ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.326.07 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МИРЭА – РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (РТУ МИРЭА) МИНОБРНАУКИ РОССИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 09.12.2024 №62

О присуждении Дрязгову Михаилу Александровичу, гражданину Российской Федерации, ученой степеникандидата физико-математических наук.

Диссертация «Детектор с разрешением числа фотонов на основе сверхпроводниковой полоски микрометровой ширины»в виде рукописи по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств» выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ»).

Принята к защите 3 октября 2024 года, протокол № 48 диссертационным советом 24.2.326.07 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), Минобрнауки РФ, Москва, 119454, проспект Вернадского, 78. Состав диссертационного совета утвержден в количестве 22 человек 26.01.2023 (Приказ № 86/нк).

Соискатель Дрязгов Михаил Александрович, 1996 года рождения, гражданин Российской Федерации. В 2017 году окончил физический факультет федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», ему была присвоена квалификация «магистр» по специальности «Прикладные математика и физика» (диплом 107432 №0010433). В том же году поступил в очную аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» по специальности 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи», которую окончил в 2023 году, и ему была присвоена квалификация «Исследователь. Преподаватель-исследователь» (диплом 107704 №0398456). Научно-исследовательской деятельностью начал заниматься в 2018 году в федеральном государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» в должности стажёра-исследователя до 2020 год; с 2020 по 2021 года работал в научно-учебной лаборатории квантовой наноэлектроники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» в должности стажера-исследователя, одновременно работая в лаборатории квантовых детекторов федерального государственного бюджетного образовательного учреждении высшего образования «Московский педагогический государственный университет» в должности младшего научного сотрудника; с 2021 года и по настоящее время работает в центре квантовых технологий физического факультета московского государственного университета имени М. В. Ломоносова в должности младшего научного сотрудника и в отделе разработок и исследований микро- и наносистем федерального государственного бюджетного учреждения науки института нанотехнологий микроэлектроники российской академии наук в должности младшего научного сотрудника. Педагогическую деятельность начал в 2017 году в государственном бюджетном профессиональном образовательном учреждении "Челябинский профессиональный колледж" в должности преподавателя по 2019 год; с 2020 по 2022 год работал в должности преподавателя в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Первый московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова министерства здравоохранения российской федерации (Сеченовский университет)».

Научный руководитель – Корнеев Александр Александрович доктор физико-математических наук, профессор департамента электронной инженерии Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова – Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики».

Официальные оппоненты:

1. Кудряшов Сергей Иванович доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник заведующий лабораторией лазерной нанофизики и биомедицины, Центр лазерных и нелинейно-оптических технологий, Отделение квантовой радиофизики им. Н.Г. Басова, Физический институт им. П.Н. Лебедева (ФИАН))

2. Кинев Николай Вадимович кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории сверхпроводниковых устройств для приема и обработки информации, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» в своем положительном заключении, составленным Мельниковым Александром Сергеевичем, доктором физико-математических наук, главным научным сотрудником МФТИ, и Бобковым Александром Михайловичем, кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником МФТИ, и утвержденным Баган Виталием Анатольевичем, проректором по научной работе МФТИ, указала, что диссертационная работа была рассмотрена и получила положительную оценку на заседании ученого совета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (протокол заседания №08-05/9697 от 11.11.2024). Результаты являются новыми, а сама работа представляет собой законченную научно-квалификационную работу; основные результаты диссертационной работы содержатся в опубликованных работах; достоверность экспериментальных результатов не вызывает сомнения; автореферат диссертации соответствует её содержанию; диссертационная работа полностью удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней ВАК, утвержденным постановлением правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, и соответствует паспорту специальности 2.2.2. – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств». Автор диссертации, Дрязгов Михаил Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств».

В обсуждении диссертационной работы приняли участие профессора: Китаева Г.Х., Битюков В.К., Юрасов А.Н., Блантер М.С., Фетисов Л.Ю.

Основные положения и выводы диссертационной работы прошли апробацию на 9 международных и российских научных конференциях и опубликованы в 9 научных изданиях, включая 3 статьи, входящих в перечень научных журналов ВАК при Минобрнауки России; 8 статей, индексируемых WoS и/или Scopus; и 1 статью, индексируемой в РИНЦ. Научные работы по теме диссертации:

1. M Dryazgov, A Semenov, N Manova, Yu Korneeva and A Korneev, «Modelling of normal domain evolution after single-photon absorption of a superconducting strip of micron width», 2020, Journal of Physics: Conference Series, 1695 012195.
2. Korneeva, Yuliya; Nadejda, Manova; Dryazgov, Mikhail; Simonov, Nikita; Zolotov, Philipp; Alexander, Korneev, «Influence of sheet resistance and strip width on the detection efficiency saturation in micron-wide 16 superconducting strips and large-area meanders», 2021, Superconductor Science and Technology, 34 084001.
3. M. Shcherbatenko, M. Elezov, N. Manova, K. Sedykh, A. Korneev, Yu. Korneeva, M. Dryazgov, N. Simonov, A. Feimov, G. Goltsman, and D. Sych, «Single-pixel camera with a large-area microstrip superconducting single photon detector on a multimode fiber», 2021, Applied Physics Letters, v118 181103.
4. M Dryazgov, N Simonov, Yu. Korneeva, A Korneev, «Determination of measurement fidelity for a superconducting photon-number resolving detector with micron-wide strips», 2022, Journal of Physics: Conference Series.
5. Dryazgov, M.A., Korneeva, Y.P. & Korneev, A.A. «Electrothermal Model of a Microstrip Superconducting Detector with Photon Number Resolution», 2022, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 86, 678–682.
6. Dryazgov, M.A., Korneeva, Y.P. And Korneev, A.A. «New Design Of A Waveguide Integrated Photon Number Resolving Superconducting Detector With Micron-wide Strips», 2022, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics And Mathematics, Vol. 15, No. 3.2 Spbopen2022.
7. Dryazgov, M.A., Korneeva, Y.P. and Korneev, «Modeling of distinguishability of nonsimultaneous two-photon events in micron-width superconducting strips», 2023, AIP Conference Proceedings.
8. Е. В. Щетинина, М. А. Дрязгов, Ю. П. Корнеева, А. А. Корнеев, М. А. Тархов, «Моделирование двухфотонных событий в сверхпроводящей полоске для различной длины тепловой связи», 2023, Физика Твердого Тела, 65(7), 1148.
9. M. Dryazgov, Yu. Korneeva, and A. Korneev, «Micrometer-Wide NbN Strips for Photon-Number-Resolving Detection», 2023, Phys. Rev. Applied 19, 034067.

В представленных работах Дрязговым М.А. проводилось электротермическое моделирование эволюции нормального домена в сверхпроводящих полосках субмикронной и микронной ширины, изготовленных из NbN. Определялись оптимальные параметры электрической схемы смещения, при которых сверхпроводящее состояние восстанавливалось самопроизвольно при различных ширинах и длинах полоски детектора. Было показано, что использование шунтирующего сопротивления предпочтительнее использования последовательной индуктивности с точки зрения быстродействия детектора и отношения сигнал-шум. С помощью разработанной электротермической модели исследовалась длина тепловой связи между горячими пятнами, образованными после поглощения двух фотонов, а также изучалось неодновременное поглощение двух фотонов с целью определить максимальное время между поглощениями, при котором такие события могут быть различимы от однофотонного поглощения с помощью анализа переднего фронта или амплитуды фотоотклика.

Также было экспериментально продемонстрировано самопроизвольное восстановление сверхпроводящего состояния в однофотонном детекторе на основе полоски микрометровой ширины, площадь которого подходит для согласования с сердцевиной многомодового волокна. Был продемонстрирован многосекционный детектор с разрешением числа фотонов на основе сверхпроводящей полоски микрометровой ширины, его характеристики были измерены. Представленный детектор способен различать до 11 фотонов в оптическом импульсе включительно с мёртвым временем 20 нс.

Дополнительно были исследованы параметры плёнок NbN, и влияние этих параметров на достижение максимальной внутренней квантовой эффективности сверхпроводящих детекторов для различной ширины сверхпроводящих полосок. Было обнаружено, что увеличение сопротивления квадрата плёнки NbN в нормальном состоянии, при условии не уменьшения критической температуры, увеличивает вероятность выхода на плато эффективности для детекторов с микрометровой шириной сверхпроводящей полоски.

На автореферат поступило 3 отзыва:

1. От Дмитриева Н.Ю., кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника лаборатории «Когерентная микрооптика и радиофотоника» ООО «Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий» — отзыв положительный.

2. От Чичкова В.И., кандидата физико-математических наук, ведущего научного сотрудника лаборатории сверхпроводниковых квантовых технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» — отзыв положительный.

3. От Каримуллина К.Р., кандидата физико-математических наук, высококвалифицированного старшего сотрудника, ученого секретаря Троицкого обособленного подразделения Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук — отзыв положительный.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывался тем, что официальные оппоненты и сотрудники ведущей организации широко известны своими достижениями в соответствующей области науки, обладают глубоким пониманием изучаемых физических процессов и способны критически оценить научную и практическую значимость результатов, полученных и представленных Дрязговым М.А. в его диссертации.

**Диссертационный совет отмечает, что в результате выполнения соискателем исследований:**

**Разработана** электротермическая модель эволюции нормального домена в сверхпроводящей полоске, образованного в следствии поглощения фотона. Результаты моделирования аналитически и качественно проверены на достоверность.

С помощью электротермического моделирования **продемонстрировано** преимущество использования шунтирующего сопротивления для обеспечения самопроизвольного восстановления сверхпроводящего состояния в детекторах на основе сверхпроводниковой полоски микрометровой ширины. Теоретически и практически **продемонстрировано**, что при достаточной собственной кинетической индуктивности сверхпроводящей полоски микрометровой ширины, сверхпроводящее состояние восстанавливается самопроизвольно.

**Показана** однофотонная природа фотооткликов детектора на основе сврехпроводящей полоски микрометровой ширины, уложенной в форму меандра на площадь, подходящую для согласования с сердцевиной многомодового оптического волокна.

 **Получены** зависимости эффективности детектирования для детекторов на основе различной ширины сверхпроводящей полоски в зависимости от сопротивления квадрата плёнки NbN, измеренного при комнатной температуре. Предложен путь выхода на детерминистический режим детектирования за счёт увеличение погонного сопротивления сверхпроводящей плёнки.

Проведено электротермическое моделирование неодновременного двухфотонного поглощения с различным расстоянием между краями образовавшихся нормальных областей. **Показано**, что при разнице во времени между моментами поглощения фотонов сверхпроводящей полоской более 40 пс, двухфотонное поглощение не может быть отличено от однофотонного при использовании согласования импедансов или анализа переднего фронта фотоотклика.

**Представлена** модифицированная электротермическая модель для многосекционных детекторов с разрешением числа фотонов с последовательным и параллельным соединением отдельных однофотонных детекторов. **Показано**, что при использовании сверхпроводящих полосок микрометровой ширины наиболее эффективна схема последовательного соединения однофотонных детекторов друг с другом и с параллельным соединением резисторов. Оценена фиделити PNR-детектора в зависимости от числа соединённых SSPD и тепловых шумов различного типа усилителей.

**Продемонстрирована** новая масштабируемая топология детектора с разрешением числа фотонов на основе сверхпроводниковых полосок микрометровой ширины с последовательным соединением однофотонных детекторов и параллельным соединением резисторов.

**Получены** характеристики PNR-детекторов на основе сверхпроводящих полосок микрометровой ширины. **Показаны** и объяснены особенности формы вольтамперной характеристики. **Получены** многофотонные амплитуды импульсов напряжения. **Получены** эффективность детектирования и мёртвое время детекторов с разрешением числа фотонов на основе сверхпроводниковых полосок.

**Продемонстрирована** многофотонная природа полученных импульсов напряжения для детектора с разрешением числа фотонов на основе сверхпроводниковых полосок микрометровой ширины. **Установлен** метод восстановления числа фотонов в оптическом импульсе с учётом эффективности однофотонного детектирования и общего числа однофотонных детекторов, входящих в детектор с разрешением числа фотонов.

**Научная ценность полученных результатов** обусловлена получением новых научных знаний, представляющих интерес для фундаментальных и прикладных исследований. В работе впервые:

**Разработана** электротермическая модель эволюции нормального домена в сверхпроводящей полоске микрометровой ширины.

Теоретически и экспериментально **продемонстрировано**, что использование шунтирующего сопротивления предпочтительнее использованию последовательного соединения индуктивности для самопроизвольного восстановления сверхпроводящего состояния из-за увеличения скорости работы детектора.

**Показано** максимальное время между поглощениями двух фотонов сверхпроводящей полоской микрометровой ширины, при котором двухфотонное и однофотонное события оказывают различное влияние на форму фотоотклика напряжения.

**Найдены** геометрические параметры однофотонного детектора на основе сврехпроводящей полоски микрометровой ширины, обеспечивающие самопроизвольное восстановление сверхпроводящего состояния после поглощения фотона за счёт собственной кинетической индуктивности.

Экспериментально **продемонстрировано** минимально необходимое сопротивление квадрата плёнки NbN, измеренное при комнатной температуре, обеспечивающее выход на насыщение внутренней квантовой эффективности на длине волны 1064 нм.

Теоретически **показано**, что использование последовательного соединения секций в детекторе с разрешением числа фотонов на основе сверхпроводниковой полоски микрометровой ширины предпочтительнее использования параллельного соединения секций.

Экспериментально **продемонстрирован** детектор с разрешением числа фотонов на основе сверхпроводниковой полоски микрометровой ширины с эффективностью однофотонного детектирования 30% на длине волны 1550 нм.

**Теоретическая значимость** диссертационного исследования заключается в проведённом анализе тепловой нестабильности нормального домена в сверхпроводниковых полосках микрометровой ширины и детекторах на их основе.

**Практическая значимость** диссертационного исследования заключается в демонстрации однофотонного детектора и детектора с разрешением числа фотонов на основе сверхпроводниковых полосок микрометровой ширины с площадью, согласующейся с сердцевиной многомодового оптического волокна, и измерении его характеристик. Данные практические результаты могут быть использованы в дальнейших экспериментальных работах по использованию детекторов одиночных фотонов и детекторов с разрешением числа фотонов на основе сверхпроводниковой полоски микрометровой ширины.

Личный вклад автора является основным во всех полученных в диссертации результатах, исключая технологическое изготовление исследуемых образцов. Постановка задач осуществлялась совместно с научным руководителем автора, Корнеевым А.А.. Разработка электротермической модели эволюции горячего пятна в сверхпроводниковой полоске микрометровой ширины; разработка дизайна однофотонного детектора на основе сверхпроводниковой полоски микрометровой ширины и детектора с разрешением числа фотонов на основе сверхпроводниковой полоски микрометровой ширины; получение экспериментальных данных и характеризация изготовленных детекторов; проведение обработки полученных экспериментальных данных для определения основных характеристик изготовленных детекторов, в частности – доказательство однофотонности и многофотонности получаемых импульсов-фотооткликов проводились соискателем самостоятельно. Автор принимал активное участие в подготовке текстов публикаций и самостоятельно защищал полученные результаты на научных конференциях.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

- полученные результаты согласуются с результатами других авторов в России и за рубежом;

- установлен систематический характер проведенных исследований;

- использована современная аппаратура и методы исследования.

Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы. Диссертация соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования, непротиворечивостью методологической платформы и взаимосвязанностью выводов. Сама работа выполнена на высоком научном уровне с использованием современного оборудования и аттестованных методик исследования.

В ходе защиты соискатель Дрязгов М.А. дал аргументированные ответы на заданные вопросы членов диссертационного совета, а также на замечания ведущей организации и оппонентов.

На заседании 09.12.2024 диссертационный совет принял решение присудить Дрязгову Михаилу Александровичу ученую степенькандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 6 докторов наук по специальности диссертации, участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета,
проголосовали: за присуждение учёной степени - 16, против присуждения учёной степени - 0, недействительных бюллетеней нет.

Зам. председателя

диссертационного совета А.Н. Юрасов

Ученый секретарь

диссертационного совета Л.Ю. Фетисов

09.12.2024