

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. первого проректора
федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Московский педагогический
государственный университет»
(МПГУ), академик РАО, доктор
географических наук, профессор
Дронов Виктор Павлович



«12» сентября 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

- федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский педагогический государственный университет» - на диссертационную работу Парамонова Максима Евгеньевича **«Оптимизация сверхпроводниковых туннельных элементов и определение их параметров»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.4. Радиофизика.

Диссертационная работа Парамонова Максима Евгеньевича «Оптимизация сверхпроводниковых туннельных элементов и определение их параметров» посвящена проблемам создания устройств интегральной сверхпроводниковой электроники и, в частности, проблемам создания высокостабильных сверхпроводниковых генераторов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн.

Актуальность диссертационной работы.

Инфракрасная (ИК) и, в особенности, её субмиллиметровая часть спектра служат уникальным и незаменимым источником информации о Вселенной. Это обусловлено фундаментальным физическим принципом: в этом диапазоне длин волн достигает пика своей интенсивности тепловое излучение от относительно холодных астрофизических объектов с

температурами в диапазоне от 3 до 3000 К. К наиболее интересным объектам относятся:

- Звезды на ранних стадиях формирования, которые ещё погружены в плотные, непрозрачные для видимого света коконы из газа и пыли (протозвездные облака).
- Межзвездная среда - разреженные газовые облака и микроскопические частицы пыли, являющиеся строительным материалом для новых звезд и планетных систем.
- Планеты, кометы, астероиды и другие тела нашей и иных планетных систем, которые не излучают собственного света, но обладают тепловым излучением.

Особая роль принадлежит космической пыли: она эффективно поглощает высокоэнергетическое излучение от горячих звезд и затем переизлучает эту энергию именно в дальнем инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах, делая видимыми ранее скрытые области звездообразования.

Для детектирования и анализа этого крайне слабого космического сигнала на частотах 0.1-1.2 ТГц требуются приемники исключительной чувствительности. Наилучшую чувствительность в данном диапазоне длин волн демонстрируют когерентные приемники, основанные на смесителях на базе сверхпроводящих туннельных переходов СИС (сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник). Главное преимущество СИС-смесителей - их шумовая температура, которая приближается к фундаментальному **квантовому пределу чувствительности**. Эта выдающаяся характеристика сделала их стандартным и обязательным оборудованием для большинства передовых наземных обсерваторий (таких как ALMA) и космических телескопов.

В рамках диссертационного исследования автор занимается решением технологических задач, направленных на дальнейшее 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, развитие астрономических технологий выступает катализатором для прорывов в фундаментальной физике и квантовых технологиях, выводя их на качественно новый уровень.

Структура и содержание диссертационной работы.

Диссертация М.Е. Парамонова состоит из введения, пяти основных глав с описанием полученных результатов, заключения, благодарностей, а также списка работ автора и используемой литературы из 85 наименований. Объем диссертационной работы составляет 129 страниц и содержит 96 рисунков.

Во введении формулируется актуальность исследования, цели и задачи диссертационного исследования, описывается научная новизна и научно-практическая ценность работы, формулируются защищаемые положения, а также приводится краткое содержание диссертационной работы.

Первая глава посвящена литературному обзору. В ней кратко описываются современные методы исследования субмиллиметрового диапазона, рассматривается работа когерентных приемников на базе СИС-смесителей и сверхпроводящих джозефсоновских генераторов гетеродина.

Вторая глава носит методологический характер. В ней рассматриваются основные методы и этапы изготовления сверхпроводниковых джозефсоновских структур, а также рассматриваются основные экспериментальные методики, используемые в дальнейшем в работе.

Третья глава посвящена исследованию основных параметров изготовленных туннельных переходов. Приведена оригинальная методика оценки качества туннельных переходов Nb/Al-AlO_x-Nb и Nb/AlN/Nb(N). Экспериментально определены зависимости средней высоты и ширины туннельного барьера от параметра прозрачности туннельного барьера для каждого типа переходов.

Четвертая глава описывает метод подавления резонансов в субТГц сверхпроводящем генераторе гетеродина на основе РДП. Предложенный метод позволяет подавить резонансные особенности вольтамперных характеристик распределенного джозефсоновского перехода и, тем самым, обеспечить непрерывную перестройку сверхпроводникового джозефсоновского генератора в широком диапазоне частот.

Пятая глава посвящена разработке сверхпроводящей интегральной микросхемы с генератором гетеродина на основе распределенного джозефсоновского перехода с двумя линиями токовых инжекторов,

предназначенной для исследования спектральных характеристик сверхпроводникового генератора субтерагерцового диапазона. Принцип работы генератора основан на перевороте полуфлаксона, который спонтанно появляется на месте π -разрыва джозефсоновской фазы. В работе приведено исследование характеристик нового типа сверхпроводникового генератора.

Научная и практическая значимость работы.

На основе полученных зависимостей параметров барьеров (Nb/Al-AlO_x/Nb, Nb/Al-AlN/Nb, Nb/Al-AlN/NbN) от плотности туннельного тока стало возможным создание высококачественных смесительных элементов, что критически важно для разработки когерентных приемников терагерцового диапазона (0.1–1.2 ТГц).

Модернизация конструкции криогенного гетеродина позволила достичь непрерывной перестройки частоты в диапазоне 250–750 ГГц (характерном для джозефсоновских генераторов Nb/Al-AlO_x/Nb) и обеспечить узкую линию генерации. Эти характеристики, необходимые для фазовой стабилизации, отвечают ключевым требованиям высокоразрешающей спектроскопии, что позволяет интегрировать данный генератор в соответствующее оборудование.

Созданный полуфлаксонный генератор с инжекторами служит источником стабильного узкополосного излучения (100–300 ГГц) с возможностью стабилизации частоты через систему ФАПЧ. Это делает его перспективным кандидатом на роль опорного генератора в сверхпроводящих квантовых схемах для точного управления и взаимодействия с кубитами.

Апробация работы.

Результаты исследований опубликованы в 17 работах, соответствующих профилю диссертации. Среди них — статьи в российских рецензируемых журналах, включённых в перечень ВАК, и международные публикации, индексируемые в базах данных Web of Science и Scopus. Представлены тезисы докладов на международных и российских конференциях, а также получен патент Российской Федерации на изобретение.

Замечания по диссертационной работе.

1. Отсутствует список сокращений, что несколько усложняет чтение диссертации.

2. Часто встречается формулировка «линейность в полулогарифмическом масштабе характеристик от тока». Данная формулировка является неграмотной, поскольку имеет двойное толкование: зависимость характеристики может быть логарифмической или экспоненциальной. В ряде случаев, когда не приводятся конкретные графики, не понятно о какой именно зависимости идет речь.

3. Литературный обзор, не предоставляет достаточной информации о современных методах исследования субмиллиметрового диапазона длин волн. В частности, поскольку речь идет о приеме информации с помощью когерентных источников, в рамках литературного обзора следует обращать внимание на альтернативные способы приема и генерации излучения, для того чтобы правильно дать представление читателю о месте данного исследования в контексте последних мировых достижений. На недостаточность литературного обзора также указывает и анализ цитированных источников. В частности, из 85 использованных источников только 3 были напечатаны за последние 5 лет и 6 за последние 10 лет.

4. Имеется ряд неточностей и опечаток. Так в тексте на стр. 35 дается текст «следующей операцией производится напыление верхнего электрода ... толщиной 150 нм» при этом рисунок 2.5 ниже дает толщину данного слоя 80 нм. На подписях к рисункам 4.11, 4.12 указано «экспериментальные точки объединены кривой сплайна для наглядности». Вместе с тем на графике приведена не сплайн-интерполяция, а аппроксимация полиномом высокой степени. На рисунке 4.14 упоминается «частота генератора составляла 363 ГГц», при этом речь идет о точке с частотой генерации 366 ГГц.

5. В параграфе 3.3 приводятся результаты аппроксимации вольтамперных характеристик СИС-перехода при больших напряжениях смещения (порядка 1 В). Однако при этом не описывается способ нахождения аппроксимационных коэффициентов. Оптимальным для данного применения является метод наименьших квадратов, который помимо коэффициентов аппроксимации дает еще и погрешности определения коэффициентов.

6. На странице 78 высказывается гипотеза: «отсутствие содержания азота в верхнем по топологии слое туннельной структуры Nb/Al-AlN/Nb вызывает заметное проявление эффекта диффузии барьерного азота в слой Nb». Автор делает такой вывод исходя из полученных экспериментальных данных. Однако данная гипотеза может быть подтверждена независимо, используя методы ПЭМ и рентгеноструктурного анализа.

7. В выводах к главе 4 упоминается «продемонстрировано полное подавление резонансов», однако исходя из рисунков 4.9 и 4.10 резонансная структура зависимости дифференциального сопротивления РДП от

напряжения смещения сохраняется. Стоит отметить, что резонанс действительно сильно подавлен и позволяет плавно перестраивать генератор.

8. На рисунке 5.3 приведен график согласования по мощности между генератором и гармоническим СИС-смесителем, однако при этом не приводится ни формул, ни алгоритмов объясняющих и подтверждающих данный результат, что позволяет усомниться в истинности данной зависимости.

9. Графики, представленные на рисунке 5.9 и 5.11, совпадают (отличие заключается только в том, что на рисунке 5.11 добавлена еще и информация о мощности генератора). Достаточно было оставить только один из рисунков.

Сделанные замечания не снижают качества диссертации. Диссертационная работа М.Е. Парамонова представляет собой теоретическое и экспериментальное исследование, проведенное на высоком научном уровне. Работа обладает значительной научной и практической значимостью.

Заключение по содержанию диссертации.

Автореферат соответствует требованиям, предусмотренным п. 25 «Положения о присуждении степеней». Его содержание полностью отражает содержание диссертации, полученные результаты и выводы.

Диссертационная работа Парамонова Максима Евгеньевича «Оптимизация сверхпроводниковых туннельных элементов и определение их параметров» представляет собой законченное научное исследование и по объёму результатов, достоверности, теоретической и практической значимости выводов удовлетворяет требованиям пп. 9, 10, 11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», введенного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям физико-математического профиля, а ее автор, Парамонов Максим Евгеньевич, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.4. Радиофизика.

Отзыв составлен Ожеговым Романом Викторовичем, кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником лаборатории квантовых детекторов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский педагогический государственный университет».

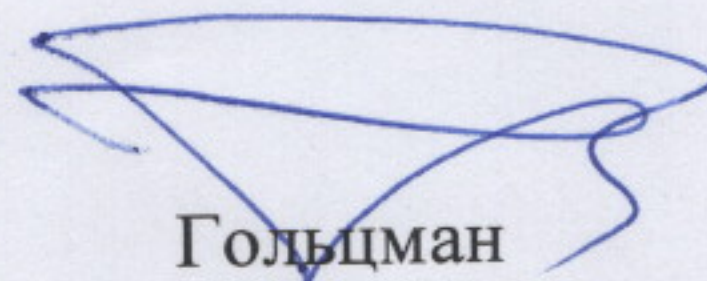
Отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на расширенном заседании кафедры общей и экспериментальной физики, федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский педагогический государственный университет» МПГУ от 28 августа 2025 года, протокол № 1.

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории квантовых детекторов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский педагогический государственный университет»



Ожегов
Роман
Викторович

Доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет», кафедра общей и экспериментальной физики, заведующий кафедрой



Гольцман
Григорий
Наумович

Контактная информация:

Полное наименование организации в соответствии с Уставом: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет»

Сокращенное наименование организации в соответствии с Уставом: Московский педагогический государственный университет,

ФГБОУ ВО «МПГУ», МПГУ

Почтовый адрес: 119435, Россия, Москва, ул. Малая Пироговская, д. 1, стр. 1.

Телефон: 8 (499) 245-03-10

Адрес электронной почты: mail@mpgu.su

Адрес электронной почты кафедры общей и экспериментальной физики: gn.goltzman@mpgu.su

Адрес официального сайта сети Интернет: https://mpgu.su/

С научными публикациями сотрудников кафедры общей и экспериментальной физики, федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский педагогический государственный университет» можно ознакомиться на сайте в сети Интернет: https://mpgu.su/.



Подпись *Ожегов Р. В., Гольцман Г. Н.*
УДОСТОВЕРЯЮ
Зам. начальника Управления развития
кадрового потенциала
И. Н. Павлушина
И. Н. Павлушина

