

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию **КОРНЕЕВА** Александра Александровича

**«Однофотонные детекторы видимого и инфракрасного диапазонов из тонких  
сверхпроводящих пленок NbN и  $\alpha$ -MoSi»,**

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по  
специальности 01.04.05 –Оптика

В настоящее время значительно возрос интерес к высокочувствительным детекторам ИК диапазона, обладающим высоким быстродействием и способным регистрировать одиночные кванты света. Для многих научных и технических задач, включая телекоммуникационные и оптические системы, квантовую оптику, квантовую криптографию, такие детекторы являются ключевым элементом.

В последнее десятилетие сверхпроводниковые однофотонные детекторы, которые часто обозначаются как Superconducting Single Photon Detectors (SSPDs), были предметом повышенного интереса. Участники большого числа исследовательских групп из различных стран мира внесли свой вклад в развитие этих устройств. Применение детекторов данного типа существенным образом расширило возможности физического эксперимента в спектроскопии, квантовой и нелинейной оптике. Именно поэтому тема диссертации А.А. Корнеева, посвященной исследованию **новых перспективных** детекторов на основе сверхпроводниковых наноструктур, способных работать в режиме регистрации отдельных фотонов в условиях больших и малых световых потоков, является **актуальной**.

**Основной целью** диссертационной работы А.А. Корнеева являлось исследование механизмов возникновения резистивного состояния при поглощении одиночных фотонов видимого и ИК диапазонов и механизмов возникновения спонтанного резистивного состояния в узких полосках нанометрового масштаба на основе разупорядоченных сверхпроводниковых пленок нитрида ниобия (NbN) и аморфных пленок силицида молибдена ( $\alpha$ -MoSi), направленное на создание практического однофотонного детектора, обладающего высокой чувствительностью и быстродействием. С этой целью был проделан большой комплекс работ, начавшийся после открытия эффекта однофотонного детектирования в узких и тонких сверхпроводниковых полосках: разработка и совершенствование модели горячего пятна с учетом начального механизма релаксации энергии в тонкой сверхпроводящей пленке и механизмов формирования вихрей; создание детектора одиночных фотонов и исследование таких его характеристик, как квантовая эффективность, скорость темного счета,

быстродействие и джиттер, спектральная чувствительность; создание практического прибора на основе разработанного детектора. Несомненным достоинством диссертационной работы является большая ширина охвата в постановке экспериментальных задач, позволившая диссертанту получить новые результаты и добиться существенного продвижения не только в решении поставленных научно-исследовательских проблем, но и в практических приложениях созданных устройств.

Диссертация (общим объемом 219 стр., включая 88 рисунков и 11 таблиц) состоит из введения, шести глав, заключения, списка публикаций автора из 55 научных работ и библиографии, содержащей 188 наименований.

**Во введении** сформулирована постановка задачи и обосновывается актуальность выбранной темы, описаны объекты и методы исследования, практическая значимость работы, научные положения, выносимые на защиту. В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

**В первой** главе диссертации приведен обзор литературы по теории и экспериментальным данным, описывающим эффект электронного разогрева в тонких неупорядоченных сверхпроводниковых пленках и процессы релаксации энергии одиночного фотона в тонкой металлической пленке, находящейся в нормальном состоянии. Приведены работы, в которых для описания резистивного состояния предлагается концепция «горячего пятна» (локальной области горячих электронов). Подробно описана работа, в которой был экспериментально обнаружен эффект однофотонного детектирования в сверхпроводниковых узких и тонких полосках, ранее предсказанный автором настоящей диссертационной работы.

**Во второй** главе подробно описаны методы и технологические маршруты изготовления изучаемых образцов, представляющих собой наноструктуры на основе тонких пленок нитрида ниобия (NbN) и силицида молибдена ( $\alpha$ -MoSi). Разработанные в диссертации тонкопленочные технологии позволили создать сверхпроводящие детекторы площадью до 10мкм x 10мкм с шириной полоски порядка 100 нм. Методики и экспериментальные схемы были разработаны для проведения экспериментов с малыми потоками фотонов, исследования импульсов с субнаносекундной длительностью, исследования вклада эффектов термически активированного и квантового проскальзывания фазы в скорость темного счета изучаемых сверхпроводниковых однофотонных детекторов.

**Третья** глава посвящена детальному изучению механизма однофотонного отклика, обнаруженному в узких полосках разупорядоченных сверхпроводниковых пленок NbN.

В качестве первичной модели, дающей представления о физических процессах, происходящих после поглощения фотона в рассматриваемых сверхпроводниковых полосках в условиях протекания тока смещения, близкого к критическому, была предложена так называемая модель «горячего пятна». В рамках этой модели обсуждаются вопросы механизма релаксации энергии после поглощения фотона, влияния джоулева разогрева на динамику развития резистивного состояния, условия самопроизвольного восстановления сверхпроводимости в пленке. Подробно исследованы условия возникновения однофотонного отклика, осциллограммы импульса напряжения, зависимости числа фотоотчетов от числа падающих фотонов на разных длинах волн. Однако показано, что экспериментально полученные спектральные чувствительности и температурные зависимости квантовой эффективности несколько отличаются от предсказаний модели «горячего пятна».

Необходимо отметить, что за время работы над диссертацией появилась еще одна модель, описывающая резистивное состояние, названная моделью «горячей перемычки». Так, модель «горячего пятна» предполагает появление области с локальным подавлением сверхпроводимости после поглощения фотона полоской, по которой течет ток, причем размер этой области меньше полной ширины полоски. Далее плотность сверхпроводящего тока, огибающего область «пятна», возрастает и при некотором токе детектирования, меньшем, чем критический ток без «горячего пятна», зарождаются (или входят через край полоски) абрикосовские вихри, что приводит к появлению резистивной области. Согласно модели «горячей перемычки» поглощенный фотон создает горячие квазичастицы, равномерно распределенные по всей ширине полоски. Когда ток смещения становится больше, чем критический ток полоски с «горячей перемычкой», но меньше, чем ток без «перемычки», появляется резистивная область. С целью выяснения правомерности одной из этих моделей автором работы были проведены исследования скорости счета SSPD в магнитных полях на разных длинах волн. Полученные экспериментальные факты удалось объяснить в рамках вихревой модели «горячего пятна», в предположении, что резистивное состояние наступает в детекторе при токе, при котором вихрь перестает пиннинговаться в «горячем пятне».

**Четвертая** глава посвящена исследованию явления спонтанного возникновения резистивного состояния в однофотонных сверхпроводниковых детекторах в виде узких полосок. Данное исследование представляется достаточно важным как с фундаментальной точки зрения, так и с практической. Именно спонтанное возникновение сопротивления в квазидвумерных сверхпроводящих полосках (коим является чувствительный элемент детектора) определяет скорость ложных срабатываний детектора, накладывая фундаментальные физические ограничения на их минимальную величину.

Продemonстрированные экспоненциальные зависимости скорости темного счета свидетельствуют о сверхпроводящих флуктуациях параметра порядка в двумерных сверхпроводниковых полосках. В качестве дополнительного способа проверки утверждения о том, что именно флуктуационные механизмы являются причиной темного счета, автором было проведено исследование влияния магнитного поля на скорость темного счета. Экспериментальные факты сдвига темных отсчетов в сторону меньших полей и уменьшения темных отсчетов с уменьшением тока по экспоненциальному закону были объяснены зависимостью тока от энергетического барьера для входа абрикосовского вихря в полоску. Кроме того, исследование зависимостей критического тока от магнитного поля позволило сделать вывод о влиянии размера и положения внутренних и краевых дефектов на скорость темного счета.

В работе впервые статистическими методами, путем измерения токов переключения из сверхпроводящего состояния в резистивное были продемонстрированы макроскопические квантовые проскальзывания фазы. Использование широкого диапазона температур в эксперименте показало, что при температурах выше 2.5 К доминирует многократное термически активированное проскальзывание фазы; в интервале температур от 1.7 К до 2.5 К преобладает однократное проскальзывание фазы; при температуре ниже 1.7 К наблюдается макроскопическое квантовое туннелирование.

В **пятой** главе исследуются однофотонные детекторы на основе аморфных пленок силицида молибдена. Результаты этой главы представляются весьма интересными и актуальными. Несмотря на то, что к настоящему времени изучено достаточно много новых материалов, перспективных для создания однофотонных детекторов, оптимального материала до сих пор не найдено, за исключением нитрида ниобия (NbN). Аморфные пленки представляются достаточно привлекательными в качестве материала для SSPD из-за критической температуры, перестраиваемой в широком диапазоне в зависимости от стехиометрии пленки, структурной однородности, отсутствием границ зерен, что делает их менее чувствительными к качеству подложки и дает возможность путем применения оптического микрорезонатора получать высокоэффективные детекторы.

Представлены результаты по изучению механизма работы однофотонного детектора на основе пленки силицида молибдена и измерению его характеристик. Исследования скорости счета фотонов, скорости темного счета и критического тока в магнитных полях подтвердили роль вихрей в механизме детектирования фотонов и механизме возникновения

темновых отсчетов в  $\alpha$ -MoSi однофотонном детекторе аналогичную их роли в механизмах работы NbN SSPD.

**Шестая** глава посвящена практическим устройствам на основе однофотонных детекторов из сверхпроводников. Следует подчеркнуть, что проведенные соискателем исследования позволили разработать практический прибор на основе SSPD, значительно превосходящий существующие аналоги однофотонных детекторов по чувствительности и быстродействию.

Исследуемый детектор был успешно применен для неразрушающей диагностики сверхбольших интегральных микросхем, изготовленных по КМОП технологии. Была разработана лабораторная установка для тестирования, опробован метод оптического анализа микросхем с пикосекундным разрешением для многослойных образцов с применением сверхпроводниковых SSPD путем детектирования излучения электронов в переключающихся полевых транзисторах.

Также была продемонстрирована регистрация нейтральных молекул (триптофана, гемоглобина, миоглобина, инсулина, грамицидина) и низкоэнергичных ионов (ионов гелия с энергией 200 эВ) с помощью NbN детектора методом регистрации распределения по времени импульсного молекулярного пучка. Данное приложение может быть полезно для волновой интерферометрии массивных молекул, в молекулярной метрологии и является хорошей альтернативой методу с использованием времяпролетного масс-спектрометра.

Значимым результатом является разработка нового типа детектора, разрешающего число одновременно поглощенных фотонов, представляющего собой набор параллельно соединенных узких сверхпроводящих полосок. Данный тип детектора имеет большие перспективы для квантовой криптографии - для работы с протоколами, в которых кодировка осуществляется числом фотонов в импульсе.

Кроме этого была разработана двухканальная система регистрации одиночных фотонов, которая в настоящее время является коммерческим продуктом, нашедшим свое применение в квантово-криптографических линиях связи, в телекоммуникации, в научных исследованиях (детектирование одиночных фотонов с высоким временным разрешением, исследование излучения из полупроводниковых квантовых точек, ближнепольная спектроскопия терагерцового диапазона частот).

Диссертация содержит большое число важных и оригинальных результатов, хорошо структурирована и аккуратно оформлена, содержит ценные разделы обзорного плана. Вся

цитируемая информация снабжена соответствующими ссылками. По каждой главе и по работе в целом сделаны четкие выводы.

Достоверность экспериментальных данных обеспечивается использованием современных средств и методик проведения исследований.

Весьма **положительно** оценивая весь материал в целом, считаю своим долгом сделать следующие **замечания**:

1. При рассмотрении статистик фотоотсчетов в главах 3 и 6 обсуждаются только случаи, когда числа фотонов в падающих потоках излучения имеют пуассоновские распределения. Вместе с тем, особенно в свете актуальных квантовооптических приложений, интересно было бы рассмотреть и другие варианты статистик световых полей, например, поля с группировкой фотонов.

2. Форма изложения материала работы не всегда оптимальна для понимания логики исследований. К сожалению, в ряде случаев допущены опечатки и неточности при написании математических выражений, и это также препятствует детальному анализу хода рассуждений автора. Например, на стр. 49 при записи распределения Пуассона пропущен минус в показателе экспоненты, а знак пропорциональности следует заменить на прямое равенство. При записи того же распределения на стр. 159 эти ошибки исправлены, но не указана степень, в которую возводится среднее число фотонов. Имеется опечатка в выражении (6.3), вызывает вопросы (6.9). На стр.152 не согласуются выражения для пиковых импульсов тока при поглощении одного фотона и произвольного числа фотонов в параллельных полосках.

Указанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общего весьма **положительного** впечатления от работы. Основные результаты диссертационной работы достаточно полно **опубликованы** в ведущих отечественных и зарубежных журналах, **обсуждались** и были приняты на международных и всероссийских конференциях, получили одобрение ведущих специалистов. Диссертация А.А. Корнеева является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным на высоком научном уровне. В работе приведены оригинальные научные результаты, представляющие интерес как с **фундаментальной**, так и с **практической** точек зрения. Полученные автором результаты **достоверны**, выводы и заключения **обоснованы**.

Автореферат правильно отражает содержание текста диссертации. Содержание работы удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, изложенным в «Положении о порядке присуждения

ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013г № 842), а её автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05- оптика.

Ведущий научный сотрудник  
кафедры квантовой электроники  
физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова,  
доктор физ.-мат. наук

Китаева Галия Хасановна

Адрес: 119991 Москва Ленинские горы, д.1, стр.2  
Тел.:8(495)939-43-72, [gkitaeva@physics.msu.ru](mailto:gkitaeva@physics.msu.ru)  
<http://www.phys.msu.ru/>

« 5 » мая 2016г.

Декан  
физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова,  
профессор

« 5 » мая 2016 г.



Н.Н.Сысоев