 111, 174405 (2025). doi:10.1103/PhysRevB.111.1744056

Изотропное отрицательное магнитосопротивление в антиферромагнитных металлах из-за обменного расщепления

П.Д. Григорьев¹, Н.С. Павлов², И.А. Некрасов², И.Р. Шеин³, А.В. Садаков⁴, О.А. Соболевский⁴, Е. Мальцев⁵, и В. М. Пудалов⁴

¹Институт теоретической физики им. Л.Д.Ландау РАН, Черноголовка, Россия

²Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

³Институт химии твёрдого тела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

⁴Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

⁵Leibniz Institute for Solid State and Materials Research, Dresden, Germany

Слоистые полуметаллы с антиферромагнитным (АФМ) упорядочением, такие как EuFe_2As_2 , EuSn_2As_2 , EuSn_2P_2 , EuIn_2As_2 и др., обладают отрицательным магнитосопротивлением: сопротивление квадратично уменьшается с полем на величину 4–6% вплоть до поля H_{sf} полной спиновой поляризации, оставаясь изотропно к направлению тока и почти изотропно по полю. Его объяснение до сих пор отсутствовало. Мы предлагаем [1] новый механизм, связанный с нарушением симметрии между АФМ подрешетками. Это сжимает волновые функции электронов проводимости, что усиливает их рассеяние на дефектах и дает изотропное магнитосопротивление. Проведенные численные расчеты методом функционала плотности подтверждают это сжатие. Предложенный механизм магнитосопротивления применим к широкому классу слоистых АФМ металлов. Величина эффекта определяется параметром γ^2 , где γ — это отношение энергии обменного расщепления к интегралу перескока между АФМ подрешетками. Мы провели детальное экспериментальное исследование этого эффекта в EuSn_2As_2 и сравнили его с нашими теоретическими предсказаниями, получив хорошее согласие для кристаллов различного состава.

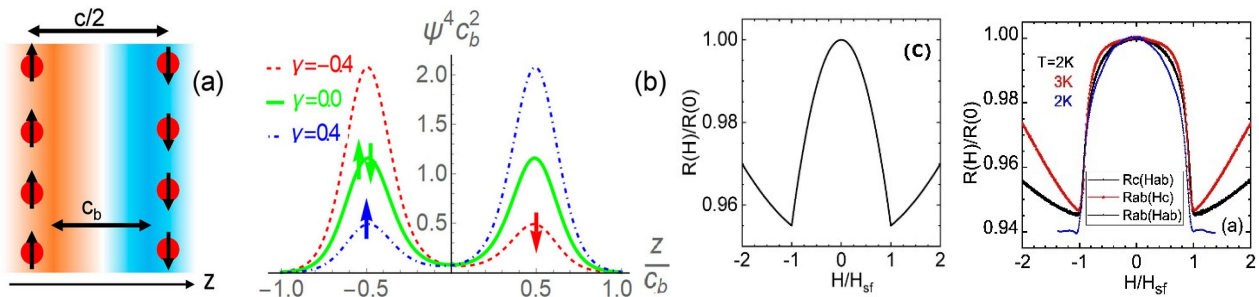


Рис. 1. (a) Схематическое расположение магнитных антиферромагнитного порядка А-типа. (b) Соответствующее изменение волновой функции электронов. (c) Теоретический вид и (d) экспериментальные данные отрицательного магнитосопротивления в АФМ полуметаллах для различных ориентаций магнитного поля и тока.

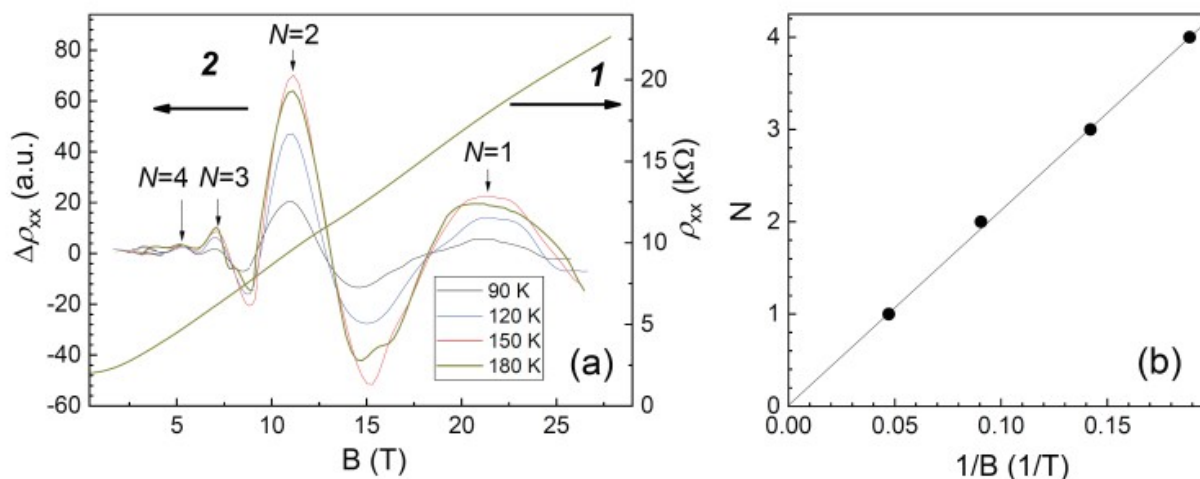
[1] P.D. Grigoriev, N.S. Pavlov, I.A. Nekrasov, I.R. Shein, A.V. Sadakov, O.A. Sobolevskiy, E. Maltsev and V.M. Pudalov, Communications Materials 6, 252 (2025). 10.1038/s43246-025-00970-5

Магнитофононные осцилляции сопротивления в структурах с квантовой ямой GaAs и барьерами из сверхрешеток AlAs/GaAs(delta Si)

Дричко И.Л., Смирнов И.Ю., Бакаров А.К., Быков А.А.

ФТИ им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург

Исследованы магнитофононные осцилляции сопротивления (MPR), связанные с резонансным рассеянием электронов на оптических фононах при температурах 77–240 К, а также и резонансным рассеянием электронов на акустических фононах (PIRO) при температурах 10–25 К на одних и тех же образцах с квантовой ямой GaAs и барьерами из сверхрешеток AlAs/GaAs, легированных Si. При исследованиях MPR было показано, что резонансное рассеяние электронов происходит на объемных продольных оптических фононах и не зависит от размерности системы, а также и от межподзонных переходов в системах с двумя подзонами пространственного квантования. Однако величина амплитуды осцилляции с номером $N=1$ в двумерных структурах зависит от соотношения механизмов рассеяния, т. е. от их строения. Что касается PIRO, то в образцах с двумя подзонами пространственного квантования резонансное рассеяние электронов на продольных акустических фононах наблюдается на фоне межподзонных переходов (MISO), что вызывает их интерференцию.



Магнитофононные осцилляции в образце 2 при разных температурах: 1 — экспериментальная зависимость $\rho_{xx}(B)$ при $T=180$ К; 2 — зависимости осциллирующей части $\Delta\rho_{xx}(B)$ при разных температурах; стрелки показывают номера пиков магнитофононного резонанса. b — Зависимость номера осцилляции от обратного магнитного поля, демонстрирующая их периодичность по $1/B$

Дричко И.Л., Смирнов И.Ю., Бакаров А.К., Быков А.А. «Магнитофононные осцилляции сопротивления в структурах с квантовой ямой GaAs и барьерами из сверхрешеток AlAs/GaAs(delta Si)» ЖЭТФ, 2025, т.167, №2, стр. 226-232

Поверхность Ферми топологического полуметалла WTe_2 : эксперимент и расчет

Б.М. Фоминых, В.В. Марченков, А.Н. Перевалова, С.Т. Байдак, А.В. Лукоянов, С.В. Наумов,
Е.Б. Марченкова, В.В. Чистяков

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

Проведены комплексные исследования поверхности Ферми и транспортных свойств высокочистого монокристалла топологического полуметалла Вейля WTe_2 . Экспериментально показано, что WTe_2 находится в состоянии, близком к электронно-дырочной компенсации, с большими значениями магнитосопротивления и подвижности носителей тока. Из анализа осцилляций Шубникова-де Гааза выделено три характерные частоты, соответствующих различным карманам на поверхности Ферми, а также определены такие параметры электронной структуры, как эффективные массы носителей тока и температура Дингла. Используя данные эксперимента, выполнены расчеты электронной структуры методом DFT+U+SOC. Предложена модель поверхности Ферми и показано, что внутри ее дырочных карманов имеются точки Вейля. Это представляет особый интерес для понимания топологических свойств WTe_2 . Полученные фундаментальные знания важны для практического применения этого материала в спинтронике и сверхбыстрой электронике.

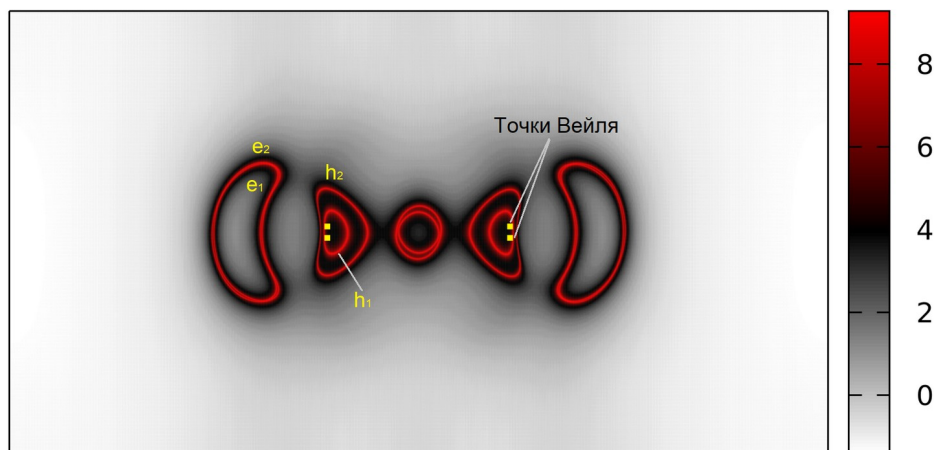


Рис. 1. Экстремальное сечение поверхности Ферми WTe_2 в плоскости $kx-kz = 0$ в зоне Бриллюэна. Стрелки указывают на желтые квадраты, обозначающие рассчитанные положения узлов Вейля.

Опубликовано:

1. *Electronic transport and Fermi surface of Weyl semimetal WTe_2 : Quantum oscillations and first principles study* / B.M. Fominykh, A.N. Perevalova, S.T. Baidak, A.V. Lukoyanov, S.V. Naumov, E.B. Marchenkova, V.V. Marchenkov. – Текст: непосредственный // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2025. — V. 1039. — P. 182966 (1-11).
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025687556 Российская Федерация. *Определение эффективной массы носителей заряда в формализме Лифшица-Косевича*: № 2025687181; заявл. 13.10.2025; опубликовано 13.10.2025 / В.В. Чистяков, В.В. Марченков, Б.М. Фоминых, А.Н. Перевалова; заявитель и правообладатель ИФМ УрО РАН. - 1 с.: ил. - Текст: непосредственный.

Собственный аномальный эффект Холла на поверхности магнитного полупроводника с сильным эффектом Рашбы

В.Н. Меньшов¹, И.П. Русинов¹, Е.В. Чулков²

¹ Центр Высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В.Л. Гинзбурга ФИАН, Москва, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, С.-Петербург, Россия

Показано, что зонная структура поверхности магнитного полупроводника с сильным эффектом Рашбы, характеризуемая нетривиальной кривизной Берри, предопределяет возникновение на магнитной доменной стенке (ДС) одномерного резонансного состояния электрона в локальной обменной щели. Это состояние имеет линейную дисперсию с малым спектральным уширением и обладает свойством киральности (Рис.1). Установлено, что спектральное размытие уменьшается с ростом ширины ДС. Кроме того, ДС может индуцировать 1D состояния с параболическим спектром. Предсказано, что присутствие на поверхности пары параллельных доменных стенок (Рис.1) может иметь измеряемое физическое следствие: дополнительный почти полуквантованный вклад в аномальную проводимость Холла. Наши оценки показывают, что поверхность полярного полупроводника BiTeI, допированного атомами переходного металла, является подходящей материальной платформой для обнаружения такого эффекта при температурах, превышающих температуру режима квантования в известных магнитных топологических изоляторах.

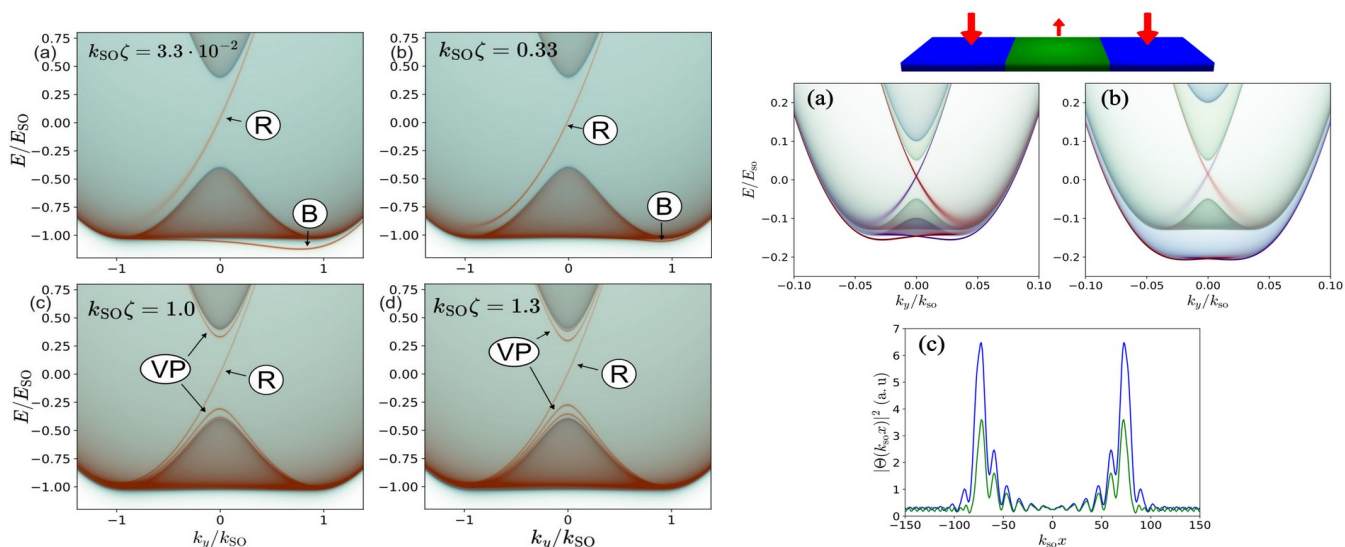


Рисунок 1. (левая панель) Эволюция спектров 1D состояний, индуцированных уединенной амплитудной ДС, с увеличением ее ширины ζ . Спектральные функции 1D состояний представлены тонкими линиями вишневого цвета на фоне проекции 2D состояний в доменах. Символы R, VP и B обозначают соответственно бесщелевое резонансное состояние, состояния Волкова-Панкратова и связанное состояние. (правая панель) (a) и (b) Спектральные характеристики состояний на поверхности с двумя тонкими параллельными ДС. Проекция спектральной функции 2D состояний в доменах представлены оттенками синего и зелёного цветов. 1D состояниям на левой/правой ДС соответствуют кривые фиолетового/вишнёвого цвета. Резонансные состояния расположены в области обменной щели. (c) Пространственный профиль плотности вероятности 1D резонансных состояний, где синяя кривая соответствует спектральной картине (a) и зелёная кривая -- (b).

Публикации:

1) В.Н. Меньшов, И.П. Русинов, Е.В. Чулков, *Собственный аномальный эффект Холла на поверхности магнитного полупроводника с сильным эффектом Рашба*, Письма в ЖЭТФ, **121**, 393 (2025)

В.Н. Меньшов, И.П. Русинов, Е.В. Чулков, *Модификация электронной структуры поверхности магнитного полупроводника с сильным эффектом Рашбы, вызванная присутствием доменных стенок*, Физика твердого тела, **67**, 1476 (2025)

Создание компактного автономного рефрижератора для работы при температурах до 0,35K

А.Д. Голованова^{ab}, А.М. Трояновский^b

^aНациональный исследовательский университет «Высшая Школа Экономики»

^bИнститут физических проблем им. П.Л.Капицы Российской академии наук

Разработан компактный автономный криостат с рабочей температурой до 0,35K, работающий на основе двухступенчатого криорефрижератора Гиффорда - Мак-Магона замкнутого цикла промышленного производства. Криостат не имеет внешних насосов и других коммуникаций за исключением необходимых для работы компрессора криорефрижератора. Рабочая температура обеспечивается сорбционной откачкой изотопов гелия-4 и гелия-3. Весь запас гелия, необходимый для работы системы, находится внутри криостата, а именно, в балластных объемах, в объеме насосов, камерах и соединительных линиях, при этом давление внутри системы не превышает 16 бар (в теплом приборе). Размеры корпуса криостата – длина – 600 мм, диаметр корпуса – 250 мм.

Время выхода на рабочий режим после запуска криорефрижератора составляет около 12 часов. Затем начинается цикл охлаждения ступени 0,35 K. Сначала конденсируется гелий-4, затем начинается процесс конденсации гелия-3. Откачка паров гелия-4 и гелия-3 обеспечивается угольными сорберами. В процессе откачки устанавливается температура камеры конденсации гелия-4 на уровне ~0,9 K и температуры 3-й ступени менее 0,35K. Общее время конденсации газов – менее 1 часа. Время цикла зависит от тепловой нагрузки, и без дополнительной нагрузки, 1 л газообразного гелия-3 хватает примерно на 8 часов непрерывной работы криостата. Возможно увеличение длительности работы за счет увеличения количества газа гелия-3 до 4х литров. Минимальная температура также зависит от тепловой нагрузки (рис.1).

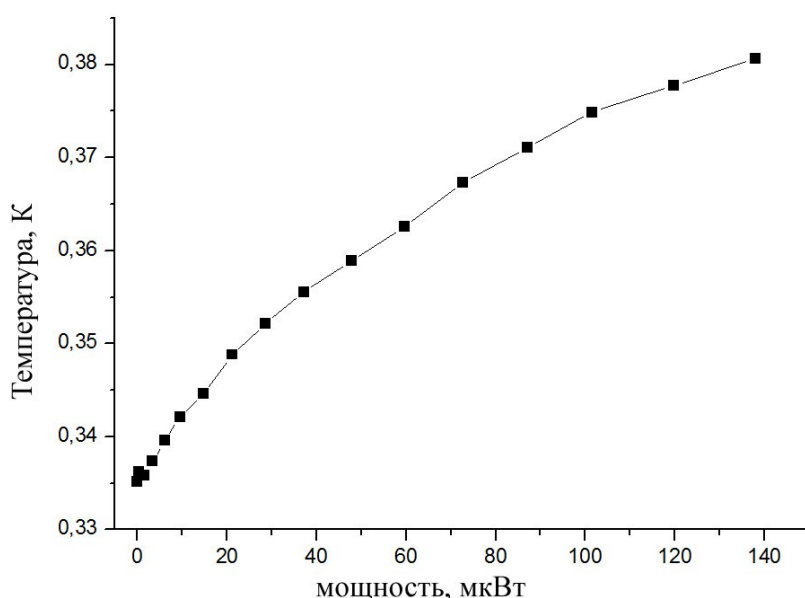


Рис. 1 Зависимость температуры от рассеиваемой мощности на ступени 0,35K.

Разработанный криостат не требует заливки криогенных жидкостей (азота, гелия) и позволяет проводить эксперименты при температуре до 0,35 K в течении более 8 часов. Криостат предназначен для использования в лабораториях, где доступ к криогенным жидкостям (азоту и гелию) ограничен.

Работа опубликована в журнале ПТЭ, №6, 2025 г.

Способ получения гибкого высокотемпературного сверхпроводника на основе диборида магния

Батулин Руслан Германович (руководитель)¹, Янилкин Игорь Витальевич¹, Гумаров Амир Ильдусович¹, Киямов Айрат Газинурович¹, Батулина Любовь Владимировна
Institute of Physics, Kazan Federal University, Kremlyovskaya Str., 18, 420008 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

Методом магнетронного распыления в режиме совместного испарения мишеней Mg и В на подложку Хастеллой С-276 с промежуточными буферными слоями Al_2O_3 (30-50 нм)/ Y_2O_3 (5-10 нм)/ MgO (55-157 нм)/ LaMnO_3 (30-50 нм) (при температуре подложки от 270 градусов до 290 градусов Цельсия) с последующим вакуумным отжигом при температуре 400 градусов разработана технология синтеза гибкого сверхпроводящего композита на основе диборида магния MgB_2 (толщиной) с $T_c \approx 22$ К с шириной перехода $\Delta T \approx 1$ К, критические значения тока $J_c \approx 500$ кА/см² ($T=5$ К, $H=2$ Т), $J_c \approx 11$ кА/см² ($T=15$ К, $H=2$ Т) и максимальным значением $J_c \approx 2$ МА/см² ($T=5$ К, $H \approx 0$ Т), защитным слоем Nb (толщиной 100 нм) и термостабилизирующим слоем Ag или Cu (толщиной 100 нм)

- [1] Пат. 2849051 С1 Российская Федерация, МПК Н 01 В 12/00; В 82 У 30/00. Способ получения гибкого высокотемпературного сверхпроводника на основе диборида магния / Р.Г. Батулин, И.В. Янилкин, А.И. Гумаров, А.Г. Киямов, Л.В. Батулина - № 2024131340; заявл. 15.10.24 ; опубл. 22.10.25, Бюл. № 30.
- [2] Synthesis of MgB_2 films on Hastelloy-C276 tape with $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{LaMnO}_3$ buffer layers by magnetron sputtering in co-evaporation mode/I. V. Yanilkin, A I Gumarov, I A Rudnev, L R Fatikhova, A G Kiiamov, A E Denisov, S A Khokhorin, D A Tayurskii, R G Batulin// Superconductor science and technology. – 2024. – V. 37. – P. 085015 (Q1).
- [3] The physical properties of Hastelloy® C-276TM and Hastelloy® C-276TM with $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{LaMnO}_3$ buffer layers down to cryogenic temperatures for applications in superconducting magnets/ R. Batulin, M. Cherosov, A. Kiiamov, I. Rudnev, S. Khokhorin, D. Uvin, A. Rogov, D. Tayurskii//Cryogenics. – V. 137. – P. 103776 (Q2).
- [4] Янилкин И.В., Гумаров А.И., Увин Д.С., Киямов А.Г., Хохорин С.А., Батулин Р.Г. Влияние термического отжига на магнитные свойства сплава Hastelloy С-276 с промежуточными буферными слоями $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{LaMnO}_3$. Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. 2025;167(2):397-408 (Q3)

Физическое моделирование сверхпроводникового датчика газовой фазы для протяженного азотного криостата

В.А. Мальгинов¹, Л.С. Флейшман²

¹Центр «Высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов» им. В.Л. Гинзбурга ФИАН

²Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе

В настоящее время одним из наиболее перспективных использований высокотемпературных сверхпроводников в электроэнергетике является создание ВТСП кабелей. Кабель находится в азотном криостате, который имеет значительную протяженность при малом поперечном сечении. При этом существует опасность аварийного образования газового пузыря, которое может произойти в любой точке вдоль длины криостата. В настоящей работе, на основе исследования фазовых переходов в различных типах ВТСП лента с током в условиях неоднородности теплоотвода, была обоснована работоспособность и экспериментально проверена эффективность датчика газовой фазы (рис. 1), который позволяет купировать аварийную ситуацию на начальной стадии. Наличие газовой фазы осуществлялось с помощью снижения уровня азота (позиция 7, рис. 1). При этом на оголенном участке происходили скачки сигналов, которые свидетельствовали о начале фазового перехода (рис. 2, начало перехода $t=4.5$ сек). Для оптимизации работы и повышения безопасности устройства были применены следующие оригинальные решения: 1. Применялась ВТСП лента без стабилизатора - это позволило существенно увеличить амплитуду полезного сигнала. 2. Использовалось бифилярное соединение лент - это позволило существенно снизить паразитный индуктивный сигнал. 3. Между лентами в бифиляре использовалась сетчатая изоляция - это позволило снизить тепловое сопротивление между лентами, ускорить процесс перехода и снизить перегрев образца. 4. Использовался трансформаторный источник тока с минимальным сопротивлением во вторичной цепи, в этом случае при переходе спад тока определялся только внутренним сопротивлением образца - это позволило избежать опасного перегрева образца во время перехода.

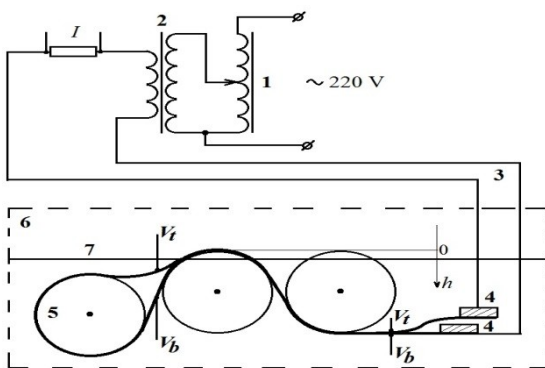


Рис. 1. Схема модели датчика газовой фазы. 1 - автотрансформатор, 2 - понижающий трансформатор, 3 - токовводы, 4 - токовые прижимные контакты, 5 - возвратная петля бифиляра, 6 - азотный криостат, 7 - уровень жидкого азота. I - ток в цепи, V_t - потенциальные контакты на верхней ленте, V_b - потенциальные контакты на нижней ленте бифиляра

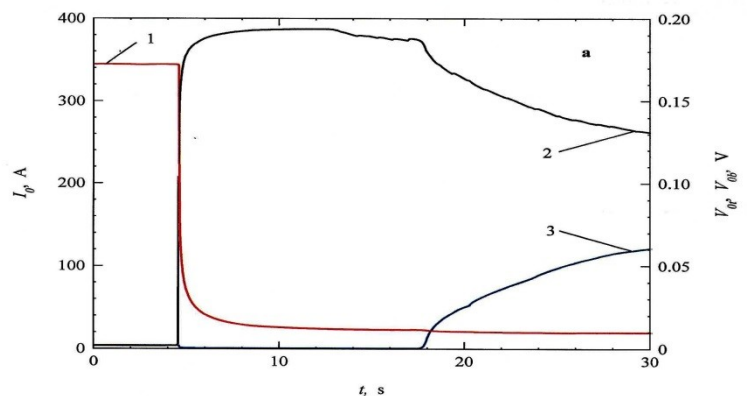


Рис. 2. Временные зависимости амплитуды тока (I_0) в ВТСП-бифиляре и амплитуд напряжений на верхней (V_{0t}) и нижней (V_{0b}) ВТСП лентах. 1 - I_0 , 2 - V_{0t} , 3 - V_{0b}

1. В.А. Мальгинов, Л.С. Флейшман. ПЖТФ, **51** (8), (2025). DOI:10.61011/PJTF.2025.08.60160.20141
2. В.А. Мальгинов, Л.С. Флейшман. ЖТФ, **95** (11), (2025). DOI: 10.61011/JTF.2025.11.61598.64-25