

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»

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа С.С. Уставщикова посвящена экспериментальному исследованию тонкоплёночных гибридных структур сверхпроводник – нормальный металл (SN) с большим отношением удельных сопротивлений слоев выше критической температуры. В таких структурах сверхпроводящий транспорт в значительной степени определяется свойствами слоя нормального металла. Актуальность темы обусловлена её направленностью на развитие элементной базы криогенной микроэлектроники с целью улучшения параметров астрономических приёмников, однофотонных детекторов, систем считывания квантовых процессоров, криогенных усилителей и болометров.

Вариация параметров гибридной SN-структуры (толщин и удельных сопротивлений слоёв) позволяет в широких пределах менять её сверхпроводящие характеристики (критический ток, глубина проникновения, кинетическая индуктивность) и расширяет возможности для детектирования излучения. Несмотря на то, что периодической научной литературе имеется достаточно большое число работ (и теоретических, и экспериментальных), посвященных данной тематике, многие вопросы относительно электродинамического отклика таких структур в микроволновом и оптическом диапазонах остаются недостаточно проработанными. Дополнительного изучения также требуют вопросы, связанные с формированием минищели в спектре квазичастиц, с ростом нелинейности в зависимости плотности сверхтока от импульса сверхпроводящего конденсата, с ростом кинетической индуктивности и её влиянием на болометрический отклик, а также с динамикой вихрей Абрикосова в слабых перпендикулярных магнитных полях. Перечисленные задачи определяют научную и практическую ценность диссертационного исследования. Поэтому тема диссертации, направленная на выявление особенностей отклика гибридных SN-структур с большим

отношением нормальных удельных сопротивлений, представляется своевременной и актуальной.

Научная новизна и основные результаты

В работе получен ряд новых научных результатов. Экспериментально установлено, что поверхностный импеданс гибридных SN-структур с $\rho_S \gg \rho_N$ определяется сверхтоком, протекающим в нормальном слое, и наличием минищели в спектре квазичастиц. Это приводит к изменению параметров диэлектрического резонатора, с помощью которого контролировался импеданс исследованной структуры MoN/Al: максимум температурной зависимости его резонансной частоты смещается с ростом толщины слоя алюминия. Обнаружено увеличение чувствительности гибридных SN-структур к оптическому облучению по сравнению с однослойной сверхпроводящей полоской. Показано, что максимальную чувствительность болометрического отклика можно достичь выбором оптимальной толщины нормального слоя меди ($d_{Cu} = 5$ нм), что подтверждено численными расчётами в рамках теории Узаделя.

В результате исследования транспортных свойств гибридных SN-полосок было показано, что высокая нелинейность «ток-фазового» соотношения при малых импульсах приводит к большой нелинейности кинетической индуктивности. Кроме того, благодаря увеличению размера кора вихрей в нормальном слое значительно уменьшается плотность тока депиннинга вихрей. Обнаружено возрастание скорости движения вихрей с ростом толщины нормального слоя меди, что объясняется уменьшением тепловыделения в этом слое и более эффективным отводом неравновесных квазичастиц из кора вихря.

Один из наиболее важных результатов диссертационной работы заключается в обнаружении диодного эффекта с кратным отношением критических токов в сверхпроводящих полосках с боковым разрезом. В перпендикулярном магнитном поле на резистивном участке ВАХ наблюдаются особенности, позволяющие определить число вихрей, вошедших в сверхпроводник, и их среднюю скорость.

Практическая значимость

Результаты работы имеют несомненную практическую ценность. Показано, что нанесение слоя нормального металла на сверхпроводник позволяет управлять динамическим диапазоном, рабочей температурой и чувствительностью детекторов излучения, основанных на оценке кинетической индуктивности, повышать чувствительность оптических и ИК-болометров. Продемонстрировано, что обнаруженный диодный эффект в гибридных SN-полосках с разрезом может быть использован для выпрямления СВЧ-тока. Предложенная в

работе методика оценки максимальной скорости вихрей по числу кинков на ВАХ устраняют неопределённость, свойственную традиционным методам.

Обоснованность и достоверность результатов

Достоверность результатов обеспечивается использованием современных методов измерения (транспортные измерения, измерение взаимной индукции, резонансные СВЧ-измерения) и подтверждается высокой воспроизводимостью экспериментальных результатов. Обоснованность выводов следует из наличия качественного согласия с физическими моделями на основе теории Узаделя и нестационарной теории Гинзбурга–Ландау. Основные результаты опубликованы в 6 статьях в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК, и прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях.

Замечания по диссертационной работе

1. В Главе 1 на стр.27 приведена формула для коэффициента взаимной индукции $M = U_s / I_f$ (отношение амплитуды переменного напряжения на приёмной катушке к амплитуде возбуждающего тока в первичной катушке). Получается, что единица измерения M – ом. Но в учебниках написано, что $M = \Phi_2 / I_1$ (отношение магнитного потока во вторичном контуре к величине тока в первичной катушке), и тогда единица измерения будет «генри».
2. В Главе 2 на стр.63 сказано, что «... энергия минищели от расстояния до SN-границы не зависит». Это совсем не очевидное утверждение, так как это сверхпроводящая щель, наведенная в нормальном металле в результате эффекта близости. Её величина определяется плотностью куперовских пар, проникших из сверхпроводника в нормальный металл. Их плотность убывает по мере удаления от границы S/N вглубь нормального металла. По-видимому, по этой причине величина минищели зависит от толщины нормального слоя.
3. В уравнении (1.5) на стр.28 размерности левой и правой частей не совпадают.
4. Рисунок 1.13 на стр.35. Невозможно разглядеть, что на нем изображено, так как каждая из трех частей рисунка имеет размеры $42 \times 30 \text{ мм}^2$, а цифры на осях – около 0.5 мм, к тому же – полупрозрачные.
5. На страницах 37-38 формулы (1.8) – (1.11) довольно сложные и не очевидные, а ссылки на источник отсутствуют.
6. В диссертации и автореферате встречаются опечатки и стилистические неточности.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки работы и не затрагивают её основных научных результатов.

Заключение

Диссертационная работа С.С. Уставщикова на тему «Электромагнитный отклик тонкоплёночных гибридных структур сверхпроводник – металл с большим отношением удельных сопротивлений в нормальном состоянии» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание степени кандидата физико-математических наук, установленным «Положением о присуждении учёных степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

Таланов Юрий Иванович, доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники, ФГБУН Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ Казанский научный центр РАН

Адрес: 420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7

Тел.: +7(843)231-91-23

E-mail: talanov@kfti.knc.ru

«_06_» октября 2026 года


(подпись)

Таланов Юрий Иванович

Согласен на обработку персональных данных.

«_06_» октября 2026 года


(подпись)

Таланов Юрий Иванович



Подпись  Ю.И.
Заверяю: зав. канцелярией КФТИ - обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН
 Куркина Н.Г.

06.10.2026г