

Уставщиков Сергей Сергеевич

**Электромагнитный отклик тонкоплёночных гибридных
структур сверхпроводник – металл с большим отношением
удельных сопротивлений в нормальном состоянии**

Специальность 1.3.8 — «Физика конденсированного состояния»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2026

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН – филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИФМ РАН), Нижний Новгород.

Научный руководитель: **Водолазов Денис Юрьевич**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела физики сверхпроводников ИФМ РАН.

Официальные оппоненты: **Таланов Юрий Иванович**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники, Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского ФИЦ Казанский научный центр РАН.

Арутюнов Константин Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института физических проблем Российской академии наук.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет» (ФГБОУ ВО «МПГУ»).

Защита состоится 22 октября 2026 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.1.238.02 при Федеральном исследовательском центре "Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова" Российской академии наук по адресу: 603087, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, д. 7, ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики микроструктур РАН и на сайте: <http://www.ipmrasc.ru>.

Автореферат разослан сентября 2026 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук
профессор РАН

Водолазов Денис Юрьевич

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы исследования В настоящее время сформулирован ряд задач, предъявляющих повышенные требования к микроэлектронным компонентам и требующих работы при температурах ниже одного кельвина: астрономические приёмники [1], однофотонные детекторы [2], системы космической связи [3], системы считывания квантовых процессоров и криогенные усилители. Для таких приложений требуется разработка криогенных аналогов компонентов полупроводниковой микроэлектроники, а также поиск материалов, позволяющих их реализовать. Интерес представляют устройства на основе гибридных сверхпроводящих структур с *эффектом близости* [4] — возникающим при контакте сверхпроводника (S) с нормальным металлом (N), в результате чего нормальный металл приобретает слабые сверхпроводящие свойства.

Диссертация посвящена исследованию особенностей электродинамического отклика и возможностей применения тонкоплёночных гибридных SN-структур, в которых значительная часть сверхтока переносится нормальным металлом [5]. Такой режим реализуется, когда удельное сопротивление сверхпроводника в нормальном состоянии значительно превышает удельное сопротивление нормального металла ($\rho_S \gg \rho_N$), а толщины слоёв $d_{S,N}$ составляют несколько длин когерентности ξ_0^S . В работе [5] этот эффект был продемонстрирован на температурных зависимостях $\Lambda(T)$ и $I_c(T)$ в гибридных структурах NbN/Al, NbN/Ag и MoN/Ag. Аналогичное изменение $I_c(T)$ наблюдалось и для NbN/Au [6].

Ранее эффект близости в тонкоплёночных трёхслойных SNS-структурах при $d_N \ll \xi_N$, $d_S \gg \xi_S$ и $\rho_S \gg \rho_N$ теоретически исследовался в работах [7]. Было показано, что плотность критического тока j_c^N может превышать плотность тока распаривания j_{dep}^S одиночной сверхпроводящей плёнки. Однако интегральный критический ток I_c структуры в целом, его температурная и полевая зависимости не исследовались.

В гибридной SN-структуре реализуется неоднородное распределение сверхпроводящих свойств по толщине, описываемое параметром $\lambda^{-2} = \lambda^{-2}(z, q)$, связывающим импульс сверхпроводящего конденсата $\hbar q$ с плотностью сверхтока [5]:

$$j_s(z, q) = -q \frac{c\Phi_0}{8\pi^2} \lambda^{-2}(z, q), \quad (1)$$

При $q \rightarrow 0$ параметр λ совпадает с лондоновской глубиной проникновения магнитного поля.

В случае сверхпроводящей плёнки с пространственно неоднородным распределением параметров, эффективная глубина проникновения магнитного поля опреде-

ляется интегральным соотношением $1/\Lambda = \int dz/\lambda^2(z)$. Для тонких сверхпроводящих плёнок ($d_S \ll \lambda$) без нормального слоя это выражение приводит к пирловской эффективной глубине проникновения $\Lambda_0 = \lambda^2/d_S$.

Эффект близости в SN-структурах с $\rho_S \gg \rho_N$ приводит к следующим следствиям [5]:

- изменение характера зависимости $\Lambda^{-1}(T)$ (наблюдалось в NbN/Al [5,8], NbN/Ag [5], MoN/Ag [5], MoN/Al [A1]);
- увеличение крутизны зависимости $I_c(T)$ и её величины (наблюдалось в NbN/Al [5], NbN/Ag [5], MoN/Cu [A2]);
- появление минищели ε_g в спектре квазичастиц [9], исследованной экспериментально в работах [10] и [A1] (обсуждается в главе 2).
- увеличение болометрического отклика за счёт увеличения крутизны зависимости $I_c(T)$ [A2] (обсуждается в главе 3);
- усиление нелинейности $j_c(q)$ и кинетической индуктивности $L_k(j)$;
- изменение характера $I_c(B)$, связанное с нелинейностью $j_c(q)$ (наблюдалось в NbN/Al, NbN/Ag [5] и MoN/Cu [A3]) (обсуждается в главе 4)

Цель и задачи работы Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование особенностей электромагнитного отклика гибридных SN-структур с большим отношением удельных сопротивлений слоёв в нормальном состоянии.

Были поставлены следующие задачи:

1. Сравнить отклик на низкочастотное ($\hbar\omega \ll \varepsilon_g \ll \Delta_0$) и сверхвысокочастотное ($\hbar\omega \sim \varepsilon_g$) электромагнитное воздействие для выявления эффектов, связанных с конечной минищелью ε_g ¹.
2. Исследовать влияние оптического излучения ($\hbar\omega \gg \Delta_0$) на критический ток гибридных SN-полосок.
3. Изучить зависимость $I_c(B)$ в перпендикулярном поле, связанную с нелинейностью $j_s(q)$.
4. Исследовать особенности вольт-амперных характеристик (ВАХ) и диодный эффект в сверхпроводящих полосках с одиночным боковым разрезом.

¹Здесь Δ_0 — величина сверхпроводящей щели в спектре квазичастиц одиночной сверхпроводящей плёнки

Методология и методы исследования Для решения сформулированных задач был использован ряд традиционных экспериментальных методов исследования сверхпроводящих структур:

1. Измерение коэффициента взаимной индукции катушек, разделённых тонкоплёночным планарным сверхпроводящим образцом;
2. Измерение резонансной частоты цилиндрического диэлектрического резонатора, находящегося в контакте с тонкоплёночным планарным сверхпроводящим образцом;
3. Измерение сопротивления и ВАХ узких сверхпроводящих полосок в режиме заданного постоянного тока.

Характеристики образцов исследовались в зависимости от температуры, магнитного поля, транспортного тока, а также от частоты и мощности внешнего электромагнитного облучения в сверхвысокочастотном и оптическом диапазонах.

Научная новизна

1. Экспериментально установлено, что поверхностный импеданс гибридных SN-структур с $\rho_S \gg \rho_N$ определяется сверхтоком, протекающим в нормальном слое, и наличием минищели.
2. Обнаружено увеличение чувствительности гибридных SN-полосок к оптическому облучению по сравнению с однослойной сверхпроводящей полоской.
3. Показано, что в гибридных SN-полосках по сравнению с однослойными:
 - достигается более высокая нелинейность кинетической индуктивности;
 - значительно уменьшена плотность тока депиннинга вихрей;
 - увеличивается максимальная скорость движения вихрей с ростом d_N .
4. Обнаружен сильный диодный эффект в сверхпроводящих полосках с боковым разрезом в перпендикулярном магнитном поле.
5. Обнаружены «кинки» на резистивном участке ВАХ полосок с боковым разрезом, что позволяет определить число вихрей и их среднюю скорость.

Практическая значимость работы

1. Нанесение слоя нормального металла позволяет управлять динамическим диапазоном, рабочей температурой и чувствительностью детекторов на кинетической индуктивности за счёт подбора толщины и удельного сопротивления нормального слоя.
2. Микроволновые измерения поверхностного импеданса гибридных SN-структур позволяют оценить величину минищели.
3. Нанесение тонкого слоя нормального металла может повысить чувствительность детекторов оптического и ИК-диапазонов, работающих на подавлении критического тока при поглощении фотона.
4. Рост нелинейности кинетической индуктивности в гибридных SN-структурах может быть использован в детекторах на кинетической индуктивности (КИД-детекторах) и параметрических усилителях.
5. С ростом толщины нормального слоя в гибридных SN-структурах наблюдается увеличение максимальной скорости движения вихрей в слабом перпендикулярном магнитном поле.
6. Наблюдение «кинков» на ВАХ в сверхпроводящих полосках с боковым разрезом позволяет определить максимальную скорость движения вихрей в нулевом магнитном поле, избегая ошибки, связанной с нехваткой информации о числе вихрей в слабых магнитных полях при традиционном способе оценки.
7. Диодный эффект в гибридных SN-полосках с разрезом в безгистерезисном режиме пригоден для выпрямления СВЧ-тока на частотах до ~ 1 GHz.

Положения выносимые на защиту

1. Температурная зависимость микроволнового отклика гибридной структуры MoN/Al определяется толщиной слоя алюминия. Эффект объясняется сильной зависимостью наведённой в Al сверхпроводящей минищели от толщины алюминия и большим отношением проводимостей Al и MoN.
2. Нанесение слоя нормального металла с малым удельным сопротивлением на тонкую сверхпроводящую плёнку с большим удельным сопротивлением в нормальном состоянии увеличивает чувствительность болометрического отклика при оптимальном выборе толщины нормального металла.

3. В тонкоплёночных полосках Cu/MoN критический ток I_c нелинейно зависит от магнитного поля в области слабых полей, что свидетельствует о приближении I_c к току распаривания и возможности достижения режима сильной зависимости кинетической индуктивности такой структуры от транспортного тока.
4. Нанесение слоя Cu на тонкую плёнку MoN приводит к более высокой максимальной скорости вихрей в получающемся композитном сверхпроводнике, чем в плёнке MoN.
5. В гибридной полоске сверхпроводник/нормальный металл с боковым разрезом, помещённой в перпендикулярное магнитное поле, можно достичь кратного различия величин критических токов, текущих в противоположных направлениях. Безгистерезисная вольт-амперная характеристика, большая разница критических токов и масштабируемость позволяют предложить данную структуру в качестве перспективного сверхпроводящего диода.
6. Наличие длинного и узкого разреза на краю сверхпроводящей полоски позволяет реализовать резистивное состояние сверхпроводника с небольшим (минимально одним) количеством движущихся вихрей, контролируемых током. Наличие нормального слоя значительно увеличивает количество движущихся вихрей до момента перехода полоски в нормальное состояние.

Личный вклад автора Автор диссертации участвовал в разработке и сборке экспериментальных установок, создании программ управления в среде LabVIEW и программ для постобработки данных в среде Python, проведении измерений, анализе полученных данных, а также в написании статей.

Степень достоверности и апробация результатов Достоверность результатов обеспечивается высокой воспроизводимостью полученных экспериментальных данных и высокой степенью качественного согласия с теоретическими моделями, отражающими основные свойства исследуемых систем.

Основные результаты по теме диссертации изложены в 14 печатных работах, в том числе в 6 статьях в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК [A1–A6], и 8 работах в сборниках трудов международных и всероссийских конференций [B1–B8].

Результаты работы опубликованы в отечественных и зарубежных журналах: «Физика твердого тела» [A1]; «Journal of Physics D» [A2]; «Superconductor Science and Technology» [A3]; «Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики» [A4, A5]; «Physical Review B» [A6].

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики микроструктур Российской академии наук (ИФМ РАН) в 2018 – 2024 гг. Все результаты диссертационной работы обсуждались на семинарах в ИФМ РАН, КФТИ и МФТИ и были представлены на международных и российских конференциях: XVIII – XXII международных симпозиумах «Нанопизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2018–2024 гг.) [B1–B7], II Международной конференции ФКС-2021 (Черноголовка, 2021 г.) [B8], а также конференции «Сверхпроводимость в наноструктурах 2023» (Москва, Сколково, 2023 г.).

Основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и приложений. Общий объём диссертации составляет 151 страницу, включая 53 рисунка. Список цитируемой литературы содержит 148 наименований, список публикаций автора по теме диссертации включает 6 печатных работ.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, связанной с созданием микроэлектронных компонентов для работы при $T \lesssim 1$ К, в частности, на основе планарных гибридных SN-структур с *эффектом близости*. Рассматривается использование для этого гибридных SN-структур с $\rho_S \gg \rho_N$, особенностью которых является перенос значительной части сверхтока в слое нормального металла и обладающих более высокой чувствительностью к внешним воздействиям по сравнению с однослойной сверхпроводящей плёнкой. Формулируются цели и задачи работы, включая сравнение отклика на низкочастотное ($\hbar\omega \ll \varepsilon_g \ll \Delta_0$) и сверхвысокочастотное ($\hbar\omega \sim \varepsilon_g$) электромагнитное воздействие с целью выявления особенностей, связанных с формированием минищели в спектре квазичастиц гибридных SN-структур, исследование влияния оптического излучения ($\hbar\omega \gg \Delta_0$) на критический ток гибридных SN-полосок, исследование зависимости критического тока от магнитного поля, направленного вдоль нормали к поверхности плёнки, $I_c(B)$, в гибридных SN-полосках, связанную с нелинейностью зависимости $j_s(q)$, а также исследование особенностей ВАХ и диодного эффекта в сверхпроводящих полосках с одиночным боковым разрезом. Практическая значимость работы обосновывается возможностью создания ряда устройств криогенной микроэлектроники (КИД-детекторы, оптические болометры, СВЧ-диоды), а также разработкой методик исследования гибридных SN-структур. Также сформулированы положения, выносимые на защиту и научная новизна исследования, обозначен личный вклад автора и приведена структура и список публикаций по теме диссертации.

В первой главе приводится описание экспериментальных методов, технологии изготовления образцов и их характеристики. В диссертации исследуется три се-

рии тонкоплёночных образцов гибридных SN-структур, включая в каждой серии образец сравнения без слоя нормального металла. Изготовление плёнок осуществлялось методом магнетронного напыления без разрыва вакуума. В качестве сверхпроводника выбран нитрид молибдена MoN с толщиной слоя $d_{\text{MoN}} \sim 20 \text{ nm}$ и сопротивлением на квадрат $\sim 100 \Omega$. В качестве нормального металла в образцах I и II серии выбран Al, а в образцах III серии Cu. Толщины слоя нормального металла в каждой серии варьировались от $0.25 d_S$ до $2-5 d_S$. Отношение удельных сопротивлений слоёв в нормальном состоянии варьировалось в пределах 10–60. Образцы I серии использовались для исследования $R(T)$ и определения наличия эффекта близости по температурным зависимостям $I_c(T)$ и $\Lambda^{-1}(T)$. Образцы II серии использовались для исследования отличий низкочастотного и микроволнового отклика. Из образцов III серии сформированы полосы для исследования болометрического отклика и зависимостей $I_c(B)$ и резистивного состояния в слабых магнитных полях.

Криогенные измерения проводились в транспортном Дьюаре с жидким гелием, за исключением зависимостей $I_c(B)$ (см. главу 4), которые проводились в криостате замкнутого цикла типа *pulse-tube*. В экспериментах использовалось три типа измерений: измерения электронного транспорта в режиме заданного тока по стандартной четырёхточечной методике, измерения температурной зависимости коэффициента взаимной индукции двух катушек разделённых тонкоплёночным образцом и измерения температурной зависимости частоты резонанса цилиндрического диэлектрического резонатора, находящегося в контакте с тонкоплёночным образцом.

Во второй главе производится сравнение температурной зависимости мнимой части импеданса гибридных SN-структур на низкой (15 kHz) и высокой ($\sim 8 \text{ GHz}$) частотах.

В высокочастотном эксперименте измерялась температурная зависимость отклонения резонансной частоты $\Delta f = f_0(T) - f_n$ от её значения в нормальном состоянии (рис. 1) для диэлектрического резонатора, находящегося в контакте с тонкоплёночной гибридной SN-структурой. Было обнаружено, что зависимость $X_s(T) \propto \Delta f$ обладает максимумом, который смещается в область более низких температур с ростом толщины слоя нормального металла. Это наблюдение подтверждается численным расчётом в рамках теории Узаделя (рис. 2). Качественно наблюдаемый пик на температурных зависимостях $X_s(T)$ объясняется совместным влиянием двух факторов: наличием минищели ε_g в нормальном металле, зависящей от d_N , и большим отношением $\rho_S/\rho_N \gg 1$.

В низкочастотном режиме из-за $k_B T_c/\hbar\omega \gg 1$ максимум появляется в непосред-

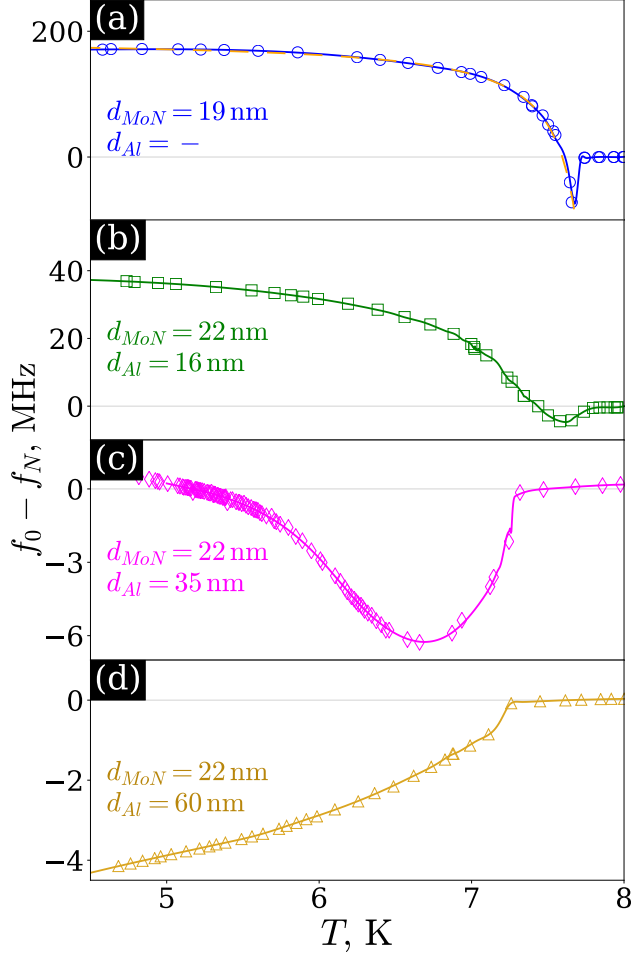


Рис. 1

Экспериментальные зависимости отклонения резонансной частоты f_0 диэлектрического резонатора, находящегося в контакте с образцами гибридных структур MoN/Al серии II, от значения в нормальном состоянии f_n ($T > T_c$). Для образца сравнения на рис. (а) пунктирной линией представлена аппроксимация выражением $f(T) = A + B/(1 - T/T_c)$, соответствующая теории Гинзбурга – Ландау, где параметры A , B и T_c определены методом наименьших квадратов.

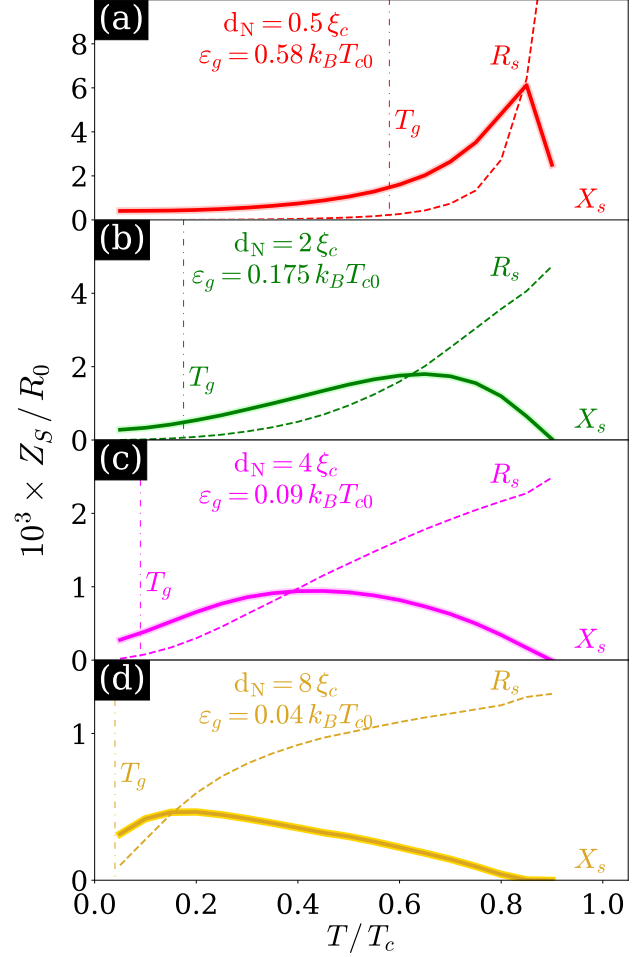


Рис. 2

Температурные зависимости поверхностного импеданса $Z_s = R_s + iX_s$ на частоте 8.5 GHz, полученные в результате численного расчёта для гибридных SN-структур в рамках теории Узаделя. Толщина сверхпроводящего слоя $d_S = 3\xi_c$, где $\xi_c = \sqrt{\hbar D_S / k_B T_{c0}}$ – масштаб длины. Отношение удельных сопротивлений в нормальном состоянии $\rho_S / \rho_N = 100$. Поверхностный импеданс нормирован на величину $R_0 = 1/(\sigma_1^S \cdot \xi_c)$.

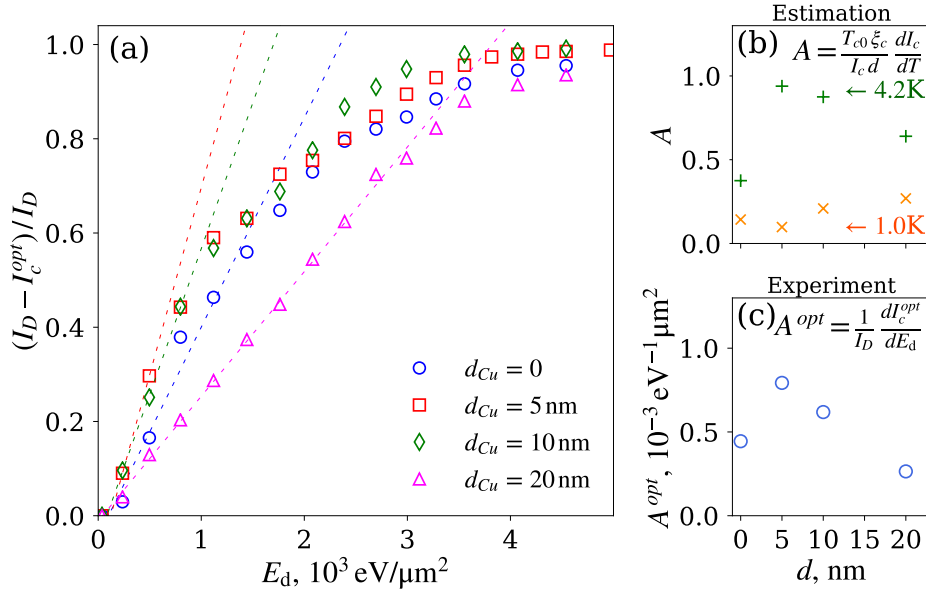


Рис. 3. (а) Зависимость критического тока I_c от плотности энергии E_d оптического облучения; I_D — «темновой ток», критический ток в отсутствие излучения. (b, c) Зависимость чувствительности полосок от толщины медного слоя d_{Cu} : (b) данные, полученные из температурной зависимости $I_c(T)$ в транспортных измерениях; (c) данные прямых оптических измерений.

ственной близости к T_c и мнимая часть поверхностного импеданса X_s оказывается пропорциональной обратной эффективной глубине проникновения магнитного поля $1/\Lambda(T)$.

В третьей главе обсуждается усиление болометрического отклика гибридных SN-полосок на оптических частотах. При оптическом облучении гибридных SN-полосок при температуре жидкого гелия было обнаружено, что зависимость критического тока от плотности энергии оптического облучения $I_c(E_d)$ линейна вблизи нулевой мощности и её наклон зависит от толщины слоя нормального металла (рис. 3). Чувствительность полоски к оптическому облучению $A^{opt} = 1/I_D |dI_c^{opt}/dE_d|$ обладает максимумом при толщине нормального слоя $d_N = 5 \text{ nm}$, что подтверждается численным расчётом в рамках теории Узаделя.

В четвёртой главе обсуждаются особенности транспортных характеристик полосок из гибридных SN-структур в слабых перпендикулярных магнитных полях: нелинейная зависимость $I_c(B)$, обусловленная нелинейностью $j_s(q)$, высокая скорость движения вихрей и диодный эффект в полосках с боковым разрезом.

Нелинейная зависимость $I_s(q)$

В сверхпроводящих полосках связь плотности сверхтока и импульса $\hbar q$ определяется выражением (1): $j_s(q) \propto q/\lambda^2(q)$, нелинейным по q . Причиной нелинейности является уменьшение числа сверхпроводящих носителей с ростом импульса $\hbar q$ вследствие разрушения куперовских пар — эффект, хорошо известный для од-

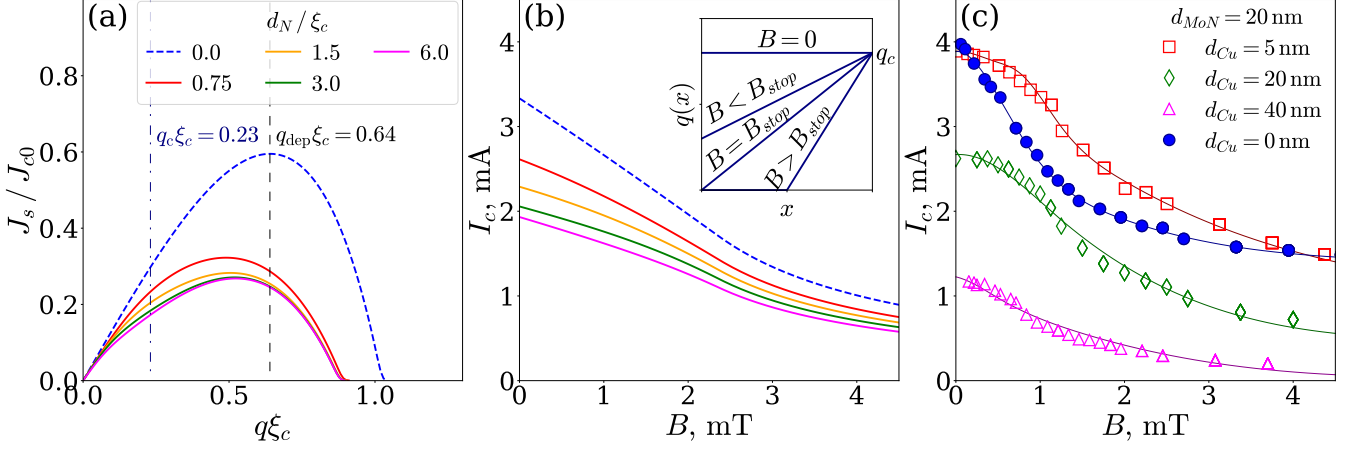


Рис. 4. (а) Нормированная интегральная плотность сверхтока J_s в зависимости от импульса сверхпроводящего конденсата $\hbar q$, полученная в результате численного расчёта в модели Узаделя для гибридных SN-структур с $\rho_S/\rho_N = D_N/D_S = 100$ (вдвое больше, чем в эксперименте). Нормировка выполнена на J_{c0} — максимальную плотность тока при $T = 0$. (б) Теоретические и (с) экспериментальные зависимости $I_c(B)$ для сверхпроводящих полосок MoN и гибридных полосок Cu/MoN с различной толщиной слоя нормального металла d_N и шириной $W = 5 \mu\text{m}$. При $T = 4.2 \text{ K}$ величина q_c найдена из сравнения $I_c(B = 0)$ с I_{dep} для полоски MoN ($q_c \xi_c = 0.23$). На вставке схематично показано распределение импульса сверхпроводящего конденсата $\hbar q(x)$ по ширине полоски в перпендикулярном магнитном поле.

нородных сверхпроводников. При достижении критического значения импульса $\hbar q_{\text{dep}}$ сверхток достигает максимального значения, называемого током распаривания j_{dep} . Наиболее выраженная нелинейность сверхтока достигается вблизи q_{dep} . В нормальном слое рассматриваемых гибридных SN-структур нелинейность проявляется при более низком значении импульса $\hbar q$, поскольку $\sqrt{D_N/D_S} \gg 1$ и распаривающее влияние сверхскорости сильнее проявляется в N слое из-за большего значения коэффициента диффузии.

Нелинейный характер зависимости $I_c(B)$ в сверхпроводящих полосках [11] может служить косвенным методом наблюдения нелинейности $j_s(q)$. Этот метод работает в полосках со слабым объёмным пиннингом и высоким краевым барьером для входа вихрей.

В гибридных SN-структурах распределение плотности тока неоднородно по толщине. В целях обобщения рассмотрим интегральную по толщине структуры плотность тока $J_s(q) = \int j_s(q, z) dz$. Численный расчёт в рамках теории Узаделя для $T = 0.55 T_{c0}$ (рис. 4а) показывает, что в однородных сверхпроводящих полосках (пунктирная линия на рис. 4а) зависимость $J_s(q)$ линейна при $q \rightarrow 0$, а с ростом q приобретает нелинейный характер, наиболее выраженный вблизи максимального значения J_{dep} , которое достигается при импульсе $\hbar q_{\text{dep}}$. В гибридных SN-структурах (сплошные кривые на рис. 4а) максимум $J_s(q)$ уменьшается и смещается в сторону меньших q из-за обратного эффекта близости; нелинейность

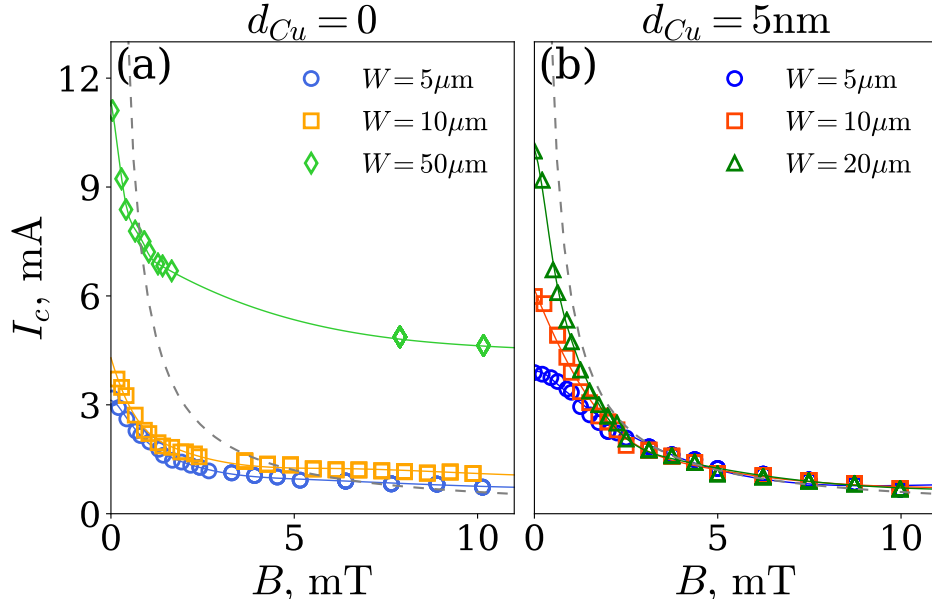


Рис. 5. Зависимость критического тока от магнитного поля $I_c(B)$ для однослойных полосок MoN ($d_N = 0$) (a) и гибридных полосок Cu/MoN с толщиной слоя нормального металла $d_N = 5$ nm (b) при различной ширине полоски W . Пунктирной линией показана зависимость вида $1/B$, следующая из модели краевого барьера. Отсутствие зависимости I_c от W для полосок Cu/MoN в больших магнитных полях указывает на слабый пиннинг вихрей; напротив, в полосках MoN наблюдается сильная зависимость I_c от W .

$J_s(q)$ усиливается и проявляется при меньших $q \lesssim q_{\text{dep}}$.

Полный ток находится интегрированием по ширине полоски: $I = \int J_s(x)dx$. В отсутствие магнитного поля $I = J_s W$, где W — ширина полоски. В реальных образцах критический ток $I_c < I_{\text{dep}} = J_{\text{dep}} W$ из-за краевых дефектов и достигается при критическом значении $q_c < q_{\text{dep}}$ [12].

В магнитном поле распределение $q(x)$ по ширине полоски становится неоднородным (см. вставку к рис. 4b), а при $B > B_{\text{stop}}$ в полоске формируется вихревой домен [13], внутри которого $q \sim 0$. Критический ток $I_c(B)$ достигается, когда импульс q достигает критического значения q_c на краю полоски (точка $x = W$ на вставке к рис. 4b). Величина $I_c(B)$ уменьшается с ростом магнитного поля вследствие увеличения наклона $q(x)$.

Сравнение экспериментального значения $I_c(4.2 \text{ K})$ при $B = 0$ с теоретической оценкой критического тока, полученной из теории Узаделя, позволяет оценить критическое значение импульса для сверхпроводящей полоски: $q_c \xi_c = 0.23$. Это значение лежит на линейном участке зависимости $J_s(q)$ (рис. 4a), что соответствует линейному характеру расчётной зависимости $I_c(B)$ в малых полях (синяя пунктирная линия на рис. 4b). Аналогичный характер зависимости $I_c(B)$ наблюдается и в эксперименте (закрашенные синие кружки на рис. 4c). Предполагая, что влияние краевых дефектов одинаково в сверхпроводящих и гибридных SN-полосках,

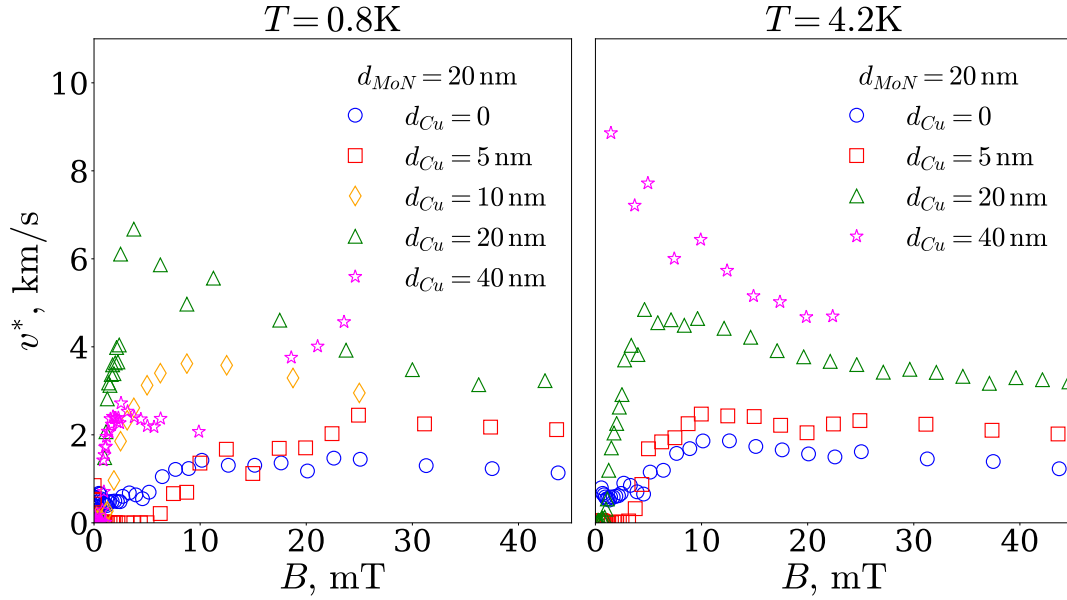


Рис. 6. Максимальная скорость движения вихрей $v^* = U^*/B L$ (скорость вблизи неустойчивости ВАХ) в зависимости от магнитного поля.

можно считать, что для последних характерно то же значение критического импульса $q_c \xi_c = 0.23$. В этом случае расчёт показывает существенно более сильную нелинейность зависимости $I_c(B)$ в SN-полосках при малых полях по сравнению с S-полоской. Отметим, что наблюдаемая нелинейность не связана с объёмным пиннингом, что подтверждается независимостью $I_c(B)$ от ширины SN-полоски при $B > B_{\text{stop}}$ (рис. 5). Ослабление пиннинга объясняется увеличением размера кора вихрей в слое нормального металла по сравнению со слоем сверхпроводника из-за значительно большей длины когерентности $\xi_N/\xi_S = \sqrt{D_N/D_S} \gg 1$.

Увеличение скорости движения вихрей

В SN-полосках переход из резистивного в нормальное состояние происходит при более высоких напряжениях U^* , чем в полосках MoN, что означает достижение движущимися вихрями более высоких максимальных скоростей $v^* = U^*/B L$ при том же значении магнитного поля.

Данный результат качественно объясняется следующим. Во-первых, благодаря существенно меньшему сопротивлению нормального слоя джоулев нагрев ($\propto \rho_N j^2$) в гибридных структурах значительно слабее, чем в одиночной сверхпроводящей полоске. Во-вторых, в обычных сверхпроводниках неравновесные электроны с энергией меньше Δ не могут покинуть сердцевину вихря из-за энергетической щели; в гибридных SN-структурах они могут проникнуть в нормальный слой с большим коэффициентом диффузии D_N и меньшей величиной щели, что облегчает их уход из кора вихря. Экспериментальные результаты качественно согласуются с такой интерпретацией (рис. 6), поскольку с увеличением толщины d_N максимальная скорость v^* возрастает — это свидетельствует об ослаблении влия-

ния неравновесных эффектов².

Вихри в полосках с боковым разрезом

В сверхпроводящих полосках критический ток снижается из-за краевых дефектов. В качестве предельного случая можно рассмотреть одиночный дефект на краю сверхпроводящей полоски, существенно искажающий линии тока. В эксперименте для этого был сделан разрез, перпендикулярный краю полоски, с помощью сфокусированного ионного пучка. При достижении критического значения импульса $\hbar q_{\text{dep}}$ вблизи вершины дефекта вихри преодолевают краевой барьер [12], входят в полоску и начинают двигаться под действием силы Лоренца перпендикулярно линиям тока. При фиксированном транспортном токе вихревые токи препятствуют входу следующего вихря, и следующий вихрь входит в полоску только после выхода предыдущего, что приводит к периодическому входу вихрей. С ростом тока увеличивается число вихрей, входящих вблизи дефекта и образующих цепочку. Поскольку движение вихрей связано с изменением фазы сверхпроводящего параметра порядка, это приводит к возникновению ненулевого среднего напряжения. Увеличение числа вихрей в цепочке на единицу сопровождается «кинком» (изломом) на ВАХ [14]. По числу кинков на ВАХ можно установить точное число вихрей в цепочке, а также соответствующее им напряжение и скорость: $\bar{v}_n = w \frac{1}{\Phi_0} \frac{U_n}{n}$, где U_n — напряжение, соответствующее n -му кинку, а $\bar{v}_n$ — средняя скорость n вихрей.

Измерения полосок MoN с боковым разрезом (рис. 7) в жидком гелии показали наличие до трех кинков в нулевом магнитном поле на резистивном участке ВАХ до срыва в нормальное состояние. Число вихрей в цепочке (при той же геометрии образца) можно увеличить двумя способами: (i) прикладывая слабое внешнее магнитное поле (наблюдалось до шести кинков) или (ii) нанесением поверх сверхпроводника слоя нормального металла (наблюдалось до восьми кинков в нулевом магнитном поле) за счёт подавления неустойчивости вихревого движения.

Вблизи напряжения срыва в нормальное состояние распределение плотности тока в сужении становится практически однородным, скорость каждого вихря близка к средней (в нашем случае $v_n^* \sim 3 \text{ km/s}$). Таким образом, метод оценки максимальной скорости v^* по числу кинков на ВАХ устраняет неопределённость, присущую стандартному методу вблизи нулевого магнитного поля (рис. 6), которая связана с невозможностью определить точное число вихрей в слабых магнитных полях.

Сравнение с результатами численного моделирования в рамках нестационарной теории Гинзбурга-Ландау совместно с уравнением теплопроводности показыва-

²С увеличением толщины d_N уменьшается миничель $\epsilon_g \propto 1/d_N^2$, и увеличивается объём, куда могут диффундировать неравновесные квазичастицы.

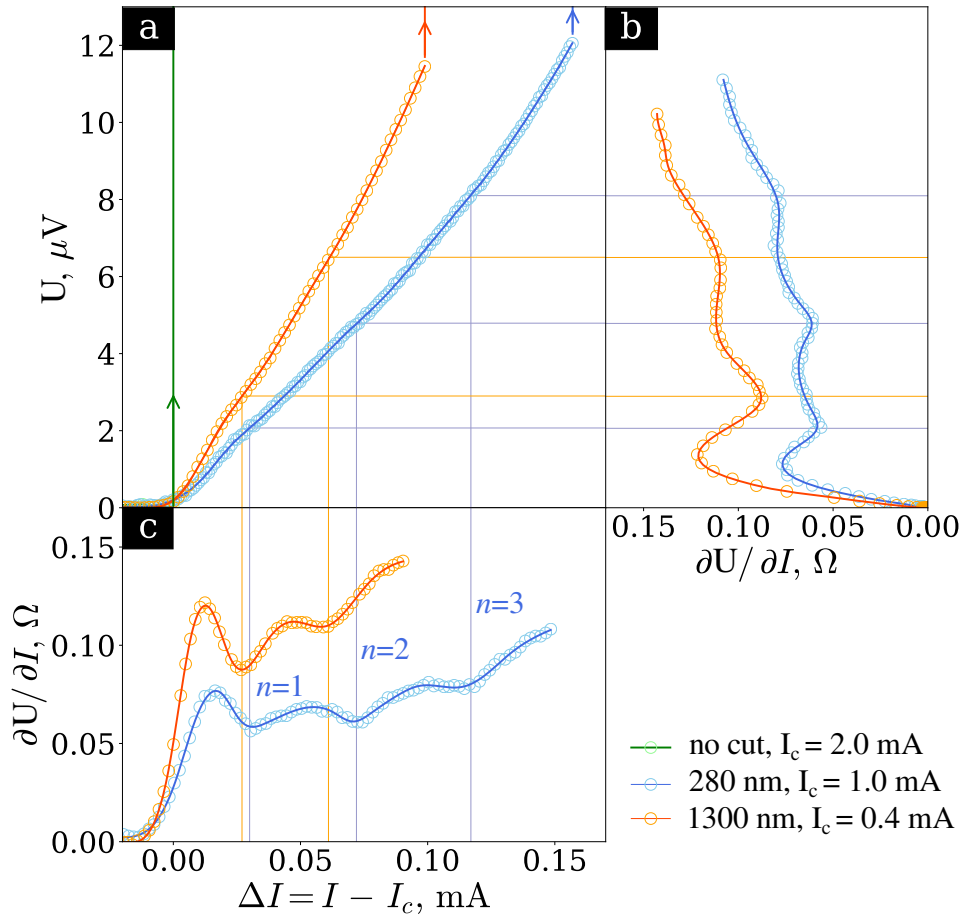


Рис. 7. (а) ВАХ и (b, c) дифференциальное сопротивление в области резистивного состояния для полосок MoN толщиной $d_{\text{MoN}} = 20 \text{ nm}$.

ет, что в полоске MoN с разрезом неустойчивость вихревого движения связана с упорядочением движения вихрей, то есть с коллективным эффектом, приводящим к формированию «вихревой реки» (линии проскальзывания фазы) при большом токе и последующему образованию неустойчивого нормального домена. Ключевым параметром, определяющим ток срыва, является время релаксации электронной температуры (τ_E).

Диодный эффект в SN-полосках с боковым разрезом

В сверхпроводящей полоске с боковым разрезом во внешнем магнитном поле возникает невзаимность из-за сгущения линий тока вблизи вершины разреза, приводящая к различию критических токов, для разных направлений протекания тока. В гибридной полоске Cu/MoN пиннинг мал, скорость движения вихрей может достигать $2\text{--}3 \text{ km/s}$, а при достаточно большой толщине медного слоя пропадает гистерезис на ВАХ. Этот эффект может быть использован для создания сверхпроводящего диода, работающего на частотах до 1 GHz для полоски шириной $1\text{--}2 \text{ }\mu\text{m}$.

Используя экспериментальные ВАХ для обоих направлений тока, были рассчитаны зависимости среднего по времени напряжения $\bar{U}$ от амплитуды переменного

тока $\tilde{I}$ при нулевом постоянном токе — чтобы продемонстрировать эффект выпрямления. Они качественно согласуются с аналогичными зависимостями, приведёнными в работах [15], причём максимальная величина $\bar{U}$ составляет несколько микровольт. Это значение можно повысить за счёт увеличения количества разрезов. Расстояния между разрезами следует выбирать больше длины разреза, поскольку ток от вершины разреза спадает степенным образом. В этом случае вихревые цепочки у каждого разреза можно считать невзаимодействующими и, следовательно, обеспечивающими аддитивный вклад в напряжение.

При более низких температурах ВАХ исследуемых полосок Cu/MoN становятся гистерезисными, однако увеличение толщины слоя меди d_{Cu} позволяет решить эту проблему. В частности, в полосках с $d_{\text{Cu}} = 100 \text{ nm}$ отсутствие гистерезиса на ВАХ наблюдалось вплоть до $T = 0.8 \text{ K}$.

Заключение

В ходе выполнения диссертационной работы были получены следующие основные результаты.

Экспериментально обнаружено, что температурная зависимость резонансной частоты диэлектрического микроволнового резонатора, находящегося в контакте с тонкоплёночной гибридной структурой сверхпроводник – нормальный металл, демонстрирует избыточно широкую область сверхпроводящего перехода. Анализ показал, что эффект связан с высокой проводимостью нормального слоя и формированием в нём минищели вследствие эффекта близости. Установлено также, что в гибридной полоске Cu/MoN увеличивается чувствительность болометрического отклика при оптимальном выборе толщины слоя меди.

Обнаруженная в эксперименте нелинейная зависимость критического тока от слабого магнитного поля в гибридных полосках Cu/MoN свидетельствует о достижении более нелинейного режима зависимости сверхтока от сверхскорости, по сравнению с полоской MoN. Экспериментально показано, что напыление слоя Cu поверх сверхпроводящего слоя MoN приводит к увеличению *максимальной* скорости вихрей Абрикосова и уменьшению их пиннинга. Эффект увеличения скорости вихрей наблюдается в широком диапазоне температур от 0.8 до 4.2 K.

В полоске MoN с боковым разрезом экспериментально продемонстрирован диодный (невзаимный) эффект в магнитном поле. Показано также, что напыление слоя нормального металла позволяет увеличить число вихрей в цепочке, входящих через краевой дефект до достижения тока срыва ВАХ в нормальное состояние.

Публикации автора по теме диссертации

- [A1] Уставщиков, С.С. СВЧ-импеданс тонкоплёночных гибридных структур сверхпроводник - нормальный металл с большим отношением проводимостей / С.С. Уставщиков, А.Ю. Аладышкин, В.В. Курин, В.А. Маркелов, А.И. Елькина, А.М. Клущин, П.А. Юнин, В.В. Рогов, Д.Ю. Водолазов // Физика твердого тела. — 2019. — т. 61, вып. 9. — С. 1722 – 1728.
- [A2] Ustavshikov, S.S. Photoresponse of a current - biased superconductor / normal-metal strip with large ratio of resistivities / S.S. Ustavshikov, Yu.N. Nozdrin, M.Yu. Levichev, A.V. Okomel'kov, I. Pashen'kin, P. Yunin, A.M. Klushin, D.Yu. Vodolazov // Journal of Physics D : Applied Physics. — 2020. — v. 53, — p. 395301.
- [A3] Ustavshikov, S.S. Approaching depairing current in dirty thin superconducting strip covered by low resistive normal metal / S.S. Ustavshikov, M.Yu. Levichev, I.Yu. Pashenkin, A.M. Klushin, D.Yu. Vodolazov // Superconductor Science and Technology. — 2021. — v. 34, n.1. — p. 015004.
- [A4] Уставщиков, С.С. Диодный эффект в сверхпроводящей гибридной полоске Cu/MoN с боковым разрезом / С.С. Уставщиков, М.Ю. Левичев, И.Ю. Пашенькин, Н.С. Гусев, С.А. Гусев, Д.Ю. Водолазов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2022. — т. 162, вып. 2. — С. 261 – 266.
- [A5] Уставщиков, С.С. Динамика вихрей в сверхпроводящей полоске MoN с боковым разрезом / С.С. Уставщиков, М.Ю. Левичев, И.Ю. Пашенькин, Н.С. Гусев, С.А. Гусев, Д.Ю. Водолазов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2023. — т. 164, вып. 3. — С. 432 – 444.
- [A6] Ustavshikov, S.S. Negative differential resistance and quasiperiodic vortex-antivortex motion in a superconducting constriction / S.S. Ustavshikov, M.Yu. Levichev, I.Yu. Pashenkin, N.S. Gusev, A.A. Mazilkin, D.Yu. Vodolazov // Physical Review B. — 2024. — v. 109. — p. 174521

Цитируемая литература

1. J.R. Tucker et al. // Rev. Mod. Phys., **57**, 1055 (1985); К. Рудаков и др. // ЖТФ, **94**(7), 1087 (2024); E.M. Gershenzon et al. // Sov. Phys. :Superconductivity, **3**, 1582 (1990)
2. G. Goltsman et al. // Appl. Phys. Lett, **79**(6), 705 (2001); A. Korneev et al. // Phys. Proc. **36**, 72 (2012)
3. H. Hao et al. // Light : Sci. & Appl., **13**(25), (2024)
4. K. Irwin, G. Hilton // Cryogenic Particle Detection. Topics in Applied Physics **99**, 63 (2005); D. Olaya et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond., **18**(4), 1797 (2008); S. Bauer et al. // Meas. Sci. Technol., **34**, 032001 (2023)
5. D.Yu. Vodolazov et al. // Supercond. Sci. Technol., **31**, 115004 (2018)
6. N. Simonov et al. // Phys. : Conf. Ser., **1695**, 012132 (2020)
7. L.G. Aslamazov, A.A. Dyachkov, S.V. Lempitskii // JETP, **64**, 1051 (1986); S.V. Lempitskii // Physica C, **167**, 168 (1990)
8. J. Claassen et al. // Phys. Rev. B, **44**, 9605 (1991)
9. A. Volkov // Physica B, **203**, 267 (1994); Ya.V. Fominov, M.V. Feigelman // Phys. Rev. B, **63**, 094518 (2001)
10. A. Kasumov et al. // Science, **284**, 5419 (1999); A. Hosseinkhani, G. Catelani. // Phys. Rev. B, **97**, 054513 (2018)
11. V.P. Andratskii et al. // JETP **38**, 797 (1974); G.M. Maksimova et al. // Europhys. Lett., **53**, 639 (2001); D.Yu. Vodolazov // Phys. Rev. B, **88**, 014525 (2013)
12. D.Yu. Vodolazov et al. // Physica C, **384**, 211 (2003)
13. M. Kupriyanov, K.K. Likharev. // Sov. Phys. SolidState, **16**, 1835 (1975); M. Benkraouda, J.R. Clem // Phys. Rev. B, **58**, 15103 (1998); B.L.T. Plourde et al. // Phys. Rev. B, **64**, 014503 (2001)
14. L. Aslamazov, A. Larkin // JETP, **41**, 381 (1975)
15. J.E. Villegas et al. // Science, **302**, 1188 (2002); G. Carapella, G. Costabile // Phys. Rev. Lett., **87**, 077002 (2001); J. Van de Vondel et al. // Phys. Rev. Lett., **94**, 057003 (2005); B.L.T. Plourde // IEEE Trans. Appl. Supercond., **19**, 3698 (2009); D. Cerbu et al. // New Jour. Phys., **15**, 063022 (2013); J. Ji et al. // Appl. Phys. Lett., **109**, 242601 (2019)

Уставщиков Сергей Сергеевич

**Электромагнитный отклик тонкоплёночных гибридных структур
сверхпроводник – нормальный металл с большим отношением
удельных сопротивлений**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико - математических наук

Подписано к печати 18.06.2026

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 60 экз.

Отпечатано на ризографе Института физики микроструктур Российской академии наук — филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»,

603087, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афонино, ул.
Академическая, д. 7.