

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Уставщикова Сергея Сергеевича «Электромагнитный отклик тонкоплёночных гибридных структур сверхпроводник – металл с большим отношением удельных сопротивлений в нормальном состоянии»,

представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 — «Физика конденсированного состояния»

Диссертационная работа С.С. Уставщикова посвящена экспериментальному исследованию тонкоплёночных гибридных структур сверхпроводник – нормальный металл (SN) с большим отношением нормальных удельных сопротивлений. **Актуальность темы** определяется запросами современной криогенной микроэлектроники, развивающейся в направлении создания высокочувствительных приёмников излучения, однофотонных детекторов, криогенных параметрических усилителей и «read-out» систем для квантовых процессоров.

Для таких приложений необходимы криогенные аналоги компонентов полупроводниковой микроэлектроники, а также материалы и структуры, позволяющие их реализовать. Одним из подходов является использование гибридных сверхпроводящих SN-структур с эффектом близости, возникающим при контакте сверхпроводника с нормальным металлом. Если $\rho_s \gg \rho_n$, а толщины слоёв составляют несколько длин когерентности, то в такой гибридной структуре перенос сверхтока может в значительной степени определяться нормальным слоем. Это приводит к тому, что сверхпроводящие характеристики гибридной структуры – критический ток, глубина проникновения магнитного поля, кинетическая индуктивность – существенно отличаются от соответствующих характеристик однослойной сверхпроводящей плёнки. Это открывает дополнительные возможности управления откликом

устройств и их детектирующей способностью. Ранее эффект близости в гибридных SNS-структурах с $\rho_S \gg \rho_N$ исследовался теоретически, однако не было сделано предсказаний относительно экспериментально наблюдаемых величин, таких как интегральный критический ток и эффективная глубина проникновения магнитного поля (а также их температурных и полевых зависимостей). В более поздней работе независимых авторов этот пробел был восполнен для SN-структур, однако экспериментально неисследованными оставались вопросы электродинамического отклика плёнок гибридных SN-структур в сверхвысокочастотном и оптическом диапазонах, а также роль минищели в квазичастичном энергетическом спектре при формировании этого отклика. Наряду с этим, исследованию подлежат температурная и полевая зависимости критического тока мостиков на основе гибридных SN-структур. Экспериментальной проверки требуют предсказания относительно усиления нелинейности зависимости плотности сверхтока от импульса конденсата, роста кинетической индуктивности и её влияния на болометрический отклик, а также динамики вихрей Абрикосова в слабых перпендикулярных магнитных полях. Этим определяется **научная и практическая ценность** диссертационного исследования, направленного на восполнение указанных пробелов.

В работе получен ряд **новых научных результатов**. Экспериментально установлено, что поверхностный импеданс гибридных SN-структур с большим отношением нормальных удельных сопротивлений определяется сверхтоком, протекающим в нормальном слое, и наличием минищели в спектре квазичастиц. Вследствие этого температурная зависимость резонансной частоты микроволнового диэлектрического резонатора, контактирующего с гибридной структурой MoN/Al, имеет максимум, смещающийся с ростом толщины Al в область низких температур, что значительно отличается от монотонных зависимостей, измеренных на низких (килогерцовых) частотах. Кроме того, обнаружено увеличение чувствительности гибридных SN-полосок к оптическому облучению по сравнению с однослойной сверхпроводящей полоской. Показано, что чувствительность болометрического отклика

максимальна при оптимальной толщине нормального слоя ($d_{Cu} = 5$ нм), что подтверждено численными расчётами в рамках теории Узаделя. Наряду с электродинамическим откликом, исследованы транспортные свойства гибридных SN-полосок. Показано, что более высокая нелинейность соотношения ток–фаза при малых импульсах приводит к достижению большей нелинейности кинетической индуктивности. Кроме того, вследствие увеличения кора вихрей в нормальном слое значительно уменьшена плотность тока депиннинга вихрей. Значительное снижение тепловыделения за счёт нормального слоя, а также более эффективный отвод неравновесных квазичастиц из сердцевины вихрей приводят к экспериментально наблюдаемому возрастанию максимальной скорости движения вихрей с ростом толщины нормального слоя. Наконец, в сверхпроводящих полосках с боковым разрезом в перпендикулярном магнитном поле на резистивном участке ВАХ наблюдаются «кинки», позволяющие определить число вихрей и их среднюю скорость, а также обнаруживается невзаимный (диодный) эффект с кратным различием критических токов.

Практическая значимость работы состоит в следующем. Установлено, что нанесение слоя нормального металла даёт возможность управлять динамическим диапазоном, рабочей температурой и чувствительностью детекторов на кинетической индуктивности (КИД), а также повышать чувствительность оптических и ИК-болометров. Обнаруженный диодный эффект в гибридных SN-полосках с разрезом может быть использован для выпрямления микроволновых токов на частотах до нескольких гигагерц. Разработанные методики оценки максимальной скорости вихрей по числу кинков на ВАХ устраняют неопределённость, характерную для традиционных методов в слабых магнитных полях.

Достоверность результатов обеспечивается высокой воспроизводимостью экспериментальных данных, использованием современных методов измерения (транспортные измерения, измерение

взаимной индукции, резонансные микроволновые измерения), а также качественным согласием с теоретическими моделями (теория Узаделя, нестационарная теория Гинзбурга–Ландау). Основные результаты опубликованы в 6 статьях в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК, и прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 149 страниц, включая 53 рисунка. Список цитируемой литературы содержит 148 наименований, список публикаций автора по теме диссертации включает 6 печатных работ. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

По работе можно сделать следующие замечания, которые условно разделяются на три категории: концептуальные (К), экспериментальные (Э) и технические рекомендации (Т).

К1. На стр. 9-10 и далее в Главе 2 используется высокочастотная методика в широком температурном диапазоне. При этом, достаточно близко к критической точке, температурно-зависимая сверхпроводящая щель $\Delta(T)$ уменьшается и может сравняться с энергией квантов ЭМ излучения. Однако нигде не обсуждается эффект Элиашберга при $\hbar\omega \sim \Delta(T)$?

Стр. 19. Исследуемые образцы состоят из тонких металлических пленок с толщинами до 5 нм. Учитывался ли квантовый размерный эффект для анализа полученных результатов?

К2. В главе 3 обсуждаются болометрические эффекты. Какова эффективная глубина проникновения ЭМ излучения в гетероструктуру, на которой происходит поглощение фотона? Почему возникает разница: используется SN или NS структура? Приводятся только качественные

соображения, в то время как, вопрос – принципиальный и требует более детального обсуждения.

К3. В Главе 3 отмечается, что экспериментально наблюдаются как быстрые импульсы с длительностью $\tau_s \sim 0.3 \mu s$ и частотой 20 MHz; а также длинные импульсы («медленный. отклик») — синхронные с импульсом тока, длительность которых τ_l удовлетворяет условию $\tau_s \ll \tau_l \leq \tau_1$. Как эти времена соотносятся с физическими параметрами (например, временем Гинзбурга-Ландау) и электротехническими параметрами (например, временем отклика RLC цепи)? Какой фактор оказывается лимитирующим для времени срабатывания болометра?

К4. Стр. 85 и рис. 3.3 читаем *«Поглощение нескольких фотонов приводит к образованию ансамбля таких «горячих пятен»... приводя к формированию протяжённой горячей области -«горячей перемычки» (hot-belt model)»*. Как размеры единичного «горячего пятна» и «горячей перемычки» соотносятся с физическими и геометрическими параметрами системы?

К.5. Стр. 105 *«В нашей системе наблюдаемое увеличение скорости [движения вихрей] может быть обусловлено ослаблением неравновесных эффектов, связанных с джоулевым нагревом, либо развитием неустойчивости по механизму Ларкина – Овчинникова»*. На зависимостях максимальной скорости вихрей от магнитного поля (Рис. 4.8) наблюдается немонотонная тенденция с максимумом. Из чего можно сделать вывод, что существуют, по крайней мере два механизма, между которыми происходит «борьба». Как влияет магнитное поле на эффективный размер вихрей и присутствия некоего порогового значения (например, совпадающего с характерным масштабом центров пиннинга), когда их движение становится более «свободным»? При этом, вероятно, нужно учитывать, что объемный пиннинг в таких структурах практически отсутствует, а центры пиннинга на свободной поверхности сверхпроводника могут отличаться от соответствующих дефектов на границе раздела с нормальным металлом в случае гетероструктур.

Экспериментальные

Э1. Стр. 18, рис. 1.1 и комментарии к нему. По смыслу всей работы, эффекты прямой и обратной близости, разумно исследовать при чистой границе раздела нормального (N) и сверхпроводящих (S) материалов. Утверждается, что изготовление сэндвичей НС производилось методом магнетронного распыления *«Напыление слоя нормального металла (Al или Cu) осуществлялось in-situ без извлечения на воздух в атмосфере Ar при давлении $1 \cdot 10^{-3}$ mbar при комнатной температуре»*. При этом отмечается, что *«...базовый уровень вакуума $\sim 1.5 \cdot 10^{-7}$ mbar»*. Алюминий является химически активным материалом, который эффективно окисляется даже при таких остаточных давлениях. Откуда следует, что в структурах серии-I на Рис. 1.1 интерфейс Al/MoN не содержит окиси алюминия? Делался ли анализ сколов соответствующих структур, например, методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения? Насколько наличие тонкого оксидного слоя критично для наблюдаемых эффектов?

Э2. Каковы точность измерения и стабилизации температуры? Насколько критична высокая степень стабилизации температуры, для получения адекватных данных критических параметров (тока и температуры) образцов?

Э3. На стр. 53-54 обсуждаются данные в магнитном поле. Однако в этом разделе нигде явно не обозначено направление магнитного поля по отношению к образцу. С какой точностью проводилась юстировка образца в пространстве?

Технические рекомендации

Т1. В диссертации на стр. 25 совершенно правильно обозначены проблемы шумовых токов. Разумное предлагаемое решение – аналоговая фильтрация. Однако опыт работы с цифровой электроникой (в данном случае – источники тока и нановольтметры фирмы Keithley) говорит, что импульсный сигнал блоков питания «пролезает» в чувствительную цепь приборов. Соответственно, для прецизионных измерений низкоразмерных образцов, в

дополнение к фильтрам, также желательно использовать буферные аналоговые предусилители.

Т2. Стр. 27. *«Для этого тонкоплёночный образец помещался между двумя аксиально-симметричными индуктивно связанными катушками и измерялся коэффициент их взаимной индукции, как показано на рис. 1.7а.»* Слабым местом такой планарной методики являются краевые эффекты, которые становятся особенно существенными в случае близости латеральных размеров пленок и катушек индуктивности. Судя по рис. 1.7б и комментариям к выражению 1.5, именно эта конфигурация и использовалась: образец 10 мм *10 мм, диаметр задающей катушки 6 мм. Делались ли оценки паразитного вклада краевых эффектов? Более удобной может оказаться аксиальная конфигурация: исследуемая пленка напыляется на диэлектрический полый цилиндр (например, стеклянный капилляр), а первичная и вторичные катушки располагаются внутри и снаружи цилиндра, соответственно.

Т3. Стр. 44, рис. 1.20. По смыслу, панели (b)-(c)-(d) представляют осциллограммы откликов системы: т.е. горизонтальная ось – время t . В то же время, в подписи к рисунку значится $U(T)$ (T - заглавное, как температура). По всей видимости, это – опечатка.

Т4. В нескольких местах диссертации приводится выражение для длины когерентности в нормальном металле в «грязном» пределе» $\xi_N = (\hbar D_N / k_B T)^{1/2}$, которая является температурно зависимой величиной. Однако, в работе под корнем фигурирует не температура, а фиксированный параметр – критическая температура T_c .

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки работы и ни в коем случае не умаляют высокого качества полученных научных результатов. Представленная квалификационная работа представляет собой завершённое научное исследование, соответствующее самым высоким стандартам.

Диссертация С.С. Уставщикова на тему «Электромагнитный отклик тонкоплёночных гибридных структур сверхпроводник – металл с большим отношением удельных сопротивлений в нормальном состоянии» удовлетворяет критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по физико-математическим наукам в соответствии с «Положением о присуждении учёных степеней», утверждённым Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013, а сам автор достоин присуждения искомой учёной степени по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

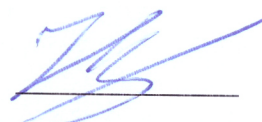
Арутюнов Константин Юрьевич, доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Института физических проблем им. П.Л. Капицы РАН.

Адрес: 119334 г. Москва, ул. Косыгина, д. 2

Тел.: +7(499)137-32-48

E-mail: karutyunov@hse.ru

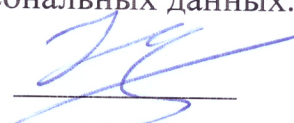
«_06_» октября 2026 года


(подпись)

Арутюнов Константин Юрьевич

Согласен на обработку персональных данных.

«_06_» октября 2026 года


(подпись)

Арутюнов Константин Юрьевич

Подпись К. Ю. Арутюнова заверяю

Ученый секретарь Института физических проблем РАН

«_06_» октября 2026 года


(подпись)

Андреева О. А.