

## О Т З Ы В

официального оппонента, доктора физико-математических наук И.А. Девятова на диссертационную работу Дениса Юрьевича Водолазова «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.

Диссертационная работа Д.Ю.Водолазова посвящена теоретическому исследованию особенностей резистивного состояния и неравновесных эффектов в тонких и узких сверхпроводящих пленках.

### Актуальность

Актуальность темы исследований, проведенных в диссертационной работе, не вызывает сомнений, поскольку исследование резистивного состояния сверхпроводников является одной из актуальных задач современной физики конденсированного состояния вещества. В резистивном состоянии сверхпроводящий параметр порядка не подавлен полностью в сверхпроводнике, что приводит к его конечному сопротивлению, хотя и меньшему, чем в нормальном состоянии. Резистивное состояние может быть реализовано как при движении вихрей в достаточно широкой сверхпроводящей полоске, так и через возникновение так называемых «центров проскальзывания фазы» в узких сверхпроводящих полосках, а также на границе сверхпроводника с нормальным металлом. При этом возникают нетривиальные физические явления, связанные с наличием диссипации в сверхпроводнике. Эти явления приводят к появлению в сверхпроводнике квазичастиц с существенно неравновесной (не фермиевской) функцией распределения, а также к возможности не только локального «нагрева» квазичастиц, но и их эффективному охлаждению, из-за уменьшения сверхпроводящего параметра порядка. Естественно, такая сложная динамика ведет к появлению нетривиальных вольт-амперных характеристик (ВАХ) контактов нормального металла с такими сверхпроводящими полосками, и их гистерезису. Более того, один из наиболее эффективных современных детекторов видимого и инфракрасного диапазона (SSPD детектор) использует в качестве приемного элемента меандр из узкой и тонкой диффузной сверхпроводящей полоски, с размерами, допускающими возникновение/проникновение вихрей. При этом физика работы этого эффективного устройства до сих пор оставалась не совсем ясной, и ее прояснение было весьма актуальным как с общетеоретической, так и с прикладной точек зрения. Диссертационная работа Д.Ю. Водолазова во многом способствует прояснению физики работы такого перспективного приемника, как SSPD.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка цитируемой литературы, состоящего из 183 наименований и списка публикаций автора. Она изложена на 236 страницах, включая 107 рисунков.

Во Введении обосновывается актуальность выбранной темы, формулируется цель исследования, раскрывается научная новизна и практическая значимость работы, приведены положения, выдвигающиеся на защиту, а также приводится краткий литературный обзор по рассматриваемой тематике.

В первой главе автор приводит основные уравнения (стационарные и временные уравнения Гинзбурга-Ландау, при наличии членов, описывающих влияние неравновесных эффектов), на основании решения которых были получены результаты диссертации. Также в первой главе, для анализа влияния относительно большого конечного времени изменения модуля сверхпроводящего параметра порядка  $\tau_{|\Delta|}$  на ВАХи сверхпроводящих мостиков и динамику  $\Delta$  в сверхпроводящих кольцах используются нестационарные уравнения Гинзбурга-Ландау, в локальном пределе. Данный подход позволил установить, что изменение завихренности в узком сверхпроводящем кольце происходит лавинообразно за счет последовательных во времени проскальзываний фазы сверхпроводящего параметра порядка в одном месте кольца, и данный результат был подтвержден в эксперименте на алюминиевых кольцах. Кроме того, было показано, что вблизи критической температуры сверхпроводника величина тока возврата  $I_r$ , при котором сверхпроводящий мостик переходит из резистивного состояния в сверхпроводящее, зависит от времени релаксации энергии квазичастиц за счет электрон-фононного взаимодействия, длины мостика, граничных условий на его концах и может иметь немонотонную зависимость от внешнего магнитного поля, а его вольт-амперная характеристика может иметь S-образный вид. Данные предсказания не были проверены непосредственно в эксперименте, хотя часть из них может быть использована для интерпретации некоторых экспериментальных результатов, полученных ранее (например немонотонную зависимость критического тока узких сверхпроводящих нанопроволок от магнитного поля, температурную зависимость  $I_r$  вблизи критической температуры и др.).

Во второй главе изучаются изменения в структуре движущейся вихревой решетки, возникающих из-за неравновесных эффектов вблизи коров быстро движущихся вихрей. Данная проблема рассматривалась в нескольких теоретических работах, начиная с работ Ларкина и Овчинникова в 70-ых годах 20 века. Оригинальным результатом является установление различных переходов в движущейся решетке вихрей Абрикосова, вызванных неравновесными эффектами и приводящими к большому значению  $\tau_{|\Delta|}$  (по сравнению с его равновесной величиной). Численные результаты подкрепляются аналитическими оценками и простыми физическими соображениями, что свидетельствует в пользу сделанных выводов. Данный результат также позволяет, хотя бы качественно, понять некоторые экспериментальные результаты по ВАХ тонких сверхпроводящих пленок помещенных в перпендикулярное магнитное поле.

Третья глава посвящена изучению нелокального резистивного отклика сверхпроводника в геометрии Холловского мостика, в зависимости от магнитного поля, направления тока и его величины. Данная задача была инспирирована двумя экспериментами, выполненными в различное время двумя экспериментальными группами. Автор диссертации внес большой вклад в понимание обнаруженных эффектов. В частности, теоретически было показано,

что нелокальный отклик возникает из-за межвихревого взаимодействия, а его немонотонная зависимость от магнитного поля связана с изменением структуры вихревой решетки в сложной холловской геометрии. Автором было установлено, что в случае больших токов значительную роль начинают играть неравновесные эффекты, что приводит к отсутствию зависимости знака нелокального напряжения от тока, и его зависимости от температуры. Для теоретического анализа автор использовал нестационарное уравнение Гинзбурга-Ландау в случае слабых токов (когда неравновесные эффекты малы) и подход Ларкина-Овчинникова для больших токов. Это позволило автору адекватно рассмотреть различные режимы.

В четвертой главе автором теоретически исследуется влияние неравновесных эффектов, связанных с приложенным напряжением к сверхпроводящему мостику, соединенным с нормальными берегами. Используя стационарное уравнение Гинзбурга-Ландау, с дополнительными членами, учитывающими влияние неравновесных эффектов, были рассчитаны ВАХи в режиме приложенного напряжения, найдены различные устойчивые симметричное и асимметричное состояния мостика, соответствующие одному и тому же значению напряжению, что является центральным результатом главы (позднее, похожие асимметричные состояния были обнаружены экспериментально на алюминиевом мостике). В главе также рассмотрена геометрия мостика, соответствующая нахождению в его центре сверхпроводящего кольца. Последняя задача была мотивирована экспериментом в подобной геометрии с алюминиевым кольцом и сравнение рассчитанных ВАХ с экспериментальными позволило подтвердить ранее сделанное утверждение (в работе голландских теоретиков) о распаривающем влиянии приложенного напряжения.

В пятой главе автором рассмотрены две задачи, связанные с конечным сопротивлением узких сверхпроводящих пленок, находящихся при температуре ниже температуры сверхпроводящего перехода. Исследованы случаи пленки с произвольным (меньше критического) током и нулевым магнитным полем, и случай пленки с малым током, находящейся в произвольном магнитном поле. Для решения поставленной задачи находились седловые состояния и определялась их энергия. Так как рассматривался диапазон температур, близкий к критической, то адекватным подходом являлось использование уравнений Гинзбурга-Ландау. Для нахождения их решения, соответствующего седловому состоянию, автором был разработан простой численный метод, имеющий ясную физическую интерпретацию. Используя данный метод автором были найдены энергии различных седловых состояний прямой и изогнутой сверхпроводящей пленки с током, близким к току распаривания; установлено, что для узких сверхпроводящих пленок с шириной  $w \sim \xi$  ( $\xi$  – длина когерентности) на зависимости критического поля  $I_c(H)$  возникает ярко выраженный пик в ненулевом поле вследствие краевого барьера на вход/выход вихрей и особенностями межвихревого взаимодействия в узких пленках. Последний результат объясняет результаты многочисленных экспериментов, в которых было обнаружено отрицательное магнитосопротивление узких сверхпроводящих пленок и немонотонная зависимость  $I_c(H)$ . Результаты с изогнутой пленкой

позволяют объяснить некоторые экспериментальные результаты по темновым отсчетам в сверхпроводниковых однофотонных детекторах, что говорит об обоснованности сделанных выводов.

В шестой главе автором исследуется физика работы перспективного сверхпроводящего детектора электромагнитного излучения – SSPD. С этой целью автором предложена модель, в рамках которой исследуется механизм разрушения сверхпроводящего состояния в узкой сверхпроводящей пленке, при наличии в центре пленки области с частично подавленной сверхпроводимостью в следствии поглощения фотона с энергией много большей щели в спектре возбуждения сверхпроводника. Модель принимает во внимание наличие двух масштабов во времени (времени изменения сверхпроводящего параметра порядка и времени релаксации в равновесие), что позволяет рассматривать ‘горячее пятно’ (область с подавленной  $\Delta$ ) как квазистационарный объект и исследовать стационарную задачу. Автором показано, что резистивное состояние в такой системе возникает при токе выше некоторого критического из-за рождения пар вихрь-антивихрь внутри области с подавленным параметром порядка и движения их к краям пленки. Данный результат был получен как в результате численного моделирования, так и с помощью аналитических расчетов, что подтверждает его обоснованность. Кроме того, в главе проводится прямое сравнение теоретических результатов с результатами двух различных экспериментов и найдено хорошее согласие, с использованием только одного подгоночного параметра.

В Заключение работы приведены основные результаты диссертации, которые отражают более чем 12-ти летнюю работу автора по данной тематике .

### **Оценка новизны и достоверности**

Результаты, определяющие научную новизну диссертационной работы Д.Ю. Водолазова, сводятся к следующему:

- Впервые показано, что конечное состояние, в которое переходит сверхпроводящее кольцо из неустойчивого токового состояния с током, близким к току распаривания, зависит от времени изменения модуля сверхпроводящего параметра порядка  $\tau_{|\Delta|}$ . Для неоднородного кольца с радиусом меньшим длины когерентности впервые продемонстрирована возможность возникновения одномерного квазивихревого состояния при величине магнитного потока сквозь кольцо, близкого к половине кванта магнитного потока.
- Впервые изучено влияние конечного времени изменения модуля сверхпроводящего параметра порядка  $\tau_{|\Delta|}$ , длины мостика, граничных условий на его концах и магнитного поля на величину тока возврата  $I_r$ , при котором периодический во времени процесс проскальзывания фазы прекращается в сверхпроводящем мостике и мостик переходит в сверхпроводящее состояние. Исследована динамика сверхпроводящего параметра порядка в сверхпроводящем мостике в режиме приложенного напряжения и рассчитана его ВАХ.

- Впервые показано, что достаточно большое  $\tau_{|Δ|}$  приводит к различным перестройкам структуры движущейся решетки вихрей Абрикосова и возможны режимы, когда в сверхпроводящей пленке могут сосуществовать быстро и медленно движущиеся вихри.
- Впервые установлено, что нелокальный резистивный отклик в сверхпроводящем Холловском мостике обусловлен межвихревым отталкиванием. Показано, что нелокальный отклик является несимметричным относительно направления транспортного тока, что объясняется разными условиями для входа/выхода вихрей через края сверхпроводника. Показано, что при достаточно больших скоростях вихрей в контакте с заданным током знак нелокального напряжения зависит от доминирующего механизма неравновесия при данной температуре.
- Впервые показано, что в сверхпроводящем мостике, ограниченном нормальными берегами, в режиме приложенного напряжения возможно наличие как симметричных, так и асимметричных устойчивых состояний, которые характеризуются симметричным и асимметричным распределением параметра порядка относительно центра мостика.
- В рамках модели Гинзбурга-Ландау впервые найдены энергии различных седловых состояний узких сверхпроводящих пленок различной ширины в диапазоне токов от нуля до тока распаривания. Впервые исследовано влияние изгиба пленки на зависимость энергии седлового состояния от тока.
- Впервые исследован пик-эффект и рассчитано магнитосопротивление (связанное с термоактивационным входом/выходом вихрей) узких сверхпроводящих пленок в большом диапазоне их ширин. Найден интервал ширин пленок, для которых пик-эффект и отрицательное магнитосопротивление наиболее ярко выражены.
- На основе феноменологической модели горячего пятна впервые последовательно предложен и обоснован механизм детектирования одиночных фотонов сверхпроводящими пленками с заданным током. Впервые рассчитана зависимость порогового тока, при котором эффективность детектирования однофотонного сверхпроводящего детектора (SSPD) выходит на насыщение в зависимости от энергии поглощенного фотона.

Достоверность приведенных в работе результатов и обоснованность научных положений и выводов, содержащихся в заключительной части диссертации, подтверждаются анализом пределов применимости используемых методов и приближений, а также сопоставлением с результатами других авторов и с экспериментом в тех случаях, когда это возможно, поэтому не вызывают сомнений.

Диссертационная работа Д.Ю. Водолазова является серьезным законченным теоретическим исследованием, расширяющим современные представления об особенностях резистивного состояния и неравновесных

эффектах в тонких и узких сверхпроводящих пленках. Она, несомненно, будет стимулировать дальнейшие исследования в этой важной и интересной области. Проведенные Д.Ю. Водолазовым теоретические исследования будут иметь практическое применение при расчетах элементной базы будущей сверхпроводящей электроники и анализе параметров перспективных болометров терагерцового излучения.

Отмечая достоинства диссертации, ее научную и практическую значимость, следует высказать **замечания:**

- в работе последовательно используется метод нестационарных уравнений Гинзбурга-Ландау, приведен ряд ссылок, в которых обосновывается возможность использования этого метода. Однако отсутствует ссылка на известный обзор К.Ю. Arutyunov, D.S. Golubev, A.D. Zaikin, Superconductivity in one dimension, Physics Reports 464 (2008) 1-70, где обсуждаются ограничения на использования этого метода;
- на стр.86 работы присутствует опечатка – не пропечатан номер рисунка.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации и не затрагивают сути полученных результатов. Диссертация представляет собой результат многолетних исследований ее автора в чрезвычайно актуальной области, является законченным научным исследованием.

Основные результаты диссертационной работы Д.Ю.Водолазова опубликованы в 26 печатных работах в ведущих зарубежных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и индексированных в базах данных Scopus и Web of Science. Представленные результаты обсуждались на 13 научно-технических конференциях, в том числе международных. Опубликованные статьи в полной мере раскрывают положения диссертации, выносимые на защиту. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Основные результаты диссертационной работы Д.Ю.Водолазова могут быть использованы в Московском Государственном университете им. М.В.Ломоносова, МПГУ, Институте радиотехники и электроники РАН, Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, Физико-техническом институте РАН, Физическом институте им. Лебедева РАН, Институте общей физики РАН, ГНИИФП, и других институтах.

Диссертация Д.Ю.Водолазова обсуждалась на семинаре отдела микроэлектроники и лаборатории физики наноструктур НИИЯФ МГУ 1 апреля 2015 года.

## **Заключение**

Диссертация Д.Ю.Водолазова представляет собой добротную и законченную научную работу, выполненную на высоком научном уровне и обладающую внутренним единством. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа отвечает требованиям п.9 Положения о порядке присуждения учёных степеней, предъявляемых к докторским диссертациям, а ее автор Водолазов Денис Юрьевич, несомненно, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук  
ведущий научный сотрудник  
Научно-исследовательский институт  
ядерной физики им. Д.В. Скобельцына  
Московского государственного  
университета им. М. В. Ломоносова  
119234, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2.  
Телефон (495) 939-25-88  
Электронная почта igor-devyatov@yandex.ru

И.А. ДЕВЯТОВ

Подпись И.А. Девятова удостоверяю  
Директор НИИЯФ МГУ,  
проф.  
Дата: 19 мая 2015 г.



ПАНАСЮК М.И.