

**ОТЗЫВ официального оппонента Рязанова Валерия Владимировича
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Парамонова Максима Евгеньевича
на тему: «Оптимизация сверхпроводниковых туннельных элементов и
определение их параметров»
по специальности 1.3.4 – «Радиофизика»**

Разработка, оптимизация конструкции и параметров сверхпроводниковых детекторов излучений субмиллиметровых длин волн является важным научно-техническим направлением в связи с их высокой чувствительностью, необходимой при реализации приемных устройств радиоастрономии. Основой сверхпроводниковых детекторов, так же, как и многих элементов и устройств цифровой и квантовой сверхпроводниковой электроники, являются туннельные переходы на основе сверхпроводящего ниобия. Диссертационная работа М.Е. Парамонова посвящена оптимизации и исследованию параметров сверхпроводниковых туннельных переходов и их использованию при разработке новых типов субтерагерцовых генераторов для сверхпроводниковых интегральных приемников излучений. Таким образом, тема диссертации М.Е. Парамонова, несомненно, актуальна, как с фундаментальной, так и с практической точек зрения.

Диссертация состоит из Введения, пяти глав и Заключения, она основана на 9 публикациях в ведущих научных журналах, четыре из которых входят в перечень изданий, рекомендованных ВАК, одном патенте и многочисленных тезисах докладов на российских и международных конференциях. Во **Введении** представлены актуальность, задачи исследований, цели и методы диссертационной работы, а также новизна полученных результатов, их научная и практическая ценность, приведены положения, выносимые на защиту, краткое содержание диссертации по главам.

Первая глава диссертации представляет собой литературный обзор, в котором обсуждаются актуальность, проблемы и методы исследований субтерагерцового и терагерцового излучений. Подробно описаны устройство и принципы работы гетеродинного приемника, использующего сверхпроводниковые опорные СВЧ-генераторы и смесители на основе туннельных переходов сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС-

переходов). Обсуждаются преимущества таких СИС-смесителей и механизм квантового преобразования частоты в этих нелинейных элементах. Последние разделы главы посвящены обсуждению различных опорных генераторов, описанию достоинств и недостатков СВЧ-генераторов «течения потока» на основе распределенных джозефсоновских туннельных переходов. Необходимое для функционирования таких генераторов приложенное магнитное поле приводит к возникновению резонансных особенностей на ВАХ (ступеней Фiske), которые препятствуют непрерывной перестройке генераторов по частоте. Устранение этих особенностей являлось одной из задач диссертационной работы.

Во второй главе диссертации детально описаны использованные технологические и экспериментальные методики, в том числе, тонкопленочные технологии послойного формирования топологии on-chip структур с использованием магнетронного осаждения слоев, реактивного ионного травления и селективного анодирования слоев ниобия для предотвращения межслоевых закороток. Для усовершенствования последней процедуры диссертантом была разработана и собрана специальная установка для контролируемого жидкостного анодного окисления ниобия. Представлены также низкотемпературные методики измерений на постоянном токе и СВЧ-измерений. Подробно обсуждаются особенности разработанной в ИРЭ РАН низкотемпературной экспериментальной установки для получения спектральных характеристик сверхпроводящего генератора гетеродина, а также СВЧ-схема преобразователя частоты, включающая в себя on-chip структуру гармонического СИС-смесителя, опорный синтезатор частот, петлю обратной связи частотной и фазовой стабилизации сигнала гетеродина.

В Главе 3 представлены результаты исследований туннельных переходов $\text{Nb/Al-AlO}_x/\text{Nb}$, $\text{Nb/Al-AlN}_x/\text{Nb}$, $\text{Nb/Al-AlN}_x/\text{NbN}$ и количественные оценки основных параметров их туннельных барьеров: средней высоты и ширины (толщины) барьера. Поскольку для повышения уровня частот сигналов, детектируемых с помощью приемных СИС-систем, до терагерцового диапазона необходимо было увеличение плотностей туннельных токов выше $10\text{-}15 \text{ кА/см}^2$, недостижимых с помощью джозефсоновских переходов с туннельным барьером из AlO_x , наряду с

усовершенствованием традиционной технологии для переходов Nb/Al-AlO_x/Nb, была разработана технология изготовления джозефсоновских структур с барьером из AlN_x, как с обоими электродами из Nb (переходы Nb/Al-AlN_x/Nb), так и с верхним электродом из NbN (переходы Nb/Al-AlN_x/NbN). Последние позволили повысить щелевое напряжение начала туннелирования с 2,8 мВ до 3,7 мВ за счет более высокой по сравнению с Nb щелью в NbN. Важным результатом является разработка (на основе модели Симмонса) и использование для аппроксимации экспериментальных кривых метода оценки параметров туннельных барьеров и определения их зависимостей от плотности критического тока и удельного сопротивления переходов. Более низкие высоты барьеров AlN_x позволяют реализовывать переходы с высокими плотностями крит. тока при больших по сравнению с AlO_x толщинах барьеров, что обеспечивает изготовление переходов с малой утечкой при напряжениях ниже щелевого. Экстраполяция полученных зависимостей позволила оценить параметры более тонких барьеров, обеспечивающих еще более высокие плотности критических токов, необходимые для проектирования СВЧ-устройств терагерцового диапазона. Полученные таким образом ширины барьеров использовались для оценки удельных емкостей переходов.

Глава 4 диссертации посвящена реализации непрерывной перестройки частоты опорного сверхпроводящего генератора гетеродина на основе распределенного джозефсоновского перехода Nb/Al-AlO_x/Nb, т.е. решению указанной выше проблемы подавления ступеней Фiske на ВАХ перехода, связанных с геометрическими резонансами волн малых колебаний (стоячими волнами), возникающими в туннельном переходе в присутствии внешнего приложенного магнитного поля. Для подавления отраженных волн в многослойную структуру распределенного джозефсоновского перехода (вдоль него в область перекрытия верхнего и нижнего сверхпроводящих слоев) вводились поглощающие слои молибдена. Было проведено численное моделирование и опробовано экспериментально несколько вариантов размещения тонкопленочных полосок молибдена и выбран оптимальный вариант, обеспечивающий сглаживание ступенек Фiske, но не уменьшающий

существенно выходную мощность генерации. Была продемонстрирована непрерывная перестройка частоты генерации в диапазоне 200-700 ГГц с шириной линии излучения 4-12 МГц.

В последней **пятой главе** диссертации представлена разработка и реализация нового типа сверхпроводникового генератора течения потока (flux-flow осциллятора) – «полуфлаксона генератора». Скачок разности фаз в переходе на π и полуфлаксон возникают в локальной области между двумя близко расположенными токовыми инжекторами. При протекании достаточного тока смещения полуфлаксона начинает менять знак (направление магнитного потока) с излучением в переход флаксонов и антифлаксонов, которые отражаясь от краев перехода создают ступеньку Фиске на ВАХ. В отличие от других flux-flow осцилляторов полуфлаксональный генератор не требует приложения магнитного поля ко всему переходу, что исключает наводки на другие части схемы на чипе. Были выполнены детальные исследования характеристик изготовленного генератора. Выходная мощность составила 8 нВт при потребляемой мощности 100 нВт. Ширина линии стабильного по фазе и частоте излучения в диапазоне 100-300 ГГц не превышала 10 МГц.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации, которые свидетельствуют о том, что в рамках диссертационной работы были разработаны и апробированы оригинальные подходы, методы и технологии, позволяющие повысить эффективность и улучшить характеристики сверхпроводниковых генераторов на основе джозефсоновских туннельных переходов. Был разработан метод и проведены количественные оценки параметров туннельных барьеров переходов трех типов: Nb/Al-AlO_x/Nb, Nb/Al-AlN_x/Nb и Nb/Al-AlN_x/NbN, использующихся при реализации on-chip СВЧ-устройств субтерагерцового и терагерцового диапазона. Разработаны и экспериментально опробованы методы сглаживания особенностей на ВАХ, которые препятствуют непрерывной перестройке сверхпроводниковых генераторов по частоте. Реализован новый тип сверхпроводникового генератора течения потока, не использующий приложенное внешнее поле.

Успешное выполнение задач диссертационной работы основано на хорошем владении диссертантом современными технологическими и

экспериментальными методиками, а также детальном понимании прорывов и проблем в текущих экспериментальных исследованиях в этой области.

В связи с отмеченным выше, достоверность и новизна полученных результатов не вызывает сомнений.

В качестве вопросов и замечаний можно отметить следующие моменты

1. Криоголовка для измерений двухсторонних кремниевых микрочипов, разработанная диссертантом и подробно описанная в Главе 2 (стр. 52-55), не использовалась в экспериментах, представленных в диссертации, и вряд ли может быть отнесена к ее результатам.

2. В Главе 3 диссертации описаны преимущества использования слоев NbN для повышения частот излучения сверхпроводящих генераторов, однако, NbN использовался только в качестве верхнего сверхпроводящего слоя. Не обсуждаются возможные преимущества и проблемы использования этого более высокотемпературного сверхпроводника для обоих слоев.

3. В Главе 3 не приведены формулы, связывающие параметры барьера с емкостью перехода, только отмечено, что «зависимости высоты и ширины барьера от удельного сопротивления» использовались для оценки емкостей. Оценка ширины барьера и величина $\epsilon=8,5$ для AlN_x , без обсуждений приведенная на стр. 67, конечно, может служить основой для оценки емкости, но как использовалась высота барьера?

4. На Рис. 3.5 для перехода Nb/Al-AlN_x/NbN вместо срыва на ветвь свертока на «разностной щели» при напряжении 0,9 мВ наблюдается срыв при 2,5 мВ, который, как написано в диссертации, связан с «особенностями системы задания напряжения», без пояснения, что это за особенности и почему подобные особенности не проявляются на Рис. 3.4 для перехода Nb/Al-AlO_x/Nb ?

5. Чем отличаются эксперименты, результаты которых представлены на рисунках 4.1 и 4.2? Зачем нужно представление двух схожих рисунков?

6. В ссылках на работы с наблюдением полуфлаксонов в джозефсоновских переходах не отмечена первая (вышедшая до работы [81]) публикация по экспериментальному обнаружению полуфлаксона в 0- π -переходе: S. M. Frolov et al, Phys. Rev B **74**, 020503 (R) (2006).

Указанные замечания относятся, в основном, к детальности представления методов и результатов в тексте диссертации и не умаляют

значимости диссертационного исследования. Диссертация «Оптимизация сверхпроводниковых туннельных элементов и определение их параметров» удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – «Радиофизика», а ее автор, Парамонов Максим Евгеньевич, несомненно, заслуживает присуждения ему искомой степени.



Рязанов В.В.

11.09.2025

Подпись В. В. Рязанов удостоверяю:
Ученый секретарь Ученого совета МФТИ



Е.Г. Евсеев

11.09.2025

Официальный оппонент:

Рязанов Валерий Владимирович

Доктор физико-математических наук,
Профессор, заведующий лабораторией сверхпроводниковой
наноэлектроники

«Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»

Контактные данные:

тел.: 7 (903) 127-95-38, e-mail: valery.ryazanov@gmail.com

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Адрес места работы:

141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.

«Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»