Федеральное государственное бюджетное учреждение науки ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ им. В.А. КОТЕЛЬНИКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

A

ЧЕКУШКИН Артем Михайлович

«Матрицы планарных кольцевых антенн с СИНИСдетекторами и матрицы криогенных фильтров».

Специальность 1.3.4 -- Радиофизика

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

Д-р физ.-мат. наук Тарасов М. А.

Оглавление

Введение
Актуальность работы 6
Степень разработанности7
Цель настоящей диссертационной работы:7
Научная новизна
Теоретическая и практическая ценность работы9
Методология и методы исследования11
Степень достоверности и апробация результатов 12
Глава 1 Обзор криогенных детекторов микроволнового излучения14
1.1 Прямые детекторы на основе эффекта сверхпроводимости14
1.1.1 Болометр на краю сверхпроводящего перехода16
1.1.2 Детектор на кинетической индуктивности 17
1.1.3 Детекторы на основе СИС-переходов19
1.1.4 Болометры на основе СИН-переходов
1.2 Основные характеристики и свойства СИНИС-детекторов
1.2.1 Ток в СИН-переходе27
1.2.2 Эффект горячих электронов31
1.2.3 Обратная электротермическая связь
1.2.4 Электронное охлаждение
1.2.5 Уравнение теплового баланса34
1.2.6 Теория Девятова, Крутицкого, Куприянова - квантовый подход 34
1.2.7 Шумы

1.2.8 Чувствительность	
1.3 Антенны для приема внешнего электромагнитного излучения	
1.3.1 Дипольная антенна	
1.3.2 Кольцевая антенна	
1.3.3 Матрицы антенн.	
1.4 Фильтры мм и суб мм длин волн	40
1.4.1 Фильтры на основе ЧСП	40
1.4.2 Круглый волновод	42
1.4.3 Капиллярный фильтр	44
1.5 Электромагнитное излучение.	46
1.6 Выводы	47
Глава 2. Расчет разрабатываемых структур	48
2.1 Расчет СИНИС-детекторов	48
2.2 Матрица кольцевых антенн с интегрированными СИНИС-детен	кторами
2.3 Способы облучения образца	
2.4 Матрицы электрически малых антенн с СИНИС-детекторами	57
2.5 Выводы	64
Глава 3. Разработка и изготовление образцов для тепло- и радио-физ	ических
измерений	66
3.1 Топология образцов (вариации антенн, СИН-переходы)	66
3.2 Технологические установки и методы изготовления образцов.	
3.2.1 Литография	68

3.2.2 Напыление пленок76
3.3 Изготовление образцов
3.3.1 Изготовление контактных площадок и кольцевых антенн
3.3.2 Формирование слоя СИНИС-структур
3.3 Описание экспериментальной установки
3.3.1 Гауссовый оптический тракт 87
3.3.2 Криостаты
3.3.3 Источник электромагнитного излучения
3.4 Методика измерения сигнала с СИНИС-структур93
3.5 Выводы
Глава 4. Фильтры мм и субмм диапазонов96
4.1 Полосно-пропускающий фильтр96
4.2 Разработка конструкции перестраиваемого сеточного фильтра
4.3 Полосно-пропускающие фильтры101
4.4 Измерение перестраиваемого сеточного фильтра 103
4.5 Изготовление и конструкция капиллярного фильтра 107
4.6 Измерение капиллярного фильтра 108
4.7 Выводы 109
Глава 5. Результаты экспериментальных исследований электрических и
спектральных характеристик СИНИС-детекторов 110
5.1 ВАХ СИНИС детекторов 110
5.2 Измерение отклика по току и напряжению на внешнее
электромагнитное излучение113

5.3 Экспериментальное исследование матриц электрически	малых	антенн.
		118
5.4 Измерение спектрального отклика		123
Выводы по 5 главе		124
Заключение.		126
Список литературы		136

Актуальность работы

В настоящее время активно развиваются инструменты для различных задач, направленных на исследование реликтового излучения Вселенной таких как Миллиметрон [1], BOOMERANG [2], OLIMPO [3], LSPE [4], БТА [5], СУФФА [6]. Для них необходимы чувствительные приемные системы с широким динамическим диапазоном, а для последних (БТА и СУФФА) еще и способные работать при высокой фоновой мощности (порядка 5-80 пВт). В случае проведения радиоастрономических наблюдений с поверхности Земли существенную роль играет поглощение терагерцового излучения парами воды, находящимися в атмосфере. Чтобы уменьшить негативное влияние атмосферы, радиотелескопы располагают на значительной высоте относительно уровня моря, либо помещают на борту исследовательских зондов (высотные аэростаты). В связи с этим, актуальной задачей является создание компактных и высокочувствительных детекторов мм и субмм диапазонов длин волн. Оптимальными детекторами для подобных предельной телескопов, с точки зрения достижения чувствительности, являются приемники на основе сверхпроводниковых некогерентных детекторов. Требования, предъявляемые К подобным системам довольно противоречивы: с одной стороны, необходима предельно высокая чувствительность на уровне не хуже 10⁻¹⁶ Вт/Гц^{1/2} для наземных телескопов, с другой стороны нужен широкий динамический диапазон, поскольку уровень фонового излучения атмосферы на поверхности Земли может составлять десятки пиковатт в диапазоне 0,8 мм. Для повышения мощности насыщения используют матрицы сверхпроводниковых детекторов. В качестве прототипа подобных приемных устройств может служить матрица кольцевых антенн с детекторами на основе СверхпроводникИзолятор-Нормальный металл-Изолятор-Сверхпроводник (СИНИС). Характеристики приемных матриц на основе СИНИС-детекторов (высокая чувствительность, широкий динамический диапазон, высокое быстродействие) делают их перспективными детекторами для исследований в области мм и субмм астрономии.

Степень разработанности

Аналогами по области применения СИНИС-детекторов можно назвать детектор (болометр) на краю сверхпроводящего перехода (БКП, В англоязычной литературе TES) [7], а также детектор на кинетической индуктивности (KID) [8]. Каждый из них обладает своими преимуществами и БКП Быстродействие обычно недостатками. составляет несколько миллисекунд. Однако, как и у СИНИС-детектора, оно может достигать порядка 1-2 мкс. В БКП это происходит за счет реализации отрицательной обратной термоэлектронной связи [9], но при этом происходит снижение чувствительности БКП. В СИНИС-детекторах подобного снижения нет, что позволяет достигать чувствительности на уровне 10⁻¹⁷-10⁻¹⁸ Вт/Гц^{1/2}. Если проводить сравнение с KID, то в них ограничение в предельную чувствительность детектора вносит генерационно-рекомбинационный шум, возникающий в малом объеме сверхпроводника после поглощения в нем фотона. В СИНИС-детекторе используется полоска нормального металла, поэтому подобной проблемы нет, а большой объем сверхпроводника позволяет избежать высокого уровня шума в сверхпроводящем электроде. Более подробно свойства и характеристики криогенных детекторов и их сравнение представлено в Главе 1.

Цель настоящей диссертационной работы:

решение проблемы насыщения сверхпроводниковых детекторов в условиях высокой фоновой мощности (десятки пиковатт), а также улучшение их

сигнальных характеристик. Для достижения этой цели были решены следующие основные задачи:

 Разработка матриц планарных кольцевых антенн мм и субмм диапазонов с интегрированными СИНИС-детекторами, которые обладают высокой чувствительностью, низкой мощностью эквивалентной шуму (МЭШ) и широким динамическим диапазоном для применения в радиоастрономии.

2) Разработка, изготовление и экспериментальное исследование перестраиваемого криогенного сеточного фильтра, по типу интерферометра Фабри-Перо, тонкопленочных фильтров, матриц капиллярных фильтров. Они необходимы для проведения измерений вольт-ваттных, ампер-ваттных и спектральных характеристик матриц планарных кольцевых антенн в криостатах при температурах 0,1 и 0,3 К, а также могут быть использованы на радиотелескопах для выделение требуемой полосы частот

3) Оптимизация существующей технологии изготовления образцов.

4) Исследование вольт-ваттных, ампер-ваттных характеристик разрабатываемых структур на внешнее электромагнитное излучение.

5) Измерение спектральных характеристик матриц кольцевых антенн: стандартного размера (полуволновые антенны) и электрически малых антенн.

Научная новизна

• Для спектральной калибровки матрицы планарных кольцевых антенн с СИНИС-детекторами впервые предложена и реализована оригинальная конструкция компактного перестраиваемого сеточного криогенного фильтра на основе интерферометра Фабри-Перо, позволяющего проводить калибровку детекторов. Данный прибор был помещен в криостат, была

продемонстрирована перестройка центральной частоты в диапазоне 100-500 ГГц, ширина полосы пропускания 4 ГГц.

• Детально изучено влияние близости нормального металла и объема сверхпроводника на работу СИН-переходов. Впервые экспериментально показано, что большая площадь сверхпроводника (*S*_{Al}/*S*_{SIN}=200 в сравнении с *S*_{Al}/*S*_{SIN}=3) и удаленность нормального металла от сверхпроводника на 5 мкм вместо 2 мкм позволяют устранить подавление энергетической щели в сверхпроводнике. На основе этих данных была оптимизирована топология СИНИС-детекторов.

• Впервые предложены, разработаны и исследованы три типа матриц электрически малых кольцевых антенн, в которые интегрированы СИНИСдетекторы. Использование кольцевых антенн, существенно меньшего размера, чем длина волны, позволяет значительно повысить плотность компоновки СИНИС-детекторов, улучшить чувствительность и повысить мощность насыщения приемной системы.

Теоретическая и практическая ценность работы

1) Разработанные, изготовленные и измеренные приемные матрицы планарных кольцевых антенн, с интегрированными в них СИНИСдетекторами, использованы в качестве прототипа приемника для исследований в области радиоастрономии.

 Разработанный, изготовленный и измеренный криогенный перестраиваемый фильтр использован для проведения спектрального анализа
 с помощью матриц планарных кольцевых антенн, с интегрированными СИНИС-детекторами, на наземных телескопах или аэростатных миссиях.

3) Измерены разработанные и изготовленные полосно-пропускающие фильтры. Относительный коэффициент пропускания составил более 0,9 (измерено методом замещения фильтра), ослабление вне полосы пропускания составило 11дБ. Получена ширина полосы пропускания 10-

90 ГГц для центральной частоты 330 ГГц. Размер и полученные характеристики фильтров позволяют использовать их для проведения измерений внутри криостатов.

4) Изготовленные и измеренные матричные капиллярные волноводные фильтры длиной 2 и 4 мм использованы как фильтры низких частот в криогенных установках.

5) Полученный рекордный отклик ПО напряжению на внешнее электромагнитное излучение матриц кольцевых антенн, ДЛЯ С интегрированными в них СИНИС-детекторами, с характерным диаметром кольца равным половине длины волны (2,6·10⁹ В/Вт) на частоте 345 ГГц, позволит проводить точные измерения для приема и оценки приходящего электромагнитного излучения на радиотелескопах.

6) согласования падающего электромагнитного Для излучения с детектором, показано, что лучшие спектральные измерения наблюдаются в случае расположения образца металлизацией (антеннами) к падающему электромагнитному излучению, при этом эффективная толщина подложки составляет $\lambda/4$. Эти выводы, полученные при помощи компьютерного моделирования, подтвердились экспериментом, В котором впервые конструкция подобного приемного (СИНИСреализована элемента детектора) для освещения со стороны антенн.

7) Разработанные матрицы электрически малых кольцевых антенн, позволят повысить плотность компоновки СИНИС детекторов, что увеличит допустимую приемную мощность, необходимую для работы в условиях высокой фоновой нагрузки. Полученный отклик напряжению ПО $(2,8.10^9 \text{ B/BT})$ для электрически матриц малых антенн позволяет использовать их наравне с матрицами стандартных кольцевых антенн. Экспериментально показан динамический диапазон более 30 дБ. Измерена спектральная характеристика в диапазоне 220-380 ГГц. Экспериментально

получена высокая флуктуационная чувствительность 74 мкК/Гц^{1/2} при уровне фона 2,7 К.

Методология и методы исследования

1. Для описания параметров СИНИС-детектора использовались методы теоретического расчета и метод численного моделирования, результаты которых в дальнейшем проверялись экспериментальным путем.

2. Для экспериментального исследования разработанных матриц планарных кольцевых антенн с СИНИС-детекторами были использованы следующие измерительные стенды:

а) для проведения измерений при комнатной температуре
 использовалась коммутирующая плата с малошумящими операционными
 усилителями с платой ЦАП-АЦП для управления с ПК;

б) для криогенных экспериментов использовался криостат Heliox фирмы Oxford Instruments с импульсной трубой в качестве первой ступени охлаждения и откачкой паров He₃ (температура 273 мК), а также криостат растворения, созданный В.С. Эдельманом в институте физических проблем им. П.Л.Капицы (минимальная температура 100 мК) [10], коммутирующая плата с усилителями при комнатной температуре, и плата ЦАП-АЦП для управления с ПК.

3. Для исследования отклика на электромагнитное излучение разработанных структур были рассчитаны и изготовлены сеточные полосно-пропускающие фильтры диапазона 250-400 ГГц. Для измерений спектрального отклика в качестве источника излучения использовали лампу обратной волны (ЛОВ) диапазона 230-380 ГГц, с квазиоптическим гауссовым трактом.

4. Для улучшения точности измерений была предложена и реализована конструкция криогенного спектрометра в виде перестраиваемого фильтра. Это позволило уменьшить влияние неоднородностей оптического

тракта за счет уменьшения числа фильтров и оптических экранов. Наличие перестраиваемого фильтра внутри криостата дало возможность избавиться от влияния внеполосного излучения.

5. В рамках данной диссертационной работы было проведено два типа исследований: измерение оптического отклика матриц планарных кольцевых антенн с СИНИС-детекторами на различную температуру черного тела (ЧТ) и спектральный отклик на внешнее электромагнитное излучение от ЛОВ. Для повышения точности эксперимента по изучению спектрального отклика использовалась схема с опорным каналом, в которой мощность излучения источника одновременно регистрировалась на пироэлектрическом приемнике.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается соответствием расчетов и различных типов экспериментов: с облучением от источника черного тела в криостате с различными фильтрами, облучением внешним источником ЛОВ, измерениями в разных криостатах и конфигурациях, с иммерсионной линзой и встречными рупорами.

Основные результаты проведённых исследований представлены в 55 работах, в том числе 28 – статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобразования и науки РФ, из них входящих в международные базы данных 23, а также в 22 докладах на международных и российских конференциях с публикацией расширенных тезисов, получено 6 патентов. Работы публиковались в ведущих специализированных изданиях: Superconductor Science and Technology, Applied Physics Letters, Journal of Physics, Journal of Applied Physics, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Радиотехника и электроника.

Публикации по материалам диссертации полностью отражают ее содержание.

Глава 1 Обзор криогенных детекторов микроволнового излучения

Эта глава носит обзорный характер. В ней представлено краткое описание существующих прямых детекторов мм и субмм диапазонов, приведены основные характеристики СИН-переходов, описаны возможные прототипы планарных антенн.

1.1 Прямые детекторы на основе эффекта сверхпроводимости

В современных детекторах для приема излучения в диапазоне мм и субмм эффекты, обнаруженные ДЛИН волн используют различные В сверхпроводящих материалах: резкий переход в состояние нулевого сопротивления (болометры на краю перехода, болометры на горячих электронах), разрыв куперовских пар (STJ); СИС-детекторы на квазичастичной нелинейности (интегральный приемник) и СИС-детектор на джозефсоновской нелинейности, кинетическая индуктивность (болометры на кинетической индуктивности), туннелирование электронов (СИНИСболометры, болометры на холодных электронах). Краткое описание каждого типа устройств можно найти в работах [А17], [11].

Сверхпроводниковые детекторы должны быть охлаждены до низких, зачастую, субкельвиновых температур, что в свою очередь снижает тепловые шумы по сравнению с обычными транзисторными устройствами, работающими при комнатных температурах.

Сверхпроводниковые детекторы условно можно разделить на два типа: у первых измеряются изменения характеристик, вызванные поглощением тепла, а вторые работают по принципу счета носителей заряда. Первые изменяют свои вольтамперные характеристики (BAX) за счет изменения числа носителей заряда, которое возникает из-за изменения температуры. В отличие от измерения температурных изменений, последние считают квазичастицы, образующиеся вследствие воздействия фотонов на

куперовские пары в сверхпроводнике, приводящего к их разрыву и изменению числа носителей. Такой принцип детектирования фотонов схож с ПЗС устройствами [12], но главным отличием от полупроводниковых детекторов является то, что ширина щели в сверхпроводнике примерно в 10⁴ раз меньше, что позволяет детектировать фотоны с энергией в 10⁴ раз меньше.

В детекторах, основанных на изменении температуры, фотон, попадающий на поглощающую пленку, передает энергию самой пленке и повышает ее температуру. При измерении изменения температуры можно вычислить энергию пришедшего фотона. Обычно подобные детекторы работают как калориметры и болометры. Калориметры измеряют энергию единичных фотонов, которые часто являются высокоэнергетичными фотонами большое изменение температуры, И создают например рентгеновские лучи (2*10⁻¹⁸—10⁻¹³ Дж, что соответствует длинам волн 10⁻⁷— 10⁻¹² м). Болометры работают с более низкоэнергетичными фотонами, в основном в субмиллиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн. В них происходит поглощение не одиночных фотонов, а всей приходящей мощности и происходит детектирование изменения температуры, которое постоянно наблюдается. На этих длинах волн детектирование одиночных фотонов обычно невыполнимо ввиду низкого отклика на сигнал.

В общем виде болометр - это тепловой детектор, состоящий из поглощающего (электромагнитную энергию) элемента и резистивного термометра. Поглощающий элемент нагревается, за счет абсорбции падающего излучения, тем самым изменяя свое сопротивление, что отражается в изменении электрического сигнала.

1.1.1 Болометр на краю сверхпроводящего перехода.

Наиболее изученным сверхпроводящим детектором, основанным на изменении температуры, является болометр на краю сверхпроводящего перехода (transition edge sensor-TES [7]) или БКП. БКП состоит из тонкой сверхпроводящей пленки, которая слабо связана с тепловым резервуаром при температуре $T_0 \sim T_c/2$. Основным режимом работы БКП является состояние, в котором сверхпроводящая пленка находится при температуре, близкой к переходу в нормальное состояние. Это довольно узкая область, в которой сопротивление пленки сильно чувствительно к температурным изменениям, происходящим из-за абсорбции фотона. БКП может быть использован и как болометр для измерения уровня пришедшей мощности, как это было впервые показано для инфракрасного излучения [13], и как калориметр для измерения энергии одиночного фотона, впервые это было сделано в работе с ниобия, бомбардировался использованием нитрида который альфачастицами [14].

электрическое сопротивление Характерное БКП В нормальном состоянии составляет несколько Ом. Поэтому для считывания сигнала с БКП обычно используются СКВИДы [15] – сверхпроводящие квантовые интерферометры, которые работают как усилители тока и могут быть легко согласованы по импедансу с сопротивлением БКП, как это было продемонстрировано в работе [9]. В БКП обычно используют режим задания напряжения.

Кроме очевидного преимущества (малый уровень шумов) СКВИДусилителей по сравнению с теплыми полупроводниковыми усилителями, первые позволяют производить считывание с матрицы БКП методом разделения каналов (мультиплексирования). Существует несколько типов мультиплексирования. Наиболее распространенным и простым является

временное мультиплексирование. В нем строки СКВИДов связанные с БКП последовательно включаются И опрашиваются. Различные столбцы СКВИДов, однако, считываются одновременно. При использовании этой методики становится возможной реализация большого массива БКП [16]. Теоретическая чувствительность БКП рассмотрена в работе [17] и составила 3*10⁷ А/Вт. В работе [18] описан БКП для японского телескопа SPICA. Была продемонстрирована МЭШ=2*10⁻¹⁸ Вт/Гц^{1/2} для измерений без облучения внешним электромагнитным сигналом, оцененная постоянная времени составила 65 мкс. Здесь стоит отметить, что быстродействие БКП может достигать порядка нескольких микросекунд, но только при условии наличия обратной связи, что в свою очередь усложняет конструкцию детектора.

БКП широко используются в радиоастрономии в субмм диапазоне: Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization 2 (BICEP2 [19]), the Submillimeter Common-User Bolometer Array 2 (SCUBA-2 [20]), и КЕСК Polarimeter Array [21].

К недостаткам болометра на краю сверхпроводящего перехода можно отнести требование поддержания температуры в рабочей точке болометра с высокой стабильностью (не хуже 10⁻⁵ К) и узкий динамический диапазон.

1.1.2 Детектор на кинетической индуктивности.

Обычно, индуктивность какого-либо участка цепи определяется по величине энергии магнитного поля, возникающего при протекании заданного тока по этому участку. Такую индуктивность принято называть магнитной или геометрической [22]. Но при создании в участке цепи тока *I* часть энергии переходит в кинетическую энергию электронов. С этой энергией можно ассоциировать кинетическую индуктивность [22]:

$$\int_{V} n_{e} \frac{1}{2} m v^{2} dV = \frac{1}{2} L_{k} I^{2} , \qquad (1.1)$$

где L_k – кинетическая индуктивность, *m* и *q* – масса и заряд электрона, $I=n_e qvA$, *A* – площадь поперечного сечения проводника. Интеграл берется по всему объему проводника. Если проводник является сверхпроводником, а пленка достаточно тонкая (d << λ – лондоновской глубины проникновения), то кинетическая индуктивность становится доминирующей в сравнении с геометрической.

Детектором на основе разрушения куперовских пар являются микроволновые детекторы на кинетической индуктивности. (MKID [8], [23]). Основная идея MKID заключается в следующем: при поглощении электромагнитной волны с энергией кванта hv, большей щели в сверхпроводнике (Δ), происходит разрыв куперовских пар с образованием квазичастиц, что вызывает изменение кинетической индуктивности пленки L_k .

Если реализовать LC контур, в котором роль L выполняет сверхпроводник, то попадание фотона на пленку сверхпроводника вызовет изменение L и, как следствие, сдвинет резонансную частоту контура. Измеряя резонансную частоту можно делать вывод о поглощенной энергии (от фотона). Качественно подобный механизм показан на рисунке 1.1. Резонансный контур имеет емкостную связь с микрополосковой линией, считывание происходит с использованием цифровой микроволновой электроники [24]. Подобные детекторы имеют высокий *Q*-фактор, который 10⁶-10⁷ для оптических МКІD [25, 26]. лостигать значений может Чувствительность подобных детекторов сильно зависит от размеров сверхпроводника. Чем меньше размер, тем выше чувствительность. Однако MKID имеют ограниченный динамический диапазон. Фазовый отклик подбирается таким образом, чтобы он не превышал 120°. К недостаткам MKID можно отнести длительное время релаксации квазичастиц, которое может составлять несколько миллисекунд. МЭШ для подобных детекторов

приводится на уровне 2*10⁻¹⁷ Вт*Гц^{-1/2} в работе [27] для мощности меньше 1 пВт. Для более высоких мощностей МЭШ пропорциональна *P*.



Рисунок 1.1 А) Фотон с энергией *hv>2*Д попадает на сверхпроводник, временно разрывает куперовскую пару, тем самым генерируя квазичастицы. Т.к. это уменьшает число заряженных носителей (Куперовских пар) в сверхпроводнике, поверхностное сопротивление также увеличивается. В) Эквивалентный контур для МКІD. С) Увеличение индуктивности сопровождается в уменьшении резонансной частоты и амплитуде сигнала на выходе. D) Сдвиг частоты может быть также рассмотрен как фазовый сигнал, который часто легче считывать, используя цифровую электронику при комнатной температуре. Иллюстрация из работы [8].

1.1.3 Детекторы на основе СИС-переходов.

Одним из наиболее ранних детекторов на основе разрушения куперовских пар можно назвать приемник на основе сверхпроводящего туннельного перехода (STJ) [28]. Принцип его работы основан на СИС

(сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник) джозефсоновском переходе [29]. Когда фотон попадает на STJ, он разрушает куперовские пары, тем самым генерируя квазичастицы, которые могут туннелировать через переход. Это создает туннельный ток в переходе, который пропорционален энергии фотона. Туннельный ток состоит из пришедшего двух компонент: туннелирование куперовских пар и ток квазичастиц. При конечной ненулевой температуре присутствует небольшой ток квазичастиц, называемый подщелевым током, который присутствует при смещении меньше, чем значение сверхпроводящей щели. Подобные детекторы имеют существенный недостаток, связанный с их изготовлением: разные STJ могут джозефсоновских иметь разный уровень токов. Существуют схемы считывания для массивов таких элементов, на основе одноэлектронных транзисторов [30], но такие схемы сложны в реализации.

1.1.4 Болометры на основе СИН-переходов.

Основная идея болометра на СИН-переходе (сверхпроводник-изоляторнормальный металл) [31] заключается в следующем: тонкая пленка поглотителя субмикронных размеров из нормального металла поглощает излучение, температура электронов в поглотителе возрастает и это изменение фиксируется при помощи СИН-перехода. Туннельный ток через переход определяется «хвостом» Ферми- распределения электронов в нормальном металле, который экспоненциально зависит от температуры электронов в металле, и изменяется как $exp(-(\Delta - eV)/kT_e)$, где T_e — температура электронов в нормальном металле, V-напряжение смещения. Так как ВАХ СИН-перехода зависит только от T_e , то СИН-переход может быть использован как термометр, для измерения температуры электронов в металле. Например, это было продемонстрировано в работах [32], [А1]. Зачастую болометры на основе СИН-переходов используются в субмиллиметровых диапазонах и в этом случае характерные размеры детектора существенно меньше, чем длина волны, поэтому необходимо использовать приемные элементы - антенны. Мощность излучения при помощи антенн концентрируется и рассеивается в поглотителе, сигнал в дальнейшем усиливается и подвергается необходимой обработке.

Первое упоминание СИН-болометра было в работе Кларка, Хофера и Ричардса в 1974 г. [31]. Он был выполнен из Pb/Al₂O₃/Al. Далее на протяжении почти 20 лет СИН-болометр без изменений упоминался в различных докладах, посвященных микроволновым детекторам [33, 34, 11].

В 1992 г. Наум, Ричардс и Мирс на конференции по прикладной сверхпроводимости [35] представили новую концепцию микроболометра на горячих электронах (рисунок 1.2) с использованием СИН-перехода. Эффект «горячих электронов» связан со слабой связью между электронной и фононной подсистемами в нормальном металле, что приводит к разогреву электронной подсистемы, за счет абсорбируемой мощности микроволнового излучения. Этот доклад, по сути, стал результатом работы этой группы за период 1990-1992 гг., см., например, [36, 37], т.к. отдельные расчеты и рассуждения докладывались и публиковались ранее. была Антенна выполнена сверхпроводника, черным обозначен поглощающий ИЗ (термализующий) элемент-поглотитель. Результирующее изменение СИН-туннельным температуры фиксировалось переходом. Важным изменением по сравнению с существующими композитными болометрами того времени было существенное уменьшение объема нормального металла, что позволило значительно увеличить чувствительность.



Рисунок 1.2. Иллюстрация схемы первого микроболометра на горячих электронах. Иллюстрация из работы [35].

Чуть позже, ученые из этой же группы представили экспериментальную работу по изучению сверхчувствительного микроболометра на горячих электронах [38]. Уже в этой работе использовались методы электронной литографии и напыление под углами для изготовления болометра. Характерные толщины сверхпроводниковых электродов составляли 50 нм, были выполнены из алюминия. Туннельный барьер представлял собой Al_2O_3 с характерным режимом окисления 500 мТорр в течение 5 минут. В качестве нормального металла была выбрана медь шириной 0.3 мкм, длиной 6 мкм и толщиной 75 нм. Была продемонстрирована чувствительность 10^9 В/Вт при 100 мК и 10^8 В/Вт при 300 мК в случае нагрева постоянным током.

Несколькими годами позже та же группа ученых описывает одно из свойств СИН-перехода: электронное охлаждение [39]. Оно было продемонстрировано на СНИС-структуре (рисунок 1.3) с алюминием в качестве сверхпроводника и меди как нормального металла. Авторы заметили, что эффект электронного охлаждения хорошо описывается теорией БКШ для температур выше 100 мК, но не ниже. Проведя дополнительные независимые измерения, они пришли к выводу, что расхождение связано с влиянием нормального металла на щель в сверхпроводнике в районе перекрытия этих слоев. Характерное сопротивление СИН-перехода в этой работе составило 10 кОм. Результатом работы стало получение охлаждаемой мощности порядка 7 фВт при 100 мК, что дало уменьшение электронной температуры на 15 мК.



Рисунок 1.3.(а) Схема электронного охладителя. Термометр и охладитель представляют собой туннельные переходы Т и R соответственно. (б) Энергетическая диаграмма для туннельного охладителя. На туннельном переходе задается смещение, близкое к значению энергии щели в сверхпроводнике Δ , но меньше ее. Т.о. только электроны, энергия которых выше E_F туннелируют из нормального металла. Взято из [39].

Что касается структуры типа СИНИС, то одним из первых упоминаний в научной литературе является работа М. Бламайра из Кембриджа [40]. СИНИС-болометр представляет собой структуру в виде сверхпроводникизолятор-нормальный металл-изолятор-сверхпроводник. Т.е. по сути это два последовательно включенных СИН-перехода с общим нормальным металлом.

Но первой работой с парой СИН-переходов для наблюдения электронного охлаждения можно считать [41]. Авторы называли данную структуру по названию слоев, которые ее образуют: СИНИС-структура или СИНИСохладитель (рисунок 1.4). Четыре туннельных перехода были изготовлены вокруг центрального электрода из нормального металла (Cu) и четырех сверхпроводящих (Al) электродов. Два перехода по краям имели бо́льшую площадь и использовались как охладители, а центральная пара электродов выполняла роль термометров.



Рисунок 1.4. (а) Схема СИНИС-охладителя. (б) Изображение реальной структуры СИНИС-охладителя в АФМ. Перепечатано из работы [41].

Авторы также продемонстрировали, что для улучшения охлаждения при помощи СИН-переходов необходимо уменьшить нормальное сопротивление СИН-переходов, в сравнении с работой [39]. В этом случае они изготовили СИН-переходы с сопротивлением 1 и 1,1 кОм. На этих образцах было продемонстрировано охлаждение электронной температуры до 100 мК при температуре в криостате 300 мК. Также авторы заметили, что максимальная мощность электронного охлаждения наблюдается в районе $V\approx 2\Delta e$, при этом Δ_{Al} =180 мкэВ. Мощность электронного охлаждения составила 2 пВт/мкм².

Годом позже эффект электронного охлаждения СИН-переходами был использован для охлаждения тонкой диэлектрической мембраны Si₃N₄ толщиной 200 нм [42]. В результате им удалось охладить мембрану на 2 %, от начальной температуры в 200 мК.

Чуть позднее выходит работа [43], в которой предлагается использование СИНИС-структуры как болометра. Авторы называют ее болометром на горячих электронах с емкостной связью (рисунок 1.5). Основной идеей публикации является сравнение СНС-болометра и СИНИС-болометра. В наблюдается последнем не ограничения ПО принимаемой частоте микроволнового излучения, связанного с наличием Андреевских зеркал (НСконтакты). Проблемы в СНС-структуре наблюдаются для частот, энергия которых больше значения щели в сверхпроводнике. В СИНИС-болометре (NHEB-CC, авторское название) подобной проблемы нет, так как высота туннельного барьера достигает 2 эВ. Также в этой структуре предполагалось использование отдельной пары СИН-переходов в качестве термометра (на рисунке 1.5 в центре).



Рисунок 1.5. Предложенная концепция болометра на горячих электронах с емкостной связью. [43]

В этой же статье авторы предлагают оптимальную конфигурацию NHEB-СС. Согласно этой теории СИН-переходы должны выполнять три задачи: измерение температуры, емкостную связь с антенной и термическую изоляцию поглощающего элемента (поглотителя) рисунок 1.6.



Рисунок 1.6. Конфигурация NHEB-CC. [43].

Помимо этих двух идей была также высказана идея использования СИН-контактов, подобно изображенных на рисунке 1.5 в центре, в качестве охлаждающих СИН-переходов для NHEB-CC.

В этом же году на конференции SPIE предложена новая концепция болометра на «холодных электронах» [44]. Эта структура представляла собой СНС-болометр с 4-СИН-переходами, подключенными к нормальному металлу. Одна пара электродов представляла собой термометр, другая пара - электронный охладитель.

В 2003 году выходит работа [45] в которой структура, изображенная на рисунке 1.6, получает название сверхпроводниковый болометр на холодных электронах (СБХЭ). В то же время публикуется работа [46], в которой та же структура фигурирует с названием болометр на горячих электронах с нормальным металлом.

Еще годом позже выходит работа [47], в которой вышеописанной конструкции дается имя СИНИС-болометр. И в это же время публикуется

работа [48], в которой конструкции, предложенной еще в 1998 г., присваивается еще одно имя: болометр на холодных электронах.

Таким образом, у одной и той же конструкции имеется множество имен: болометр на горячих электронах с емкостной связью, сверхпроводниковый болометр на холодных электронах, болометр на горячих электронах с нормальным металлом, болометр на холодных электронах, СИНИС-болометр и, наконец, СИНИС-детектор.

1.2 Основные характеристики и свойства СИНИС-детекторов.

1.2.1 Ток в СИН-переходе.

ВАХ СИН-перехода при $T < 0,5T_{\kappa}$ зависит только от температуры электронов в нормальном металле и практически не зависит от температуры сверхпроводящего электрода [49].

Процесс туннелирования электронов в СИН переходе описывается набором хорошо известных уравнений [50]. Туннелирование электронов с энергией *E* из нормального металла в сверхпроводник определяется формулой (1.2),

$$|\Gamma|_{N \to S} (E) = \frac{N_{S}(E - eV)}{e^{2} \cdot R} n(E, T_{e}) [1 - n(E - eV, T_{S})]$$
(1.2)

где Г-число электронов, перешедших из N в S область, *е*-заряд электрона, *V*напряжение, приложенное к СИН переходу, и в обратном направлении (1.3)

$$|\Gamma|_{S \to N} (E) = \frac{N_{S}(E - eV)}{e^{2} \cdot R} n(E - eV, T_{S})[1 - n(E, T_{e})]$$
(1.3)

где $N_s(E) = \theta(E^2 - \Delta^2)|E|/\sqrt{E^2 - \Delta^2}$ нормированная плотность состояний в сверхпроводнике, θ - функция Хэвисайда и $n(E,T) = 1/[\exp(E/T) + 1]$ фермиевская функция заполнения для электрона с энергией *E*. Ток, возникающий в СИН переходе, определяется как разность (1.2) и (1.3) умноженная на заряд электрона *-e*, и проинтегрированная по всем

энергиям (1.4).

$$I(V, T_e) = -e \int dE[|\Gamma|_{N \to S} (E) - |\Gamma|_{S \to N} (E)]$$
(1.4)

Электроны могут пройти через туннельный барьер только в случае туннелирования - следствие неопределенности в квантовой механике, гласящей, что существует конченая возможность найти электрон с другой стороны барьера. В нормальном металле электроны занимают состояния с почти постоянной плотностью по всему уровню допустимых энергий, в то время как в сверхпроводнике есть щель, в которой электроны не могут существовать. Электроны в нормальном металле, находящиеся на энергиях, соответствующих энергиям туннелировать щели, не могут через изоляционный барьер. В отсутствии внешнего напряжения, N и S регионы находятся в состоянии термодинамического равновесия с химическим потенциалом, проходящим посередине энергетической щели.

Если к СИН переходу приложить напряжение V, химический потенциал в N смещается относительно S. При T=0 туннельный ток отсутствует до тех пор, пока |eV| < 0. Величина тока не зависит от знака V, т.к. дырочное и электронное возбуждения имеют равные энергии. При T>0, рисунок 1.7, всегда существуют возбуждения с энергией, позволяющий им туннелировать при меньших напряжениях, что приводит к экспоненциально меняющемуся току в области напряжений, меньших $V=\Delta/e$.



Рисунок 1.7 Энергетическая диаграмма СИН перехода при приложении внешнего напряжения V.

Если считать, что распределение электронов по энергии описывается функцией Ферми, то форму ВАХ СИН-перехода при температурах много меньше критической с достаточно высокой точностью можно описать выражением (1.5) [51]

$$I(V,T) = \frac{1}{eR_n} \sqrt{2\pi kT\Delta} * exp\left(-\frac{\Delta}{kT}\right) * \sinh\left(\frac{eV}{kT}\right), \qquad (1.5)$$

где R_n нормальное сопротивление перехода, T электронная температура, Δ энергетическая щель, е заряд электрона, k постоянная Больцмана, V напряжение.

О величине электронной температуры можно судить по форме вольтамперной характеристики СИН перехода, у которого вид ВАХ непосредственно зависит от электронной температуры нормального металла [32], [A1, A31].

Из уравнения (1.5) можно получить зависимость дифференциальной проводимости *G* на переходе от напряжения смещения при разных температурах (1.6).

$$G = \frac{1}{R_d} (V, T) = \frac{1}{R_n} \sqrt{\frac{2\pi * 1.76T_c}{T}} * exp\left[-\frac{1.76T_c}{T}\right] * \cosh\left(\frac{eV}{kT}\right)$$
(1.6)

Согласно теории БКШ [52] плотность состояний в сверхпроводнике равна

$$\nu_0(E) = \left| Re \frac{\frac{E}{\Delta}}{\sqrt{\left(\frac{E}{\Delta}\right)^2 - 1}} \right| \tag{1.7}$$

где *Δ* энергетическая щель. Экспериментальные ВАХ, как правило, отклоняются от теории БКШ, обнаруживая подщелевую проводимость и довольно низкую проводимость на краю щели. Для описания этих эффектов к плотности состояний из теории БКШ добавляют полуэмпирический параметр Дайнса γ [53].

$$\nu_0(E) = \left| Re \frac{\frac{E}{\Delta} - i\gamma}{\sqrt{\left(\frac{E}{\Delta} - i\gamma\right)^2 - 1}} \right|$$
(1.8)

Благодаря этому параметру значение плотности состояний в районе щели становится конечным и обратно пропорциональна корню из параметра Дайнса.

$$\nu_0(E) = \left|\frac{1}{\sqrt{\gamma}}\right| \tag{1.9}$$

В идеальном случае (БКШ) $\gamma = 0$. В реальных сверхпроводниках этот параметр может варьироваться от $\gamma = 10^{-2}...10^{-4}$. Считается, что возникновение такого сглаживания расходящейся плотности состояний вблизи щели может быть объяснено несколькими причинами: туннелирование под действием фотонов излучения, андреевские токи, подавление сверхпроводимости эффектом близости, подщелевые состояния за счет примесей, микрозакоротки. На ВАХ идеального СИН перехода увеличение плотности состояний отражается на участке в районе щели, где ток резко возрастает. Так как ток возрастает, напряжение не изменяется, следовательно, сопротивление уменьшается. По теоретическим оценкам, сопротивление возле края щели должно стремиться к нулю. В эксперименте [A1, A31], наблюдалось уменьшение этого сопротивления до нескольких Ом. Это подтверждает тот факт, что возле щели реально плотность состояний не стремиться к бесконечности, как это должно быть по теории БКШ, а размывается, из-за влияния различных паразитных эффектов, которые учитываются параметром Дайнса. Сопротивление в изученных образцах уменьшается больше, чем на 2 порядка, отсюда можно оценить, что параметр Дайнса, меньше, чем $\gamma = 10^{-4}$ [A1, A23, A31].

1.2.2 Эффект горячих электронов

Электроны называют горячими электронами, когда распределение в нормальном металле может быть описано с эффективной температурой выше, чем температура решетки. Этот эффект впервые был описан в полупроводниках и был использован для создания первого детектора на горячих электронах миллиметровых и субмиллиметровых длин волн [54, 55]. Падающее излучение, попадающее полупроводник, на поглощается свободными носителями и повышает их температуру и подвижность. Похожий эффект можно наблюдать в металлах, включая сверхпроводники. Каждое взаимодействие фотона и электрона в металле приводит к поглощению энергии фотона с частотой у электроном, который увеличивает свою энергию на hv. При низких температурах, электрон-фононное взаимодействие слабое и эти «горячие электроны» могут обменивать свою энергию электронами электрон-электронное с другими через взаимодействие. Постоянная времени электрон-фононного взаимодействия τ_{e} . заметно выше, чем электрон-электронная τ_{e-e} [56, 57]. Например, τ_{e-} ph

 $_{ph}$ =52 нс, в то время как τ_{e-e} = 16 нс для T=2 К. Таким образом, может быть установлено распределение электронов с повышенной эффективной температурой.

1.2.3 Обратная электротермическая связь.

Механизм обратной электротермической связи впервые был описан в 1995 году К. Ирвиным [58]. Тонкая сверхпроводящая пленка, охлажденная до температуры ниже, чем Т_к, измеряется в режиме задания напряжения. Напряжение смещения подбирается таким образом, чтобы эта пленка находилась в нормальном состоянии (пограничном). Падающее внешнее излучение рассеивается в пленке, которая уже является резистивной. Это уменьшению мощности, которая приводит к выделяется за счет приложенного напряжения и, следовательно, уменьшает температуру пленки, возвращая ее в исходную рабочую точку. Таким образом, ток, текущий через устройство, пропорционален падающей мощности и может быть измерен с помощью СКВИДа.

В СИНИС-болометрах обратная электротермическая связь происходит благодаря эффекту электронного охлаждения. Приходящее излучение нагревает электронную подсистему в нормальном металле поглотителя, СИН-переход находится под напряжением, чуть меньшем, чем ширина щели. В этом случае туннельный ток будет выносить горячие электроны из нормального металла, тем самым охлаждая его. В СИНИС-болометре при условии задания напряжения, ток, текущий через СИН-переход, благодаря обратной электротермической связи, зависит от температуры электронной системы в нормальном металле. Похожий принцип работы СИНИСболометра и в условиях задания тока: напряжение на СИН-переходе пропорционально электронной температуре в металле. При правильно заданном напряжении смещения (или тока) электронная система может быть охлаждена ниже, чем температура фононной системы, благодаря слабому электрон-фононному взаимодействию при низких температурах.

1.2.4 Электронное охлаждение

При низких температурах электроны в металле становятся термически развязанными от фононов. В частности, температура электронов может фононов. В 1994 г Наум отличаться от температуры и др. [39] экспериментально продемонстрировали возможность достижения температуры электронов ниже, чем фононов. Чуть позже, Лейво, Пекола и Аверин повторили этот эксперимент и улучшили его результат [41]. Было показано, что возможно существенно охладить электроны в нормальном металле в структуре СИНИС, где С-сверхпроводник из алюминия. Авторы продемонстрировали охлаждение электронной подсистемы с 300 мК до 100 мК. Заметное улучшение электронного охлаждения было достигнуто благодаря оптимизации сопротивления туннельного перехода (10 кОм у Наума и др. и 1 кОм у Лейво и др.), а также охлаждаемой структуры (СИНС в ранних и СИНИС в поздних образцах).

В этих работах было показано, что электронное охлаждение в СИНпереходе имеет максимум мощности на смещении порядка щели. Оптимальное значение мощности охлаждения должно быть при температурах $k_b T \approx 0.3 \Delta$, где оно достигает $P_C = 0.06 \Delta^2 / e^2 R_N$, после чего уменьшается, как $(k_b T/\Delta)^{3/2}$ [59]. В общем виде мощность электронного охлаждения получена в работах, например [39, 44, 41]. В частности, при температурах $k_bT << \Delta$ и напряжениях $k_bT < eV < \Delta - k_bT$ мощность электронного охлаждения может быть записана как [60]:

$$P_{c} = \frac{\sqrt{2\pi\Delta k_{b}T}}{2eR_{N}} \left(\frac{\Delta}{e} - V\right) exp\left(-\frac{\Delta - eV}{k_{b}T}\right)$$
(1.10)

1.2.5 Уравнение теплового баланса

Одним из способов анализа структуры с двумя СИН-переходами (СИНИС-болометр) является уравнение теплового баланса, которое принимает во внимание энергии, связанные с тепловыми процессами и подходит для описания работы болометра на постоянном токе (ω=0) [61, 62]:

$$2P_N + 2\beta P_s - \Sigma \Lambda \left(T_e^5 - T_{ph}^5\right) + I^2 R_a + P_0 + \delta P = 0 \tag{1.11}$$

Здесь P_0 - уровень фонового сигнала, δP - полезный сигнал, $\sum \Lambda (T_e^5 - T_{ph}^5)$ тепловой поток между электронной и фононной системами, $2P_N$ – мощность электронного охлаждения, I^2R - джоулевый нагрев нормального металла, $2\beta P_s$ - нагрев за счет возврата квазичастиц из сверхпроводника, Λ - объем нормального металла, Σ - постоянная материала.

1.2.6 Теория Девятова, Крутицкого, Куприянова - квантовый подход.

Подход к оценке работы СИНИС-болометра, описанный выше, справедлив для случая работы в режиме нагрева при помощи постоянного тока (джоулевый нагрев), заданного через СИНИС-болометр ($\omega=0$) [60].

Однако, когда мы рассматриваем СИНИС-болометр как детектор микроволнового излучения, такая оценка уже не является справедливой, т.к. характерная энергия кванта излучения hv для частот порядка 350 ГГц выше, чем классическая энергия электрона в поле волны $W_c = e^2 E^2 / 4m\omega^2$, где *E*напряженность электрического поля, *т* и *е* масса и заряд электрона [63]. В этом случае уравнение теплового баланса не способно адекватно отразить общую картину поглощения кванта излучения, т.к. процесс поглощения излучения является не классическим, а квантовым. Непосредственно после фотона поглощения функция распределения n_e электронов имеет существенно неравновесный вид и не может быть описана с помощью распределения Ферми [64]. Форма функции n_e сильно зависит от электронэлектронной и электрон-фононной скоростей релаксации, а также от возможности генерации неравновесных фононов в поглотителе. Анализ, проведенный в работе [65] показал, что ампер-ваттная чувствительность может превысить предел «фотонного счетчика» $\stackrel{e}{-}\hbar\omega$, только в том случае, когда эффективное размножение электронов происходит в поглотителе, после акта поглощения фотона.

Поэтому для корректного описания детектирования внешнего электромагнитного сигнала СИНИС-болометром необходимо использовать интегралы столкновений и рассчитывать характерные времена электронфононного, электрон-электронного, фонон-электронного взаимодействий [56]. Это было продемонстрировано в работах [A16, A18, A24].

1.2.7 Шумы

Общая мощность эквивалентная шуму (МЭШ) детектора образуется из нескольких составляющих и хорошо описана в работе [60]:

$$M \ni \coprod_{\text{общий}}^{2} = \frac{\langle \delta I_{w}^{2} \rangle_{amp}}{S_{I}^{2}(0,V)} + M \ni \coprod_{e-ph}^{2} + M \ni \coprod_{CHH}^{2}$$
(1.12)

Здесь $<\delta I_w^2 >_{amp}$ токовая чувствительность усилителя СКВИДа; МЭШ_{СИН}шум, связанный с СИН-переходом:

$$M\Im III_{CHH}^{2} = <\delta P_{w}^{2} > -2\frac{<\delta P_{w}\delta I_{w}>}{S_{I}(0,V)} + \frac{<\delta I_{w}^{2}>}{S_{I}^{2}(0,V)}$$
(1.13)

МЭШ_{е-ph} шум, связанный с электрон-фононным взаимодействием в нормальном металле:

$$M\Im III_{e-ph}^{2} = 10k_{b}\Sigma \Lambda (T_{e}^{6} + T_{ph}^{6}), \qquad (1.14)$$

а именно, шум, возникающий из-за теплового потока между электронами и фононами. Последнее выражение есть упрощенный вид формулы, приведенной в [61] для чистого металла. Это выражение может быть также

записано в виде $2k_bG_eT_e^2 + 2k_bG_{ph}T_{ph}^2$, где $G_{ph} = 5\Sigma\Lambda T_{ph}^4$ и $G_e = 5\Sigma\Lambda T_e^4$ это теплопроводности фононной и электронной подсистем соответственно. В случае равновесия $T = T_e = T_{ph}$ электрон-фононный шум уменьшается и формула переходит в стандартную формулу шума Найквиста (теплового): МЭШ= $4k_bGT^2$.

Приведенная выше формула для общего МЭШ справедлива для случая задания напряжения. В режиме работы задания тока следует заменить в формуле для МЭШ_{общ} шумы усилителя по току δI на шумы усилителя по напряжению δV и чувствительность по току $S_{I}^{2}(0, V)$ на чувствительность по напряжению $S_{V}^{2}(0, I)$.

Электрический ток через СИН переход флуктуирует. Низкочастотная плотность состояний таких флуктуаций (дробовой шум) может быть получена путем суммирования туннелирующих электронов по распределению Пуассона (1.14)

$$\langle \delta \mathbf{I}^{2} \rangle_{w} = 2e^{2} \int dE[|\Gamma|_{N \to S} (\mathbf{E}) + |\Gamma|_{S \to N} (\mathbf{E})]$$
(1.15)

Пример использования дробового шума для измерения температуры дан в работе [66].

В равновесии температуры сверхпроводника и нормального металла равны и (1.15) переходит в хорошо известное выражение (1.16)

$$\langle \delta I^2 \rangle_w = 2eI \operatorname{coth}(eV/2kT)$$
 (1.16)

1.2.8 Чувствительность

Чувствительность болометра — это изменение измеренного электрического параметра (тока или напряжения) на единицу поглощенной мощности излучения. Поглощенная мощность повышает температуру электронной системы, а туннельный ток уменьшает ее через электронное
охлаждение. Также можно использовать термины вольт-ваттная чувствительность и ампер-ваттная чувствительность. Существует еще определение отклика на электромагнитное излучение. Оно означает абсолютное изменение параметра – напряжения или тока.

В случае если нет сильного перегрева ни фоновой мощностью, ни мощностью принимаемого сигнала, изменение температуры поглотителя может быть описано с хорошей точностью формулой для электрон-фононного взаимодействия (1.17).

$$P_{sig} = \sum \Lambda \left(T_e^5 - T_{ph}^5 \right)$$
 (1.17)

где Σ [Вт/м⁻³К⁻⁵] - параметр материала, Λ - объем поглотителя, T_e температура электронной подсистемы, T_{ph} -температура фононной подсистемы. Здесь можно не учитывать эффект электронного охлаждения: согласно выражению (1.10), мощность электронного охлаждения играет роль только при смещении по напряжению в районе щели, которое не является оптимальным для экспериментов с оптической нагрузкой.

В этом случае электрон-фононная теплопроводность $G=dP/dT_e$, что соответствует чувствительности по напряжению (1.18):

$$S = \frac{dV}{dP} = \frac{dV}{dT} * \frac{dT}{dP} = \frac{dV}{dT} * \frac{1}{G} = \frac{dV}{dT} * \frac{1}{5\Sigma\Lambda T_e^4}$$
(1.18)

В работах [А7, А8] СИНИС-болометры с подвешенными мостами были интегрированы в двойную щелевую и логопериодическую антенну. Технология подвешенных мостов (в данном случае это полоска из меди, которая является поглотителем) используется для того, чтобы развязать тепловые системы подложки и СИНИС-болометра, тем самым улучшив чувствительность. Была продемонстрирована чувствительность в 3*10⁸ В/Вт и 1,1*10⁴ А/Вт.

1.3 Антенны для приема внешнего электромагнитного излучения.

Размеры СИНИС-болометра существенно меньше, чем длина волны излучения для характерных частот в мм и субмм диапазонах. Поэтому для связи падающего излучения с детектором используются планарные антенны.

1.3.1 Дипольная антенна

Диаграмма направленности дипольной антенны известна и представляет собой круг в плоскости Н [67]. В случае если дипольная антенна находится на диэлектрической подложке, происходит видоизменение диаграммы направленности из круга, в вытянутые лепестки, которые направлены в диэлектрик. Таким образом, при приеме сигнала подобными антеннами возбуждаются подложечные моды, что, в свою очередь, приводит к потерям сигнала.

1.3.2 Кольцевая антенна.

Основные характеристики кольцевой антенны можно найти в работах [68, 69]. Хочется отметить основные достоинства подобных приемных устройств. Диаграмма направленности представляет собой вытянутый лепесток. Добротность и полоса приема могут быть подобраны за счет изменения диаметра и ширины кольца.

Еще одним достоинством кольцевой антенны по сравнению с дипольной является ее способность принимать две поляризации, в то время как дипольная антенна может принимать только одну.

1.3.3 Матрицы антенн.

Мощность фонового излучения даже в условиях работы на наземных высокогорных или баллонных обсерваториях может достигать десятки пиковатт на одну пространственную моду. Зачастую это оказывается выше мощности насыщения одиночного СИНИС-болометра (менее 1 пВт). При

объединении таких структур в матрицы мощность сигнала распределяется между отдельными болометрами, что позволяет принимать внешнее излучение с мощностью, превышающей десятки пиковатт [70, 71].

Следует различать фазированные антенные решетки и матрицы не фазированных антенн.

Фазированная антенная решетка [72, 73] представляет собой антенную решетку, направление излучения или форма диаграммы направленности, которой регулируются амплитудно-фазовыми распределениями токов или полей возбуждения на излучающих элементах. В антенной решетке диаграмма направленности формируется за счет интерференции электромагнитных волн, излучаемых в пространство ее элементами (одиночными антеннами). Важным отличием ФАР от простой антенной решетки является то, что амплитудно-фазовое распределение не является фиксированным, а может управляться за счет изменения фаз микроволн. ФАР отличаются узкой диаграммой направленности. В случае матрицы планарных кольцевых антенн, диаграмма направленности существенно шире, как у одиночной антенны. В рупоре это компенсируется облучением со всех сторон.

Кроме ФАР существуют так называемые матрицы изображения (imaging array). Будущие поколения приборов для применения В исследовании нашей галактики требуют массивов из тысяч элементов для изображения большого участка небесной сферы. Использование детекторов в фокальной плоскости в оптической системе, к примеру, как в матрицах ПЗС, позволяет создать дизайн системы с такими требованиями. Достоинством такой системы является возможность сканировать участок неба и представлять его в виде массива точек, согласующихся с массивом приемной матрицы. Подобные системы требуют также матрицы рупоров либо линз для

каждого приемного пикселя, как это было предложено в работе [74], что существенно усложняет конструкцию и увеличивает ее размеры.

В случае приема сигнала большой мощности (в нашем случае выше 1 пВт) необходимо использовать массив антенн. В рамках данной работы были рассмотрены различные массивы планарных кольцевых антенн, объединенные в прямоугольную матрицу для приема сигнала большой мощности. Элементы матрицы соединены последовательно или параллельно. Пример использования матриц в виде колец как приемной структуры дан в работе [75].

1.4 Фильтры мм и суб мм длин волн.

Фильтры мм и суб-мм длин волн имеют различные конструкции в своей основе: частотно-селективные поверхности, волноводы, рупора.

1.4.1 Фильтры на основе ЧСП

Частотно-селективная поверхность (ЧСП) [76] это периодически расположенные простые металлические повторяющиеся рисунки, которые взаимодействуют с внешним электромагнитным излучением. ЧСП работает как реактивный элемент на пути распространения электромагнитной волны. ЧСП может отражать, пропускать или поглощать излучение в полосе частот. Такая «металлическая сетка» является популярной в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне длин волн. Одним из возможных применений является использование таких поверхностей как фильтров: полоснопропускающих фильтров, фильтров высоких частот (ФВЧ), фильтров низких частот (ФНЧ), режекторных фильтров.

В общем виде теория для фильтров на основе металлических сеток была обобщена Ульрихом [77] и развита Моллером и др. [78] Существует разделение таких фильтров на 3 основных вида: емкостные, индуктивные и комбинация емкостных и индуктивных в форме крестов - рисунок 1.8.



Рисунок 1.8. Левая часть - емкостная сетка, правая - индуктивная, центральная - их комбинация в виде крестового фильтра. [78]

Подобная терминология связана с эквивалентными электрическими схемами, используемыми для описания таких сеток. Для полосовых фильтров были выбраны "индуктивные" сетки с крестовыми отверстиями. Период сетки определяет длину волны, на которой дифракцией формируются лепестки диаграммы направленности решетки. Основные характеристики фильтров можно качественно описать противофазной интерференцией в направлении вдоль плоскости фильтра (расстояние между соседними крестами составляет половину длины волны) и синфазной интерференцией в направлении перпендикулярно поверхности фильтра.

В первом приближении полосовая характеристика описывается теорией Ульриха [77, 79, 80], согласно которой отверстие ячейки рассматривается как диафрагма в волноводе и описывается как параллельный колебательный LCконтур, включенный в линию передач с характеристическим импедансом Z₀, равным волновому сопротивлению вакуума. Это приближение имеет смысл в области одномодовости волновода и поэтому не применимо как для слишком длинных, так и для слишком коротких длин волн ($\lambda >> P$, $\lambda << P$, где P — период сетки).

Существуют три механизма пропускания со своими резонансными частотами и полосами, которые можно объединить в одной простой модели с лоренцовой формой линии резонанса для каждой из них. Основная линия пропускания соответствует резонансной длине щели креста, вторая линия пропускания соответствует интерференции от переднего и заднего отверстия щели, т.е. зависит от толщины металла, а также линия поглощения на аномалии Вуда связанная с периодом решетки.

1.4.2 Круглый волновод

В качестве связующего звена в оптическом тракте были использованы волноводные фильтры.

Волновод собой представляет систему распределенными С параметрами [81], в которых может существовать дискретный набор типов колебаний (мод). Волноводы бывают различных типов И форм: прямоугольные, круглые, параллельные (пластины). В круглых И прямоугольных волноводах могут распространяться только ТЕ и ТМ моды. Поперечная электрическая и поперечная магнитная моды соответственно. Для ТЕМ моды необходимо два проводника, поэтому она может быть только в волноводе, образованном двумя параллельными проводящими пластинами.

Для наших целей был использован волновод круглого сечения. Наименьшими модами круглого волновода являются TE₁₁ и TM₀₁, где первая цифра означает число (полных) периодов стоячей волны, укладывающейся вдоль периметра волновода и вторая цифра – число полупериодов, укладывающихся вдоль радиуса. Очевидно, что в круглом волноводе моды TE₁₀ и TM₁₀ отсутствуют.

Одной из основных характеристик волновода является частота среза, ниже которой распространение электромагнитной волны на большое расстояние невозможно вследствие сильного затухания. Для круглого волновода расчёт частоты среза производится по формуле:

$$f_c = \frac{p_{mn} * c}{2\pi a * \sqrt{\mu \varepsilon_r}} \tag{1.19}$$

где p_{mn} -n-ый корень функции Бесселя $J_m(x)$ первого рода, m-ого порядка (см. таблицу 1.1), с - скорость света, а - радиус волновода, ε_r - относительна диэлектрическая проницаемость среды в волноводе, μ – относительная магнитная проницаемость среды в волноводе.

Мода	p_{mn}	Мода	$\hat{p_{mn}}$
TE ₀₁	3.832	TM_{01}	2.405
TE_{11}	1.841	TM_{11}	3.832
TE_{21}	3.054	TM_{21}	5.136
TE_{02}	7.016	TM_{02}	5.520
TE ₁₂	5.331	TM ₁₂	7.016
TE ₂₂	6.706	TM ₂₂	8.42

Таблица 1.1 Корни функции Бесселя [81].

Как видно из таблицы 1.1 мода TE₁₁ является основной модой круглого волновода.

Помимо частоты среза в волноводе важны волновые числа k и k_c, постоянная распространения β , поверхностное сопротивление R_s, потери изза диэлектрика в волноводе α_d и потери на стенках волновода α_c .

$$k = \frac{2\pi f \sqrt{\mu \varepsilon_r}}{c},\tag{1.20}$$

$$k_c = \frac{p_{mn}}{a},\tag{1.21}$$

$$\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2},\tag{1.22}$$

$$\alpha_d = \frac{k^2 tan\delta}{2\beta},\tag{1.23}$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}},\tag{1.24}$$

$$\alpha_c = \frac{R_s}{ak\eta\beta} \left(k_c^2 + \frac{k^2}{p_{mn}^2 - 1} \right) \tag{1.25}$$

1.4.3 Капиллярный фильтр

Описанные выше тонкопленочные фильтры (гл.1.4.1) имеют следующие недостатки: аномалия Вуда и потери по краям из-за скинэффекта.

Другой тип фильтра, который может быть использован для проведения криогенных измерений СИНИС-детекторов это волноводный фильтр. Подавление длинноволновой части излучения в подобном фильтре довольно значительно [94]. Еще одним важным преимуществом запредельного волновода в качестве фильтра является резкость отсечки частоты пропускания. При этом характеристики фильтров можно регулировать в широких пределах, изменяя диаметр и длину волноводов. Амплитуда волны, распространяющейся в волноводе, определяется как

$$E \mid (Z) = \mid E0 \mid \exp(i \gamma Z) \tag{1.26},$$

где Z — координата вдоль волновода, E — интенсивность электрического поля в точке Z, E0 — интенсивность электрического поля в начальной точке, а γ — константа распространения, описываемая как

$$\gamma = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_{cr}} \sqrt{\left(\frac{\lambda_{cr}}{\lambda}\right)^2 - 1}$$
(1.27)

Если $\lambda < \lambda_{cr}$, то мы имеем обычную волну, но если $\lambda > \lambda_{cr}$, то γ будет мнимой, а волна будет экспоненциально затухать внутри волновода.

Одиночный круглый запредельный волновод в качестве фильтра высоких частот изучался ранее в [94], получено затухание 6-12 дБ в полосе пропускания и затухание 30-60 дБ вне рабочих частот. Такой фильтр требует входных и выходных рупоров рис. 1.9 и адаптеров при использовании в квазиоптических системах и делает конструкцию достаточно сложной, большого размера, с неравномерными спектральными характеристиками.



Рисунок 1.9 Принципиальная схема конструкции фильтрующего модуля. А – оптиковолноводное устройство ввода излучения, Б – центральная металлическая часть модуля со сменным фильтрующим цилиндрическим каналом, В – оптико-волноводное устройство вывода излучения; 1 – полиэтиленовые линзы (диаметр 13 мм) для ввода излучения в фильтрующий канал и вывода из него, 2 – волноводные конусы (длина 8 мм, угол расходимости ≈30°), 3 – направляющие отверстия для втулки с запредельным волноводом, 4 – сменная металлическая втулка (внешний диаметр 4 мм) с цилиндрическим запредельным волноводом (диаметр канала: 1.5, 1.2, 0.48, 0.4, 0.24 мм) и продолжением волноводного конуса, 5 – металлическая муфта с резьбой для крепления устройств ввода/вывода фильтрующего модуля (длина 12 мм, внешний диаметр 14 мм). [94]. 1.5 Электромагнитное излучение.

В общем виде спектральная плотность излучения, которая создается абсолютно черным телом определенной температуры задается формулой Планка:

$$R(\nu, T) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2 * (\exp(\frac{h\nu}{kT}) - 1)}$$
(1.28),

При различных температурах черное тело изменяет мощность излучения (рис. 1.10). Зачастую при исследовании вольт-ваттных и амперваттных характеристик приемных элементов необходимо выделить требуемую полосу частот. Интегральная мощность внеполосного излучения может достигать больших значений в сравнении с мощностью излучения внутри полосы. В этом случае необходимо обеспечить качественное подавление на частотах вне рабочей частоты и при этом разрабатываемый фильтр должен обеспечивать резкую частоту отсечки.



Рисунок 1.10. Спектр излучения абсолютно черного тела для температур 3,5,10 К.

1.6 Выводы

СИНИС-детектор является перспективным чувствительным элементом для детектирования электромагнитного сигнала в области мм и суб-мм длин волн. Значение МЭШ не хуже 10⁻¹⁷ Вт*Гц^{-1/2} позволяет ему конкурировать с такими широко распространенными детекторами как TES и KID.

Существует ограничение по максимально возможной принимаемой мощности на один СИНИС-детектор: не более 1 пВт. Его можно преодолеть, объединяя детекторы в матрицы, тем самым распределяя принимаемую мощность по большему числу детекторов. Подобный подход более детально описан в главе 2.

Описанные тонкопленочные фильтры представляют собой интерес для использования их в криогенных установках: компактный размер и практически любой форм-фактор позволяют устанавливать их внутри криостата непосредственно рядом с детектором.

Капиллярные фильтры могут быть использованы в качестве фильтров высоких частот для существенного, по сравнению с тонкопленочными фильтрами, подавления внеполосного излучения. Глава 2. Расчет разрабатываемых структур.

В этой главе представлен теоретический расчет, а также компьютерное моделирование для матриц кольцевых антенн с СИНИС-детекторами. Для согласования приемного элемента и электромагнитного излучения были выбраны матрицы последовательных и параллельных планарных кольцевых антенн.

Приведено описание кольцевых антенн с характерным диаметром примерно в полдлины волны падающего излучения для частот 345 ГГц.

Мы адаптировали частотно-селективную поверхность для использования ее в качестве приемной системы с распределенным поглотителем в виде СИНИС-детекторов. Одиночный СИНИС-детектор насыщается на уровне мощности выше 1 пВт. Для увеличения возможной приемной мощности использованы матрицы из 50 детекторов, между которыми распределяется мощность излучения. Было решено создать матрицу кольцевых антенн (параграф 2.2) с диаметром порядка полдлины волны. В ходе проведения лабораторных исследований было обнаружено, что массив антенн с центральной частотой в 350 ГГц чувствителен к излучению на частоте 90 ГГц. Это послужило основанием для разработки массива антенн с характерным размером существенно (в 6 раз) меньше, чем длина волны падающего излучения (параграф 2.4) для частоты 350 ГГц.

2.1 Расчет СИНИС-детекторов

В данной работе в качестве чувствительного элемента используется СИНИС-структура. СИНИС-детектор представляет собой емкостной элемент, поэтому для согласования с антенной, которая характеризуется, помимо прочего, индуктивным сопротивлением, необходимо корректно подбирать емкость СИН-переходов. СИН переход из алюминия-оксида алюминия-алюминия, сверхпроводимость, в одном из электродов которого,

подавлена при помощи подслоя железа, имеет емкость порядка 70 фФ/мкм², для толщины Al₂O₃ порядка 1,2-1,3 нм. Важно корректно оценивать объем нормального металла, который определялся размерами самого поглотителя + нормальный металл, который является нижним электродом в СИН-переходе рисунок 2.1. Это важно для дальнейших расчетов по формулам 1.17, 1.18.



Рисунок 2.1. Кольцевая антенна с интегрированными в нее двумя СИНИС-детекторами. Показаны части СИНИС-детектора: 2 СИН-перехода и поглотители.

Для матриц кольцевых антенн использовались детекторы с площадью СИН-переходов равной 2*0,4=0,8 мкм². Объем поглотителя равен 0,02 мкм³, при толщине нормального металла в 15 нм. В качестве примера, на рисунке 2.1 изображена кольцевая антенна с двумя последовательно соединенными для кольцевого тока детекторами; в этом случае емкость, которая должна быть учтена при расчете кольцевой антенны, определяется 4

последовательными СИН переходами и составляет ¹/₄ емкости одного СИНа = $14 \ \phi \Phi$, а сопротивление, определяемое сопротивлением полоски нормального металла, равно $4R_N$. Изменяя число СИНИС-детекторов в антенне, а также способ их соединения, можно получить необходимые емкость и сопротивление для согласования с антенной.

Одним из ключевых эффектов в СИН-переходе является эффект электронного охлаждения, который прямо влияет на характеристики структуры. На рисунке 2.2 представлено рассчитанное электронное охлаждение для СИНИС-структуры по формуле 1.10.



Рисунок 2.2 Рассчитанная мощность электронного охлаждения для различных температур электронной подсистемы: 100, 150, 200, 250 мК.

Показано, что максимум электронного охлаждения находится при смещении по напряжению примерно равному щели. Ниже будет показано, что на середине щели, где отклик максимален, мощность электронного охлаждения (для температуры T_e =250мK) не превышает 4 фВт. Эта

температура характерна для электронной подсистемы, когда фононная температура составляет 100 мК (электронная температура получена из анализа ВАХ, а именно из отношения R_d/R_n). В то же время, мощность, передаваемая за счет электрон-фононного взаимодействия для 1 СИНИСдетектора, для подобных температур, составляет 30 фВт, что на порядок больше электронного охлаждения. Поэтому при использовании формулы 1.16 электронное охлаждение не учитывается.

Воспользуемся следующими исходными параметрами: объем поглотителя Λ =0,02 мкм³, фононная температура 0,1 К, фоновое излучение P₁=1 пВт для одиночной моды. В этом случае, согласно формуле электрон-фононного взаимодействия, температура электронной подсистемы будет равна 0,43 К, что говорит о том, что детектор близок к насыщению.

Если взять максимально возможный отклик по температуре для алюминиевого СИН-перехода [39, 60] как $dV/dT = V_A/T_e = 0,4$ мВ/К в идеальном случае и dV/dT = 20 k/e=0,2 мВ/К для практической реализации, мы получим (согласно формуле 1.18) для одиночного СИНИС-детектора с объемом поглотителя $\Lambda = 2*10^{-20}$ м⁻³ чувствительность $S = 5*10^6$ /T⁴. Это соответствует вольт-ваттной чувствительности $S = 5*10^{10}$ В/Вт для электронной температуры 0,1 К.

Взяв производную формулы для чувствительности детектора (1.18) и найдя ее экстремум, мы получим выражение для максимально возможной чувствительности по напряжению (2.1) [A11, A12]:

$$S_{\Lambda}^{max} = \frac{4k}{e} \frac{1}{(\Sigma\Lambda)^{0.2}} \frac{1}{P^{0.8}}$$
(2.1)

Особенностью этой формулы является то, что она не содержит фононную температуру системы. По сути, она зависит только от электронной температуры детектора, которая определяется мощностью принятого сигнала. Для чувствительности по току зависимость этого параметра от электронной температуры более очевидна и в первом приближении выглядит так [60]:

$$S_i = \frac{e}{2kT_e} \tag{2.2}$$

Для одного детектора чувствительность должна быть равна $S_1 = 1.5 \times 10^8 \text{ B/BT};$ в случае этом отклик ПО напряжению равен $V_{out}=S_1P_1=150$ мкВ. Для примера: если принимаемую мощность уменьшить в 10 раз (до 0,1 пВт), то чувствительность единичного детектора увеличится до $9,45*10^8$ В/Вт из-за коэффициента (P_1/P_2)^{0.8}=6,3.

В работе [А6] была показана вольт-ваттная чувствительность в 3,2*10⁸ В/Вт для СИНИС-структуры на основе титана; МЭШ составила 3,5*10⁻¹⁷ Вт/Гц^{-1/2}.

2.2 Матрица кольцевых антенн с интегрированными СИНИС-детекторами

Выше было показано, что в случае приема сигнала большой мощности одиночный СИНИС детектор приходит в насыщение. Для того, чтобы избежать подобного эффекта, были использованы матрицы СИНИСдетекторов в форме распределенных поглотителей. Предложено использовать модель частотно-селективной поверхности [84, 85, 86] в виде матрицы кольцевых антенн с интегрированными в них СИНИС-детекторами.

Обычная кольцевая антенна имеет резонанс на длине волны, равной периметру антенны. В нашем случае требуется антенна с центральной частотой на 345ГГц, находящаяся на кремниевой подложке. Длина волны падающего излучения равна 0,87 мм. Таким образом, радиус кольца должен быть 138 мкм, без учета реактивных элементов.

Проведено численное моделирование кольцевых антенн с диаметром порядка полволны падающего излучения с СИНИС-детекторами на частоту

345 ГГц, моделирование выполнено в программном пакете CST Studio Suite с учетом реактивных элементов. Было получено, что для заданной частоты оптимальный внешний диаметр кольца равен 300 мкм. Ширина кольца 22 мкм, расстояние между центрами колец 475 мкм. Значения получены для случая облучения антенн со стороны подложки.

Матрицы состоят из единичных элементов, представляющих собой кольцевые антенны с, интегрированными в них, СИНИС-детекторами. Если в кольцевую антенну интегрировано 2 СИНИС-детектора и мощность приходящего излучения 1 пВт, то принимаемый сигнал в каждом детекторе будет 0,5 пВт, перегрев электронной подсистемы в этом случае будет равен 0,38 К, чувствительность по напряжению для двух детекторов, подключенных параллельно, будет такой же, как и для одного детектора $S=9,45*10^8$ B/Bт.

Для матрицы, состоящей из 50 детекторов, сигнальная мощность для одного детектора будет в 50 раз меньше, т.е. $P_{50}=P_1/50$; поскольку антенны подключены последовательно, то выходной сигнал будет в 25 раз больше (в каждой антенне 2 детектора подключены параллельно). Для одного детектора в таком массиве чувствительность по напряжению будет $S_{obut}/50=S_1G_{50}$, где $G_{50}=(50)^{0.8}=23$, т.е. в 23 раза выше, но сигнальная мощность на один детектор будет в 50 раз меньше. При таких условиях мы получим, что суммарный сигнал на матрице будет равен [A12] (2.3):

$$V_{\text{sbix}} = (S_1 G_{50})(P_1/n)G_{\text{nocned}} = (S_1 P) * 11$$
(2.3)

Таким образом, в матрице из 25 кольцевых антенн, подключенных последовательно, (по 2 детектора в каждой, подключенных параллельно), суммарный сигнал на выходе будет в 11 раз выше, чем для одиночного детектора. При этом, благодаря использованию такой матрицы, мы избегаем перегрева приемного элемента, повышая, таким образом, динамический

диапазон в условиях приема сигнала с высокой фоновой нагрузкой. Но в таком случае мы получим более низкий отклик и мощность эквивалентную шуму (МЭШ). До тех пор, пока мощность сигнала ниже фоновой мощности, чувствительность не изменяется, и динамический диапазон определяется отношением этой фоновой мощности к МЭШ при данной нагрузке:

$$D = \frac{P_{\phi \circ H}}{M \Im \square} = \frac{P_{\phi \circ H} * S_A}{V_{\square}} = \frac{2k}{eV_{\square}} \left(\frac{P_{\phi \circ H}}{\Sigma A}\right)^{0.2}$$
(2.4)

В случае если $P_{\phi_{0H}}=1$ пВт, $V_{III}=20$ нВ/Гц^{1/2} – шум усилителя по напряжению, $\Lambda=0,02*10^{-18}$ м³, для одного детектора мы получим D=3,8*10³ или 35 дБ. Для массива из 50 детекторов [A12] D будет медленно уменьшаться как функция объема (Λ)^{0.2}~(50)^{0.2}=2,2. Как только уровень сигнала превысит уровень фонового излучения, чувствительность будет уменьшаться как $P^{0,8}$ и выходной сигнал также будет уменьшаться. В нашем случае это происходит уже при температуре черного тела около 5 К, и дальнейшее повышение температуры до 10 К сопровождается повышением мощности излучения до 5 пВт и уменьшением чувствительности в 3 раза.

Для согласования приемной матрицы с внешним излучением используется конструкция встречных рупоров, т.н. back-to-back horn (рисунок 2.3). Такое согласующее устройство можно условно разделить на три части: приемный рупор, волновод и выходной рупор. Входной рупор заканчивается волноводом диаметром 0,9 мм с центральной частотой 345 ГГц. Выходной рупор облучает подложку с матрицей антенн, позади которой находится контррефлектор. Эта конструкция аналогична конструкции, используемой на космическом телескопе Планк [87]. Многократные отражения от стенок рупора и контррефлектора приводят к улучшению поглощения излучения, которое попало во внутреннюю полость.



Рисунок 2.3 Согласующее устройство: приемный конический рупор длиной 11 мм, круглый волновод и выходной конический рупор длиной 7 мм

2.3 Способы облучения образца.

Для улучшения согласования приходящего излучения с приемной матрицей было исследовано два способа облучения образца: облучение со стороны подложки (рисунок 2.4а) и со стороны антенн (рисунок 2.4б) [A12]. В первой конфигурации (а) толщина кремниевой подложки была примерно $\lambda/2$ и расстояние от антенн до отражателя $\lambda/4$. В итоге полоса пропускания составила 20 ГГц и эффективность поглощения сильно зависела от обоих расстояний.

В соответствии с нашими измерениями, более эффективная конфигурация получается, когда массив антенн облучается приходящим излучением со стороны антенн (рисунок 2.4б), при этом подложка, толщиной *λ*/*4* сзади запылена толстым слоем золота, которое работает как отражатель. В этом случае расстояние между антенной и отражателем точно 65 мкм=*λ*/4. В результате мы улучшили эффективное согласование, ширину полосы приема и ее однородность. Такой подход получил подтверждение в работе [88].



Рисунок 2.4. Схемы расположения образцов относительно падающего излучения и способы электрических контактов: а) облучение со стороны диэлектрика, б) облучение со стороны антенн, контактные площадки вынесены в сторону. 1-Подложка. Слева 280 мкм, справа 65 мкм, 2-матрица антенн, 3-отражатель.

Моделируемая структура разрабатываемого образца показана на рисунке 2.5. Два СИНИС-детектора интегрированы в кольцевую антенну. Мы использовали дискретный порт с сопротивлением поглотителя 40 Ом и сосредоточенной емкостью 25 фФ. Внешний и внутренний диаметры кольца 300 и 256 мкм соответственно. В представленной модели толщина подложки Модель 280 мкм (рисунок 2.5а) и 65 мкм (рисунок 2.5б). идеального проводника была использована для моделирования отражателя в обоих случаях. В эксперименте отражатель был изготовлен из алюминиевой фольги на держателе образца или толстого слоя золота на обратной стороне подложки способа облучения. Результаты моделирования В зависимости OT представлены на рисунке 2.5 справа. Коэффициент приема достигал 50 % или более. Изменение размеров колец приводило к сдвигу центральной частоты. На практике мы не можем принять во внимание всевозможные паразитные отражения и потери внутри интегрирующей полости и рассчитать полную систему с самосовмещенными рупорами. Результаты моделирования использовали как первое приближение для разрабатываемой структуры [A13].



Рисунок 2.5. Элементарная ячейка разрабатываемой структуры. Желтым цветом показана кольцевая антенна. Красным - 2 порта, имитирующие подключение СИНИС-детекторов. Бирюзовым -- антиотражающее покрытие. А) Стандартный способ облучения со стороны кремния с антиотражающим покрытием. В) Облучение со стороны антенн.

2.4 Матрицы электрически малых антенн с СИНИС-детекторами.

Приведено описание конструкции матрицы кольцевых антенн с существенно (в 6 раз) меньшим диаметром, чем длина волны, на основе электрически малых кольцевых антенн и распределенного поглотителя. Это позволит сделать приемное устройство более широкополосным и компактным.

Мы разработали и изготовили различные матрицы электрически малых антенн с широкими (15 мкм) и узкими кольцевыми антеннами (3 мкм), содержащих два или четыре детектора, подключенных последовательно или параллельно [А5, А6, А7, А8, А12 А20].

Электрически малые антенны (ЭМА) в виде периодической матрицы эффективно могут взаимодействовать проводящих элементов с электромагнитным излучением, когда размеры элементов и их период существенно меньше длины волны. Классическим примером таких структур является разрезанный кольцевой резонатор. Для таких структур нет ограничения на минимальный размер порядка половины длины волны как в случае замкнутых кольцевых резонаторов. Качественно такой эффект аналогичен влиянию «укорачивающей» емкости для дипольной антенны. Объединяя такие элементы (рисунок 2.6) в плотную периодическую матрицу с сильным взаимодействием между элементами, удается получить более эффективное взаимодействие с излучением [А5, А9, А11].



Рис.2.6 Фотография в электронном микроскопе единичной ячейки в виде разрезанной кольцевой антенны, внешний диаметр которой 54 мкм, ширина 15 мкм, с четырьмя СИНИС-детекторами.

Ранее мы исследовали матрицы 5х5 стандартных кольцевых антенн диапазона 350 ГГц с внешним диаметром антенны 300 мкм, периодом 475 мкм, занимающие площадь 2200х2200 мкм. В образцах с ЭМА внешний диаметр кольца составлял 54 мкм, период 70 мкм, площадь матрицы 9х9 элементов составляет 614х614 мкм. В каждую планарную антенну (как для стандартного варианта, так и для ЭМА) интегрировано два или четыре детектора на основе СИНИС структуры. Таким образом на площади 0,38 мм² для ЭМА может быть расположено 162 детектора, а на 4,8 мм² при обычном подходе расположено 50 детекторов, т.е. при одинаковой мощности насыщения на один детектор для матрицы ЭМА мощность на единицу площади будет в 41 раз больше. При этом пиксели матрицы изображения можно располагать существенно ближе друг к другу.

Мы разработали широкополосный массив на частоту 200-400 ГГц, который состоит из разрезанных кольцевых антенн, в которые включены

СИНИС-детекторы. Характерный размер элементарной ячейки такого массива меньше, чем $\lambda/10$. Такая структура работает как метаматериал с распределенным поглотителем, который воспринимается падающей волной как однородная пленка метаматериала для любого угла падения. Этот факт делает такой массив применимым в волноводах, где все 3 ортогональных компоненты k-вектора распространяющейся волны отличны от нуля. Маленький размер (относительно обычного кольцевого резонатора) позволяет существенно повысить плотность расположения детекторов, тем самым увеличив ширину полосы и динамический диапазон для одного приемного элемента.

Для оценки предлагаемой структуры были сделаны три различных расчета: метод сосредоточенных элементов (RLC), численное моделирование одиночной ячейки с периодическими граничными условиями, численное моделирование всей структуры, состоящей из 100 ЭМА с СИНИСдетекторами.

Единичная ячейка, показанная на рисунке 2.6, похожа на разрезанный кольцевой резонатор, который является общим случаем для многих метаматериалов. В одном из наших дизайнов внешний диаметр кольца равен 54 мкм и ширина кольца 15 мкм, что дает индуктивность для такой пленки из золота равной [A11]:

$$L = \mu_0 R \left[\ln \left(\frac{8R}{r} \right) - 1,75 \right] = 54,6 \ n\Gamma \mu$$
 (2.5)

Для алюминиевых СИН-переходов характерная емкость на 1 мкм² составляет 70 фФ. Для четырех СИНИС детекторов с 8 СИН-переходами, площадью 0,8 мкм², расположенных последовательно, получаем ёмкость в 7 фФ. Здесь стоит отметить, что для постоянного тока мы имеем 2 пары параллельных СИНИС-детекторов. Ho приходящего СВЧ-излучения для кольцо представляет собой независимую элементарную ячейку, В которой последовательно по кругу включены 4 СИНИС-детектора. Коэффициент

качества такого приемника при характерном сопротивлении детектора 30 Ом равен Q=ωL/R=3. При этом резонансная частота равна 257 ГГц. Подобный расчет был сделан нами для первоначальной оценки.

Численное моделирование проводилось А.С. Соболевым в программе CST STUDIO SUITE с использованием граничного условия Unit cell – расчет одного элемента в бесконечной матрице [A9]. На рисунке 2.7 показан вид элементарной ячейки размером 37 мкм*38 мкм в плоскости XY.



Рис.2.7 Элементарная ячейка и эквивалентная электрическая схема, предложенная А.С. Соболевым. [А9]

Материал антенны – золото толщиной 200 нм из библиотеки материалов CST STUDIO SUITE. Детектор задается при помощи порта. Приемная сосредоточенного матрица согласуется с внешним излучением при помощи кремниевой линзы. Большая часть СВЧ-сигнала, проходящего через линзу, поглощается в СИНИС-детекторах, но некоторая часть этого сигнала проходит дальше в вакуум, т.к. нет отражателя после приемника. Эквивалентная микроволновая схема может быть представлена как параллельное соединение трех импедансов: поверхностный импеданс Z_{FSS} массива подключен к импедансу свободного пространства (вакуума) Z_{Vac} =377 Ом и импедансу кремния Z_{Si} =377/ $\sqrt{11,7}$ Ом, находящего за приемным устройством. Из эквивалентной схемы можно вывести формулу для мощности P_{abs}:

$$P_{abs} = \frac{Z_{Vac}}{Z_{FSS} + Z_{Vac}} * \frac{4Z_{Si}Z_{Vac}Z_{FSS}(Z_{FSS} + Z_{Vac})}{(Z_{Si}Z_{FSS} + Z_{Si}Z_{Vac} + Z_{Vac}Z_{FSS})^2}$$
(2.6)

Зависимость P_{abs} от Z_{FSS} отображена на рисунок 2.11. Максимум достигается при Z_{FSS} =80 Ом для P_{abs} =-1 дБ, что чуть меньше, чем дает параллельное соединение Z_{FSS} и Z_{Si} .



Рисунок 2.8. Поглощенная мощность P_{abs}, как функция Z_{FSS}. Расчет произведен А.С. Соболевым. [А9]

В качестве внешнего сигнала использовали волноводный порт, генерирующий две поляризации первой моды на частоту 345 ГГц. Расчет эффективности поглощения производили в диапазоне 300 - 450 ГГц. Результаты моделирования представлены на рисунке 2.9.



Рисунок 2.9 – Численное моделирование приемной матрицы в виде ЭМА. Зависимость доли поглощенной мощности для двух ортогональных мод кольцевого массива на кремниевой линзе. Расчет произведен А.С. Соболевым. [А9]

Моделирование, описанное выше, происходит с учетом бесконечных периодических граничных условий. Это существенно ускоряет время расчета, но приводит к тому, что в расчете элементы работают как фазированная антенная решетка.

Позднее было произведено моделирование всей структуры [A14, A20], состоящей из 100 элементов, с граничными условиями open add space. Такой подход к численному моделированию заметно увеличивает время расчета, но при этом позволяет получить более точные результаты. Расчеты сделаны для четвертьволновой подложки, облучение со стороны антенн, на обратной стороне подложки – отражатель. Рисунок 2.10.



Рисунок 2.10. Спектральная характеристика электрически малых кольцевых антенн, полученная при помощи моделирования [А14, А20]. Расчет произведен А.А. Гунбиной.

Сравнивая результаты моделирования (рисунок 2.9 и рисунок 2.10) можно сделать вывод, что последний учитывает больше особенностей, связанных с неоднородностью приема внешнего сигнала, возникающих за счет взаимного влияния между элементами.

2.5 Выводы

Приведено описание и расчет, используемых в работе, СИНИСдетекторов.

Теоретически показано, что мощность электронного охлаждения максимальна в районе значения сверхпроводящей щели, однако отклик на внешнее электромагнитное излучение на тех значениях минимален. Это не позволяет использовать эффект электронного охлаждения для эффективного понижения электронной температуры, что в свою очередь позволило бы повысить чувствительность. В качестве приемной антенны выбрана кольцевая антенна. Ее достоинствами является возможность объединять подобные антенны в матрицы за счет последовательного или параллельного соединения антенн. Кроме того, они занимают небольшую площадь на образце в сравнении с логопериодическими и щелевыми антеннами.

Произведен расчет для матриц СИНИС-детекторов. Показано, что в случае 50 болометров (25 антенн, в антенне по 2 параллельно соединенных болометра) суммарный сигнал по напряжению на выходе всей матрицы будет в 11 раз выше, чем для одиночного детектора. Также, это позволит избежать насыщения СИНИС-детектора.

Для согласования приемной матрицы с внешним электромагнитным излучением предложено использовать самосовмещенный рупор.

Теоретически рассчитаны способы облучения образца: со стороны антенн или со стороны подложки. Показано, что облучение со стороны антенн имеет менее изрезанную спектральную характеристику, чем при облучении со стороны подложки.

Представлены численные расчеты для матрицы электрически малых СИНИС-детекторами: кольцевых антенн с формульный, численное приближении моделирование В одной элементарной ячейки с периодическими граничными условиями и численное моделирование всей структуры.

Глава 3. Разработка и изготовление образцов для тепло- и радио-физических измерений.

В данной главе представлена топология образцов. Описана технология изготовления матриц кольцевых антенн с криогенными детекторами для приема внешнего электромагнитного излучения с центральной частотой 345 ГГц и полосой пропускания 80-200 ГГц в зависимости от конфигурации антенн. Приведены технологические маршруты основных этапов изготовления разрабатываемых структур.

3.1 Топология образцов (вариации антенн, СИН-переходы)

Рабочие структуры изготавливались на оксидированных кремниевых двух- и трехдюймовый подложках. На подложках располагалось до 48 чипов размером 7*7 и 7*14 мм. Было предложено две различные матрицы антенн: стандартные матрицы с характерным диаметром кольца в полдлины волны и матрицы электрически малых антенн. Каждая матрица была выполнена в последовательном и параллельном соединении. Элементы объединялись в матрицы, соединяясь в различных вариантах: под прямым углом и под углом в 45° (один из вариантов соединения элементов предложен А.С. Соболевым). Помимо этого, были реализованы чипы размером 7*14 мм, в которых контактные площадки были вынесены в сторону, для случая облучения со стороны антенн. Чипы размером 7*7 мм имели 16 контактных площадок по периметру. Кроме основной структуры на этих образцах были расположены одиночные тестовые структуры: обычная кольцевая антенна с 2 СИНИСдетекторами, 2 последовательно включенных одиночных СИНИС-детектора, 20 последовательными СИН-переходами, два термометра с одна электрически малая антенна с 4 СИНИС-детекторами (два последовательно и два параллельно включенных).

В каждую антенну были включены СИНИС-детекторы одинаковой площадью СИН-переходов. В разных образцах использовались СИН-переходы с размерами 0,4*2 мкм и 0,8*2 мкм. Также на тестовых структурах было исследовано влияние близости нормального металла и объемов сверхпроводника на свойства СИН-перехода. Для этого на одной из тестовых структур был заметно уменьшен объем сверхпроводящего электрода (0,21 мкм³ против 1 мкм³).

Все структуры были изготовлены на одной кремниевой подложке и, соответственно, проходили одни и те же технологические циклы. Это было сделано для того, чтобы исключить фактор расхождения параметров напыления, окисления, проявки, засветки, запекания, каждый из которых может оказать заметное влияние на финальные характеристики структуры. Образцы, изготовленные на одной подложке, имеют минимальный разброс параметров, что позволяет качественно сравнивать различные топологии, при этом считая, что технологические параметры, такие как толщина металла, чистота металла, площадь СИН-переходов, качество СИН-переходов не влияют на относительное сравнение. Примеры изготовленных детекторов на основе матриц стандартных кольцевых антенн и ЭМА изображены на рисунках 3.1 и 3.2 соответственно. Фотографии сделаны в оптическом микроскопе при увеличении x5 (обычные колечки) и x50 (колечки типа метаматериала) для наглядности сравнения плотности компоновки элементов.



Рисунок 3.1. Изображение матриц стандартных колец в параллельном (слева) и последовательном (справа) соединении. Увеличение х5.



Рисунок 3.2. Изображение матриц ЭМА, в последовательном (слева) и параллельном (справа) соединении. Увеличение x50.

3.2 Технологические установки и методы изготовления образцов.

3.2.1 Литография.

Для получения определенной структуры на поверхности материала (резиста) используется метод литографии. Литография бывает электронной и оптической, последняя может быть лазерной или ультрафиолетовой фотолитографией.

Электронная литография.

Это метод нанолитографии с использованием электронного пучка. На рисунке 3.3 приведена фотография установки электронной литографии фирмы Raith.



Рисунок 3.3 Электронный литограф e_LiNE фирмы Raith.

Пучок электронов, сформированный с помощью магнитных линз на поверхность слоя полимера (резиста), формирует заданный рисунок.

Преимуществами электронной литографии являются высокое разрешение, и возможность корректировать требуемый рисунок при помощи простой модификации в компьютерной программе. Чтобы определить разрешение можно воспользоваться формулами волны де Бройля $\lambda = \frac{h}{mv}$, где h-постоянная планка, m-масса электрона, v-скорость электрона. Скорость электрона зависит от ускоряющего напряжения $U, v = (2qU/m)^{\frac{1}{2}}$, где q-заряд электрона. Ускоряющее напряжение на установках электронной литографии составляет 10-200 кэВ. Отсюда следует, что длина волны электрона при заданных ускоряющих напряжениях порядка 0,01 нм. Поэтому разрешение

может достичь теоретической величины близкой к 0,1 нм. Более того, последние результаты для электронного микроскопа при ускоряющем напряжении в 80 кэВ позволили достичь разрешения 0,04 нм [89]. К электронной литографии недостаткам можно отнести долгое время экспонирования, которое может достигать нескольких часов, для структур большой площади (более 30% заполнения пластины) и ограничение на применение этого метода для экспонирования структур, содержащих СИНпереходы (т.к. быть повреждены они могут сильным потоком высокоэнергетичных электронов).

Также, для производства образцов применялся электронный литограф JEOLJBX-5DII, находящийся в Чалмерском технологическом университете, Гетеборг, Швеция. Основные параметры установки: минимальный диаметр пучка 8 нм, ускоряющее напряжение 50 кВ и 100 кВ.

При помощи электронного литографа производятся шаблоны (см. рисунок 3.4) для фотолитографии. Они представляют собой стеклянные или кварцевые пластины, покрытые хромом.



Рисунок 3.4 Общий вид готового шаблона в оптическом микроскопе.

Создание масок происходит в несколько этапов: чистка пластины с хромом, нанесение электронного резиста, запекание, экспонирование в электронном литографе, проявка резиста, травление хрома, смывка резиста в метилпирролидоне (ремувер).

Кроме изготовления масок электронный литограф может быть использован для изготовления СИС и СИН образцов при помощи метода прямой электронной литографии. Подробное описание этого метода представлено в работах [A25, A28].

Фотолитография

Для изготовления определенного слоя (рисунка) на образце используется метод оптической фотолитографии. Для него необходим заранее изготовленный шаблон, на котором в слое хрома изображен требуемый паттерн. Перед оптической литографией подложки очищались в ультразвуковой ванне, на них был нанесен фоторезист. Важными контролируемыми параметрами при формировании резистивной маски являются ускорение и скорость вращения при нанесении фоторезиста, температура и время сушки резиста, время и интенсивность экспонирования, время проявления. Параметры основных этапов формирования стандартной резистивной маски и маски с нависающим профилем приведены ниже в таблице 3.1.

Резистивная маска для прямой	Резистивная маска для обратной	
литографии	литографии	
- ультразвуковая очистка подложек	- ультразвуковая очистка подложек	
- S 1813, 4000 обор/мин, 30 сек	- AZ5214E, 4000 обор/мин, 30 сек	
- сушка, 90°С, 30 мин	- сушка, 90°С, 30 мин	
- засветка, 4 мВт/см ² , 18 сек	- засветка, 4 мВт/см ² , 16 сек	
- проявление, КОН, 30 сек	- сушка, 120°С, 5 мин	
- отмывка водой	- засветка, 4 мВт/ссм ² , 40 сек	
	- проявление, КОН, 17 сек	
	- отмывка водой	

Таблица 3.1. Этапы формирования стандартной резистивной маски и маски с нависающим профилем

Резист наносится методом ценрифугирования. Зависимости толщины фоторезистов от частоты вращения центрифуги представлены в таблице 3.2.

Количество	оборотов,	Толщина АZ2514Е мкм	Толщина
обор/мин			S1813 мкм
2000	1,98		
------	------	------	
3000	1,62	1,51	
4000	1,4	1,28	
5000	1,25	1,14	

Таблица 3.2. Зависимости толщины фоторезистов от частоты вращения центрифуги.

Литографический процесс можно разделить на три этапа: 1 этап формирование слоя фоторезиста (включает в себя подготовку поверхности подложки, нанесение фоторезиста и сушка фоторезиста); 2 этап – передача рисунка на слой фоторезиста (совмещение и экспонирование, проявление фоторезиста и вторая термообработка); 3 этап – передача рисунка на материал технологического слоя. Различают прямую И обратную литографию. При прямой литографии пленка, в которой формируется рисунок, нанесена на подложку до формирования слоя фоторезиста. Рисунок, получаемый на пленке, соответствует рисунку маски. При обратной литографии пленка, в которой необходимо получить рисунок, наноситься поверх уже сформированной резистивной маски. Часть пленки удаляется вместе с маской («взрывная» литография), и на подложке остается требуемый рисунок пленки. Для «взрывной» литографии необходимо обеспечить соответствующую (с отрицательным наклоном) форму боковых стенок окон маски и сравнительно с пленкой толстый слой фоторезиста. При обратной литографии рисунок, передаваемый на пленку, противоположен рисунку резистивной маски. При формировании резистивной маски с нависающим профилем мы используем фоторезист AZ5214E. Он содержит в себе фотоактивные компоненты, способные изменяться, превращая его В негативный ("image reversal" или IR). Данный фоторезист может менять свой тип с позитивного на негативный благодаря специальным присадкам, которые становятся активными при температуре выше 110°С, и что особенно важно, только в проэкспонированной области фоторезиста. Таким образом, после дополнительной сушки засвеченные участки фоторезиста становятся нерастворимыми в проявителе, в отличие от неэкспонированных участков, где фоторезист продолжает вести себя как обычный позитивный фоторезист без засветки, и после последующего полного экспонирования (без маски) удаляется в проявителе.

Установка оптической фотолитографии MA150 фирмы "Karl Zuss", фото которой представлено на рисунке 3.5, имеет минимальное разрешение 0,8 мкм при использовании оптической системы UV 400 нм. Максимум спектра излучения лампы находится на длине волны 405 нм. Максимальный размер экспонированной области 150 мм. Процесс совмещения – ручной, с возможностью дублирования изображения на мониторе через установленную видеосистему. Автоматическое выставление плоскостности подложки относительно шаблона и возможность программируемого выставления зазора подложкой шаблоном между И позволяет максимально снизить нежелательные дифракционные эффекты. Шаговый механизм перемещения подложки позволяет обеспечивать высокую точность совмещения вплоть до 0,5 мкм.

74



Рисунок 3.5 Установка совмещения и экспонирования МА150

Оптимальное время экспозиции при интенсивности лампы 4 мВт/см² составляло 18 сек. Образцы проявлялись в 1%-растворе КОН в воде в течение~30 сек.

Лазерная литография.

Лазерная литография сочетает в себе плюсы электронной литографии для нее не требуются маски, однако работает в оптическом диапазоне и имеет разрешение порядка 0,5 мкм. Она обладает меньшими временами засветки, чем электронная литография (максимальное время экспозиции порядка 2 часов при заполнении более 50% подложки), но процесс засветки образца происходит заметно дольше, чем в случае оптической фотолитографии, время засветки которой в среднем не превышает 1 минуты.

В основе установки лазерной литографии лежит диодный лазер с рабочей длиной волны в 405 нм. Размеры подложки от 5*5 мм до 250*250 мм. Для фокусировки используется оптический лазер с длиной волны 680 нм. Максимально допустимый перепад высот на подложке-100 мкм. Скорость засветки=110 мм²/мин. Лазерный литограф фирмы Heidelberg Instruments DWL 2000 (рисунок 3.6) минимальное разрешение 0,5 мкм.



Рисунок 3.6 Лазерный литограф DWL 2000.

3.2.2 Напыление пленок

Для формирования планарных структур мы используем напылительную систему Leybold Heraus L–560 UV, оснащенную водоохлаждаемым держателем подложек, крионасосом, двумя системами магнетронного распыления на постоянном токе (DC) и ВЧ-системой магнетронного распыления. Схема и фото напылительной установки показаны на рисунке 3.7.







Рис.3.7 Фото и схема камеры напылительной установки L 560 UV:
1-держатель, 2- подложка, 3- кварцевый датчик, 4- заслонка,
5- ионная пушка, 6- RF магнетрон, 7- система ввода газов,
8- крионасос, 9- турбомолекулярный насос, 10- форвакуумный насос,
11-DC магнетрон (Al), 12- DC магнетрон (Nb)

Подложки закрепляются на массивном изолированном, вращающемся держателе из меди, предусмотренным для размещения 4-х подложек диаметром 3". Держатель может разогреваться до 80°С и охлаждаться до 2°С. Привод вращения держателя расположен сверху и оборудован системой позиционирования. К держателю подводиться ВЧ мощность, что позволяет проводить ВЧ-чистку поверхности образцов перед напылением пленок. Установка L560UV оснащена тремя магнетронными распылительными системами, две из которых работают в режиме постоянного тока (DC магнетроны) и одна – в режиме ВЧ разряда (RF магнетрон). DC магнетроны используются для распыления пленок алюминия и ниобия.

Также для нанесения металлических и диэлектрических слоев на подложку была использована кластерная магнетронная система Kurt J. Lesker [A26, A27].

Для изготовления слоя СИНИС-детекторов методом теневого напыления используется установка Kurt J. Lesker с поворотным диском, , рисунок 3.8.



Рисунок 3.8. Установка электронно-лучевого напыления K.J.Lesker.

3.3 Изготовление образцов.

В данной части будут рассмотрены возможности применения различных материалов и технологий, описанных выше, которые были использованы для изготовления разрабатываемых структур.

Для реализации модели матриц с СИНИС-детекторами были созданы различные варианты топологии структур с использованием программы автоматического проектирования «AutoCAD».

Процесс изготовления матриц кольцевых антенн с СИНИСдетекторами состоял из двух основных этапов: формирование контактных площадок, соединительных проводов и антенн при помощи лазерного литографа и электронно-лучевого напыления, затем формирование СИНИСдетекторов при помощи двухслойного резиста, электронного литографа и технологии теневого напыления. Каждый этап изготовления состоял из нескольких технологических шагов. При этом, для каждого этапа и технологического шага существует вариативность, которая будет описана ниже.

3.3.1 Изготовление контактных площадок и кольцевых антенн

Первым этапом в изготовлении контактных площадок и антенн является чистка подложки в ацетоне и изопропаноле. После этого она подвергается плазменному травлению, на основе кислорода, для очистки от остаточных органических соединений на поверхности. Затем, на подложку наносится резист методом центрифугирования. После этого резист запекается при температуре 90-180°С, в зависимости от типа материала. В итоге, на поверхности подложки образуется практически ровная пленка материала, чувствительного к излучению. Толщина пленки варьируется от 0,15 до 3 и более микрометров. Она определяется типом используемого резиста и скоростью вращения центрифуги. После этого чувствительный слой экспонируется электронной или оптической литографией. В момент засветки изменяется молекулярная структура резиста. Это приводит к тому, что взаимодействие между проявителем и слоями с засветкой и без проявляются по-разному: если резист «позитивный», то в проявителе удаляется засвеченная область; если «негативный», то удаляется область, которая не была подвержена облучению. Затем происходит напыление пленки металла на подложку, после чего образец помещается в специальный состав (ацетон или жидкость на основе метилпироллидона), в которой резист сильно разбухает (5-10 раз), затем растворяется, и, таким образом, поднимает часть напыленной пленки. Для облегчения отрыва металла, который не находится в непосредственном контакте с подложкой, можно использовать Подобная ультразвуковую ванну. технология называется взрывной литографией (lift-off). Она обладает рядом преимуществ: края оставшейся пленки металла получаются прямоугольными, металл не подвергается взаимодействию с сильными кислотами или щелочами, хорошая воспроизводимость результата. К недостаткам данной технологии можно отнести то, что накладываются определенные ограничения на спектр возможных резистов, т.к. они должны обладать нависающим профилем при проявке, иначе велик риск формирования, так называемых, стенок из металла, которые образуются на торцах проявленного резиста. При этом накладывается сильное ограничение на максимально возможную толщину напыляемой пленки: высота металла не должна превышать 2/3 от толщины резиста.

Другой возможной технологией формирования металлической пленки на поверхности кремниевой подложки является технология травления металла. В ней на чистую пластину происходит напыление металла, затем формирование требуемого паттерна при помощи литографии, затем травление части металла, неприкрытого резистом. В отличие от технологии

80

lift-off, технология травления может быть применена для пленок заметно толще, чем толщина резиста. К недостаткам данной технологии можно отнести то, что зачастую травление происходит либо в смеси сильных кислот, либо в плазмо-химии. Оба метода травления зачастую являются изотропными, что приводит к профилю, отличному от прямоугольного, оставшегося на поверхности подложки, металла, что, в свою очередь, приводит к неоднородности растекания токов.

В ранних образцах формирование контактных площадок, разводки проводов и антенн происходило в два этапа:

-формирование меток совмещения и проводов с характерными толщинами металла не превышающими 20-30 нм.

-формирование контактных площадок и антенн, толщиной металла до 400 нм.

В более поздних работах эти этапы были объединены, благодаря использованию технологии теневого напыления и формированию контактов между антеннами и детекторами за счет «подъема» тонкого слоя алюминия (60 нм) на толстый слой проводов (100-180 нм).

Для изготовления контактных площадок и антенн использовалась трехслойная структура из металлов: Ті (10 нм), Au (80-150 нм), Pd (10-20 нм). Титан используется для лучшей адгезии металлического слоя с кремниевой подложкой, золото, как основной металл, обладает хорошей электро- и теплопроводностью (4,06*10⁷ См/м и 318 Вт/м*К соответственно), а палладий нужен для верхнего контакта с последующим слоем алюминия, т.к. золото и алюминий образуют интерметаллический компаунд, который характеризуется слабой проводимостью.

Важно отметить, что без использования технологии теневого напыления нельзя в процессе изготовления структуры производить

81

напыление слоя тоньше, чем предыдущего. Это чревато разрывами либо крайне плохими контактами между слоями.

3.3.2 Формирование слоя СИНИС-структур

Стандартным способом формирования СИНИС-детекторов элементов можно считать метод с использованием двух этапов изготовления: формирование СИН-переходов и формирование перемычки между ними из нормального металла-поглотителя. Технологические шаги в каждом этапе схожи с описанными выше для формирования контактных площадок и антенн: чистка подложки, нанесение резиста, запекание, экспонирование, проявка, напыление, взрыв фоторезиста, чистка.

СИНИС-структура формируется в одном вакуумном цикле (давление, при котором происходит начало напылительного цикла порядка 10⁻⁶-10⁻⁷ мбар): происходит напыление алюминия (температура перехода В 1,2 К) толщиной 10-40 нм сверхпроводящее состояние (зависит OT предыдущего слоя металла), окисление пленки алюминия в атмосфере кислорода при давлении (1-10 мбар) время окисления 10 мин. При это образуется пленка Al₂O₃, толщиной порядка 0,8-1,2 нм. Затем, после откачки камеры, происходит напыление нормального металла, в нашем случае это медь толщиной 5-20 нм, затем на нее происходит напыление 5-10 нм золота, чтобы предотвратить окисление меди, после открытия вакуумной камеры.

После того как СИН-переход сформирован, снова происходит чистка, нанесение резиста и напыление перемычки из нормального металла между двумя, близко расположенными, СИН-переходами. В нашем случае это полоска из меди, толщиной 40-100 нм. Таким образом, мы получаем СИНИС структуру, изображенную на рисунке 3.9.



Рисунок 3.9 Пример структуры, реализованной напылением под прямыми углами.

Описанный выше способ изготовления СИНИС-структур не накладывает никаких ограничений на площадь СИН-перехода, позволяет сделать его сколь угодно большим. Однако этот метод обладает рядом недостатков, основными из которых являются разрыв вакуума (перед напылением перемычки) и требование, чтобы толщина этой перемычки превышала толщину СИН-перехода. Создавая толстый нормальный металл, лва СИН-перехода, связывающий МЫ тем самым понижаем его сопротивление, что негативно сказывается на характеристиках СИНИСструктуры, как это было показано ранее, в главе 2.

Альтернативной способу прямого напыления СИНИС-структуры с разрывом вакуума является метод теневого напыления. Для его реализации используется два слоя резиста. Первый, толщиной 350-400 нм, второй, толщиной 100-150 нм. Каждый резист имеет свой собственный проявитель, т.е. реализуется селективное проявление каждого слоя, что позволяет контролировать величину перепроявки нижнего слоя резиста. Благодаря этому, появляется возможность реализовать нависающий профиль резиста. Напыление, так же как и для простого СИН-перехода, происходит в три этапа и схематически изображено на рисунке 3.10.



Рисунок 3.10. Этапы теневого напыления.

-формирование части нормального металла. Для этого используется алюминий (10-15 нм), сверхпроводимость которого подавлена подслоем железа (1,2 нм)

-окисление верхней части алюминия в атмосфере кислорода. Создание туннельного барьера, характерной толщиной 10-15 А. (1-10 мбар, 10 минут)

-напыление алюминия под углами ±45°, толщина 40 нм. Реализация нависающего профиля двухслойного резиста позволяет создавать перекрытие между слоем, напыленным под прямым углом (алюминий с подавленной сверхпроводимостью), и слоями, напыленными под углами (алюминий).

Таким образом, удается создать СИНИС-структуру в одном технологическом цикле без разрыва вакуума в камере напылительной установки.

Площадь переходов, сформированных подобной технологией, обычно не превышает 1-2 мкм². Это ограничение следует из геометрических расчетов возможной тени нависающего профиля двухслойного резиста.

При формировании двухслойного резиста важно упомянуть про реализацию правильного профиля нижнего слоя резиста. Так как проявка (травление) резиста происходит в жидкой среде, то вымывание резиста происходит изотропно. Поэтому если произвести недостаточную проявку, то может возникнуть ситуация, когда часть нижнего резиста образует профиль, который приведет к контакту напыляемого металла с органическим материалом. Из-за этого могут возникнуть «стенки» после смыва резиста.

Благодаря напылению под углами, возможна реализация контакта между тонким слоем алюминия (40 нм) и толстым слоем антенн (200 нм). См. рисунки 3.11 и 3.12.

85



Рисунок 3.11. Фотография, снятая на СЭМ под углом, увеличение x11000. На верхней части толстый слой антенны (200 нм), в середине изображения часть СИНИС-детектора.



Рисунок 3.12. Изображение в СЭМ, вид сверху. Увеличение х12000. СИНИС-детектор.

Технология теневого напыления позволяет оптимизировать технологическую карту, благодаря возможности убрать слой «тонкого

золота» (Ті/Au/Pd общей толщиной 30-35 нм), что позволяет соединить СИНИС структуру с толстым слоем металлического электрода. Распыляемый под углом сверхпроводник (алюминий, толщиной к нормали=40 нм) «взбирается» на слой Au/Pd (толщиной 100-180 нм).

3.3 Описание экспериментальной установки

Для исследования радио – и тепло-физических характеристик созданных образцов используется экспериментальная установка и разработана специализированная методика в виде аппаратно-программного комплекса, представленного в следующих подразделах. Установка состоит из квазиоптического гауссова тракта, набора фильтров, криогенных установок, чернотельных эталонов излучения и специализированного ПО - IRTECON.

3.3.1 Гауссовый оптический тракт

Электромагнитная волна может быть представлена как гауссовый пучок.

Гауссовый пучок – это пучок электромагнитной волны, в котором распределение электрического поля и излучения в поперечном сечении может быть аппроксимировано функцией Гаусса (3.1):

$$g(x) = a * \exp\left(-\frac{(x-b)^3}{2c^2}\right)$$
 (3.1)

где a,b,c в общем случае произвольные вещественные числа.

Для системы с осевой симметрией изменяются только размер пятна (т.е. ширина пятна в месте перетяжки) и радиус кривизны (образующая гауссова пучка - гипербола). Более того, для тонкой линзы изменяется только радиус кривизны, а размер пятна остается неизменным.

На рисунке 3.13 представлен собранный гауссовый тракт с 4 линзами. В качестве излучателя использовалась лампа обратной волны (ЛОВ). Определялись характеристики перестраиваемого сеточного фильтра, в качестве детектора был выбран пироэлектрический приемник.



Рисунок 3.13. 1-ЛОВ, 2,4-линзы, 3-модулятор, 5-перестраиваемый фильтр, 6пироэлектрический детектор.

3.3.2 Криостаты.

Первоначальные измерения ВАХ СИНИС-структур проходили при комнатной температуре, для проверки работоспособности переходов, измерения их нормального сопротивления и настройке измерительного оборудования. Для криогенных тестов использовались две криогенные системы описанные ниже.

Криостат Heliox AC-V [52] был использован для проведения низкотемпературных измерений. Рисунок 3.14



Рисунок 3.14. Криостат Heliox AC-V в разобранном (для монтажа образца) и собранном видах. 1-Контроллер охлаждения импульсной трубы, 2-вывод электрических соединений к образцу, 3- сбор ³He, 4-первая ступень импульсной трубы, 5-сорбционный насос, 6-вторая ступень импульсной трубы, 7-емкость с ³He и место крепления образцов.

Криостат фирмы Oxford-Instruments обладает высокой температурной стабильностью (±3 мК при температурах ниже 2 К), минимальная рабочая температура 273 мК, время удержания низкой температуры до 50 часов. Кроме этого, в нашем распоряжении была внешняя крышка с оптическим окном, что позволяло проводить спектральные измерения с источником, находящимся при комнатной температуре. [52]

Помимо Heliox, криостата фирмы позволяющего работать при температуре 270 мК, был использован погружной микрокриостат основе Не₃ [10]. Схема растворения криостата представлена на на рисунке 3.15 и 3.16.



Рисунок 3.15 Упрощенная схема криостата-вставки (а) и внешний вид низкотемпературной части криостата со снятым экраном (б). 1-крышка из нержавеющей стали, уплотняемая индием, 2-верхняя часть корпуса, 3-держатель образцов, 4- медный теплопровод, 5,6,7-соответственно 100 К, 4.2 К и 0.4 К-медные экраны, 8-конденсатор паров смеси, 9-трубки откачки ванн ³Не (справа) и ⁴Не (слева), 10-миксер, 11-испаритель, 12-теплообменник, 13, 18-сорбционные тепловые ключи поглотителей ³Не и ⁴Не соответственно, 14-медные проставки в линиях откачки, 15-сорберы ³Не (справа) и ⁴Не (слева), 16-медный корпус, в котором размещены сорберы, 17-конденсатор ⁴Не, 19несущие стержни-теплопроводы, 20-медный экран, 21-трубка перелива ⁴Не, 22-ванна ³Не, 23-конденсатор ³Не, 24-ванна ⁴Не, 25-труба из нержавеющей стали, 26нижний фланец, уплотняемый индием, 27-контейнеры смеси ³Не и ⁴Не, 28-внты для натяжения полимерных центрирующих нитей, 29-магнитный тепловой ключ для предварительного

охлаждения миксера и системы ³He, 30-переходное кольцо экрана 4.2 К, 31-пружинящие латунные лепестки. [10]



Рисунок 3.16 Внешний вид криостата-вставки (а), установленной в транспортном гелиевом криостате объемом 35 л (б). [10]

Подобный криостат позволяет работать при температурах ниже 100 мК, минимальная температура 40 мК.

3.3.3 Источник электромагнитного излучения.

В качестве источника электромагнитного излучения нами был разработан и изготовлен излучатель в виде тонкой нихромовой пленки, напыленной на подложку из кремния или сапфира. Подложка из сапфира обладает более высокой теплопроводностью (149 Вт*м⁻¹*К⁻¹ по сравнению с 46 Вт*м⁻¹*К⁻¹ у кремния), что позволяет добиться более крутого фронта сигнала. На нихром были нанесены золотые контактные площадки для выравнивания распределения тока по пленке. Спектр излучения может быть описан при помощи формулы Планка для излучения черного тела.

Источник излучения был подвешен на манганиновых проводах, электрически изолированных от медного основания с температурой 0,5 К. Подвес обеспечивал тепловую изоляцию от основания и по проводам подавался ток, нагревающий пленку. При пропускании импульсного тока с мгновенной мощностью порядка десятка милливатт излучатель нагревался до 10-15 К. Температура излучателя температуры контролировалась С точностью до 0,1 К термометром на основе RuO_2 резистора, приклеенного к подложке с тыльной стороны. Излучение теплового источника падало на детектор через диафрагму диаметром 7 мм и высотой 3 мм, с двух сторон закрытую полосно-пропускающими сетчатыми фильтрами с центральной частотой 350 ГГц и полосой пропускания сборки 70 ГГц. После фильтра излучение фокусировалось на детекторы полусферической сапфировой линзой и кремниевой подложкой с детекторами, прижатою тыльной стороной к линзе. Мощность излучения рассчитывалась по формуле Планка для одномодовой антенны с учетом пропускания фильтров в предположении, что излучатель – черное тело, диафрагма не ограничивает диаграмму направленности антенны и антенна согласована с поглотителем – полоской нормального металла [56].

Реально мощность, поглощаемая детектором, заведомо меньше. Так, сопротивление медного мостика, как это было измерено на тестовых образцах в работе [90], составило несколько Ом, что на порядок меньше согласованного сопротивления 50 Ом. Однако абсолютные значения

92

мощности излучения при разных температурах излучателя зависят только от точности измерения его температуры и степени черноты.

3.4 Методика измерения сигнала с СИНИС-структур.

Все измерения в данной работе были сделаны в режиме задания тока. Мы использовали усилители, на основе полевых транзисторов: OPA111 [91] или AD743 [92], (сравнительные характеристики приведены в таблице 3), которые находились при комнатной температуре. Наборы балластных сопротивлений от 200 кОм до 10 ГОм были использованы для системы задания тока рисунок 3.17.



Рисунок 3.17: Принципиальная схема блока усилителей используемых для снятия характеристик с матрицы СИНИС-детекторов.

	OPA111	AD743
Входной шум по	11 нВ/√Гц на 100 Гц	3,6 нВ/√Гц на 100 Гц
напряжению		
Входной шум по току	0,9 фА/√Гц	6,9фА/√Гц
Входное сопротивление	10 ¹³ Ом	10 ¹⁰ Ом

Таблица 3.3 Основные параметры используемых усилителей.

Как видно из таблицы 3.3, усилитель OPA 111 имеет на порядок лучше шумовую характеристику по току, которая особенно важна в наших измерениях. Дальнейшие результаты представлены с учетом работы измерительной схемы на основе усилителя OPA 111.

Вольт-амперные характеристики СИНИС-детекторов регистрировались в режиме задания медленно меняющегося тока смещения І. При этом выходное напряжение ЦАП, задающего управляющее напряжение, симметричное относительно земли, подавалось на СИНИС через резисторы номиналом 1-10 ГОм по витой паре проводов. Чтобы уменьшить влияние тепловых шумов от элементов, находящихся при комнатной температуре, дополнительно в цепь последовательно включались резисторы номиналом 1 МОм, охлажденные до температуры 0,4-0,5 К. Заданное напряжение U на СИНИС–детекторах через витую пару поступало на вход малошумящего предварительного усилителя, расположенного при комнатной температуре.

Использовалась сбора система данных на основе компьютера И многофункционального устройства ввода-вывода NI-6289 [93]. Ток І задавался 16-разрядным ЦАП. Выходное напряжение усилителя преобразовывалась 16-разрядным АЦП. Дифференциальное сопротивление R_d=dU/dI определялось численным дифференцированием вольт-амперных характеристик. Измерения проводились с использованием погружного криостата растворения [10], в котором образцы размещаются внутри экрана с температурой 0,4-0,5 К наверху прибора на держателе, охлажденном до температуры ниже 0,1 К. Температура держателя образцов измерялась RuO₂термометром фирмы LakeShore.

3.5 Выводы

Представлено описание различных топологий матриц кольцевых антенн с СИНИС-детекторами: кольцевые антенны, соединенные

параллельно, кольцевые антенны, соединенные последовательно, электрически малые кольцевые антенны. Стандартный размер образца 7*7 мм.

Предложены топологии образцов для проведения измерений по приему излучения со стороны антенн: для этого контактные площадки выведены в сторону и размер чипом 7*14 мм.

Приведено описание технологических установок для изготовления образцов: установка электронно-лучевой литографии, установки магнетронного и электронно-лучевого напыления.

Приведено описание технологических карт изготовления образцов. Предложен и экспериментально подтвержден способ соединения двух слоев в случае, когда первый слой толще, чем предыдущий: методом напыления под углами. Это позволило упростить процесс изготовления образцов.

Описаны используемые установки для проведения экспериментальных исследований образцов: криостаты, источники электромагнитного излучения, системы измерения.

Глава 4. Фильтры мм и субмм диапазонов.

В данной главе представлен теоретический расчет одиночных полоснопропускающих пленочных фильтров, расчет криогенного спектрального перестраиваемого фильтра и капиллярных фильтров. Описаны результаты спектральных измерений изготовленных фильтров.

4.1 Полосно-пропускающий фильтр.

Представлена разработка конструкции полосно-пропускающего фильтра на основе ЧСП для частоты 345 ГГц. Выбор параметров элементарной ячейки (g - размер ячейки, L - длина креста, W - ширина креста) позволяет получить фильтр необходимой добротности - $Q = \lambda_0 / (\lambda_1 - \lambda_0) - \lambda_0 / (\lambda_1 - \lambda_0) \lambda_2$).где λ_1 , λ_2 - длины волн, соответствующие пропусканию 50% от максимального (-3 дБ), а также сместить полосу пропускания от линии поглощения, так называемой аномалии Вуда, которая проявляется на длине волны равной периоду ($\lambda = g$). В этом отношении крестовые отверстия предпочтительней, было чем квадратные И круглые, как ЭТО продемонстрировано, например, в работе [82].

В расчетах использовалась формула, полученная эмпирическим путем [78]:

$$\lambda_R = 2g - 3.6a - 2.7b, \tag{4.1}$$

где g - размер ячейки, a - половина расстояния между соседними крестами, b - половина ширины креста. Добротность Q зависит от относительных размеров креста g:L:W.

Для сеток на подложке следует учитывать отличие длины волны в диэлектрике от длины волны в вакууме. Если сетка полностью погружена в диэлектрик, как это иногда делается для интерференционных фильтров, то $\lambda_{eff} = \lambda_0 / \sqrt{\varepsilon}$, где ε - диэлектрическая проницаемость. Для односторонней толстой

подложки $\lambda_{eff} = \lambda_0 / \sqrt{\varepsilon_{eff}}$, $1 < \varepsilon_{eff} < (\varepsilon + 1)/2$. При этом $\varepsilon_{eff} \approx (\varepsilon + 1)/2$ уже при толщине диэлектрика $d = 0.1 \lambda_0$. На спектральную характеристику влияет также отражение от поверхности подложки и интерференция его с отражением от сетки на второй поверхности.

При выборе технологии изготовления сетки мы учитывали, прежде всего, качество краев отверстий. Для уменьшения потерь на краях важно уменьшать поверхностное сопротивление, а не толщину скин слоя. Это объясняется тем, что скин-слой влияет на отражение от поверхности фильтра вне полосы, а потери прохождения нужно рассматривать как омические потери в отрезке волновода, образованного стенками отверстия. Если стенки прямоугольные и резкие (рисунок 4.1a), то вносимое сопротивление будет пропорционально произведению удельного сопротивления на длину волновода, т.е. на толщину пленки и обратно пропорционально ширине узкой стенки и глубине скин-слоя. Для прямоугольных стенок вносимое сопротивление потерь на ширине щели w составит:

$$R_{abs} = \rho w/t \delta = (\rho w/t) [\omega \mu/2\rho]^{1/2} = (w/t) (\omega \mu \rho/2)^{1/2}$$
(4.2)

Если край с подтравом (рисунок 4.16), то вместо толщины пленки *t* необходимо брать глубину скин-слоя δ с корректирующим множителем *α*.

$$R_{abs} = \rho w / \alpha \delta^2 = (\rho w / t) [\alpha \omega \mu / 2\rho] = \alpha \omega \mu w / 2t.$$
(4.3)

Потери в этом случае слабо зависят от проводимости пленки, поскольку при увеличении проводимости уменьшается глубина скин-слоя. Это находит подтверждение в экспериментах с латунными, алюминиевыми, никелевыми, медными и золотыми фильтрами [83].



Рисунок 4.1. Схематическое изображение сечения элемента ячейки с прямоугольными резкими краями (а) и с подтравом (б). Красным цветом выделены участки, в которых возбуждаются токи, связанные с прохождением излучения. Зеленым цветом показана подложка.

Ниже приведен пример расчёта центральной частоты для фильтра с учетом его характеристического размера.

Согласно формуле 3.1 $\lambda_R = 2g \cdot 3.6a \cdot 2.7b$, где g- размер элементарной ячейки, 2a - расстояние между концом одного креста и началом другого, 2b - ширина креста. С учетом того, что фильтр будет изготавливаться на кварцевой подложке, необходимо учитывать эффективную диэлектрическую проницаемость, которая равна 2,35, при диэлектрической проницаемости кварца 3,7. При таких данных получим, что λ_{eff} =570 мкм.

Для фильтра с шаблоном на 350ГГц (с подложкой из кварца), (широкополосного, с шириной порядка 80-100ГГц), с отношениями сторон: 10:8:1 (размер ячейки g, длина креста L, ширина креста W) получим, что λ_{Reff} =15, т.е. 15 относительных единиц, тогда g=380 мкм, L=305 мкм, W=38 мкм.

4.2 Разработка конструкции перестраиваемого сеточного фильтра

При обычных спектральных измерениях реализуется следующая схема: перестраиваемый источник излучения (ЛОВ) находится снаружи криостата, между ЛОВ и первым оптическим окном стоят квазиоптические линзы, обеспечивающие перетяжку гауссова пучка в районе первого оптического окна криостата. На каждом оптическом окне криостата располагаются ФНЧ, ФВЧ, полосно-пропускающие фильтры, а также аттенюаторы. Подобных оптических окон зачастую не менее трех. Все это вносит существенные погрешности в измерения при любой сборке-разборке криостата. Поэтому привлекательным и естественным вариантом построения измерительной системы для проведения спектральных измерений является использование широкополосного калиброванного криогенного теплового источника (черное тело, излучающее в широкой полосе частот) в паре с перестраиваемым высокодобротным фильтром внутри криостата. Такое решение позволяет существенно упростить оптический тракт по сравнению с использованием лампы обратной волны (ЛОВ) и набора линз, находящихся при комнатной избавиться температуре, а также многократных отражений OT И неоднородностей, возникающих на оптических окнах криостата.

В качестве перестраиваемого фильтра была разработана конструкция сеточного фильтра типа интерферометра Фабри-Перо. Одним из условий реализации такой конструкции является хорошая отражающая способность сеток. В нашем эксперименте в роли сеток (зеркал интерферометра) выступают металлические фильтры высоких частот на кварцевых подложках [A3, A12, A13]. Коэффициент пропускания одного такого фильтра в исследуемом диапазоне частот составляет не более 4 %, что удовлетворяет требования к зеркалам для интерферометра. Был произведен расчет частотной характеристики такого фильтра, настроенного на частоту 300 ГГц.

Расчет производился в следующей конфигурации: сетки на подложках смотрят друг на друга, расстояние между сетками 500 мкм, что соответствует половине длины волны на данной частоте. В качестве материалов были выбраны оптический кварц для подложки и золото для материала решетки. Моделирование данной периодической решетки производилось для характерной ячейки с периодическими граничными условиями. Размеры соответствуют изготовленным структурам. Длина креста 40 мкм, ширина 5 мкм, толщина 0,3 мкм, на подложке 240 мкм. Расчет проводился в программном пакете CST STUDIO SUITE 2016, фотография рассчитываемой структуры представлена на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2. Вид рассчитываемой ячейки в программе моделирования с основными параметрами.

В результате моделирования получены спектры пропускания данной структуры в диапазоне частот 50-1000 ГГц. Из данных графиков видны пики пропускания на частотах около 300 ГГц и следующих кратных (600 и 900 ГГц). Смещение пиков относительно планируемой частоты связано с так называемым «эффектом провисания электрического поля в сетках» и более выражен на высоких частотах, Рисунок 4.3.



Рисунок 4.3. График расчетной зависимости пропускания сетчатого фильтра в линейном масштабе.

Для первого варианта фильтра были изготовлены сетки из золота на кварцевых подложках толщиной 240 мкм, диаметром 25 мм, толщина золота 300 нм, ширина полосок 5 мкм, период 40 мкм [A2].

4.3 Измерения полосно-пропускающих фильтров

Приведены измерения разработанных и изготовленных полоснопропускающих фильтров [А6, А29].

Лучший полосно-пропускающий фильтр получился на кварцевой подложке, с напылением золота, изготовленный по технологии взрывной литографии.

Все результаты первой серии образцов были получены на образцах, изготовленных методом травления. Следующая серия образцов была выполнена методом обратной (взрывной) литографии. Пленки меди и золота толщиной 0,5-2 мкм наносили методом электронно-лучевого испарения на подложки из каптона и кварца. В таких образцах профиль отверстия оказывается более резким без утоньшений на краях, характерных для подтрава при химическом травлении. В качестве иллюстрации на рисунке 4.4 приведены характеристики некоторых тонкопленочных фильтров для диапазона 350-450 ГГц. Измерения проводили с использованием ламп обратной волны в качестве источника излучения. В отличие от предыдущих измерений в ЛОВ-спектрометре ЭПСИЛОН с непрерывным считыванием спектра, в данном случае прохождение измерялось методом замещения на тех частотах, где имеются максимумы излучения во всем тракте. Замещение производилось непосредственно после каждого измерения с фильтром, что дополнительно повышало точность и снижало влияние медленных дрейфов уровня мощности. Такая методика позволила значительно повысить точность измерения в этих спектральных точках и избавиться от точек со слабым сигналом, в которых погрешность превышает 3 дБ. Измеренные значения аппроксимировали кривой Лоренца по методу наименьших квадратов, полученные значения приведены на рисунке 4.4



Рисунок 4.4. Обработанные графики пропускания фильтров из золота толщиной 0,35 мкм, и меди толщиной 0,3 мкм, 1 мкм, 2 мкм, изготовленные по шаблонам для диапазонов на 350 и 450 ГГц. Смещение по частоте вниз связано с использованием диэлектрической подложки.

Лучшие значения потерь пропускания составили -0.09 дБ в пределах полосы пропускания. Вне полосы пропускания потери в одиночном фильтре, превышали -11 дБ, что превышает геометрический фактор, равный отношению вытравленной площади к полной площади единичной ячейки и составляющий -8,2 дБ. Потери, измеренные в фотошаблоне, представляющем собой пленку хрома на стеклянной подложке, составили 20 дБ на центральной частоте, что наглядно иллюстрирует роль резистивных потерь в материале фильтра. Кроме того, были измерены спектры пропускания фильтров в дальнем ИК диапазоне с использованием ИК спектрофотометра. В этом диапазоне ослабление превышает 10 дБ.

4.4 Измерение перестраиваемого сеточного фильтра

Был изготовлен и протестирован криогенный перестраиваемый сеточный фильтр [A2, A22, A33]. Пропускание измерено методом замещения в просвечивающем ЛОВ-спектрометре. Рейтер с сетками устанавливали в четырехлинзовом тракте в перетяжке сформированного гауссова пучка, где фронт волны наиболее плоский. Более подробно измерительный стенд описан в главе 3.

Перестраиваемый интерферометр состоял из двух металлических дисков, которые раздвигались вращением кольцевых диафрагм в резьбе M50x0.75. Использование магнитов для прижима сеток к винтовым кольцам позволило избежать люфтов при перемещении металлических частей. Один полный оборот кольца с сеткой соответствовал перемещению на 0,75 мм. Изначальный зазор между сетками 0,1 MM. Сетки располагались металлическими частями одна к другой и диэлектриком наружу. Была проведена проверка и калибровка ЛОВа при помощи сеточного заводского интерферометра. Коэффициент пропускания в максимуме составил 40% от сигнала без интерферометра. Измерено пропускание интерферометра при фиксированном расстоянии между сетками, определяемом двойной толщиной подложки, см. рисунок 4.5.



Рисунок 4.5. Пропускание интерферометра при сканировании частоты ЛОВ и фиксированном расстоянии между сетками, равном двойной толщине кварцевой подложки.

На трех частотах была измерена ширина полосы пропускания такого интерференционного фильтра, полученная при перемещении одной из сеток, результаты представлены в таблице 4.1.

Частота, ГГц	123	180	229
Расстояние, мм	1,22	0,85	0,7
Полуширина, ГГц	6,2	6,3	10
Добротность	20	28	23

Таблица 4.1. Пропускание фильтра на различных частотах.

В диапазоне до 500 ГГц было измерено пропускание интерферометра при перестройке частоты ЛОВ, см. рисунок 4.6. Неравномерности характеристики связаны с неравномерной спектральной характеристикой ЛОВ. Перестройка путем вращения зеркал оказывается более гладкой, чем в случае перестройки частоты ЛОВ.



Рисунок 4.6. Пропускание интерферометра, измеренного перестройкой ЛОВ в диапазоне до 500 ГГц. Гладкая кривая – аппроксимация экспериментального графика. Ширина на полувысоте 20 ГГц. Центральная частота по фитовке-421 ГГц. Что соответствует расстоянию между сетками 0.356мм.

Помимо этой конфигурации (кварц-сетка-воздушный зазор-сеткакварц), была измерена конфигурация сетка-кварц-воздушный зазор-сеткакварц. Измерения проводились при фиксированной частоте ЛОВ равной 468 ГГц, для этой частоты длина волны составляет 0,64 мм. Таким образом, чтобы наблюдать резонанс, расстояние между пластинами должно быть кратным 0,32 мм. В эксперименте минимальный зазор между сетками с учетом влияния толщины диэлектрической подложки составляет 0,288 мм. Из рисунка 4.7 видно, что резонанс происходит при зазорах 0,35; 0,7; 1,02 мм, что соответствует теоретическому расчету.



Рисунок 4.7 Зависимость коэффициента пропускания от расстояния между сетками.

Проведен эксперимент по калибровке перестраиваемого фильтра. Для фиксированных частот на 232 и 95 ГГц, задаваемых ЛПД, изменялось расстояние между сетками [А2, А22, А33]. Результаты измерений представлены на рисунке 4.8.



Рисунок 4.8 Измерения при комнатной температуре. ЛПД на 232 ГГц (красный) и на 95 ГГц (синий).

4.5 Изготовление и конструкция капиллярного фильтра.

Матрица капилляров (тонких волноводов) может работать как фильтр высоких частот на миллиметровых и субмиллиметровых волнах без дополнительных адаптеров. На более низких частотах каждый капилляр рассматривать как круглый запредельный волновод. Массив можно капилляров не нуждается в каких-либо переходниках, они тонкие (длина 1-4 мм) и могут быть вставлены в любой квазиоптический тракт. Они также могут быть альтернативой перфорированным пластинам (сеткам), которые должны быть расположены в виде 4-6 параллельных слоев, и этот фильтр высоких частот является, скорее, полосовым фильтром с пропускной способностью около одной октавы. Промышленные производители многослойных терагерцовых фильтров, такие как QMC Instruments и TYDEX, не предлагают высокоэффективных высокочастотных фильтров, которые необходимы для криогенных источников излучения, предназначенных для калибровки сверхпроводящих детекторов.

В простом приближении для расчета запредельного волновода можно воспользоваться эмпирической формулой:

$$\lambda_{cr} = 1.71 \cdot d$$

Для используемых купроникелевых полых трубочек, диаметром 0,54 получим частоту отсечки 324 ГГц.

Изготовлена серия капиллярных матричных фильтров с различными диаметрами и длинами капилляров. Процесс изготовления включает следующие этапы: гальванизация нержавеющих или никель-медных капилляров Ni, заполнение короткого отрезка трубки внутреннего диаметра 10 мм как можно большим количеством капилляров с диаметром 0,54 мм, пайка такого пакета оловянно-свинцовым сплавом, электроэрозионная резка кусков длиной 2 и 4 мм, заключительная очистка в ультразвуковой ванне. Рис. 4.9.



Рисунок 4.9. Принципиальные шаги при изготовлении волноводного капиллярного матричного фильтра.

4.6 Измерение капиллярного фильтра.

Капиллярные фильтры помещались в перетяжке квазиоптического гауссова тракта: источником излучения была лампы обратной волны (ЛОВ), на выходе которой находился гофрированный рупор, четыре тефлоновые линзы (фокусное расстояние 20 см и 40 см) и детектор на основе ячйки Голея. Амплитуда сигнала после прохождения квазиоптического тракта измерялась в диапазоне частот 150-550 ГГц. Для внешнего диаметра капилляра 0,54 мм и длиной 4 мм затухание фильтра составляло более 40 дБ на частотах ниже 200 ГГц. На частотах выше 350 ГГц затухание не превышает 5 дБ, что соответствует теоретическому расчету. Рис. 4.10


Рис. 4.10. Результаты измерений коэффициента пропускания капиллярного фильтра: красный-4 мм, синий 2 мм длиной.

4.7 Выводы

- Измерены разработанные и изготовленные полосно-пропускающие фильтры. Относительный коэффициент пропускания составил более 0,9 (измерено методом замещения фильтра), ослабление вне полосы пропускания составило 11 дБ. Получена ширина полосы пропускания 10-90 ГГц для центральной частоты 330 ГГц.
- Изготовлен и опробован криогенный перестраиваемый фильтр.
 Коэффициент пропускания составил 0,4, ширина полосы пропускания
 4 ГГц для центральной частоты 280 ГГц и 20 ГГц для центральной частоты 420 ГГц.
- Изготовлены волноводные фильтры высоких частот длиной 2 и 4, мм.
 Экспериментальные результаты соответствуют теоретической модели.
 Затухание выше 350 ГГц не превышает 5 дБ. Затухание на частотах ниже 200 ГГц более 40 дБ. Небольшие размеры позволяют использовать фильтры в криогенных установках.

Глава 5. Результаты экспериментальных исследований электрических и спектральных характеристик СИНИС-детекторов.

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию спектральных и сигнальных параметров матриц кольцевых антенн с интегрированными в них СИНИС-детекторами. Представлены результаты измерений отклика разработанных структур на излучение черного тела и ЛОВ. Проведено сравнение спектральных характеристик матриц стандартных кольцевых антенн и электрически малых кольцевых антенн. В результатах измерений приведены лучшие значения, полученные для изготовленных образцов.

5.1 ВАХ СИНИС детекторов.

Были изготовлены и измерены образцы с различным объемом сверхпроводящего алюминия [A10] и различным расстоянием между СИНпереходом и ловушкой из нормального металла [A4]. Дифференциальные сопротивления этих образцов приведены на рисунке 5.1, нумерация на графике следующая:

1) сверхпроводящие электроды лежат поверх трехслойной структуры Ti/Au/Pd, расстояние до нормальной ловушки 2 мкм;

2) конфигурация аналогична первой, но сверхпроводящие электроды лежат на тонком слое из Ti/Pd. В первом и втором случаях отношение площади сверхпроводящего алюминия к площади СИН-перехода *S*_{Al}/*S*_{SIN} = 3;

3) В структуре была значительно увеличена площадь сверхпроводящего алюминия, сверхпроводящий электрод лежит на двухслойной структуре Ti/Pd, но расстояние от СИН перехода до нормального металла такое же, как и в предыдущих двух случаях.

110

4) Для последнего типа образца была реализована большая площадь сверхпроводящего электрода (*S*_{Al}/*S*_{SIN}=200), расстояние от СИН-перехода до нормального металла составило 5 мкм.



Рисунок 5.1. Зависимости дифференциального сопротивления от напряжения смещения для четырех модельных образцов. Каждый образец состоял из 2 последовательных СИНИС-структур.

Из рисунка 5.1 можно сделать вывод, что толщина нормального металла влияет на свойства СИН-перехода. Но, в гораздо большей степени, на свойства СИН-переходов оказывает влияние объем сверхпроводника и его близость к нормальному металлу.

Ниже представлены результаты измерения матрицы 25 кольцевых антенн [A5] с криогенными детекторами диапазона 345 ГГц в самосовмещенном рупоре. В каждой кольцевой антенне находилось 2 СИНИС-детектора, соединенных параллельно. Измеренное при температуре 280 мК дифференциальное сопротивление последовательно соединенной матрицы приведено на рисунке 5.2. В этом случае асимптотическое сопротивление составляет 50 кОм, максимальное дифференциальное сопротивление 4 МОм. Для задания напряжения и считывания тока были изготовлены образцы с параллельным соединением 25 кольцевых антенн, в этом случае нормальное сопротивление образца составляет 14 Ом, что на 3 порядка меньше по сравнению с последовательным подключением. В случае задания смещения по току, сопротивление в рабочей точке (при 5 мВ) с наибольшим откликом по напряжению составляет около 500 кОм, а при задании смещения по напряжению в точке максимального отклика по току (на графике 5.3 примерно на 0,35 мВ) дифференциальное сопротивление, показанное на рисунке 5.3, составляет около 10 Ом [А3].



Рисунок 5.2 Дифферинциальное сопротивление структуры из 25 кольцевых антенн, соединенных последовательно.



Рисунок 5.3 Дифферинциальное сопротивление структуры из 25 колец соединенных параллельно. 5.2 Измерение отклика по току и напряжению на внешнее электромагнитное излучение.

Для измерения квазистатического оптического отклика по току или напряжению в качестве источника излучения использовалось черное тело (ЧТ), установленное внутри криостата, при контролируемой температуре. В нашем эксперименте мы тестировали несколько толщин кремния: 380, 280, 130, 65 мкм, что примерно соответствует долям длины волны $3\lambda/2$, $2\lambda/2$, $\lambda/4$ соответственно.

В случае аппроксимации мощности излучения формулой Планка для температуры 10 К, частоты 350 ГГц и полосы пропускания 70 ГГц мощность излучения составляет 3,7 пВт. Измеренные вольт-ваттные и ампер-ваттные чувствительности для матрицы кольцевых антенн, соединенных параллельно составили $dV/dP=3,4\cdot10^7$ В/Вт и 10^5 А/Вт, рисунок 5.4. Невысокий отклик по напряжению обусловлен не идеальной (используемые усилители имеют

большие шумы по току 12 фА/Гц^{1/2} в сравнении с шумами СИНИСдетектора) системой считывания для данного типа соединения антенн [А3].



Рисунок 5.4. Оптический отклик по току и по напряжению для матрицы параллельно соединенных антенн на излучение ЧТ с температурой 10К, расположенного внутри криостата

На рисунке 5.5 приведены оптические отклики по напряжению для матрицы кольцевых антенн, соединенных последовательно. Температура черного тела изменялась от 2 К до 9 К, что соответствует мощности излучения от 30 фВт до 3,0 пВт. Измеренные оптические отклики по напряжению составили от 2,6*10⁹В/Вт для 30 фВт до 5*10⁸ В/Вт для 3 пВт [A13]. Исследуемые образцы находились при температуре 100 мК.



Рис.5.5. Оптический отклик по напряжению для матрицы 25 кольцевых антенн, соединенных последовательно, для температур ЧТ в диапазоне 2-9 К. VCC - ВАХ матрицы без облучения.

Измерен оптический отклик по току в случае, когда источник находился снаружи криостата. Модулированный сигнал излучения ЧТ 77/300 К подавался на образец через окно криостата. Полученный результат представлен на рисунке 5.6 [А3].



Рисунок 5.6. Оптический отклик по току для матрицы последовательно соединенных 25 антенн на излучение черного тела, расположенного снаружи криостата

Для измерений спектрального отклика по напряжению в качестве источника излучения была использована ЛОВ диапазона 230-380 ГГц. Излучение проходит через три поглощающих аттенюатора, размещенных на радиационных экранах с температурами 100 К, 3 К и 0,3 К с ослаблением более 20 дБ, фильтр низких частот и полосно-пропускающий фильтр. Одновременно измерялись сигналы от детектора и от пироэлектрического детектора, с помощью которого контролировался уровень входной мощности.

Экспериментально измеренные спектры образцов с матрицей стандартных кольцевых антенн на кремниевой подложке приведены на рисунке 5.7. Также были проведены исследования влияния четвертьволнового антиотражающего покрытия, и было показано, что оно улучшает чувствительность и равномерность спектрального отклика (красная

кривая на рисунке 5.7), [А3]. Для сравнения, на рисунке 5.7 справа представлено численное моделирование принимаемой мощности и амплитуды для одной кольцевой антенны на кремниевой подложке толщиной 280 мкм с просветляющим покрытием. Общий вид кривой совпадает с экспериментальной.



Рисунок 5.7. Спектральные характеристики матрицы: слева – экспериментальные результаты с просветляющим покрытием (красный) и без него (синий); справа - расчетные спектральные характеристики одиночного кольца, освещаемого плоской волной.

Были рассмотрены различные конфигурации для измерения образцов: облучение со стороны антенны и облучение со стороны диэлектрика. Экспериментально подтверждено, что облучение матрицы со стороны антенн имеет более широкую полосу и уровень принимаемого сигнала существенно больше, чем при облучении со стороны диэлектрика. Результаты представлены на рисунке 5.8. Данные измерения были проведены в одном цикле охлаждения, различные образцы располагались близко друг к другу, использовался один источник излучения [A12].



Рисунок 5.8 – Спектральный отклик образцов двух типов на сигнал с ЛОВ. Красныйоблучение со стороны антенны, синий-облучение со стороны диэлектрика.

5.3 Экспериментальное исследование матриц электрически малых антенн.

Были проведены измерения матриц электрически малых кольцевых c СИНИС-детекторами [А5, А9, А11]. Измерения образцов антенн проводилось в криостатах при рабочей температуре 100 и 300 мК. Матрица из 81 электрически малой антенны с 2 СИНИС-детекторами в каждой антенне при T=300 мК имела нормальное сопротивление $R_n = 100$ кОм, дифференциальное 5 МОм, максимальное сопротивление R_d =CM. рисунок 5.9. Отношение $R_d/R_n = 50$, показывает, что эффективная электронная температура равна 450 мК, это означает, что образцы перегреваются не до конца остывшими частями холодной камеры, либо имеет место прохождение тепла из-за недостаточной изоляции стыков различных частей камеры.



Рисунок 5.9 ВАХ и дифференциальное сопротивление матрицы, состоящей из 81 электричеси малых кольцевых антенн, соединенных последовательно. Красная кривая измерения на бОльшем баластном сопротивлении - дает лучшую точность, синяя - на меньшем, позволяет измерить ВАХ при бОльшем размахе по напряжению.

Было проводедено два типа оптических измерений: исследовались оптический отклик по току или напряжению приемной структуры при различной температуре ЧТ и спектральный отклик.

На рисунке 5.10 приведены отклики по току и по напряжению для матрицы, соединенной параллельно. Измерения показали, что $dV/dP = 10^7$ B/BT, а $dI/dP = 2,4*10^4$ A/BT при облучении ЧТ при температуре 10 К. Температура образцов составляла 100 мК.



Рисунок 5.10 отклик по току и по напряжению для матрицы ЭМА, соединенных параллельно при T=100 мК и мощности излучения 3.7 пВт.

Для матрицы ЭМА, соединенных последовательно, отклики по напряжению составили 2,8*10⁹ В/Вт для 30 фВт и 3,5*10⁸ В/Вт для 2 пВт, рисунок 5.11.



Рисунок 5.11. Экспериментально измеренный отклик по напряжению на излучение черного тела для последовательной матрицы из 81 электрически малой антенны при температурах ЧТ от 2 К до 7,5 К. Температура образца 100 мК.

Исследуемые образцы в держателе с кремниевой линзой были измерены в сорбционном криостате на парах Гелий-3 при температуре 280 мК, а также в криостате растворения при температурах 100 – 300 мК. Изменяя температуру ЧТ при помощи нагревателя от 2 до 7,5 К, мы измеряли отклик по напряжению на частоте 345 ГГц. Мощность, приходящаяся на структуру, с учетом распределения Планка, составила от 2 фВт до 7 пВт (рисунок 5.12), из чего можно сделать вывод, что матрица ЭМА с СИНИСдетекторами имеет динамический диапазон более 30 дБ [A11, A22, A45, A47].

Полезную информацию о флуктуационной чувствительности можно получить из зависимости отклика по напряжению от температуры излучателя. В нашем случае мы получаем dV(T=2,7K)/dT = 135 мкB/K. При шуме на выходе 10 нB/Гц^{1/2} эквивалентная шуму разность температур составит 74 мкК/Гц^{1/2}. Если подавить паразитный фоновый сигнал и снизить электронную температуру до 0,1 К, то можно улучшить чувствительность еще на порядок.



Рисунок 5.12 Отклик по напряжению на падающее излучение мощностью от 2 фВт до 7,5 пВт. Температура образцов 100 мК, 257 мК и 480 мК. Соответствующая электронная температура 275 мК, 295 мК и 480 мК соответственно. Отклик по напряжению достигает 1,3*10⁹ В/Вт.

Следует заметить, что согласно формулам (2.1) и (2.4) из главы 2 широкая собственная полоса пропускания матрицы ЭМА с СИНИСдетекторами потенциально снижает чувствительность по сравнению с матрицей обычных кольцевых антенн, однако при одинаковой высокой фоновой нагрузке первая матрица будет чувствительнее за счет разделения мощности на большем количестве детекторов.

Важно отметить, что даже если удастся избежать перегрева от фонового излучения, мы не сможем избежать значительного перегрева при приеме полезного сигнала большой мощности.

5.4 Измерение спектрального отклика

При измерении спектрального отклика по напряжению в качестве источника использовали ЛОВ. Сигнал от ЛОВ, проходя через окна криостата, поступает на исследуемый образец На первой ступени располагалась ограничивающая медная апертура с диаметром отверстия 4 мм, ФНЧ ИК диапазона ZITEX G108 и квазиоптический аттенюатор в виде тонкой пленки нихрома на полиимидовой основе с ослаблением 10 дБ. На второй ступени располагалась комбинация следующих фильтров: ФНЧ ИК диапазона FLUOROGOLD, медная апертура диаметром отверстия 4 мм. С квазиоптический аттенюатор 10 дБ, ФНЧ ИК диапазона ZITEX G108, еще один квазиоптический аттенюатор 10 дБ. На ступени 300 мК располагался встречный рупор с ФНЧ 600 ГГц на входе и иммерсионная линза.



Рисунок 5.13 спектральный отклик матрицы ЭМА с СИНИС-детекторами (черная кривая) и стандартных образцов с размерами антенны порядка длины волны (синяя кривая).

Из рисунка 5.13 видно, что спектральный отклик матрицы ЭМА с СИНИС-детекторами более широкий и более равномерный по сравнению с матрицей стандартных кольцевых антенн, а повторяющиеся на обеих кривых неоднородности соответствуют потерям в квазиоптическом тракте, включающем окна и фильтры на трех температурных ступенях криостата.

Выводы по 5 главе

- Исследовано влияние близости нормального металла и объема сверхпроводника на качество СИН-переходов. Было показано, что большая площадь сверхпроводника (*S_{Al}/S_{SIN}=200* против *S_{Al}/S_{SIN}=3*) и удаленность от нормального металла от сверхпроводника на 5 мкм вместо 2 мкм заметно улучшают качество перехода.
- Измерены ВАХ СИНИС-детектора на постоянном токе в условиях отсутствия внешней оптической нагрузки. Сделан вывод об изначальном перегреве электронной системы: 450 мК при температуре криостата 270 мК, и 230 мК при 100 мК из-за просачивания высокочастотных сигналов из внешнего окружения.
- Исследована чувствительность матрицы планарных кольцевых антенн с СИНИС-детекторами на внешнее электромагнитное излучение. Вольт-ваттная чувствительность составляет 2,6*10⁹ В/Вт при температуре излучателя 2 К.
- Впервые разработаны, изготовлены и исследованы матрицы ЭМА с СИНИС-детекторами. Продемонстрирован отклик по напряжению 2,8*10⁹ В/Вт для последовательной матрицы и отклик по току 2,4*10⁵ А/Вт на частоте 345 ГГц.
- Спектральный отклик в диапазоне 240 370 ГГц для матриц ЭМА показал лучшую чувствительность и однородность в сравнении с матрицей обычных колечек с диаметром в полдлины волны.

 Экспериментально получена флуктуационная чувствительность 74 мкК/Гц^{1/2} при уровне фона 2,7 К, полоса пропускания более 100 ГГц. Заключение.

- Разработаны, изготовлены и измерены квазиоптические фильтры для криогенных электромагнитных измерений: полосно-пропускающие, перестраиваемый на основе интерферометра Фабри-Перо, капиллярные матричные фильтры. Полосно-пропускающие фильтры имеют полосу пропускания 10-90 ГГц и ослабление вне полосы порядка 10 дБ. Перестраиваемый фильтр способен работать при криогенных температурах и в полосе частот 100-500 ГГц с шириной полосы пропускания 4 ГГц. Волноводные фильтры с характерным диаметром волновода 0,54 мм имеют пропускание выше 350 ГГц на уровне 40%. Затухание на частотах ниже 200 ГГц более 40 дБ.
- 2. Разработана и успешно использована методика изготовления матриц планарных кольцевых антенн, с интегрированными СИНИСдетекторами, в которых убран слой «тонкого золота». Это позволило упростить технологическую карту изготовления образцов, улучшить теплоотвод финальной структуры за счет более толстого слоя нормального металла, используемого для формирования массивов антенн (200 нм против 35 нм ранее).
- Разработаны, изготовлены матрицы планарных кольцевых антенн для приема внешнего электромагнитного излучения диапазона 345 ГГц с интегрированными в них СИНИС-детекторами. МЭШ разработанных структур не хуже 10⁻¹⁷ Вт/Гц^{-1/2}.
- 4. Измерен оптический И спектральный отклик на внешнее электромагнитное излучение матриц параллельно и последовательно соединенных кольцевых антенн с характерным диаметром 300 мкм. Для последовательной матрицы ИЗ 25 антенн с детекторами чувствительность по напряжению на излучение черного тела достигает $3 \cdot 10^9 \text{ B/BT};$ мощность насыщения превышает 5 пВт. Токовая

чувствительность для матрицы из 25 параллельно соединенных антенн с детекторами составляет 2·10⁴ A/Bт.

- 5. Экспериментально измерены спектральные характеристики матриц кольцевых антенн с СИНИС-детекторами. Ширина полосы пропускания превышает 100 ГГц. Исследовано влияние расположения образца на однородность и мощность приема сигнала при облучении: с обратной стороны подложки, со стороны антенн.
- 6. Разработана, изготовлена и экспериментально исследована приемная матрица электрически малых антенн с СИНИС-детекторами, характерный диаметр кольца антенны 54 мкм. Измерен оптический и спектральный отклик. Экспериментально получена вольт-ваттная чувствительность выше 10⁹ В/Вт, динамический диапазон более 30 дБ, полоса пропускания более 130 ГГц. Использование матрицы кольцевых антенн типа метаматериала позволило увеличить полосу пропускания в сравнении с матрицей полуволновых кольцевых антенн.

Публикации в журналах, вошедших в Перечень изданий, рекомендованных ВАК:

- [А1] Чекушкин А.М., Тарасов М.А., Первичный криогенный термометр на основе цепочек туннельных переходов сверхпроводник изолятор нормальный металл// Нелинейный мир, №2, стр. 56-57, Москва, 2015.
- [А2] Чекушкин А.М., Юсупов Р.А, Завьялов В.В., Кузьмин Л.С., Тарасов М.А. Криогенный перестраиваемый спектральный фильтр для калибровки высокочувствительных болометров // Журнал радиоэлектроники. – 2017. – №. 1.
- [АЗ] М.А. Тарасов, С. Махашабде, А.А. Гунбина, М.Ю. Фоминский, Р.А. Юсупов, Чекушкин А.М., А.Б. Ермаков, А.С. Соболев, В.С. Эдельман, М.А. Мансфельд, В.Ф. Вдовин, Матрица кольцевых антенн с криогенными болометрами диапазона 345 ГГц в интегрирующей полости// Журнал радиоэлектроники №1, 2018г.
- [А4] А.М. Чекушкин, М.А. Тарасов, Р.А. Юсупов, А.А. Гунбина, В.С. Эдельман, Влияние ловушек из нормального металла, андреевского отражения и эффекта близости на охлаждение сверхпроводника в СИНИС структурах// Труды МФТИ, Том10, №2, стр. 64-71, 2018г.
- [А5] Чекушкин А.М., Юсупов Р.А., Эдельман В.С., Соболев А.С., Тарасов М.А., Матрицы метаматериалов с интегрированными СИНИСболометрами// Нелинейный мир, №1, 2019, С.74-78

Публикации в зарубежных рецензируемых журналах, входящих в Международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science:

- [A6] E. Otto, M. Tarasov, P. K. Grimes, A. Chekushkin, L. S. Kuzmin, G. Yassin, Optical response of a titanium-based cold-electron bolometer, Superconductor Science and Technology, vol. 26, 2013; doi:10.1088/0953-2048/26/8/085020.
- [A7] M. Tarasov, V. Edelman, S. Mahashabde, M. Fominsky, S. Lemzyakov, A. Chekushkin, R. Yusupov, D. Winkler, and A. Yurgens, Electrical and optical properties of a bolometer with a suspended absorber and tunnelingcurrent thermometers, Appl. Phys. Lett. 110, 242601 (2017); doi: http://dx.doi.org/10.1063/1.4986463
- [A8] M. Tarasov, V. Edelman, S. Mahashabde, M. Fominsky, S. Lemzyakov, A. Chekushkin, R. Yusupov, D. Winkler, A. Yurgens. SINIS bolometer with a suspended absorber //Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2018. T. 969. №. 1. C. 012088. doi :10.1088/1742-6596/969/1/012088
- [A9] A.S. Sobolev, B. Beiranvand, A.M. Chekushkin, A.V. Kudryashov, M.A. Tarasov, R.A. Yusupov, A. Gunbina, V.F. Vdovin and V. Edelman, Wideband metamaterial-based array of SINIS bolometers// EPJ Web

Conf., Volume 195, Article Number 05009, Number of page(s) 2, 2018 DOI: 10.1051/epjconf/201819505009

- [A10] M. Tarasov, A. Gunbina, M. Mansfeld, G. Yakopov, A. Chekushkin, R. Yusupov, S. Lemzyakov, V. Edelman and V. Vdovin, Arrays of annular cryogenic antennas with SINIS bolometers and cryogenic receivers for SubTHz observatories // EPJ Web Conf.,Volume 195, Article Number 05010, Number of page(s) 2, 2018 DOI: 10.1051/epjconf/201819505010
- [A11] Tarasov M., Sobolev A., Gunbina A., Yakopov G., Chekushkin A., Yusupov R., Lemzyakov S., Vdovin V., and Edelman V., Annular antenna array metamaterial with SINIS bolometers // Journal of Applied Physics, Vol.125, Issue 17, 174501, 2019 DOI: 10.1063/1.5054160
- [A12] M. A. Tarasov, A.A. Gunbina. S. Mahashbde, R.A. Yusupov, A.M. Chekushkin, D.V. Nagirnaya, V.S. Edelman, G.V. Yakopov, V.F. Vdovin. Arrays of Annular Antennas With SINIS Bolometers //IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2019. T. 30. №. 3. C. 1-6. 10.1109/TASC.2019.2941857
- [A13] M. A. Tarasov, A. M. Chekushkin, R. A. Yusupov, A. A. Gunbina, V. S. Edelman Matching of Radiation with Array of Planar Antennas with SINIS Bolometers in an Integrating Cavity// Journal of Communications Technology and Electronics, 2020, Vol. 65, No. 1, pp. 60–68, DOI: 10.1134/S1064226920010064 (М.А. Тарасов, А.М. Чекушкин, Р.А. Юсупов, А.А. Гунбина, В.С. Эдельман. Согласование излучения с матрицей планарных антенн с СИНИС болометрами в интегрирующей полости// Радиотехника и электроника. — 2020. — Т.65, № 1. — С. 65-74.)
- [A14] A.A.Gunbina, M.A.Tarasov, S.A.Lemzyakov, A.M.Chekushkin, R.A.Yusupov, D.V.Nagirnaya, M.A.Mansfeld, V.F.Vdovin, D.Winkler, A.S.Kalaboukhov, V.S.Edelman, Spectral response of arrays of half-wave and electrically small antennas with SINIS bolometers, Physics of Solid State, 2020, vol. 62, No. 9, pp. 1504-1611 DOI: 10.1134/S1063783420090097. М.А. Тарасов, С.А. Лемзяков, А.А. Гунбина, А.М. Чекушкин, Р.А. Юсупов, М.А. Мансфельд, В.Ф. Вдовин, Д. Винклер, Д.В. Нагирная, А.С. Калабухов, В.С. Эдельман, Спектральный отклик матриц полуволновых и электрически малых антенн с СИНИС болометрами, Нанофизика и наноэлектроника, XXIV Междунар. симп., 10-13 марта 2020, Н.Новгород, т. 1, с. 56-57. Физика твердого тела, 2020, в. 9, стр. 1440-1446 DOI: 10.21883/FTT.2020.09.49767.35Н.
- [A15].M.A. Tarasov, A.A. Gunbina. S. Mahashabde, R.A. Yusupov, S.A. Lemzyakov, D.V. Nagirnaya, M.A. Mansfeld, A.M. Chekushkin, bolometer with A.S. Kalaboukhov, D. Winkler, SINIS V.F. Vdovin, microwave readout, Physics of Solid State, 2020, vol. 62, No. 9, pp. 1580-10. 1134/S1063783420090292. М.А. Тарасов, С. Махашабде, 1584 DOI: Р.А. Юсупов, А.М. Чекушкин, С.А. Лемзяков, Д.В. Нагирная, А.А. Гунбина, М.А. Мансфельд, В.Ф. Вдовин, В.С. Эдельман, Д. Винклер, А.С. Калабухов, СИНИС

болометр с микроволновым считыванием, Нанофизика и наноэлектроника, XXIV Междунар. симп., 10-13 марта 2020, Н.Новгород, т. 1, с. 120-121. Физика твердого тела, 2020, в. 9, стр. 1415-1419 DOI: 10.21883/FTT.2020.09.49763.17H.

- [A16] R.A. Yusupov, A.A. Gunbina, A.M. Chekushkin, D.V. Nagirnaya, S.A. Lemzyakov, V.S. Edelman, M.A. Tarasov, Quantum response of a bolometer based on the SINIS structure with a suspended absorber, Physics of 2020. DOI: Solid State, vol. 62, No. 9, pp. 1567-1570 10.1134/S106378342009036X. Р.А. Юсупов, А.А. Гунбина, А.М. Чекушкин, Д.В. Нагирная, С.А. Лемзяков, В.С. Эдельман, М.А. Тарасов, Квантовый отклик болометра на основе структуры СИНИС с подвешенным абсорбером, Нанофизика и наноэлектроника, XXIV Междунар. симп., 10-13 марта 2020, Н. Новгород, т. 1, с. 144-145. Физика твердого тела, 2020, в. 9, стр. 1403-1406. DOI 10.21883/FTT.2020.09.49761.11H.
- [A17] Yu.Yu. Balega, A.M. Baryshev, G.M. Bubnov, V.F. Vdovin, A.A. Gunbina, S.N. Vdovichev, P.N. Dmitriev. V.K. Dubrovich, I.I. Zinchenko, V.P. Koshelets, S.A. Lemzyakov, D.V. Nagirnaya, K.I. Rudakov, A.V. Smirnov, M.A. Tarasov, L.V. Filippenko, V.B. Haikin, A.V. Khudchenko, A.M. Chekushkin, V.S. Edelman, R.A. Yusupov, G.V. Yakopov, Superconducting receivers for space, balloon, and groundbased sub-terahertz radio telescopes, Radiophysics and Quantum Electronics, Vol. 63, No. 7, Dec. 2020, pp. 479-500, DOI: 10.1007/s11141-021-10073-z. Ю.Ю. Балега, А.М. Барышев, Г.М. Бубнов, В.Ф. Вдовин, С.Н. Вдовичев, А.А. Гунбина, П.Н. Дмитриев, В.К. Дубрович, И.И. Зинченко, В.П. Кошелец, С.А. Лемзяков, Д.В. Нагирная, М.А. Тарасов, К.И. Рудаков, А.В. Смирнов, Л.В. Филиппенко, В.С. Эдельман, В.Б. Хайкин, A.B. Худченко, А.М. Чекушкин, Р.А. Юсупов, Г.В. Якопов, Сверхпроводниковые приемники ДЛЯ космических, аэростатных и наземных субтерагерцовых телескопов, Изв. ВУЗов Радиофизика, т.63, №7,2020, с. 533-556.
- [A18] M. Tarasov, A. Gunbina, R. Yusupov, A. Chekushkin, D. Nagirnaya,
 S. Lemzyakov, V. Vdovin, V Edelman, A. Kalaboukhov, D. Winkler, Non-Thermal Absorption and Quantum Efficiency of SINIS Bolometer, IEEE TAS 2021, vol. 31, No 5, Aug.2021, P. 2300105, DOI: 10.1109/TASC.2021.3057327
- [A19] A.A. Gunbina, S. Mahashabde, M.A. Tarasov, G.V. Yakopov,
 R.A. Yusupov, A.M. Chekushkin, D.V. Nagirnaya, S.A. Lemzyakov,
 V.F. Vdovin, A.S. Kalaboukhov, D. Winkler, A 90 GHz SINIS detector with
 2 GHz readout, IEEE TAS, vol. 31, No 5, 1500805, Aug. 2021, DOI:
 10.1109/TASC.2021.3068999
- [A20] M. Tarasov, A. Gunbina, S. Lemzyakov, M. Fominsky, A. Chekushkin, G. Yakopov, V. Vdovin, V. Edelman, Matrices of SINIS detectors for

Тегаhertz radioastronomy, Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2021, vol. 48, No 9, pp. 262-267; DOI: 10.3103/S1068335621090086. М. Тарасов, А. Гунбина, С. Лемзяков, М. Фоминский, А. Чекушкин, Г. Якопов, В. Вдовин, В Эдельман, Матрицы детекторов сверхпроводник-изолятор-нормальный металл-изолятор-сверхпроводник для терагерцовой радиоастрономии, Краткие сообщения по физике ФИАН, № 9, с. 10-18, 2021.

- [A21] M. Tarasov, A. Gunbina, S. Lemzyakov, D. Nagirnaya, M. Fominsky, A. Chekushkin, V. Koshelets, E. Goldobin, A. Kalaboukhov, Development of Josephson travelling-wave parametric amplifier based on aluminum SIS junctions, Phys. of Sol. State, 2021, Vol. 63, No.9, pp.1377-1381. DOI: 10.1134/S1063783421090419. Тарасов М., Гунбина А., Лемзяков С., Нагирная Д., Фоминский М., Чекушкин А., Кошелец В., Голдобин Э., Калабухов A., Разработка джозефсоновского параметрического усилителя бегущей волны на основе алюминиевых СИС-переходов, 1223. тела, 2021, 9, Физика твердого вып. стр. DOI: 10.21883/FTT.2021.09.51242.11H.
- [A22] M. Tarasov, A. Gunbina, A. Chekushkin, V. Vdovin, A. Kalaboukhov, Arrays of sub-terahertz cryogenic metamaterial, Appl. Sci. 2021, 11, 9649; DOI: 10.3390/app11209649.
- [A23] M. Tarasov, A. Gunbina, M. Fominsky, A. Chekushkin, V. Vdovin, V. Koshelets, E. Sohina, A. Kalaboukhov, V. Edelman, Fabrication of NIS and SIS nanojunctions with aluminum electrodes and studies of magnetic field influence on IV curves, Electronics 2021, 10, 2894; DOI: 10.3390/electronics10232894.
- [A24] M. Tarasov, V. Edelman, S. Lemzyakov, A. Gunbina, R. Yusupov,
 A. Chekushkin, D. Nagirnaya, V. Vdovin, A. Kalaboukhov, Cryogenic
 MIMIM and SIMIS microwave detectors, 2020 7th All-Russian Microwave
 Conference (RMC), 25-27 Nov 2020, pp.25-27, Moscow, Russia, DOI: 10.1109/RMC50626.2020.9312267.
- [А25] Фоминский М. Ю. и др. Изготовление сверхпроводниковых туннельных структур с использованием электронно-лучевой литографии //Физика твердого тела. – 2021. – Т. 63. – №. 9. – С. 1228-1232.
- [A26] Чекушкин А. М. и др. Оптимизация режимов изготовления пленок Nb, NbN, NbTiN и высококачественных туннельных переходов на их основе для приемных структур терагерцевого диапазона //Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91. – №. 10. – С. 1577-1582.
- [A27] Artem M. Chekushkin, Lyudmila V. Filippenko, Vadim V. Kashin, Mikhail Yu. Fominskiy, Valery P. Koshelets. Investigation of thin films for fabrication

of Nb/AlN/NbN tunnel junctions and microstrip lines of NbTiN-SiO2 -Al. RENSIT, 13(4), 419-426, 2021, DOI:<u>10.17725/rensit.2021.13.419</u>

 [A28] Fominsky, M. Y., Filippenko, L. V., Chekushkin, A. M., Dmitriev, P. N., & Koshelets, V. P. (2021). Fabrication of Superconducting Nb–AlN–NbN Tunnel Junctions Using Electron-Beam Lithography. *Electronics*, 10(23), 2944.

Тезисы докладов на конференциях:

- [A29] M. A. Tarasov, A. M. Chekushkin, V. S. Edelman, L. S. Kuzmin Устный доклад на тему: «Metamaterial bandpass structures made of two-dimensional arrays of planar resonators», Tera-2012, 20-22 June, Moscow, Russia.
- [A30] M. A. Tarasov, A. M. Chekushkin, L.S.Kuzmin, "Focal plane CEB array design for OLIMPO and CLOVER projects", The 13th International Workshop «Cryogenic Nanodevices», poster session, on March 17-24, 2013, Bjorkliden, Kiruna, Sweden.
- [A31] **A.M.** Чекушкин, M.A. Тарасов, Л.С. Кузьмин, «Криогенные микротермометры на основе массива СИН переходов», устный доклад МФТИ, 25-30 56-й научной конференции ноября, 2013. на Долгопрудный.
- [A32] V. S. Edelman, M. A. Tarasov, A. M. Chekushkin, "Capillary quasioptical highpass filter", The 25th International Symposium on Space Terahertz Technology, 27-30 April 2014, Moscow, Russia.
- [АЗЗ] Чекушкин А.М, Юсупов Р.А, Глыбовский С., Саянский А., Завьялов В.В., Дубрович В., Кузьмин Л.С., Щесняк С., Тарасов М.А. Перестраиваемый сеточный интерферометр для спектральной калибровки криогенных болометров // Сборник трудов II Московской Микроволновой конференции / Москва, 2014, С.139-144
- [A34] M.Tarasov, A.Chekushkin, L.Jonsson, L.Kuzmin, Grid interferometer for spectracl calibration of cryogenic bolometers, The 14th Int.Workshop, "High frequencySuperconductiong Electronics.", Bjorkliden, Kiruna, Sweden, 10-16 April, 2016.
- [A35] A.Chekushkin, A.Chiginev, A.Mukhin, L.Kuzmin, Multifrequency Cross-Slot Antenna with Resonant Cold-Electron Bolometers for Cosmology Space Missions, The 14th Int.Workshop, "High Frequency Superconductiong Electronics.", Bjorkliden, Kiruna, Sweden, 10-16 April, 2016.
- [АЗ6] А.М. Чекушкин, В.К. Дубрович, В.В.Завьялов, А.Е. Саянский, Л.С. Кузьмин, М.А.Тарасов, Криогенные спектральные анализаторы для многочастотных приемных систем мм и субмм диапазонов. DAWN-2016, 20-24 июня 2016, Санкт-Петербург, Россия.
- [АЗ7] Чекушкин А.М., Юсупов Р. А., Завьялов В.В., Кузьмин Л.С., Тарасов М.А., Криогенный перестраиваемый спектральный фильтр для

калибровки высокочувствительных болометров // Сборник трудов IV Всероссийской микроволновой конференции / Москва, 2016, С. 337-341

- [A38] M.Tarasov, V.Edelman, S.Mahashabde, M.Fominsky, S.Lemzyakov, A.Chekushkin, R.Yusupov, D.Winkler, A.Yurgens, SINIS bolometer with a suspended absorber, Int. Conf. Low Temp. Physics – 28, August 9-16, Gothenburg, Sweden, 2017
- [АЗ9] А.М. Чекушкин, М.А. Тарасов, Р.А. Юсупов, А.А. Гунбина, В.С. Эдельман, Влияние ловушек из нормального металла, андреевского отражения и эффект близости на охлаждение сверхпроводника в СИНИС структурах // Сборник трудов 60-ой Научной конференции МФТИ, Электроника, фотоника и молекулярная физика / Долгопрудный, С. 116-118, 2017.
- [A40] М.А. Тарасов, С. Махашабде, А.А. Гунбина, М.Ю. Фоминский, Р.А. Юсупов, А.Б. Ермаков, А.М. Чекушкин, А.С. Соболев, В.С. Эдельман, М.А. Мансфельд, В.Ф. Вдовин, Матрица кольцевых антенн диапазона 345 ГГц с криогенными болометрами в интегрирующей полости // Сборник трудов V Всероссийской микроволновой конференции/ Москва, 2017 С. 304-308
- [A41] A.S. Sobolev, M.A. Tarasov, A.A. Gunbina, R.A. Yusupov, A.M. Chekushkin, V.F. Vdovin, V.S. Edelman, Wideband metamaterial-based array of SINIS bolometers, TERA2018, N.Novgorod Oct. 22-25 2018
- [A42] M. Tarasov, A. Gunbina, M.Mansfeld, G. Yakopov, A.Chekushkin, R. Yusupov, V. Edelman, V. Vdovin. Arrays of annular antennas with SINIS bolometers for radioastronomy, TERA2018, N.Novgorod Oct. 22-25 2018.
- [А43] Бейранванд Б., Вдовин В.Ф., Гунбина А.А., Ермаков А.Б., Лемзяков С.А., Мансфельд М.А., Махашабде С., Нагирная Д.В., Соболев А.С., Тарасов М.А., Фоминский М.Ю., Чекушкин А.М., Эдельман В.С., Юсупов Р.А., Якопов Г.В., Матрицы планарных антенн с интегрированными СИНИС болометрами для радиоастрономических исследований. Сборник трудов VI Всероссийской микроволновой конференции, с. 253-257, г. Москва, 28 - 30 ноября 2018.
- [A44] Соболев А.С., Бейранванд Б., Тарасов М.А., Юсупов Р.А., Гунбина А.А., **Чекушкин А.М.**, Эдельман В.С. Двухчастотная метаповерхность с интегрированными СИНИС болометрами. Сборник трудов VI Всероссийской микроволновой конференции, с. 310, г. Москва, 28 30 ноября 2018.
- [A45] Юсупов Р.А., Соболев А.С., Гунбина А.А., Мансфельд М.А., Чекушкин А.М., Вдовин В.Ф., Тарасов М.А., Эдельман В.С. Метаматериалы с интегрированными СИНИС болометрами // Материалы докладов 28-ой Международной Крымской конференции / 2018. Том 4, С.856-861.

- [А46] Вдовин В.Ф. Гунбина А.А., Мансфельд М.А., Якопов Г.В., Юсупов Р.А., Чекушкин А.М., Эдельман В.С., Тарасов М.А. Метаматериалы с интегрированными СИНИС болометрами. Согласование матрицы планарных антенн с СИНИС болометрами с излучением диапазона 350 ГГц // Материалы докладов 28-ой Международной Крымской конференции / 2018. Том 9, С.1563-1574.
- [А47] Тарасов М.А., Соболев А.С., Гунбина А.А., Мансфельд М.А., Юсупов Р.А., С.А. Лемзяков, **Чекушкин А.М.,** Вдовин В.Ф., Эдельман В.С., Метаматериалы с кольцевыми антеннами и СИНИС болометрами// Тезисы докладов 38 Совещания по физике низких температур (НТ-38), 2018, С. 12-13
- [A48] M. Tarasov, A. Gunbina, R. Yusupov, A. Chekushkin, D. Nagirnaya,
 S. Lemzyakov, V. Vdovin, V Edelman, A. Kalaboukhov, and D. Winkler,
 Non-Thermal Absorption and Quantum Efficiency of SINIS Bolometer, Appl.
 Supercond. Conf. ASC2020, Oct 23 Nov. 7, 2020, Wk1EOr2A-08.
- [A49] A.A. Gunbina, *Member, IEEE*, S. Mahashabde, M.A. Tarasov, G.V. Yakopov, R.A. Yusupov, A.M. Chekushkin, D.V. Nagirnaya, S.A. Lemzyakov, V.F. Vdovin, *Member, IEEE*, A.S. Kalaboukhov, D. Winkler, A 90 GHz SINIS detector with 2 GHz readout, Appl. Supercond. Conf. ASC2020, Oct 23 Nov. 7, Wk2EPo1E-03.
- [A50] M. Tarasov, V. Edelman, S. Lemzyakov, A. Gunbina, R. Yusupov,
 A. Chekushkin, D. Nagirnaya, V. Vdovin, A. Kalaboukhov, Cryogenic
 MIMIM and SIMIS microwave detectors, 2020 7th All-Russian Microwave
 Conference (RMC), 25-27 Nov 2020, pp.25-27, Moscow, Russia, DOI: 10.1109/RMC50626.2020.9312267.

Публикации в книгах:

 [A51] A.A. Gunbina, M.A. Tarasov, M.Yu. Fominsky, A.M. Chekushkin, R.A. Yusupov,
 D.V. Nagirnaya, Fabrication of aluminum nanostructures for microwave detectors based on tunnel junctions, chapter in the book "Advances in Microelectronics: Reviews, Vol.3" 2021, ISBN: 978-84-09-33338-7 e-ISBN: 978-84-09-33339-4 pp. 183-212

Патенты автора:

- [А52] Тарасов М.А., Филиппенко Л.В., Фоминский М.Ю., Нагирная Д.В., Чекушкин А.М., Способ изготовления устройств с тонкопленочными сверхпроводниковыми переходами. Патент № 2593647. Дата государственной регистрации 14 июля 2016
- [А53] Тарасов М.А, Чекушкин А.М., Юсупов Р.А, Способ изготовления устройств со свободно висящими микромостиками, Патент № 2632630. Дата государственной регистрации 06.10.2017

- [А54] Тарасов М.А, Соболев А.С., Чекушкин А.М., Юсупов Р.А., Гунбина А.А. Широкополосный детектор терагерцового излучения (варианты), Патент № 2684897. Дата государственной регистрации 16.04.2019
- [A55] Тарасов М.А, Чекушкин А.М., Юсупов Р.А, Способ изготовления воздушных мостов в качестве межэлектродных соединений интегральных схем, Патент № 2685082. Дата государственной регистрации 16.04.2019
- [А56] М.А. Тарасов, А.А. Гунбина, Д.В. Нагирная, Р.А. Юсупов, А.М. Чекушкин, Способ изготовления устройств с тонкопленочными туннельными переходами, заявка № 2019123125/28(045127), положительное решение от 18.02.2020, патент RU2733330C1.
- [А57] М. Тарасов, А. Гунбина, А. Чекушкин, М. Фоминский, Способ изготовления тонкопленочных туннельных переходов методом раздельной литографии, заявка на изобретение, № 2021108441 от 30.03.2021, патент № 2757762

- Wild W., Kardashev N.S., Likhachev S.F. et. al. Millimetron-a large Russian-European submillimeter space observatory. // Experimantal Astronomy, Vol. 23, No. 1, 2009. pp. 221-244.
- MacTavish C.J., Ade P.A.R., Bock J.J. et.al. Cosmological parameters from the 2003 flight of BOOMERANG. // The Astrophysical Journal, Vol. 647, No. 2, 2006. pp. 1-18.
- 3. Nati F., Ade P., Boscaleri A. et. al. The OLIMPO experiment. // New Astronomy Reviews, Vol. 51, 2007. pp. 385-389.
- Aiola S., Amico G., Battagila P. et. al. The Large-Scale Polarization Explorer (LSPE) // Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV., Vol. 8446, 2012. P. 84467A.
- Л.И. Снежко. Проект БТА: исследование, состояние и перспективы. [Электронный pecypc] [1994]. URL: https://www.sao.ru/hq/sekbta/40_SAO/ Snezhko.htm
- 6. http://www.ipme.ru/ipme/labs/RT-70/source/start.html [Электронный ресурс]
- Irwin K. D., Hilton G. C. Transition-edge sensors // In: Cryogenic particle detection. / Ed. by Enss C. Berlin: Springer, 2005. pp. 63-150.
- Day P., LeDuc H. et. al. A broadband superconducting detector suitable for use in large arrays. // Nature, Vol. 425, 2003. pp. 817-821.
- 9. Irwin K.D., Nam S.W. et. al. Irwin K. D. et al. A self-biasing cryogenic particle detector utilizing electrothermal feedback and a SQUID readout. // IEEE

Transactions on Applied Superconductivity., Vol. 5, 1995. pp. 2690-2693.

- 10. Эдельман В.С. Погружной микрокриостат растворения. // Приборы и техника эксперимента., Т. 2, 2009. С. 159-165.
- Richards P. L., Hu Q. Superconducting components for infrared and millimeter-wave receivers // Proceedings of the IEEE, Vol. 77, 1989. pp. 1233-1246.
- Boyle W. S., Smith G. E. Charge coupled semiconductor devices // Bell System Technical Journal., Vol. 49, No. 4, 1970. pp. 587-593.
- Andrews D. H. et al. Attenuated Superconductors I. For Measuring Infra-Red Radiation // Review of Scientific Instruments, Vol. 13, 1942. pp. 281-292.
- Andrews D.H., Fowler R.D., Williams M.C. The Effect of Alpha-particles on a Superconductor // Physical Review, Vol. 76, 1949. pp. 164-155.
- 15. Clarke J. BAI, editor. The SQUID handbook. 1st ed. Weinheim: Wiley-Vch, 2004. 414 pp.
- Bennet D.A., Horansky R.D., Schmidt D.R. et. al. A high resolution gammaray spectrometer based on superconducting microcalorimeters. // Review of Scientific Instruments., Vol. 83, 2012. P. 093113.
- Tiest W.B., Bruijn M., Hoevers H. et. al. Understanding TES microcalorimeter noise and energy resolution. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A., Vol. 520, 2004. pp. 329-332.
- Khosropanah P., Dirks B. et. al.. Low-noise transition edge sensor (TES) for SAFARI instrument on SPICA // Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared

Detectors and Instrumentation for Astronomy V, Vol. 7741, 2010. P. 77410L.

- 19. Ade P. A. R. et al. Detection of B-mode polarization at degree angular scales by BICEP2. // Physical Review Letters., Vol. 112, No. 24, 2014. P. 241101.
- 20. Holland W. S. et al. SCUBA-2: the 10 000 pixel bolometer camera on the James Clerk Maxwell Telescope. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society., Vol. 430, No. 4, 2013. pp. 2513-2533.
- Staniszewski Z. et al. The Keck Array: A Multi Camera CMB Polarimeter at the South Pole. // Journal of Low Temperature Physics., Vol. 167, No. 5-6, 2012. pp. 827-833.
- 22. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. Москва: МЦНМО, 2000.
- 23. J. Z. Superconducting microresonators: Physics and applications. // Annual Review of Condensed Matter Physics, Vol. 3, 2012. pp. 169-214.
- McHugh S., Mazin B.A. et. al. A readout for large arrays of microwave kinetic inductance detectors // Review of Scientific Instruments., Vol. 83, 2012. P. 044702.
- 25. Leduc H., Bumble B. et. al.. Titanium Nitride Films for Ultrasensitive Microresonator Detectors // Applied Physics Letters, Vol. 97, 2010. P. 102509.
- 26. Szypryt P., Mazin B. et. al. High Quality Factor Platinum Silicide Microwave Kinetic Inductance Detectors // Applied Physics Letters, Vol. 109, 2016. P. 151102.
- 27. Flanigan D., McCarrick H., et. al. Photon noise from chaotic and coherent

millimeter-wave sources measured with horn-coupled, aluminum lumpedelement kinetic inductance detectors. // Applied Physics Letters, Vol. 108, 2016. P. 083504.

- Burstein E., Langenberg D. N., Taylor B. N. Superconductors as quantum detectors for microwave and sub-millimeter-wave radiation // Physical Review Letters., Vol. 6, 1961. P. 92.
- 29. Stewart W. C. Current-voltage characteristics of Josephson junctions // Applied Physics Letters., Vol. 12, 1968. pp. 277-280.
- 30. Schneiderman J. F., Delsing P., Shaw M.D. et. al. Characterization of a differential radio-frequency single-electron transistor // Applied physics letters., Vol. 88, 2006. P. 083506.
- 31. Clarke J., Hoffer G., Richards P. Superconducting tunnel junction bolometers.// Revue de physique appliquée., Vol. 9, 1974. pp. 69-71.
- 32. Kuzmin L. Ultra-sensitive cryogenic thermometer based on an array of the SIN tunnel junctions // Physica C: Superconductivity., Vol. 468, 2008. pp. 142-146.
- 33. Clarke J., Hoffer G., et. al. Superconductive bolometers for submillimeter wavelengths // Journal of Applied Physics, Vol. 48, 1977. pp. 4865-4879.
- 34. Hamilton C.A. Space applications of superconductivity: microwave and infrared detectors // Cryogenics., Vol. 20, 1980. pp. 235-243.
- 35. Nahum M., Richards P. L., Mears C. A. Design analysis of a novel hot-electron microbolometer // IEEE transactions on applied superconductivity., Vol. 3, 1993. pp. 2124-2127.

- 36. Nahum M., Richards P. L. Design analysis of a novel low temperature bolometer // IEEE Transactions on Magnetics., Vol. 27, 1991. pp. 2484-2487.
- 37. Mees J., Nahum M., Richards P. L. New designs for antenna-coupled superconducting bolometers // Applied physics letters., Vol. 59, 1991. pp. 2329-2331.
- 38. Nahum M., Martinis J. M. Ultrasensitive-hot-electron microbolometer. // Applied physics letters., Vol. 63, 1993. pp. 3075-3077.
- Nahum M., Eiles T. M., Martinis J. M. Electronic microrefrigerator based on a normal-insulator-superconductor tunnel junction // Applied Physics Letters., Vol. 65, 1994. pp. 3123-3125.
- 40. Blamire M. G. et al. Extreme critical-temperature enhancement of Al by tunneling in Nb/AlO x/Al/AlO x/Nb tunnel junctions. // Physical review letters., Vol. 66, 1991. P. 220.
- Leivo M. M., Pekola J. P., Averin D. V. Efficient Peltier refrigeration by a pair of normal metal/insulator/superconductor junctions. // Applied Physics Letters., Vol. 68, 1996. pp. 1996-1998.
- 42. Manninen A. J., Leivo M. M., Pekola J. P. Refrigeration of a dielectric membrane by superconductor/insulator/normal-metal/insulator/superconductor tunneling // Applied physics letters., Vol. 70, 1997. pp. 1885-1887.
- 43. Kuzmin L. Capacitively coupled hot-electron microbolometer as perspective IR and sub-mm wave sensor // Proc. of the 9th International Symposium on Space Terahertz Technology., 1998. pp. 99-103.

- 44. Kuzmin L. S., Devyatov I. A., Golubev D. Cold-electron bolometer with electronic microrefrigeration and general noise analysis // Millimeter and Submillimeter Waves IV. – International Society for Optics and Photonics, Vol. 3465, 1998. pp. 193-199.
- 45. Kuzmin L.S. Superconducting cold-electron bolometer with proximity traps // Microelectronic Engineering, Vol. 69, 2003. pp. 309-316.
- 46. Tarasov M.A., Kuzmin L.S., Fominskii M.Y. et. al. Electron cooling in a normal-metal hot-electron bolometer // Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters., Vol. 78, 2003. pp. 714-717.
- 47. Tarasov M., Kuzmin L., Stepantsov E. et. al. Terahertz spectroscopy with a Josephson oscillator and a SINIS bolometer // Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters., Vol. 79, 2004. pp. 298-303.
- 48. Kuzmin L. Ultimate cold-electron bolometer with strong electrothermal feedback // Millimeter and Submillimeter Detectors for Astronomy II. International Society for Optics and Photonics, Vol. 5498, 2004. pp. 349-361.
- 49. L. S. Superconducting Tunneling and Applications. London: Chapman and Hall, 1972.
- 50. Giaever I., Megerle K. Study of superconductors by electron tunneling // Physical Review., Vol. 122, 1961. P. 1101.
- 51. Feshchenko A. V. et al. Tunnel-junction thermometry down to millikelvin temperatures // Physical Review Applied., Vol. 4, No. 3, 2015. P. 034001.
- 52. Bardeen J., Cooper L. N., Schrieffer J. R.. Theory of superconductivity //

Physical review., Vol. 108, 1957. P. 1175.

- 53. Dynes R. C., Narayanamurti V., Garno J. P. Direct measurement of quasiparticle-lifetime broadening in a strong-coupled superconductor // Physical Review Letters., Vol. 41, 1978. P. 1509.
- 54. Kinch M. A., Rollin B. V.. Detection of millimetre and sub-millimetre wave radiation by free carrier absorption in a semiconductor // British Journal of Applied Physics. , Vol. 14, 1963. P. 672.
- 55. Conwell E. M. Solid state physics, suppl. 9: High field transport in semiconductors. solid state physics. London: Academic Press, 1967.
- 56. Тарасов М.А., Эдельман В.С., Махашабде С. и др. Нетепловой оптический отклик туннельных структур сверхпроводник-изоляторнормальный металл-изолятор-сверхпроводник // Журнал экспериментальной и теоретической физики., Т. 146, 2014. С. 123-132.
- 57. Tarasov M.A., Edelman V.S., Ermakov A.B. et. al. Quantum Efficiency of Cold Electron Bolometer Optical Response // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology., Vol. 5, 2014. pp. 44-48.
- 58. Irwin K.D. An application of electrothermal feedback for high resolution cryogenic particle detection // Applied Physics Letters., Vol. 66, 1995. pp. 1998-2000.
- 59. Bardas A., Averin D. Peltier effect in normal-metal-superconductor microcontacts // Physical Review B., Vol. 52, 1995. P. 12873.
- 60. Golubev D., Kuzmin L. Nonequilibrium theory of a hot-electron bolometer with normal metal-insulator-superconductor tunnel junction // Journal of

Applied Physics., Vol. 89, 2001. pp. 6464-6472.

- Jochum J., Mears C., et.al. Modeling the power flow in normal conductorinsulator-superconductor junctions // Journal of applied physics., Vol. 83, 1998. pp. 3217-3224.
- Fisher P. A., Ullom J. N., Nahum M. High-power on-chip microrefrigerator based on a normal-metal/insulator/superconductor tunnel junction // Applied physics letters., Vol. 74, 1999. pp. 2705-2707.
- 63. Девятов И. А., Крутицкий П. А., Куприянов М. Ю. Исследование различных мод работы сверхпроводникового детектора микроволнового излучения сверхмалых размеров // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики., Т. 84, 2006. С. 61-66.
- 64. Fann W.S., Storz R. et. al. Direct measurement of nonequilibrium electronenergy distributions in subpicosecond laser-heated gold films // Physical review letters., Vol. 68, 1992. P. 2834.
- 65. Девятов И. А., Куприянов М. Ю. Исследование неравновесности электронной подсистемы в низкотемпературных детекторах микроволнового излучения. // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики., Т. 80, № 10, 2004. С. 752-757.
- 66. Spietz L., Lehnert K.W. et. al. Primary electronic thermometry using the shot noise of a tunnel junction // Science., Vol. 300, 2003. pp. 1929-1932.
- 67. Kominami M., Pozar D., Schaubert D. Dipole and slot elements and arrays on semi-infinite substrates. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 33, No. 6, 1985. pp. 600-607.

- Johnson R. C., Jasik H. Antenna engineering handbook. New York: McGraw-Hill Book Company, 1984.
- 69. Chang K., Hsieh L. H. Microwave ring circuits and related structures. New Jercey: Wiley, 2004.
- 70. Kuzmin L. An array of cold-electron bolometers with SIN tunnel junctions and JFET readout for cosmology instruments // Journal of Physics: Conference Series., Vol. 97, 2008. P. 012310.
- 71. Kuzmin L. S. 2D array of cold-electron nanobolometers with double polarised cross-dipole antennas // Nanoscale research letters., Vol. 7, 2012. P. 224.
- 72. Hansen R. C. Phased array antennas. New York: John Wiley & Sons, 2009.
- 73. Bhattacharyya A. K. Phased array antennas: floquet analysis, synthesis, BFNs, and active array systems. New York: A Wiley-Interscience publication., 2006.
- 74. Sayre J. T. et al. Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VI. // Design and characterization of 90 GHz feedhorn-coupled TES polarimeter pixels in the SPTPol camera. Amsterdam. 2012.
- 75. Parker E. A., Hamdy S. M. A. Rings as elements for frequency selective surfaces // Electronics Letters., Vol. 17, 1981. pp. 612-614.
- 76. Munk B. A., Frequency selective surfaces: theory and design. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- 77. Ulrich R. Far-infrared properties of metallic mesh and its complementary structure // Infrared Physics., Vol. 7, 1967. pp. 37-55.
- Möller K. D. et al. Thin and thick cross shaped metal grids // Infrared physics & technology., Vol. 40, 1999. pp. 475-485.
- 79. Ulrich R. Preparation of grids for far infrared filters // Applied optics., Vol. 8, 1969. pp. 319-322.
- 80. Ulrich R. Interference filters for the far infrared // Applied Optics., Vol. 7, 1968. pp. 1987-1996.
- 81. Pozar D. Microwave engineering. New York: John Wiley and Sons, 2009.
- 82. Mahashabde S. et al. A frequency selective surface based focal plane receiver for the OLIMPO balloon-borne telescope // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology., Vol. 5, No. 1, 2015. pp. 145--152.
- 83. Mahashabde S. et al. Planar frequency selective bolometric array at 350 GHz // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology., Vol. 5, No. 1, 2015. pp. 37-43.
- 84. Mahashabde S. et al. A distributed-absorber cold-electron bolometer single pixel at 95 GHz // Applied Physics Letters., Vol. 107, No. 9, 2015. P. 092602.
- Lamarre J. M. et al. Planck pre-launch status: The HFI instrument, from specification to actual performance. // Astronomy & Astrophysics., Vol. 520, 2010. P. A.9.
- 86. Vissers M. R. et al. Ultrastable millimeter-wave kinetic inductance detectors // Applied Physics Letters., Vol. 116, No. 3, 2020. P. 032601.
- 87. Erni R. et. al. Atomic resolution imaging with a sub 50 um electron probe. // Physical Review Letters, Vol. 102, No. 9, 2009. P. 096101.

- 88. Селиверстов А. В., Тарасов М. А., Эдельман В. С. Исследование андреевской проводимости структур сверхпроводник-изоляторнормальный металл. // Журнал экспериментальной и теоретической физики., Т. 151, № 4, 2017. С. 752-766.
- 89. Instruments T. URL: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa111.pdf
- 90. Devices A. URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/ data-sheets/AD743.pdf
- 91. Instruments N. URL: http://www.ni.com/pdf/product-flyers/multifunctionio.pdf
- 92. Chen C. Y. et al.. Extraordinary transmission through a silver film perforated with cross shaped hole arrays in a square lattice // Applied Physics Letters., Vol. 91, 2007. P. 063108.
- 93. Тарасов М.А. и др. Изготовление и характеристики сеточных полосовых фильтров в диапазоне 0.3-0.8 ТГц. // Приборы и техника эксперимента., Т. 1, 2009. С. 8589.
- 94. Сызранов В.С..Е.А.С..Л.С.П..&.М.В.Н. Разработка и исследование волноводных фильтров терагерцового и субтерагерцового диапазонов частот // Приборы и техника эксперимента., Vol. 6, 2012. P. 70.