

ОТЗЫВ  
Официального оппонента на диссертационную работу

Водолазова 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.

Диссертационная работа Д. Ю. Водолазова посвящена теоретическому исследованию такого состояния сверхпроводников, в котором сверхпроводящий параметр порядка подавлен, но не полностью, в результате чего сверхпроводник приобретает конечное значение сопротивления, меньшее чем в нормальном состоянии. Обычно это состояние связано с образованием и движением вихрей под действием как транспортного тока, так и внешнего магнитного поля. Более интересными и менее изученными являются рассмотренные в диссертации случаи, когда резистивное состояние возникает в узких тонких пленках сверхпроводника за счет образования центров проскальзывания фазы, а также вблизи контакта сверхпроводника с нормальным металлом.

**Тема диссертации.** Тема диссертационной работы связана с изучением резистивного состояния сверхпроводящих систем микронных размеров, с толщиной менее лондоновской глубины проникновения поля и шириной от нескольких длин когерентности до менее одной длины когерентности. В диссертации рассматриваются системы, находящихся в переходном режиме от микро- к макроуровню.

**Актуальность тематики.** Эта тематика приобретает все большую актуальность в связи с бурным развитием технологий миниатюризации. Помимо интереса с точки зрения фундаментальной науки, исследования в этом направлении, безусловно, перспективны и для практических приложений (сверхпроводниковая электроника, однофотонные сверхпроводниковые детекторы излучения и т.п.). Вихри в тонких сверхпроводниковых структурах являются концептуальным базисом перспективных квантовых устройств, таких как когерентные генераторы ТГц излучения, кубиты для квантовых вычислений, в которых необходима контролируемая динамика генерации и движения вихрей.

**Объектами исследования** в диссертационной работе являются узкие и тонкие сверхпроводящие пленки различной геометрии, имеющие прямое отношение к экспериментально изучаемым микроструктурам с размерами микронного диапазона.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.**

Диссертация объемом в 236 страниц состоит из шести глав, заключения, списка цитируемой литературы (183 наименования), а также списка публикаций автора по теме диссертации.

В *Главе Введение* обоснована актуальность тематики, представлен краткий обзор предыдущих работ по теме диссертации, изложены цели диссертационной работы и методы решения поставленных задач, сформулированы положения выносимые на защиту. Представленный обзор литературы полон и отражает современное состояние исследований по выбранной тематике.

В *Главе 1* (*Динамика сверхпроводящего параметра порядка в “грязных” сверхпроводящих мостиках и кольцах. Локальное приближение*), в ее 7 разделах исследуются свойства резистивного состояния в сверхпроводящих тонкопленочных кольцах и мостиках. Рассмотрение проведено вблизи критической температуры, что позволило автору

использовать локальное приближение и рассматривать лишь малые отклонения от равновесия квазичастичной функции распределения. Установлено, что основным источником неравновесности в этой области температур являются изменения параметра порядка во времени. Автором изучена динамика параметра порядка, динамика переходов между метастабильными состояниями сверхпроводящих колец, динамика проскальзывания фазы, а также влияние внешнего низкочастотного электромагнитного излучения на процесс проскальзывание фазы. Полученные знания применены к практически важным задачам, таким как описание вольт-амперных характеристик сверхпроводящих мостиков вблизи критической температуры, их гистерезиса, а также исследовано влияние магнитного поля. Сделанное заключение о лавинообразном характере изменения завихренности и намагниченности сверхпроводящих колец подтверждается несколькими независимыми экспериментами. Положение о влиянии магнитного поля, длины мостика и граничных условий на вольтамперную характеристику сверхпроводящего мостика основывается как на численных расчетах, так и на аналитических оценках, а также согласуется с экспериментом.

В *Главе 2* (*Трансформация движущейся решетки вихрей Абрикосова, вызванная неравновесными эффектами*) рассмотрен вопрос о влиянии изменения параметра порядка во времени на динамику движущейся решетки вихрей Абрикосова. Выявлен и описан процесс трансформации решетки вихрей в движущиеся одномерные вихревые цепочки. Установлено, как переходы в структуре цепочек вихрей проявляются в виде особенностей на вольт-амперных характеристиках. Основные выводы главы обоснованы результатами численных расчетов, аналитическими оценками, а также рядом экспериментальных результатов, полученных ранее.

В *Главе 3* (*Диодный эффект и неравновесные эффекты в холловском сверхпроводящем мостике*) диссертационной работы теоретически исследуется нелокальный отклик проводимости сверхпроводникового холловского мостика. Показано, что нелокальный отклик возникает из-за взаимодействия вихрей, а знак нелокального напряжения зависит от доминирующего механизма неравновесия. Эта задача связана с экспериментами, проведенными двумя экспериментальными группами при участии автора диссертации, а сделанные выводы основаны на сравнительном анализе экспериментальных результатов и теоретических расчетов, что подтверждает их справедливость.

В *Главе 4* (*Стационарные состояния квазидвумерного сверхпроводящего мостика, ограниченного нормальными “берегами”, в режиме приложенного напряжения*) диссертационной работы изучаются свойства узких N-S-N мостиков с берегами из нормального металла. Автором обнаружено, что при напряжениях на мостике, превышающих критическое значение, возникают асимметричные состояния, характеризуемые несимметричным (относительно центра мостика) распределением сверхпроводящего параметра порядка. Другой результат этой главы – объяснение экспериментально обнаруженной резкой немонотонной зависимости критического тока от магнитного поля, характер которой меняется при изменении температуры вблизи критической. При теоретическом рассмотрении задач главы использовались хорошо известные методы и подходы, а сделанные выводы согласуются с выводами, полученными различными теоретическими группами при решении схожих проблем, что свидетельствуют в пользу их правильности.

В *Главе 5* (*Пороговые (седловые) флуктуации в узких сверхпроводящих пленках*) диссертационной работы рассматриваются неустойчивости, связанные с развитием не малых флуктуаций параметра порядка в пленках конечной ширины (большой длины когерентности). Показано, что в зависимости от приложенного тока флуктуации приводят либо к появлению линии проскальзывания фазы, либо движущегося вихря (в нулевом магнитном поле). Появление таких флуктуаций приводит к переключению пленки в резистивное или нормальное состояние при пропускании большого тока, либо к

появлению среднего ненулевого электрического напряжения в пленке – при малых токах. Сделанные в этой главе выводы подтверждаются многочисленными экспериментами и в предельных случаях совпадают с хорошо известными результатами, полученными в лондоновском пределе.

В *Главе 6 (Фотоиндуцированное рождение пары вихрь-антивихрь в токонесущей узкой сверхпроводящей пленке)* рассмотрен процесс возникновения в пленке областей с подавленным параметром порядка, возникающих при поглощении фотона и последующей генерации неравновесных квазичастиц. Эта задача связана с результатами экспериментов по однофотонному детектированию инфракрасного и видимого излучения. Основным результатом главы является заключение о вовлеченности сверхпроводящих вихрей в процесс возникновения резистивного отклика после поглощения одиночного фотона. Данный вывод основан на результатах численного счета в рамках физически обоснованной модели, аналитических вычислениях в рамках модели Лондонов и подкреплен сравнением с доступными экспериментальными результатами.

По материалам исследований автором опубликовано 26 научных работ в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК, а также 14 тезисов конференций и препринтов. Основные результаты неоднократно представлялись автором на отечественных и международных научных форумах.

Новизна и достоверность. В диссертации получено множество новых результатов. Как правило, рассматриваемые в диссертации вопросы стимулированы экспериментами, результаты которых являлись загадочными и нуждались в теоретическом объяснении. Автором выявлены множество эффектов, обусловленных временной динамикой сверхпроводящего параметра порядка. В частности, автором решена задача о динамике состояния сверхпроводящего кольца с током близким к критическому и предсказана возможность возникновения одномерного вихревого состояния для неоднородного кольца с радиусом меньшим длины когерентности. Теоретически исследована динамика сверхпроводящего параметра порядка в сверхпроводящем мостике и рассчитана его вольт-амперная характеристика. Теоретически изучена сложная динамика движущейся решетки вихрей Абрикосова. Подробно изучен и объяснен нелокальный отклик в сверхпроводящем мостике холловской геометрии, обусловленный взаимодействием вихрей. Для сверхпроводящего мостика N-S-N с берегами из нормального металла найдены устойчивые состояния, характеризующиеся различным пространственным распределением параметра порядка. Для узких сверхпроводящих пленок вычислены значения энергии метастабильных состояний в широком диапазоне токов. Изучены процессы термоактивационного входа/выхода вихрей и связанный с ними пик-эффект на вольт-амперных характеристиках. Наконец, автором предложен вихревой механизм детектирования фотонов в сверхпроводящих пленках с транспортным током.

Важным достоинством диссертации Водолазова является постоянное сопоставление полученных теоретических результатов с экспериментами, выявление ограничений и недостатков предшествующих вычислений, оправданности сделанных в них предположений и анализ их последствий. С этой точки зрения диссертация имеет большую педагогическую ценность. Замечательная особенность диссертации состоит в единообразном подходе к большому числу задач, в которых автору удалось выявить главные действующие механизмы. Теоретические результаты автора не только объяснили ряд казавшихся загадочными экспериментальных результатов, но и служат стимулом для постановки новых экспериментов по проверке теоретических предсказаний автора. Последнее обстоятельство делает диссертационную работу особенно ценной для экспериментаторов в данной области. Достоверность полученных в работе результатов гарантируется надежностью применявшимся разнообразных аналитических методов, согласием с теоретическими результатами, полученными в других работах, и согласием с данными физических и численных экспериментов.

Некоторые замечания, которые можно сделать по тексту диссертации:

1. В разделе 1.2 вычисляется динамика поведения сверхпроводящего кольца. Но результаты вычислений подробно сопоставляются только с одним экспериментом [70] – измерением полевой зависимости намагниченности кольца. Результаты же других измерений [71,72] обсуждаются только на словах, без приведения рисунков, что затрудняет проверку соответствия теории экспериментам.
2. Во всех главах диссертации автор во вводном параграфе списком перечисляет свои публикации, относящиеся в данной главе. Далее, при изложении собственно результатов, каких-либо ссылок на свои работы автор не дает. Такая форма изложения не удобна для читателя, так как затрудняет понимание того, какие из описываемых результатов являются оригинальными.
3. Во введении к Главе 2 автор использует неудачную терминологию, описывая изменение параметра порядка. Написано буквально следующее: “ $\Delta$  уменьшается впереди вихря и увеличивается позади движущегося вихря”- это неоднозначная формулировка сбивает читателя с толку. На самом деле автор имеет в виду, конечно, изменение знака производной  $d\Delta/dt$ , что проясняется позднее на стр.91.
4. Подавляющее большинство теоретических результатов автора объясняют результаты уже проведенных экспериментов и т.о. обращены в прошлое. Редкими исключениями являются предсказания новых эффектов в намагниченности СП пленки в окрестности  $T_c$  (стр.127), а также предсказание асимметричного состояния и предложение геометрии структуры для его обнаружения (стр. 142). Для такого обширного теоретического исследования хотелось бы видеть большее число предсказаний.

Эти замечания, однако, носят скорее характер пожеланий для развития теоретических исследований автора и для полировки текста, который мог бы составить монографию. Они нисколько не умаляют общей высокой оценки диссертации, представляющей собой систематическое подробное теоретическое исследование, открывающее новое направление в исследовании сверхпроводящих структур микронных размеров. Результаты работы могут быть использованы в ведущих научных центрах, таких как Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, ИФП им. П. Л. Капицы РАН, ИФТТ РАН, Институт физики микроструктур РАН, Институт физики металлов УрО РАН, Институт физики полупроводников СО РАН, Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова, Новосибирский Государственный Университет, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». Основные результаты диссертации Д. Ю. Водолазова были опубликованы в 26 статьях в ведущих международных научных журналах, включая Physical Review Letters, Europhysics Letters, Physica C, Physical Review B, Journal of Applied Physics, а также докладывались автором на многих российских и международных конференциях.

**Заключение.** Диссертация Водолазова Дениса Юрьевича «Резистивное состояние и неравновесные эффекты в узких сверхпроводящих пленках», является выдающимся научным трудом, соответствующим монографии по широте круга рассматриваемых вопросов и глубине их анализа. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы.

Работа написана доступным языком для специалистов, работающих в области физики сверхпроводников, содержит иллюстрирующие рисунки, грамотно и аккуратно оформлена. По каждой главе и работе в целом сделаны четкие выводы. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа отвечает требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор,

Водолазов Денис Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент  
Доктор физико-математических наук  
Главный научный сотрудник,  
Заведующий отделом высокотемпературной сверхпроводимости и наноструктур  
Отделения физики твердого тела  
Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53  
Телефон (499) 135-42-78  
Электронная почта pudalov@lebedev.ru

Пудалов В.М.  
13.05.2015г

Подпись В.М. Пудалова удостоверяю:  
Ученый секретарь ФИАН,  
д.ф.-м.н.

Богачев С.А.

