

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **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».

Благодаря достижениям современной технологии, сверхпроводники малых размеров, в том числе тонкопленочные образцы, стали предметом интенсивного экспериментального исследования и реальным объектом для приложений. Резистивное состояние и неравновесные процессы в таких системах имеют свою собственную специфику, которая качественно отличается от аналогичных процессов в массивных сверхпроводниках. Сверхпроводники малых размеров чувствительны к внешним тепловым и электромагнитным воздействиям. По этой причине они перспективны для применения в высокочувствительных датчиках, например, в приборах, регистрирующих однофотонные процессы. Теоретическое и экспериментальное исследование резистивных и неравновесных процессов в таких системах интересно для физики сверхпроводимости и необходимо для создания новых технических сверхпроводниковых устройств. Однако, до начала двухтысячных годов данная проблема была изучена весьма фрагментарно. Автор начал свои исследования по теме диссертации именно в начале двухтысячных годов и принял активное участие в решении ряда важных задач в рассматриваемой области. В этой связи **актуальность** диссертации Д.Ю. Водолазова, посвященной теоретическому исследованию резистивного состояния и неравновесных процессов в узких сверхпроводящих пленках, не вызывает сомнений.

Среди результатов, полученных в диссертации, я бы отметил следующие наиболее интересные.

Показано, что завихренность (*vorticity*) в узком сверхпроводящем кольце, радиус которого меньше длины когерентности, меняется лавинообразно в результате последовательных проскальзываний фазы сверхпроводящего параметра порядка в одном и то же месте кольца. Изучено влияние на динамику данного процесса температуры и локальной неоднородности образца. Проведено сопоставление теоретических результатов с экспериментом.

Показано, что увеличение времени релаксации модуля параметра порядка, обусловленное неравновесными процессами, приводит к ряду трансформаций решетки движущихся вихрей Абрикосова при изменении величины транспортного тока. Показано,

что в сверхпроводящей пленке могут возникать линейные области с динамически подавленным параметром порядка. Эти области ориентированы поперек тока. Вихри в них движутся очень быстро, они сильно модифицированы и схожи по структуре с джозефсоновскими вихрями. Таким образом, в рассматриваемом режиме в образце сосуществуют быстро и медленно движущиеся вихри. Данный результат является весьма неожиданным.

Исследован сигнал в холловском сверхпроводящем мостике, находящемся в резистивном состоянии. Показано, что для описания возможных эффектов необходимо учитывать отталкивание вихрей, перестройку вихревой структуры с изменением тока или поля, а также условия входа и выхода вихрей через края образца. Показано, что при больших скоростях вихрей (большие токи) знак напряжения в мостике перестает зависеть от направления тока, а определяется эффектами неравновесности. Результаты данного теоретического исследования хорошо согласуются с экспериментом.

Показано, что в узких сверхпроводящих пленках возникает своеобразный пик-эффект в зависимости критического тока от магнитного поля. Он обусловлен наличием краевого барьера на вход и выход вихрей и особенностями межвихревого взаимодействия в узких пленках. Данный результат также подтвержден экспериментом.

Основываясь на феноменологической модели «горячего пятна», автор предложил способ детектирования одиночных фотонов с помощью узких сверхпроводящих пленок с транспортным током. Им проанализирована эффективность подобного детектора в зависимости от частоты детектируемых фотонов, вычислен пороговый ток детектирования в зависимости от частоты.

Я отметил здесь только пять наиболее интересных результатов, полученных в диссертации. Однако, и не перечисленные в моем отзыве результаты, которые автор упомянул, как основные, весьма интересны и заслуживают внимания. В этой связи необходимо отметить, что автором выполнен большой объем теоретических исследований, а совокупность их результатов по качеству и объему вполне соответствует уровню диссертации на соискание степени доктора физико-математических наук.

Важной особенностью проделанной работы является то, что большинство исследований выполнялось в тесном контакте с ведущими экспериментальными лабораториями, работающими в данной области. То есть, результаты были получены в нужное время и в нужном месте. Они внесли своевременный вклад в изучение актуальной проблемы физики сверхпроводимости и были востребованы коллегами. Недаром публикации по диссертации вышли в ведущих международных научных журналах таких,

как Physical Review B и Physical Review Letters, а многие результаты автора подтверждены экспериментами.

Д.Ю. Водолазов в ходе исследований продемонстрировал незаурядную математическую подготовку. Им численно и аналитически решались и анализировались системы сложных нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных.

Достоверность результатов и обоснованность выводов, представленных в диссертации Д.Ю. Водолазова, подтверждаются анализом применимости используемых теоретических подходов и методов, сопоставлением теоретических результатов с экспериментом, а также, когда это возможно, сопоставлением своих результатов с результатами других авторов.

Новизна полученных результатов подтверждается литературным анализом работ других авторов, а также публикацией результатов диссертации в ведущих рецензируемых журналах. Основываясь на собственном знании состояния исследований в данной области, могу утверждать, что основные результаты диссертации Д.Ю. Водолазова являются новыми и интересными.

Диссертация написана достаточно ясным языком, содержит весьма полный анализ литературных источников по рассматриваемой тематике. В целом диссертация производит весьма благоприятное впечатление. Однако, именно к форме изложения материала у меня есть замечания (см. ниже).

Естественно, в диссертации Д.Ю. Водолазова имеются определенные недостатки. На мой взгляд, они носят, в основном, методический характер, а также связаны с оформлением работы.

Основные результаты диссертации получены в рамках нестационарной теории Гинзбурга-Ландау. Во многих случаях такой подход дает вполне разумные, согласующиеся с экспериментом результаты. Однако, насколько мне известно, строго вывести уравнения нелинейной нестационарной теории Гинзбурга-Ландау из макроскопической теории в достаточно общем случае не удастся из-за особенностей плотности состояний на краю сверхпроводящей щели. На мой взгляд, данную проблему следовало бы обсудить в таком фундаментальном труде, как докторская диссертация. Особенно был бы интересно узнать, есть ли какие-то новые обоснования подобного подхода (теоретические или эмпирические) по сравнению с соображениями, изложенными в классических обзорах и монографиях конца прошедшего века.

На странице 25 диссертации автор пишет, что в основных уравнениях теории (1.2) нельзя: «полностью описать джоулев «разогрев» ... Однако, вблизи критической температуры сверхпроводника джоулев разогрев можно не учитывать, так как он мал по

параметру $\sim(1-T/T_c)$...». В этом важном для дальнейшего утверждения мне не понятно, что значит «полностью описать». Разогрев учитывается частично или он отброшен совсем? Не ясно, почему в первом случае слово «разогрев» взято в кавычки. Но самое главное, что означает малость по параметру $(1-T/T_c)$? Область, когда джоулев разогрев мал совпадает с областью применимости теории Гинзбурга-Ландау? Значительно уже или шире? Привести какие-то количественные оценки для тех или иных случаев было бы весьма полезно.

Следующее замечание отчасти связано с предыдущим. Часть результатов, обсуждаемых в диссертации экспериментов, может быть также интерпретирована с использованием эффектов разогрева (по крайней мере качественно). Об этом сказано в диссертации и автором. Оценка величины джоулева разогрева позволила бы более определенно судить о механизмах наблюдаемых эффектов.

В диссертации рассматриваются явления в сверхпроводниках малых размеров вблизи критической температуры. Мне представляется естественным, что в таких условиях важную роль могут играть флуктуации. Возможно, что это не так. Однако, в любом случае, обсуждение роли флуктуаций или хотя бы краткое упоминание о них было бы правильным.

К сожалению, в тексте диссертации и автореферата содержится значительное число стилистических и грамматических ошибок. Естественно, я не буду перечислять все, а лишь отмечу те, что относятся к перечню основных результатов диссертации, изложенных во Введении и автореферате. В разделе «Цели и задачи» (автореферат, стр. 8, диссертация, стр. 12), не ясно, что такое холловский сверхпроводник. Там же, «исследование роли вихрей на условия ...». В разделе «Научная новизна» (автореферат, стр. 8,9, диссертация, стр. 13,14), пункт 3, по тексту не ясно медленные и быстрые вихри могут сосуществовать в одном режиме или это разные режимы. В пункте 6 (и по всему тексту диссертации) странный термин «седловые состояния». Если в основном тексте диссертации можно понять, что это значит, то во Введении, что означает данный термин, не понятно. В разделе «Теоретическая и практическая значимость работы» (автореферат, стр. 9, диссертация, стр. 14), не ясно, что такое «локальные и нелокальные геометрии». В разделе «Положения, выносимые на защиту» (автореферат, стр. 10, диссертация, стр. 15), пункт 2, не ясно, что означают слова «до тока возврата» и далее.

Перечисленные замечания относятся к оформлению диссертации и имеют, в основном, методический и рекомендательный характер. Они не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Д.Ю. Водолазова.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Содержание диссертации соответствует специальности 01.04.07 — физика конденсированного состояния.

Диссертация Водолазова Дениса Юрьевича является законченным научным исследованием. Основные результаты диссертационной работы опубликованы полно и своевременно в ведущих научных журналах. Они докладывались на многочисленных конференциях и семинарах в России и за рубежом.

Диссертация выполнена на высоком научном уровне, получены результаты важные для приложений и интересные для физики сверхпроводимости. Д.Ю. Водолазов продемонстрировал высокую квалификацию теоретика и общую научную эрудицию. Представленная диссертация удовлетворяет требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а соискатель заслуживает присвоения искомой ученой степени по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

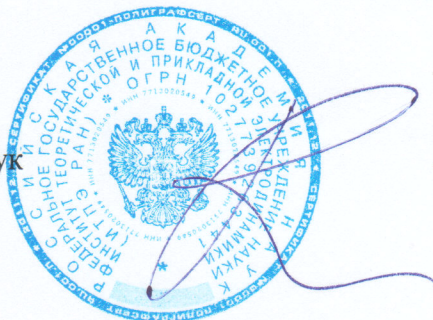
Зав. лабораторией,
доктор физико-математических наук

А. Л. Рахманов
25.05.2015

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук (ИТПЭ РАН), лаборатория теоретической электродинамики конденсированного состояния.

125412 Москва, ул. Ижорская, д. 13,
тел. +7(495)362-51-47, e-mail: alrakhmanov@mail.ru

Подпись А.Л. Рахманова заверяю:
ученый секретарь ИТПЭ РАН
кандидат физико-математических наук



А.Т. Кунавин