



федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования

**«Московский педагогический
государственный университет»
(МПГУ)**

ул. М. Пироговская, д. 1, стр. 1, г. Москва, 119991, ГСП-1, тел: (499)245-03-10,
факс: (499)245-77-58, e-mail: mail@mpgu.edu
ОКПО 02079566, ОГРН 1027700215344, ИНН/КПП 7704077771/770401001

**Moscow State Pedagogical University
(MSPU)**

M. Pirogovskaya, st., 1-1, Moscow, 119991, Russia, tel: (499)245-03-10, fax: (499)245-77-58, e-mail: mail@mpgu.edu

26.05.15 № 8/98/112

На № _____ от _____

«Утверждаю»

**И.О. проректора по научной работе
ФГБОУ ВПО
«Московский педагогический
государственный
университет» (МПГУ)**



д. ф.-м. н.

Подольский Владимир Евгеньевич

«26» май 2015 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Водозаова Дениса Юрьевича «Резистивное состояние и неравновесные эффекты в узких сверхпроводящих пленках», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Прогресс, достигнутый в последнее десятилетие в технологии изготовления сверхпроводящих наноструктур, ознаменовал начало нового этапа в развитии сверхпроводниковой электроники, связанного с использованием структур с характерными размерами в плане порядка 100 нм. Среди уже достигнутых практических результатов - реализация джозефсоновских кубитов и других искусственных квантовых систем, создание усилителей и смесителей с чувствительностью, ограниченной квантовым пределом, создание высокочувствительных сверхпроводниковых болометров и однофотонных детекторов с рекордными временными и шумовыми характеристиками. При этом, в силу того, что условия работы большинства практических наноэлектронных устройств являются сильно неравновесными, физика их работы может быть весьма нетривиальна, теоретическое описание зачастую отстает от практической

реализации, что, естественно, сдерживает дальнейшее развитие. Поэтому диссертационное исследование Водолазова Дениса Юрьевича «Резистивное состояние и неравновесные эффекты в узких сверхпроводящих пленках», посвященное теоретической разработке ряда открытых вопросов и содержащее большое количество важных для разработчиков устройств результатов, безусловно, является чрезвычайно актуальным и практически значимым.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка публикаций автора и списка цитируемой литературы; она основана на 26 научных работах, опубликованных в российских и международных изданиях, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК.

Во Введении обоснована актуальность исследования резистивного состояния и неравновесных эффектов в узких сверхпроводящих пленках/мостиках, определены цели работы и методы решения поставленных задач, показана ее научная новизна и значимость, приведены положения, выносимые на защиту, и личный вклад автора, представлена структура диссертации.

В первой главе сформулированы основные уравнения, используемые в работе – обобщенное нестационарное уравнение Гинзбурга-Ландау и дополняющее его выражение для плотности тока. Полученные в главе результаты продолжают исследование свойств процесса проскальзывания фазы, начатое еще в 70-ых годах 20 столетия различными научными группами. В главе последовательно указывается на важность учета конечного, и достаточно большого времени $\tau_{|\Delta|}$ изменения модуля сверхпроводящего параметра порядка $|\Delta|$, возникающего из-за специфических неравновесных эффектов, связанных с вариацией $|\Delta|$ во времени. С учетом этих неравновесных эффектов исследована динамика параметра порядка в сверхпроводящих мостиках конечной длины и сверхпроводящих неоднородных кольцах, рассчитаны вольтамперные характеристики сверхпроводящих мостиков вблизи критической температуры. Для неоднородного кольца с радиусом, меньшим длины когерентности, продемонстрирована возможность возникновения одномерного квазивихревого состояния при величине магнитного потока сквозь кольцо, близкого к половине кванта магнитного потока (существование такого состояния было подтверждено в эксперименте). В главе также представлены результаты по исследованию влияния внешнего электромагнитного излучения низкой частоты на процесс проскальзывания фазы в сверхпроводящем мостике, которые оказались похожими на свойства джозефсоновского контакта, но с некоторой спецификой, связанной с конечным $\tau_{|\Delta|}$. Одним из интересных результатов главы также является предсказание роста тока возврата, при котором происходит переход из резистивного в сверхпроводящее состояние, в слабых магнитных полях. Отметим, что данный эффект является следствием конечного $\tau_{|\Delta|}$ и ранее не обсуждался в литературе.

Во второй главе движение вихрей Абрикосова рассмотрено с учетом конечного времени релаксации параметра порядка. Исследованы случаи толстой и тонкой пленки. Численными расчетами установлено, что с ростом тока происходит несколько последовательных перестроек вихревой структуры, связанных со сменой отталкивания между вихрями анизотропным эффективным притяжением из-за подавления параметра порядка в следе вихря. Для случая толстой пленки получена оценка критической скорости движения вихрей, при которой происходит первая перестройка вихревой структуры. Показана возможность существования быстро и медленно движущихся вихрей. Полученный результат является развитием предыдущих исследований, в которых было предсказано изменение формы вихря, вследствие его движения, но не было исследовано как этот эффект сказывается на структуре движущейся вихревой решетки. Данный результат также качественно объясняет многие эксперименты, проведенные как на низко, так и высокотемпературных сверхпроводниках, что говорит в пользу его достоверности.

В третьей главе теоретически исследована зависимость резистивного отклика сверхпроводника в геометрии холловского мостика от магнитного поля, направления тока и его

величины. Обнаружена немонотонная зависимость нелокального сигнала от приложенного магнитного поля, которая также наблюдалась в эксперименте и объяснялась наличием различных структур вихревой решетки (соответствующих различным полям), влияющих на движение вихрей в соединяющем мостике. Кроме того, был продемонстрирован эффект наличия асимметрии нелокального напряжения относительно направления течения тока - при всех магнитных полях вихри легче движутся от вольтового контакта вблизи критической температуры, и к вольтовому контакту при низких температурах. Последний результат показывает, что в нелокальной геометрии можно качественно отличить различные механизмы неравновесия, тогда, как в локальной они отличаются только количественно.

В четвертой главе изучены различные стационарные состояния в системе нормальный металл – сверхпроводящий мостик – нормальный металл (N-S-N) в режиме приложенного напряжения при температурах близких к T_c . Рассчитаны вольтамперные характеристики в режиме приложенного напряжения, обнаружены асимметричные состояния, характеризующиеся асимметричным относительно центра мостика распределением сверхпроводящего параметра порядка от координаты. Проведено исследование влияния магнитного поля на критический ток сверхпроводящего кольца, соединенного узкими сверхпроводящими проводами с более широкими контактами и показано, что свойства такой системы качественно меняются с понижением температуры и зависят от состояния ‘берегов’, к которым данная система присоединяется. Справедливость полученных результатов основана на их сравнении с теоретическими результатами других авторов и с доступными экспериментальными данными.

Пятая глава диссертации посвящена решению задачи о флуктуационном проскальзывании фазы в квазидвумерных сверхпроводящих полосках. Для нулевого магнитного поля исследован случай произвольного тока, а для произвольного по величине магнитного поля – случай малого тока. В рамках теории Гинзбурга-Ландау найдены различные седловые состояния узкой сверхпроводящей полоски, которые оказываются качественно различными для различных токов: при токе порядка тока распаривания - состояние Лангера-Амбегаокара, описывающее однородное, по ширине пленки, состояние с локально подавленным параметром порядка; при меньших токах – состояние с частично подавленным параметром порядка вблизи края пленки (вихревой зародыш); при еще меньших токах – состояние с вихрем. Продемонстрирован эффект, имеющий важное практическое значение – локальное увеличение плотности тока в пленке с изгибом и значительное уменьшение энергии седлового состояния по сравнению с пленкой без изгиба. Обнаружен и исследован пик-эффект и для большого диапазона значений ширины полоски рассчитано магнитосопротивление, связанное с термоактивационным входом-выходом вихрей. Полученные результаты могут быть использованы как для интерпретации темновых отсчетов в однофотонных сверхпроводниковых детекторах, так и для анализа перехода сверхпроводника в резистивное состояние при токе ниже критического, за счет флуктуаций параметра порядка.

Шестая глава посвящена исследованию механизма детектирования однофотонного детектора на основе узкой полоски сверхпроводника, смещенной током. Предложена модель «горячего пятна», в которой, в отличие от предыдущих моделей, учтено условие непрерывности тока и выполнен самосогласованный расчет влияния тока на устойчивость сверхпроводящего состояния пленки с «горячим пятном». Путем количественного анализа показано, что возникает резистивное состояние узкой сверхпроводящей пленки с локально подавленным сверхпроводящим параметром порядка в центральной части сверхпроводника при токе выше некоторого критического, из-за рождения пар вихрь-антивихрь внутри этой области и их движения к краям пленки, которое приводит к возникновению резистивного отклика. Данный количественный анализ является убедительным обоснованием вихревого механизма детектирования одиночных фотонов узкой сверхпроводящей полоской с током.

В Заключении сформулированы основные научные результаты диссертации.

Особо стоит отметить хорошую согласованность теоретических предсказаний, представленных в диссертации, с опубликованными экспериментальными результатами других авторов.

По диссертации имеются следующие **замечания**.

1. При расчете вольтамперных характеристик сверхпроводящих мостиков в первой главе диссертации не учитываются эффекты, связанные с джоулевым разогревом. Сама возможность существования режима, в котором последними можно пренебречь, не вызывает сомнений, однако количественные критерии его реализации заранее неочевидны. В связи с этим остаются не вполне ясными границы применимости полученных результатов, в частности, предсказания о существовании ступенчатой структуры при малых напряжениях. Без соответствующего анализа затруднена постановка экспериментов, направленных на сравнение теории и эксперимента.

2. Использованное автором обобщенное нестационарное уравнение Гинзбурга-Ландау содержит в качестве параметра электрон-фононное время. К сожалению, автор не обсуждает ситуации, когда наиболее быстрым неупругим процессом являются электрон-электронные столкновения (что характерно для сильно разупорядоченных пленок при низкой температуре; при этом окрестность критической температуры сверхпроводящего перехода вполне может попадать в эту область). Поскольку современные эксперименты часто имеют дело с нанопроволоками из сильно разупорядоченных материалов полезным было бы представлять, будет ли при этом модифицироваться уравнения и какой параметр будет возникать вместо электрон-фононного времени.

3. При расчете зависимости внутренней эффективности детектирования от тока смещения сверхпроводникового однофотонного детектора автором использована сильно упрощенная модель функции распределения квазичастиц – тепловое распределение с повышенной температурой, имеющее форму круга с резким краем. Неясно, насколько это модельное предположение оказывает качественное влияние на получаемые зависимости.

4. В работе содержится довольно значительное число опечаток. Так, на стр. 58 имеется фраза «удобно использовать аналогию динамики джозефсоновского контакта с динамикой некой эффективной ‘частицей’», на стр. 103 – «было экспериментально обнаружено независимость критического напряжения...», на стр. 127 – «эффект однозначно проявляется в знаке нелокального оклика в холловском сверхпроводящем мостике, *независящим* от направления тока...». Во многих случаях пропущены запятые, выделяющие придаточные предложения, деепричастные обороты и вводные слова.

Сделанные замечания не влияют существенно на общую оценку работы и в основном носят характер пожеланий.

Работа докладывалась на семинаре Учебно-Научного радиофизического центра МПГУ с участием специалистов в области физики неравновесной сверхпроводимости – разработчиков однофотонных детекторов. На заседании присутствовало 22 специалиста, среди них 4 доктора наук, 6 кандидатов наук, аспиранты, студенты. Основные вывод семинара состоит в том, что работа выполнена на высоком научном уровне, результаты оригинальны и достоверны, обладают высокой научной и практической значимостью. В частности, диссертация вносит существенный вклад в исследования и реализацию сверхпроводниковых однофотонных детекторов. Практическая значимость работы связана с исследованием характеристик уже активно применяемых сверхпроводниковых однофотонных детекторов.

Диссертация написана хорошим языком, доступным для экспериментаторов, хорошо структурирована и оформлена, содержит ценные разделы обзорного плана. Вся цитируемая информация снабжена соответствующими ссылками. По каждой главе и по работе в целом сделаны четкие выводы. Результаты могут быть использованы и развиты в ИФТТ РАН, ИПТМ РАН (г.Черноголовка), МГУ, ИРЭ РАН, ФИАН, МФТИ, МПГУ (г.Москва), ФТИ РАН (г.Санкт-

МПГУ (г.Москва), ФТИ РАН (г.Санкт-Петербург). Автореферат и опубликованные работы полно и правильно отражают содержание диссертации, ее результаты и выводы. Результаты исследований опубликованы в авторитетных российских и зарубежных рецензируемых журналах с высоким импакт-фактором, докладывались на престижных научных семинарах и конференциях.

Диссертационная работа «Резистивное состояние и неравновесные эффекты в узких сверхпроводящих пленках» удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор – Водолазов Денис Юрьевич – заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Отзыв составили

Председатель семинара
зав. кафедрой общей и экспериментальной физики
Института физики, технологии и информационных систем
ФГБОУ ВПО МПГУ
д. ф.-м. н., проф.

Г.Н. Гольцман

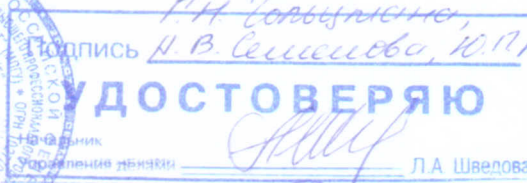
к.ф.-м.н, доцент кафедры общей и экспериментальной физики
Института физики, технологии и информационных систем
ФГБОУ ВПО МПГУ

А.В. Семенов

к.ф.-м.н, научный сотрудник
Учебно-научного радиофизического центра
Института физики, технологии и информационных систем
ФГБОУ ВПО МПГУ

Ю.П. Корнеева

Диссертация и отзыв обсуждены и одобрены на семинаре кафедры общей и экспериментальной физики ФГБОУ ВПО «Московский педагогический государственный университет» 21.04.15. Отзыв утверждён на заседании Учёного совета ИФТиС ФГБОУ ВПО МПГУ (протокол №10 от 22.05.2015 г.).



Подпись Г.Н. Гольцмана,
Д.В. Семенова, Ю.П. Корнеевой

Л.А. Шведова