

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.111.02,
созданного на базе Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А.
Котельникова Российской академии наук, по диссертации на
соискание ученой степени кандидата наук.

аттестационное дело N _____

решение диссертационного совета от 10 октября 2025 г., № 15

**О присуждении Парамонову Максиму Евгеньевичу, гражданину
России ученой степени кандидата физико-математических наук.**

Диссертация на тему «**Оптимизация сверхпроводниковых
туннельных элементов и определение их параметров**» принята к защите
09 июня 2025, протокол № 9, диссертационным советом 24.1.111.02,
созданным на базе Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Российской академии наук (125009, Москва, ул.
Моховая, д. 11. корп.7) (приказ Рособрнадзора о создании совета № 2397–
1958 от 21.12.2007 г.; приказ Минобрнауки РФ о продлении деятельности
совета № 714/нк от 02.11.2012 г.).

Соискатель Парамонов Максим Евгеньевич, 1990 года рождения, в
2012 году окончил Московский государственный университет имени М.В.
Ломоносова по специальности «Физика», специализация «Физика твердого
тела», получен диплом специалиста.

В период с 01.10.2020 по 30.09.2024 проходил обучение в аспирантуре
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Российской академии наук Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН по специальности 1.3.4 «Радиофизика» и по
окончании получил диплом по направлению подготовки 03.06.01 «Физика
и астрономия» с присвоением квалификации «Исследователь.
Преподаватель исследователь».

Работает научным сотрудником лаборатории № 234
«Сверхпроводниковые устройства для приема и обработки информации»
ИРЭ им. В.А. Котельникова Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории № 234 «Сверхпроводниковые
устройства для приема и обработки информации» Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники
и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им.
В.А. Котельникова РАН).

Научный руководитель: Кошелец Валерий Павлович, доктор
физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник
лаборатории 234 «Сверхпроводниковые устройства для приема и
обработки информации» Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Российской академии наук Института радиотехники и
электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Официальные оппоненты:

Рязанов Валерий Владимирович доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией сверхпроводниковой наноэлектроники Московского физико-технического института (национального исследовательского университета),

Корнев Виктор Константинович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский педагогический государственный университет, **в своем положительном отзыве**, подписанном к.ф - м.н., Р.В. Ожеговым, старшим научным сотрудником лаборатории квантовых детекторов и Г.Н. Гольцманом д.ф - м.н., профессором, заведующим кафедрой общей и экспериментальной физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский педагогический государственный университет», и утвержденном и.о. первого проректора федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский педагогический государственный университет» (МПГУ), академиком РАО, доктором географических наук, профессором Дроновым Виктором Павловичем, **отметила**, что тема диссертации М.Е. Парамонова актуальна, она представляет завершённую научную работу, содержащую решения технологических задач, направленных на совершенствование СИС - приемников для работы на субтерагерцовых и терагерцовых частотах, а именно: созданием туннельных переходов с исключительно высокой прозрачностью барьера и разработкой высококачественных сверхпроводящих гетеродинов. Важно отметить, что эти передовые исследования носят междисциплинарный характер. Разработка новых типов сверхпроводящих генераторов и высокоэффективных наноструктур, первоначально нацеленная на нужды астрофизики, находит прямое применение в смежных областях. Наиболее перспективной из них является криогенная квантовая электроника, в частности, для задач квантовых вычислений (кубиты, параметрические усилители) и высокоточной спектроскопии. Таким образом, данная работа выступает катализатором для прорывов в фундаментальной физике и квантовых технологиях, выводя их на качественно новый уровень. Работа обладает значительной научной и практической значимостью.

Основные результаты проведенных исследований представлены в 17 работах по профилю диссертации: 4 статьи – в российских рецензируемых периодических изданиях (журналах) из перечня ВАК РФ (по состоянию на 18.03.2025), 5 статей опубликованы в журналах, входящих в

международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science и Scopus, 7 тезисов докладов – на международных и российских конференциях, 1 – патент РФ на изобретение. Работы публиковались в ведущих специализированных изданиях: Applied Physics Letters (APL), Applied Sciences (MDPI), Радиотехника и электроника, Физика твердого тела, Журнал Радиоэлектроники, Нелинейный мир. Исследования выполнялись при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (гранты №№: 14.613.21.0046, 14.607.21.0100, 075-15-2021-667); Российского научного фонда (гранты №№: 19-19-00618, 23-79-00019); Российского фонда фундаментальных исследований (грант №: 19-52-80023). Общий объем опубликованных по теме диссертации работ составил 8.32 печ. л.

Из них:

1. Paramonov M., Fominsky M.Yu., Koshelets V.P., Neumeier B., Koelle D., Kleiner R., and Goldobin E. Radiation power and linewidth of a semifluxon-based Josephson oscillator //Applied Physics Letters. – 2014. – Т. 104. – №. 6

Краткое описание: Продемонстрирован высокочастотный генератор, работающий на частоте ~ 200 ГГц, в основе которого лежит переворот полуфлаксона в джозефсоновском переходе. Полуфлаксон спонтанно возникает в месте π -разрыва джозефсоновской фазы, искусственно созданного с помощью двух миниатюрных токовых инжекторов. Излучение детектируется детектором на кристалле (туннельным переходом). Расчетная мощность излучения (на детекторе) составляет ~ 8 нВт, что следует сравнить с мощностью постоянного тока ~ 100 нВт, потребляемой генератором. Измеренная ширина линии излучения, всего ~ 1.1 МГц, является типичной для геометрических (Фиске) резонансов, хотя мы пытались подавить такие резонансы, разместив хорошо согласованные СВЧ-трансформаторы на обоих его концах. Используя цепь обратной связи фазовой синхронизации (ФАПЧ), возможно уменьшить ширину линии излучения до менее 1 Гц, измеренную относительно опорного генератора и определяемую лишь разрешающей способностью измерительной установки.

2. Rudakov K. I., Khudchenko A.V., Filippenko L.V., Paramonov M.E., Hesper R., Lima D.A., Baryshev A.M., Koshelets V.P. THz range low-noise SIS receivers for space and ground-based radio astronomy //Applied Sciences. – 2021. – Т. 11. – №. 21. – С. 10087

Краткое описание: В данной статье представлены результаты разработки СИС-приёмников для диапазонов частот 211–275 ГГц и 790–950 ГГц с шумовой температурой в режиме двух боковых полос (DSB) приблизительно 20 К и 200 К соответственно. Эти разработки и достижения реализованы при создании приёмных систем для миссии «Миллиметрон» Роскосмоса и для наземного телескопа APEX (Atacama Pathfinder EXperiment).

3. Paramonov M.E., Filippenko L.V., Khan F.V., Kiselev O.S., Koshelets V.P. Superconducting Sub-Terahertz Oscillator with Continuous Frequency Tuning //Applied Sciences. – 2022. – Т. 12. – №. 17. – С. 8904

Краткое описание: Был предложен и реализован метод подавления резонансов, основанный на введении слоев нормального металла в область, прилегающую к длинному джозефсоновскому переходу. Было проведено моделирование распространения электромагнитных волн в предложенной интегральной структуре; изготовлены экспериментальные образцы и выполнено их комплексное исследование.

Продemonстрировано полное подавление резонансов и возможность непрерывной перестройки частоты сверхпроводящего локального генератора в диапазоне 200–700 ГГц. Ширина линии излучения генератора на фиксированной частоте не превышает 15 МГц во всем частотном диапазоне, что позволяет реализовать режим фазовой автоподстройки частоты в интегральном приёмнике, предназначенном для спектральных исследований.

4. K.I. Rudakov, M.E. Paramonov, P.N. Dmitriev, A.M. Baryshev, A.V. Khudchenko, V.P. Koshelets. Analysis of High-Frequency Parameters of Superconducting Planar Structures //Journal of Communications Technology and Electronics. – 2016. – Т. 61. С. 1395–1399

Краткое описание: Спроектированы и изготовлены образцы СВЧ планарных устройств, позволяющие определить параметры изготавливаемых слоев, которые необходимы для корректного численного моделирования на основе теории Маттиса–Бардина и могут отличаться от табличных параметров используемых материалов.

5. Paramonov M. E., Filippenko L. V., Dmitriev P. N., Fominsky M. Y., Koshelets, V. P. Determination of the Parameters of Tunneling Barriers of Superconducting Tunnel Structures for Submillimeter Receivers //Journal of Communications Technology and Electronics. – 2019. – Т. 64. – С. 1144–1148

Краткое описание: Проведена оценка параметров туннельного барьера джозефсоновских переходов Nb/Al–AlO_x/Nb в широком диапазоне значений плотностей тока с использованием метода Симмонса. Показано, что при увеличении значения удельного сопротивления RnS от 60 до 2100 Ом мкм² (уменьшении плотности туннельного тока перехода J от 3.5 до 0.1 кА/см²) возрастают значения высоты туннельного барьера от 0.85 до 1.18 эВ, а его ширина увеличивается с 10.7 до 13.3 Å. Экспериментально наблюдаемая линейная зависимость параметров туннельного барьера от RnS позволила оценить емкость переходов в области значений RnS 10...30 Ом мкм², требуемых для создания малошумящих приемников субмиллиметрового диапазона.

6. Парамонов М.Е., Кошелец В.П., Голдобин Э.Б. Мощность излучения и ширина линии джозефсоновского полуфлаксона генератора //Нелинейный мир. – 2015. – Т. 13. – №. 2. – С. 41–43

Краткое описание: Рассмотрен новый тип сверхпроводящего генератора, работающего на частоте около 200 ГГц. Отмечено, что работа такого генератора основана на перевороте полуфлаксона в длинном джозефсоновском переходе при подаче тока смещения. Полуфлаксон возникает в переходе на месте разрыва джозефсоновской фазы на величину π , искусственно созданном с помощью двух токовых инжекторов субмикронных размеров. Электромагнитное излучение такого генератора принимается детектором (туннельным джозефсоновским переходом), расположенном на том же чипе. Мощность излучения принимаемого детектором составляет порядка 10 нВт, что сравнимо с потребляемой генератором мощностью 100 нВт. Измерены спектры излучения нового генератора и зависимости ширины линии излучения от параметров структуры.

7. Парамонов М.Е., Голдобин Э.Б., Кошелец В.П. Измерение ширины линии джозефсоновского генератора с инжекторами //Журнал радиоэлектроники. – 2016. – №. 7. – С. 4–4

Краткое описание: Разработана интегральная микросхема для исследования спектральных характеристик сверхпроводникового генератора субтерагерцового диапазона с инжекторами. Электромагнитное излучение такого генератора принимается сверхпроводниковым туннельным джозефсоновским переходом, находящимся на этом же чипе. Была определена форма линии излучения и измерена её

ширина. Построены зависимости, показывающие воздействие инжекторов на общую картину генерации. Хотя мощность излучения такого генератора невелика и составляет порядка 10 нВт, регистрация и изучение его характеристик представляет большой физический интерес.

8. Парамонов М.Е., Филиппенко Л.В., Дмитриев П.Н., Фоминский М.Ю., Ермаков А.Б., Кошелец В.П. Параметры туннельного барьера сверхпроводниковых структур на основе ниобия // Физика твердого тела. – 2020. – Т. 62. – №. 9. – С. 1370-1374

Краткое описание: Проведена оценка основных параметров туннельного барьера джозефсоновских переходов Nb/AlO_x/Nb и Nb/AlN/Nb в широком диапазоне значений плотностей тока с использованием метода Симмонса. Экспериментально определены зависимости высоты и ширины туннельного барьера от удельного сопротивления для каждого типа переходов. Снижение высоты туннельного барьера перехода с прослойкой из AlN на 0.3 eV, по сравнению с оксидным, позволяет получать переходы с плотностью тока выше 15 kA/cm² при технологически достижимой толщине изоляционного слоя порядка 10 Ангстрем, что дает возможность реализовывать параметр качества R_j/R_n не ниже 25.

9. Чекушкин А.М., Парамонов М.Е., Кошелец В.П. Подстройка параметров туннельного барьера СИС-перехода путем варьирования состава верхнего электрода // Физика твердого тела - 2024. - Т.66. - №7. - С. 1042-1046

Краткое описание: Рассмотрено влияние верхнего электрода нитрида ниобия в многослойной структуре Nb|Al-AlN|NbN на параметры туннельного барьера (AlN). Показано, что повышение концентрации азота в газовой смеси Ar/N₂ при формировании NbN методом магнетронного распыления приводит к уменьшению туннельной прозрачности барьера AlN.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы из:

- Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук от канд. физ.-мат. наук Больгинова В.В. (замеч. нет)

- Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)» от канд. тех. наук Родионова И.А. (замеч.: в автореферате не описан метод измерения ширины барьера (Рисунок 2Б), указанная на графиках погрешность большей части измерений соответствует +/-0,02 нм, что существенно превышает точность измерений, например, просвечивающей микроскопии; следует пояснить, как получены (рассчитаны) данные погрешности; предложенный метод основан на введении поглощающих слоев в области перекрытия электродов и на концах РДП-генератора - не раскрыто влияние данного подхода на шумовые характеристики генераторов; в автореферате не раскрыта и не поясняется возможность применения сверхпроводящего полуфлаксонального генератора с инжекторами для работы с квантовыми

сопроцессорами на сверхпроводниковой платформе (кубитами); его указанный диапазон частот составляет 100-300 ГГц, тогда как используемые в квантовых вычислениях сверхпроводниковые кубиты работают в диапазоне частот 0,8-7 ГГц; на рисунках присутствуют надписи без перевода на русский язык, в тексте автореферата встречаются англицизмы (16 - пиновой, «overlap» и т.п.), используется разделение разрядов точкой вместо запятой.)

- Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова от д-ра физ.-мат. наук Соловьева И.И. (замеч. нет)

- Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института прикладной физики им. А.В. Гапонова - Грехова Российской академии наук от доктора физико-математических наук, главного научного сотрудника Вдовина В.Ф. (замеч. нет)

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации по диссертации М.Е. Парамонова обосновывается тем, что: официальными оппонентами являются ученые широко известные своими достижениями в данной отрасли науки, имеющие многочисленные научные труды в рецензируемых научных журналах, способны определить актуальность, новизну, научную и практическую ценность оппонируемой диссертации – д.ф.-м.н. **В.В. Рязанов** является известным специалистом в области физики сверхпроводимости и наноэлектроники, внесшим фундаментальный вклад в исследование джозефсоновских переходов и признанным экспертом в разработке сверхпроводящих квантовых устройств и цифровых вычислительных систем, д.ф.-м.н. **В.К. Корнев** является одним из ведущих специалистов в области сверхпроводниковой электроники, специализирующимся на исследовании динамических процессов в джозефсоновских устройствах, разработке аналоговых и цифровых сверхпроводниковых систем.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский педагогический государственный университет. Университет активно участвует в научных исследованиях, международных проектах и программах академического обмена. Многочисленные работы её сотрудников в области оппонируемой диссертации свидетельствуют об их способности адекватно оценить результаты, представленные автором для защиты.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. Экспериментально полученные линейные зависимости (в полулогарифмическом масштабе) величин средней высоты $\bar{\varphi}$ и толщины d от плотности туннельного тока для переходов Nb/Al - AlO_x/Nb, Nb/Al-AlN/Nb и Nb/Al-AlN/NbN позволяют оценить удельные емкости этих переходов во всем исследованном диапазоне

и экстраполировать результаты в область более высоких плотностей тока, где прямые измерения параметров барьеров невозможны.

2. Снижение средней высоты туннельного барьера в переходах Nb/Al-AlN/Nb, по сравнению с оксидными Nb/Al-AlO_x/Nb, позволяет реализовывать туннельные структуры с плотностью тока выше 15 кА/см² при технологически достижимой толщине изоляционного слоя порядка 1 нм и дает возможность реализовывать параметр качества R_j/R_n не ниже 25.
3. Включение поглощающих слоев в конструкцию криогенного генератора гетеродина субТГц диапазона на основе распределенного туннельного перехода (РДП) для интегральных приемных систем позволяет увеличить параметр затухания электромагнитной волны внутри перехода α , вследствие чего на ВАХ в «резонансном режиме» работы генератора происходит подавление ступеней Фiske, подобно области вязкого течения вихрей. Это дает возможность производить непрерывную перестройку генератора в широком диапазоне частот.
4. Полуфлаксонный генератор, впервые исследованный в данной работе, имеет полную совместимость с наиболее востребованными низкотемпературными сверхпроводящими схемами для радиотехнических приложений и квантовых вычислений (кубиты) благодаря малым размерам, низкому энерговыделению и отсутствию потребности во внешнем магнитном поле. Его мощность составила 10 нВт, минимальная ширина линии излучения 1,2 МГц.

Теоретическая значимость исследования заключается в получении фундаментальных зависимостей между основными параметрами сверхпроводящих туннельных переходов Nb/Al-AlO_x/Nb, Nb/Al-AlN/Nb, Nb/Al-AlN/NbN и плотности туннельного тока, что расширяет понимание процессов формирования туннельных барьеров и их характеристик в ТГц диапазоне частот.

Практическая значимость исследования состоит в создании усовершенствованного криогенного генератора гетеродина с возможностью непрерывной перестройки частоты и полуфлаксонного генератора с инжекторами для получения стабильного узкополосного излучения, что позволяет применять данные разработки в спектрометрическом оборудовании высокого разрешения и сверхпроводящих квантовых схемах взаимодействия с кубитами.

Личный вклад соискателя состоит в том, что все использованные в диссертации результаты получены автором лично или при его участии. Вклад соискателя в постановку и решение задач, проведение расчетов и экспериментов, анализ полученных результатов и написание текста статей в части, относящейся к теме диссертации, является определяющим.

В ходе защиты диссертации в рамках дискуссии членами диссертационного совета была дана высокая оценка уровню работы и отмечено, что работа вносит существенный вклад в развитие

