

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ
им. В.А. КОТЕЛЬНИКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи



ЮСУПОВ РЕНАТ АЛЬБЕРТОВИЧ

**БОЛОМЕТР НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ СВЕРХПРОВОДНИК –
ИЗОЛЯТОР – НОРМАЛЬНЫЙ МЕТАЛЛ – ИЗОЛЯТОР –
СВЕРХПРОВОДНИК С ПОДВЕШЕННЫМ АБСОРБЕРОМ**

Специальность 01.04.03 – «Радиофизика»

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

д-р. физ.-мат. наук

Тарасов М.А.

Москва 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Актуальность	4
Степень разработанности темы исследования.....	5
Цель и задачи настоящей диссертационной работы	6
Объект исследования.....	7
Предмет исследования.....	8
Научная новизна.....	8
Положения, выносимые на защиту:	8
Конкретные задачи, решенные в диссертации:	9
Научная и практическая ценность работы:	9
Степень достоверности результатов проводимых исследований.....	10
Личный вклад автора	10
Апробация работы и публикации.....	11
Публикации по теме работы	11
Структуры и объём диссертации.....	12
Глава 1: Некогерентные детекторы терагерцового диапазона	14
1.1 Применение высокочувствительных криогенных приемников для астрономии.....	14
1.2 Актуальные болометрические приемники терагерцового диапазона. 19	
1.2.1 Терморезистивные металлические болометры.....	19
1.2.2 Полупроводниковые болометры	21
1.2.3 Болометр на краю сверхпроводящего перехода (TES).....	23
1.2.4 Болометр на основе кинетической индуктивности (KID)	24
1.2.5 Болометр на горячих электронах (HEB).....	25
1.2.6 Андреевский приемник	26
1.2.7 От андреевского болометра к «болометру на холодных электронах»	33
Глава 2: Радио- тепло- физическая модель и конструкция болометра на основе СИНИС структуры с подвешенным абсорбером	37
2.1 Режимы работы СИНИС болометра	37
2.2 Конструкция и технология изготовления СИНИС болометров с подвешенным абсорбером	50

2.3 Расчет характеристик планарных антенн.....	54
2.4 Вид изготовленных образцов, особенности конструкции и технологии	59
Глава 3: Методика низкотемпературных измерений и измерения на постоянном токе	63
3.1 Схема измерений на постоянном току.....	63
3.2 Методика низкотемпературных измерений	66
3.3 Измерения основных характеристик без внешнего нагрева	70
3.4 Проблема подавления щели.....	73
3.5 Эффект андреевского отражения	75
3.6 Отклик на нагрев постоянным током	77
3.7 Выводы к главе.....	79
Глава 4: Отклик на внешнее излучение.....	81
4.1 Схема измерений отклика на внешнее излучение.....	81
4.2 Конструкция источника излучения в виде черного тела	84
4.3 Результаты измерений отклика болометра на внешнее излучение	85
4.4 Расчет мощности, принимаемой болометром.....	88
4.5 Расчеты МЭШ и квантовой эффективности	91
4.6 Измерение быстродействия болометра	94
4.7 Выводы к главе.....	96
Заключение.....	97
Список сокращений и условных обозначений.....	99
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	100
Список авторских публикаций	107
Приложение.....	112
Технологическая карта изготовления болометров с подвешенным абсорбером.....	112

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность

Одной из важнейших задач современной радиоастрономии является исследование реликтового излучения. Реликтовое излучение (лат. *relictum* — остаток), космическое сверхвысокочастотное фоновое излучение — равномерно заполняющее Вселенную тепловое излучение, возникшее в эпоху первичной рекомбинации водорода. Экспериментально его существование было подтверждено в 1965 году [1]. Наряду с космологическим красным смещением, реликтовое излучение рассматривается как одно из главных подтверждений теории Большого взрыва. Спектр наполняющего Вселенную реликтового излучения соответствует спектру излучения абсолютно чёрного тела с температурой 2.725 К. Его максимум приходится на частоту 160.4 ГГц (микроволновое излучение), что соответствует длине волны 1.9 мм. Оно изотропно с точностью до 0.01 % — среднеквадратичное отклонение температуры составляет приблизительно 18 мкК [2].

В 1983 году был проведён первый эксперимент, РЕЛИКТ-1 [3], по измерению реликтового излучения с борта космического аппарата. В январе 1992 года на основании анализа данных эксперимента РЕЛИКТ-1 (данные получены в 1983-1984 г.) российские учёные объявили об открытии анизотропии реликтового излучения [4]. Чуть позднее об обнаружении флуктуаций объявили и американские учёные на основании данных эксперимента COBE [5] (запущен в 1989). Спектрофотометр дальнего инфракрасного излучения FIRAS, установленный на спутнике NASA COBE, выполнил наиболее точные на тот момент измерения спектра реликтового излучения. Они подтвердили его соответствие спектру излучения абсолютно чёрного тела с температурой 2.725 К. В 2006 году за это открытие была присуждена Нобелевская премия по физике руководителям группы COBE Джорджу Смуту и Джону Мазеру, хотя российские исследователи обнародовали свои результаты раньше американцев.

В 2001 году был запущен Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) - космический радиотелескоп НАСА, предназначенный в первую очередь для изучения реликтового излучения. С помощью этого инструмента удалось в 35 раз улучшить разрешение карты распределения флуктуаций температуры распределения микроволнового излучения по небесной сфере [6]. Наиболее детальную на сегодняшний день карту распределений удалось построить по данным, полученным с радиотелескопа Planck [7]. Планк — астрономический спутник Европейского космического агентства (ЕКА), запущенный в 2009г. и полностью закончивший свою работы в 2013г., но данные, полученные с помощью этого инструмента, обрабатывают до сих пор.

Для всех этих космических телескопов использовались охлаждаемые высокочувствительные болометрические приемники. Подобные приемники использовались и на ИК радиотелескопах (IRAS [8], Herschel Space Observatory [9] и будут использоваться на будущем James Webb Space Telescope [10]). Болометрические приемники планируются и в составе разных инструментов готовящейся космической обсерватории Миллиметрон (2029) [11]. Для различных инструментов этой обсерватории требуются высокочувствительные детекторы с мощностью эквивалентной шуму (МЭШ) до 10^{-19} Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$, в качестве основного варианта рассматриваются детекторы на основе сверхпроводниковых болометров [12].

Степень разработанности темы исследования.

Проведенные исследования показывают, что в основу требуемых некогерентных приемников могут быть с успехом положены болометры структуры сверхпроводник-изолятор-нормальный металл - изолятор - сверхпроводник (СИНИС) [13], [14], [15], обладающие МЭШ сравнимой с МЭШ болометров на краю сверхпроводящего перехода (БКП), но имеющими более широкий динамический диапазон и на три порядка большее быстродействие. Ранее болометры на основе СИНИС структуры изготавливались с поглотителем из тонкой пленки алюминия, с подслоем

ферромагнитной окиси хрома или тонкой (1-2 нм) пленки железа для подавления сверхпроводимости в пленке алюминия (12-14 нм), являющейся абсорбером. Поглотитель в такой конструкции лежал непосредственно на подложке, что влекло за собой большие утечки тепла и в подложку, и в электроды. Предлагается новый тип СИНИС болометра, в котором мостик из нормального металла подвешивается между двумя сверхпроводниковыми электродами. В качестве болометров используют симметричную структуру: два СИН перехода с общим нормальным металлом (СИНИС). Поглощение излучения в СИНИС структурах вызывает разогрев абсорбера, который может быть зарегистрирован по увеличению туннельного тока СИН термометров. Обычно для оценки чувствительности считают, что энергия поглощённого излучения эквивалентна нагреву постоянным током. Предполагается, что электронная система нагревается до некоторой повышенной электронной температуры T_e . В случае довольно высокой энергии фотона $hf \gg kT$ распределение энергии электронов сложным образом зависит от электрон–электронных, электрон–фононных, фонон–электронных, фонон–фононных взаимодействий и туннелирования возбужденных электронов через СИН–переход. Функция распределения электронов в таком случае может существенно отличаться от функции распределения Ферми. Если снизить утечку тепла через фононную систему в подложку и электроды путем оптимального проектирования абсорбера, квантовая эффективность детектора (количество высокоэнергетических электронов на один квант излучения) может быть улучшена вплоть до величины hf/kT вследствие увеличения числа возбужденных электронов [16], [17], [18].

Цель и задачи настоящей диссертационной работы

В данной работе представлено решение проблемы тепловой развязки абсорбера и подложки, а также проблемы утечки тепла в сверхпроводниковые электроды, которые неизбежны в существующих конструкциях болометров на основе СИНИС структуры, что позволит увеличить квантовую эффективность

работы приемной структуры. Для достижения этой цели решались следующие основные задачи:

- 1) Разработка новой конструкции болометров на основе структуры СИНИС с подвешенными тонкопленочными нормальными мостиками из различных металлов, позволяющая существенно снизить потери поглощенной мощности, за счет устранения прямого теплового контакта абсорбера с подложкой и за счет устранения утечек тепла через туннельные переходы. Разработка и оптимизация методов изготовления, и изготовление болометров на основе СИНИС структуры с подвешенными тонкопленочными нормальными мостиками из различных металлов.
- 2) Исследование вопросов электродинамической и технологической интеграции болометров с планарными антеннами ТГц диапазона. Расчёт основных параметров используемых антенн: двойной щелевой и логопериодической антенны. Оптимизация согласования антенны с нагрузкой в виде болометра.
- 3) Экспериментальное исследование изготовленных болометров при низких температурах 500 - 100 мК. Исследование температурной зависимости ВАХ и дифференциальных сопротивлений. Оценка отклика болометра при нагреве постоянным током.
- 4) Экспериментальное исследование процессов релаксации терагерцового излучения в СИНИС структуре. Измерение оптического отклика изготовленных болометров на частотах около 350 ГГц. Оценка МЭШ, флуктуационной чувствительности и квантовой эффективности изготовленных болометров.

Объект исследования

Объектом исследования является болометр на основе СИНИС структуры с подвешенным абсорбером.

Предмет исследования

Предметом исследования являются тепло- и радио-физические процессы в СИН переходах и на границах пленка-подложка - уход тепла в подложку. Эффекты андреевского отражения и эффект близости в СИН структурах. Процессы релаксации терагерцового излучения в болометре на основе СИНИС структуры с подвешенным абсорбером и определение основных его характеристик.

Научная новизна

В работе предложена, разработана и исследована новая конструкция болометра на основе СИНИС структуры с высокой квантовой эффективностью. Впервые исследованы процессы теплопереноса, эффекта близости, андреевского отражения на границе сверхпроводящей и нормальной пленки в таких структурах. Исследован вопрос электродинамического согласования болометров с планарными антеннами. Впервые выполнены оценки времени отклика болометров на основе СИНИС структур.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) Пространственное отделение абсорбера от подложки позволяет повысить квантовую эффективность токового отклика болометров более чем на порядок.
- 2) Применение в качестве абсорбера материалов с меньшим значением постоянной электрон-фононного взаимодействия, обладающих сильным электрон-электронным взаимодействием и акустически рассогласованных с алюминием (гафний, медь или палладий), позволяет дополнительно уменьшить уход тепла из электронной системы в фононную.
- 3) Ловушка горячих квазичастиц из нормального металла, расположенная в непосредственной близости от СИНИС структуры, не улучшает охлаждение переходов, но может негативно влиять на основные характеристики структур. Экспериментально показано, что расположение такой ловушки в

непосредственной близости от туннельного перехода подавляет его сверхпроводящую щель и ухудшает отклик.

Конкретные задачи, решенные в диссертации:

- 1) Разработана конструкция и технология изготовления болометров на основе СИНИС структур с подвешенным абсорбером для работы в субмиллиметровом диапазоне частот.
- 2) Разработаны, изготовлены и исследованы болометры, интегрированные в логопериодическую и двойную щелевую антенны с центральной частотой 345 ГГц с абсорберами из палладия, гафния и меди. Проведено моделирование характеристик антенн, оценено согласование.
- 3) Проведена серия измерений при низких температурах. Измерена температурная зависимости дифференциального сопротивления изготовленных СИНИС болометров в диапазоне 100 – 500 мК. Проведены исследования отклика по напряжению при нагреве мощностью постоянного тока в специально разработанных структурах для таких измерений.
- 4) Измерены максимальный отклик СИНИС болометров по току и напряжению на частоте 345 ГГц на внешнее излучение черного тела (ЧТ) при различных мощностях излучения. Измерена флуктуационная чувствительность.

Научная и практическая ценность работы:

- 1) Предложенная в работе технология позволяет создавать устройства со свободно висящими микромостиками из нормального металла и сверхпроводниковыми переходами типа сверхпроводник-изолятор-нормальный металл (СИН), сверхпроводник-изолятор-другой сверхпроводник (СИС'), а также андреевские контакты (сверхпроводник-андреевский контакт-нормальный металл) и структуры с барьером Шоттки (сверхпроводник-барьер Шоттки-полупроводник) [A21].

2) Разработан болометр с высоким электрическим откликом (10^9 В/Вт) и низким уровнем шумовых характеристик (МЭШ менее 10^{-16} Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$), что позволяет на его основе создавать детекторы ТГц диапазона с рекордными параметрами для подобного типа устройств [A19].

3) Болометры предложенной конструкции с подвешенным абсорбером могут быть использованы в матрицах приемных элементов, состоящих из планарных антенн и СИНИС болометров, для создания прототипа приемника для установки на телескопе БТА. Это позволит проводить на этом оптическом телескопе измерения также и в субТГц- диапазоне частот [A20].

Степень достоверности результатов проводимых исследований

Достоверность результатов исследований подтверждается проведением серий низкотемпературных измерений в двух различных криостатах. Повторяемость этих результатов при проведении измерений в различных конфигурациях нагрева абсорбера: постоянным током, излучением черного тела в непрерывном режиме, излучением черного тела короткими импульсами, монохроматическим облучением от лампы обратной волны, также свидетельствует о достоверности проведенных исследований. Результаты данной работы подтверждают прогнозы, сделанные в ряде теоретических статей.

Личный вклад автора

Работы были выполнены Р.А. Юсуповым как самостоятельно, так и в соавторстве с сотрудниками лаборатории сверхпроводниковой электроники ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, и ИФП им. П.Л. Капицы РАН и представителями других групп. Автор принимал участие в разработке концепции и топологии болометров на основе СИНИС структуры с подвешенным абсорбером. Участвовал в разработке технологии и изготовлении таких болометров с использованием прямой электронной и лазерной литографии. Моделирование и расчет используемых планарных антенн проведены Р.А. Юсуповым лично. Провел работы по подготовке

криостата на импульсных трубках для проведения низкотемпературных оптических измерений. Автор готовил и проводил измерения электрических характеристик и оптического отклика образцов в криостате с откачкой паров He^3 и криостате растворения He^3/He^4 , занимался обработкой результатов и подготовкой публикаций.

Апробация работы и публикации.

Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись и докладывались в 22 докладах на международных и российских конференциях с публикацией расширенных тезисов, в том числе:

- Int. Conf. Low Temp. Physics (2017)
- TERA2018 (2018)
- Applied Superconductivity Conference (2018)
- Международная Крымская микроволновая конференция КрыМиКо (2018)
- 38 совещание по физике низких температур НТ38 (2018)
- Всероссийской микроволновой конференции (2014, 2015, 2016, 2017, 2018)
- Научная конференция МФТИ (2012, 2013, 2017)
- Конференция-конкурс молодых ученых им. И. В. Анисимкина (2012, 2013, 2016)

Доклад по теме данной работы отмечен дипломом победителя 60-й научной конференции МФТИ в секции «Твердотельной электроники и радиофизики». Результаты работы неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах лаборатории и вошли в итоговые отчеты и бюллетень важнейших исследований ИРЭ РАН.

Публикации по теме работы

Работы публиковались в ведущих специализированных изданиях: «Appl. Phys. Lett», «Journal of Applied Physics», «IEEE Transactions on Applied Superconductivity», «Journal of Physics: Conf. Series», «EPJ Web Conf», «Радиотехника и электроника», «Журнал радиоэлектроники», «Нелинейный мир», «Труды МФТИ». Публикации по материалам диссертации полностью

отражают ее содержание; они хорошо известны специалистам, на них имеются ссылки в научной периодике.

Основные результаты проведенных исследований опубликованы в 42 работах, в том числе в 18 - в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, из них 9 - в журналах, индексируемых в наукометрических базах данных Web of Science и Scopus; 3 патента РФ; 21 тезисов докладов конференций. Общий объем опубликованных по теме диссертации работ составил 214 стр.

Структуры и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка условных обозначений, библиографии и одного приложения. Общий объем диссертации 113 страниц, включая 58 рисунков, 2 таблицы.

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации и определены её цели. Сформулированы научная новизна, практическая ценность и положения, выносимые на защиту. Рассмотрены вопросы авторства в публикациях результатов.

Первая глава является обзорной. В ней рассматривается применение высокочувствительных некогерентных детекторов ТГц излучения и описаны современные радиотелескопы. Приводится обзор существующих типов и принципов действия современных высокочувствительных криогенных приемных устройств ТГц и суб-ТГц диапазона и их применение. Излагается история появления и развития болометров на основе СИНИС структур.

Вторая глава посвящена обсуждению предлагаемой конструкции болометров на основе СИНИС структуры с подвешенным абсорбером. В первом разделе обсуждается квантовая модель, описывающая прием излучения болометром на основе СИНИС структуры, выделяется два режима работы: фотонный счетчик и болометрический режим. Рассматриваются способы перехода от первого режима ко второму. Во втором разделе приводится описание оригинальной конструкции СИНИС болометра с подвешенным абсорбером и её основные преимущества. Описывается

методика изготовления таких болометров и изучается вопрос интеграции изготовленных болометров с планарными антеннами. В заключительном разделе главы приводятся изображения изготовленных структур и проводится обсуждение особенностей предложенной технологии и конструкции.

Третья глава содержит описание оригинальной, но легко повторяемой и верифицируемой методики низкотемпературных измерений и результаты измерений основных характеристик изготовленных СИНИС болометров. Первый раздел посвящен описанию схемы измерений по постоянному току. Далее приводится описание двух использованных в работе криостатов, а также общее описание оборудования и технологических решений используемых при таких измерениях. Приводятся результаты измерений ВАХ и температурных зависимостей дифференциального сопротивления. Отмечается эффект подавления щели в сверхпроводнике за счет эффекта близости, обосновывается применение второй версии конструкции СИНИС болометра с подвешенным абсорбером. Проводится исследование эффекта андреевского отражения, обнаруженного в таких структурах в этой работе. Исследована чувствительность изготовленных болометров на нагрев постоянным током.

Четвертая глава полностью посвящена исследованию отклика на внешнее излучение ММ диапазона изготовленных структур. Приводится описание схемы измерений отклика болометров на внешнее электромагнитное излучение. Описаны характеристики фильтров, применяемых при данных измерениях. Источником излучения было черное тело, конструкция которого так же описана в данной главе. Важным также является вопрос расчета, принимаемой болометром мощности, с учетом особенностей эксперимента и рассогласований болометра и антенн. Приведены лучшие измеренные отклики на внешнее излучение и расчет вольт-ваттных и ампер-ваттных чувствительностей. Проведен расчет МЭШ, температурной чувствительности и флуктуационной чувствительности. В последнем разделе приведены результаты измерения постоянной времени таких болометров.

Заключение содержит основные результаты работы.

ГЛАВА 1: НЕКОГЕРЕНТНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

1.1 Применение высокочувствительных криогенных приемников для астрономии

Основным применением криогенных высокочувствительных приемников является миллиметровая и субмиллиметровая радиоастрономия. Субмиллиметровая астрономия — раздел наблюдательной астрономии, связанный с наблюдениями в субмиллиметровом диапазоне длин волн (300 ГГц – 1.5 ТГц). Астрономы помещают субмиллиметровый диапазон между дальним инфракрасным диапазоном и микроволновым диапазоном, то есть в области длин волн от нескольких сотен микрометров до миллиметра.

Используя субмиллиметровые наблюдения, астрономы исследуют молекулярные облака и ядра тёмных туманностей с целью выяснения процессов звездообразования с момента коллапса до рождения звезды. Субмиллиметровые наблюдения тёмных облаков могут использоваться для определения химического состава и механизмов охлаждения составляющих их молекул. Также субмиллиметровые наблюдения используются при изучении процессов образования и эволюции галактик [19].

Наиболее существенным ограничением для обнаружения излучения из космоса в субмиллиметровом диапазоне длин волн для наземного наблюдателя является излучение атмосферы, шумы и затухание излучения. Как и в инфракрасном диапазоне, в субмиллиметровой части спектра находится большое количество полос поглощения водяного пара и других компонентов атмосферы, и наблюдения возможно проводить только в окнах прозрачности. Идеальное место для проведения наблюдений в субмиллиметровом диапазоне должно быть сухим, прохладным, иметь устойчивые погодные условия и находиться вдали от населённых пунктов. Существует лишь несколько подобных мест, например, Мауна-Кеа (Гавайи,

США), Обсерватория плато Чахнантор (Чили), Южный полюс, гималайский отдел Индийской астрономической обсерватории. Сравнительный анализ показал, что все четыре пункта идеально подходят для субмиллиметровых наблюдений; Мауна-Кеа при этом является наиболее известным и доступным пунктом. Некоторый интерес был проявлен к пунктам высоких широт Арктики, особенно к Верхнему Лагерю в Гренландии, где общее влагосодержание меньше, чем на Мауна-Кеа (хотя, малая широта Мауна-Кеа позволяет наблюдать большее количество объектов южного неба).



Рисунок 1.1. Вид на плато Чахнантор, показывающий антенны диаметром 12 м антенны, объединённые в единый астрономический радиоинтерферометр Atacama Large Millimeter Array. Фотография из [8].

Обсерватория плато Чахнантор имеет телескоп Atacama Pathfinder Experiment (рис.1.1), крупнейший субмиллиметровый телескоп в южном полушарии, а также крупнейший наземный астрономический проект, Atacama Large Millimeter Array [20], интерферометр в субмиллиметровом диапазоне длин волн, состоящий из 54 12-метровых и 12 7-метровых радиотелескопов. The Submillimeter Array, Субмиллиметровая антенная решётка, является другим интерферометром, расположенным на Мауна-Кеа и состоящим из восьми 6-метровых радиотелескопов. Один из крупнейших существующих сейчас субмиллиметровых телескопов, Телескоп Джеймса Кларка Максвелла,

также расположен на горе Мауна-Кеа. В нем используется охлаждаемый до 0.1 К многопиксельный сверхпроводниковый приемник (SCUBA 2) [21].

При помощи стратостатов и других летательных аппаратов можно проводить исследования из более высоких слоёв атмосферы. В качестве примеров можно привести телескоп SOFIA [22]. Стратосферная обсерватория ИК-астрономии (англ. Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy, SOFIA) — совместный проект НАСА и Германского центра авиации и космонавтики по созданию и использованию телескопа системы Кассегрена, работающего с борта летящего самолёта (Боинг-747. SOFIA работает с 2010 г. Обсерватория расположена на борту широкофюзеляжного самолета Boeing 747SP, который был модифицирован для установки телескопа-рефлектора с 2.5 метровой апертурой в задней части фюзеляжа и работает на высотах 12–14 км, в стратосфере. Первоначально телескоп был разработан для астрономических наблюдений в инфракрасной области спектра, но также может быть использован для наблюдений в частотах видимой области спектра. Водяной пар, находящийся в атмосфере Земли, поглощает некоторые ИК волны на их пути к поверхности планеты, но возможности проекта SOFIA позволяют поднять телескоп достаточно высоко, чтобы он был выше основной массы пара атмосферы. На высоте полета самолета доступно около 85 % всего ИК спектра. Самолет может перелететь практически в любую точку планеты, позволяя вести наблюдения как в Северном, так и в Южном полушариях. Подъём телескопа на высоту в 13 километров позволяет сделать качество получаемой «картинки» близкой к уровню космических обсерваторий. Первые изображения с помощью этого телескопа были получены 26 мая 2010, астрономические наблюдения велись около 2 минут, в ходе которых были сняты Юпитер и ядра галактики M82. Первый научный вылет состоялся в начале декабря этого же года и шёл около 10 часов, в течение которых проводились наблюдения области активного звездообразования в туманности Ориона. Летящая обсерватория SOFIA помогла весной 2015 доказать, что

сверхновые являются основными производителями космической пыли в галактиках, составляющей основу Земли и всех существующих во Вселенной планет.

Космические наблюдения в субмиллиметровом диапазоне свободны от атмосферного поглощения. Спутник SWAS [23] был запущен на низкую околоземную орбиту 5 декабря 1998 года как одна из миссий НАСА. Целью космического аппарата было изучение гигантских молекулярных облаков и ядер тёмных облаков. Исследования касались пяти спектральных линий: воды (H_2O), изотопа воды (H_2^{18}O), изотопа монооксида углерода (^{13}CO), молекулярного кислорода (O_2), нейтрального углерода (C I). В июне 2005 года целью аппарата стала поддержка эксперимента Deep Impact, до августа 2005 года аппарат следил за содержанием воды в комете.

В 2009 году ЕКА запустило миссию Herschel [9], телескоп которой обладает наибольшим диаметром (3.4 метра) среди всех телескопов, отправленных в космос. Наблюдения проводятся в далёком инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах. Космический аппарат находится в точке Лагранжа L2 системы Земля-Солнце. Точка L2 расположена примерно в 1.5 млн. км от Земли. Данная обсерватория исследует первые стадии формирования галактик.

Среди проектов с российским участием перспективен радиотелескоп РТ-70 на высокогорном плато Суффа [24] в отрогах Туркестанского хребта в Республике Узбекистан. Рабочий диапазон частот принимаемого излучения 5 – 350 ГГц (6 см – 0.85 мм). С учетом особенностей радиоастроклимата региона [25] радиотелескоп преимущественно будет работать в коротковолновой части миллиметрового диапазона волн. Радиотелескоп РТ-70 будет работать в двух режимах: автономном и радиоинтерферометрическом - в сети наземных и космических радиотелескопов. Выгодное географическое положение (ближайшие сравнимые радиотелескопы - в Японии диаметром 45 м. и Испании диаметром 30 м.) играет важную роль при работе в глобальной

радиоинтерферометрической сети. Радиотелескоп РТ-70 в комплексе строящейся обсерватории на плато Суффа будет являться одним из наземным пунктом проекта «Миллиметрон». Так же сейчас идет обсуждение о строительстве в рамках проекта СУФФА радиотелескопа с меньшей антенной для работы в ТГц диапазоне (0.8 мм), что позволит отложить решение чрезвычайно сложного в техническом плане вопроса – обеспечения работы 70 метрового телескопа до субММ волн.

Для перечисленных наземных, баллонных и космических телескопов требуются высокочувствительные детекторы миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн. Для многих проектов, в частности, наземных или на воздушных шарах, требуется детекторы наряду с высокой чувствительностью обладающие широким динамическим диапазоном, для обеспечения измерений в условиях довольно высокой мощности фонового излучения. И именно по последнему параметру, болометры на основе СИНИС структур перспективнее, чем применяемые болометры на краю сверхпроводящего переходы.

На основе исследуемых в данной работе болометров планируется создание прототипа приемника, охлаждаемого до температур 0.3 К, для отечественного Большого телескопа азимутального (БТА) [26], крупнейшего оптического телескопа Евразии [A14]. Это расширит возможности телескопа не только в сторону миллиметровых длин волн, но и позволит эксплуатировать эту уникальную установку не только в ночное время, но и днем благодаря тому, что фоновое миллиметровое излучение атмосферы, в отличие от фона в оптическом диапазоне, слабо зависит от времени суток. Применение таких приемников возможно также и в других перспективных проектах: строящиеся космический радиотелескоп Миллиметрон [11] и международный проект 70-ти метрового телескопа на плато Суффа [24] [A13].

1.2 Актуальные болометрические приемники терагерцового диапазона

В данном разделе описаны основные применяющиеся в настоящее время приемники субТГц и ТГц диапазонов. Часть из них работает и применяется при комнатных температурах в различных стендах для измерений СВЧ характеристик совместно с различными источниками излучения, такими как ЛОВ, лазеры, и т. д., генерирующими в ТГц диапазоне. Отметим, что высокочувствительные приемники требуют охлаждения и работают при температурах жидкого азота, водорода, гелия или в специальных криостатах при температурах до десятков мК.

1.2.1 Терморезистивные металлические болометры

Болометр (др.-греч. βολή — луч и μέτρον — мера) — тепловой приёмник излучения, чаще всего оптического (а именно — ИК-диапазона), изобретён Самуэлем Пирпонтотом Лэнгли в 1878 году [27]. Принцип действия первых болометров был основан на изменении электрического сопротивления термочувствительного элемента вследствие нагрева под воздействием поглощаемого потока электромагнитного излучения. Основным компонентом такого болометра — очень тонкая пластинка, зачернённая для лучшего поглощения излучения. Из-за своей малой толщины пластинка под действием излучения быстро нагревается и её сопротивление повышается. Для пленки из чистого металла в идеальном случае изменение сопротивления от температуры линейно и $d(R/R_0)/dT=1/273$. Для измерения малых отклонений сопротивления пластинки её включают в мостовую схему, которую балансируют при отсутствии засветки. Металлические болометры часто подсоединяют через трансформаторный вход, так как у них очень малое собственное сопротивление. Первые терморезистивные болометры успешно работали на искусственных спутниках Земли [28], но позже были вытеснены пироэлектрическими приёмниками. В качестве материалов для металлических болометров используют платину, никель, золото.

Простейшие расчеты показывают, что подобные болометры могут иметь уже неплохую чувствительность и при комнатных температурах, если речь идет о достаточно небольших объемах металла поглотителя. Например, рассмотрим пленку меди, размерами соответствующую пленкам подвешенного абсорбера в болометрах, предлагаемых в данной работе. Это медная пленка шириной 1 мкм, длиной 3 мкм и толщиной 0.1 мкм. Удельное сопротивление и температурная зависимость сопротивления меди при комнатной температуре 20°C взята из таблиц. Сопротивление такого мостика составляет всего 0.5 Ом. При приеме некой разумной мощности 1 пВт такой мостик нагреется примерно на 1°C. И если мы параллельно пропускаем через мостик ток порядка 0.1 мкА, который вызывает дополнительный нагрев, вольт-ваттная чувствительность такого приемника составит $5 \cdot 10^2$ В/Вт. Данные рассуждения носят оценочный характер и не все особенности таких измерений в них учтены.

При понижении температуры возможно увеличить чувствительность на порядки, кроме существенно уменьшается вклад тепловых шумов. Например, в работе [29] нашими коллегами исследовалась возможность использования резисторов на основе RuO_2 в качестве широкополосных низкотемпературных детекторов излучения.

Многие годы толсто пленочные резисторы на основе оксида рутения используются в качестве сенсоров в низкотемпературной термометрии. Они обладают рядом достоинств: такие термометры просты и компактны, их калибровки слабо меняются при термоциклировании, и главное, они обладают высокой чувствительностью. Диапазон температур, при которых резисторы используются в качестве термометров, лежит в интервале от 25 мК до 4 К. Толсто пленочные резисторы в большом количестве выпускаются и используются промышленностью в качестве чип-резисторов поверхностного монтажа (Surface Mounted Device, SMD) в современной электронике. Благодаря этому на рынке доступно множество дешевых резисторов

различных типоразмеров и номиналов (от единиц Ом до десятков МОм). Помимо многих достоинств, термометры из толстопленочных RuO_2 - резисторов обладают рядом недостатков. К ним относятся сильная чувствительность к перегреву (что и определяет нижнюю границу температурного диапазона использования этих термометров) и к паразитным засветкам. Эти особенности наталкивают на идею использования таких резисторов в качестве болометрических приемников излучения.

Главным результатом работы [29] является вывод о возможности использования промышленных толстопленочных рутениевых резисторов в качестве широкополосных низкотемпературных приемников излучения. Для рабочих температур около 0.1 К такие резисторы позволяют надежно детектировать сигнал мощностью до 2 пВт в диапазоне частот шириной как минимум 0.5 - 2.5 ТГц. Вольт-ваттная чувствительность при 100 мК составила порядка 10^5 В/Вт, МЭШ порядка 10^{-13} Вт·Гц^{-1/2} при оптическом согласовании не лучше 30%.

1.2.2 Полупроводниковые болометры

Следующим этапом развития стало использование полупроводниковых пленок вместо металлических из-за их большей температурной зависимости сопротивления. Полупроводниковый болометр — теплоэлектрический полупроводниковый прибор, использующий зависимость электрического сопротивления полупроводника от температуры, применяемый для индикации и измерения интенсивности электромагнитного излучения. У полупроводниковых материалов коэффициент-температурного сопротивления отрицателен, а его абсолютная величина больше, чем у металлов. Поэтому, полупроводниковые болометры, по сравнению с металлическими, обладают большей чувствительностью. Полупроводниковые болометры на данный момент являются одними из самых распространённых и оптимальными по соотношению цена / чувствительность.

Первый полупроводниковый болометр был создан компанией Bell в годы Второй мировой войны [30]. Он отличался простотой, надёжностью и высокой чувствительностью. Полупроводниковый болометр состоит из двух плёночных (толщиной до 10 мкм) термисторов. Один из термисторов, непосредственно подвергающийся облучению, является активным. Второй — компенсационный. Он экранирован от внешнего излучения и предназначен для компенсации изменений температуры окружающей среды. Оба термистора помещаются в общий герметичный корпус. Современные болометры исполняются, как правило, в композиционном виде, то есть в них разделяют функции абсорбера (элемента, который принимает излучение и согласовывается с излучением) и термометра. Полупроводниковые болометры применяются, например, в системах ориентации, для дистанционного измерения температуры. Полупроводниковые болометры широко коммерчески распространены, и они доступны как для комнатных рабочих температур, так и для охлаждения до температур жидкого гелия и ниже. Среди болометров, не требующих охлаждения, можно упомянуть иммерсионный полупроводниковый болометр БП 2М [31] в комплекте со светозащитным устройством СУБ-1А. Он предназначен для эксплуатации в качестве встроенного элемента внутри комплектных изделий для регистрации и измерения параметров теплового излучения в широком спектральном диапазоне. Его основные характеристики: вольт-ваттная чувствительность $2.5 \cdot 10^3$ В/Вт, постоянная времени 2.3 мс при допустимых рабочих температурах от -10 до +55°C.

Также доступны криогенные высокочувствительные полупроводниковые болометры. Например, детекторы производства американской компании Infrared Laboratories, Inc [32]. Данные болометры применяются для регистрации оптического излучения ИК-диапазона. Компания Infrared Laboratories изготавливает 4 основных типа болометров на

разные частотные диапазоны и с разными рабочими температурами. Заявлены МЭШ до 10^{-14} Вт/Гц^{1/2} при рабочей температуре 1.6К.

1.2.3 Болومتر на краю сверхпроводящего перехода (TES)

Одним из самых чувствительных на данный момент является болومتر на краю сверхпроводящего перехода (БКП) (Transition-edge sensor - TES) [33]. БКП представляет собой поглощающий элемент, согласованный с тонкой сверхпроводящей пленкой, и имеющий слабую связь с тепловым резервуаром. Принцип работы основан на резкой зависимости сопротивления сверхпроводников от температуры вблизи критической температуры перехода в сверхпроводящее состояние. Критическая температура перехода такого сверхпроводника должна быть близка к рабочей температуре, используемых рефрижераторов. При работе через БКП протекает постоянный ток, нагревающий поглотитель с помощью джоулевого тепла. В отсутствие внешнего излучения этот нагрев компенсируется отводом тепла в термостат; при поглощении фотона сопротивление болметра растет, а ток – падает, что приводит к снижению токового нагрева и дополнительном отводе тепла, добавленного фотоном в поглотитель. Считывание тока, протекающего через болومتر, осуществляется сверхпроводящим квантовым интерферометром (СКВИДом). Первые демонстрации измерительного потенциала сверхпроводящего перехода появились в 1940-х годах [34], через 30 лет после открытия сверхпроводимости. Тем не менее, детектор TES не находил широкого распространения в течение 50 лет, в основном из-за сложности считывания сигнала в такой системе с низким импедансом. Вторым препятствием для широкого применения детекторов TES была сложность достижения стабильной работы в узкой области температур сверхпроводящего перехода.

В настоящее время БКП широко используются в инфракрасном диапазоне. Например, в составе наземного прибора SCUBA2 на JCMT [21]. Из суборбитальных телескопов инструменты HAWC+ и предстоящий

инструмент HIRMES, оба на SOFIA. Боллометры БКП также планируется использовать в инструменте SAFARI для SPICA [35]; [36]. Группы из SRON и JPL продемонстрировали чувствительность БКП $1 \cdot 10^{-19}$ Вт·Гц^{1/2}. [37]. Несмотря на зрелость технологий, связанных с БКП, и отработанность систем считывания, создание матриц на основе БКП с количеством пикселей более 10^4 является сложной задачей, так как простое частотное мультиплексирование сложно реализуемо для БКП.

1.2.4 Боллометр на основе кинетической индуктивности (KID)

Кинетическая индуктивность — это индуктивность материала, вызванная инерцией его носители заряда. В сверхпроводнике присутствуют два типа носителей заряда: куперовские пары - спаренные электроны, которые несут ток без какого-либо сопротивления и квазичастицы, у которых перенос заряда является резистивным. При низких температурах $T \ll T_c$ концентрация квазичастиц экспоненциально мала, и в сверхпроводнике может преобладать кинетическая индуктивность из-за инерции куперовских пар. Кинетическая индуктивность зависит от температуры, и она может быть использована для измерения температурных эффектов в тонких сверхпроводящих пленках [38]. Это позволяет боллометрически обнаруживать излучение, что и было первоначально предложено Д.Г. МакДональдом в 1987 году [39]. В 2002 году J. Zmuidzinas с соавторами [40] и А.В. Сергеев с соавторами [41] предложили более чувствительный детектор излучения, использующий тот факт, что при очень низких температурах, обычно $T = T_c/10$ изменение комплексного поверхностного сопротивления сверхпроводящей пленки на квазичастицу $\delta Z_s / \delta N_{qp}$ не зависит от температуры. Таким образом, устройство работает в тепловом неравновесии: квазичастицы являются избыточными частицами, созданными при поглощении излучения и затухающие с течением времени. Сергеев и др. предложил детектор, в котором изменения тока смещения в небольшой сверхпроводящей цепи измеряются СКВИДОМ. Более элегантный метод был предложен J. Zmuidzinas и развит в [42]. Идея заключалась в

использовании сверхпроводящего тонкопленочного микроволнового резонатора, для обнаружения изменения поверхностного сопротивления сверхпроводящей пленки, путем обнаружения изменений свойств резонансного контура. Это очень мощная и элегантная концепция легла в основу микроволнового детектора на кинетической индуктивности (КИД).

Важным преимуществом КИД является то, что мультиплексирование с частотным разделением может быть достигнуто путем объединения многих резонаторов на 1 линию передачи. Как правило, при ширине резонанса 1-2 МГц достигается возможность считывания 2–4 тыс. пикселей с помощью одного малошумящего холодного (4К) усилителя, с полосой пропускания 4–8 ГГц по двум коаксиальными кабелями, подключенными к портам 1 и 2 линии подачи. Типичные МЭШ современных КИД на уровне 10^{-17} Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$. [43]

1.2.5 Болومتر на горячих электронах (НЕВ)

На основе эффекта электронного разогрева в тонких сверхпроводниковых пленках разработаны уникальные детекторы электромагнитного излучения, обладающие высокой чувствительностью и быстродействием, а именно болометры на эффекте электронного разогрева в сверхпроводниковых наноструктурах (hot-electron-bolometer, НЕВ) [44]. Под горячими электронами подразумеваются носители заряда, энергетическое распределение которых смещено относительно равновесного при этой температуре в сторону больших энергий. Эффект разогрева в тонких сверхпроводниковых пленках, находящихся в резистивном состоянии, впервые был исследован в работах [45], а в работах [46] было показано влияние излучения мм и суб. мм диапазона на физические свойства узких Nb полосок, находящихся в резистивном состоянии.

Базовый принцип работы болометров на основе эффекта электронного разогрева состоит в том, что электронная подсистема сверхпроводника нагревается под действием принятого электромагнитного излучения до температуры, которая существенно выше фоновой температуры, что

становится причиной изменения сопротивления болометра. Возникновение данного эффекта возможно только при криогенных температурах, так как при таких температурах электронная и фононная подсистемы слабо связаны [47]. По величине этого измерения с учетом известной зависимости сопротивления болометра от температуры оценивается мощность принятого излучения.

Существенным преимуществом болометра на основе эффекта электронного разогрева является то, что он может работать как режиме прямого детектора, так и в режиме смесителя. Например, NbN НЕВ используются как смесители для терагерцового диапазона частот [48] для гетерогенных приемников. Именно такой смеситель используется для 6 и 7 полосы частот (1.4 – 1.9 ТГц) инструмента HIFI космической обсерватории Хершель [49]. НЕВ смесители испытывались также в составе сверхпроводникового интегрального приёмника [50].

Существуют и сверхчувствительные однофотонные детекторы на основе микроструктур из NbN. Продемонстрирована МЭШ на уровне 10^{-17} Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ для квантов излучения с длиной волны 1.55 мкм и до 10^{-20} Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ при температурах 2.3К [51]. На основе данного типа болометров демонстрируется возможность создания практического инфракрасного однофотонного детектора [52].

1.2.6 Андреевский приемник

В качестве альтернативного варианта детектирования «горячих электронов» можно использовать изменение тока квазичастиц через туннельный контакт, которое зависит от энергии поглощенных фотонов.

Первой такой реализацией является болометр на горячих электронах в нормальном металле (NHEB), в котором используется эффект разогрева «электронного газа» в пленке нормального металла и эффект «андреевского отражения» [53] на контактах со сверхпроводников (так же используется название андреевский болометр). Впервые подобные схемы были предложены

в работах [54] и [55] в 1993 году, где была продемонстрирована очень высокая чувствительность 10^9 В/Вт, что, более чем на порядок превосходило достигнутую чувствительность приемников субмиллиметрового диапазона на тот момент. Схема такого устройства приведена на рисунке 1.2. Абсорбер такого болометра представляет собой узкую полоску нормального металла, объем которого очень мал по сравнению с другими детекторами ММ диапазона. Абсорбер из нормального металла изготавливался из меди, толщина составляла 50 нм, а размеры рабочей области 2 на 6 мкм. Нормальное сопротивление переходов составляло порядка 100 Ом. Энергия «фокусируется» через сверхпроводниковые контакты, которые обеспечивают электрический, но не термический контакт. Используется особенность, что при таких низких температурах фононная и электронная подсистемы слабо связаны и небольшая приходящая мощность вызывает значительное увеличение электронной температуры, которое приводит к существенному изменению ВАХ СИН перехода. Данный болометр изучался в логопериодической и спиральной планарных антенных на диэлектрической подложке, освещаемой через диэлектрическую линзу. В работе также оценивается МЭШ такого устройство, которая, если она ограничена шумами усилителя 3 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$, составляет порядка $3 \cdot 10^{-17}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$.

В 1994 году появляются первые работы по изучению электронного охлаждения в СИН переходах [56]. Данный эффект схож с эффектом Пельтье в полупроводниках, и в литературе также называется эффектом охлаждения Пельтье в СИН переходах.

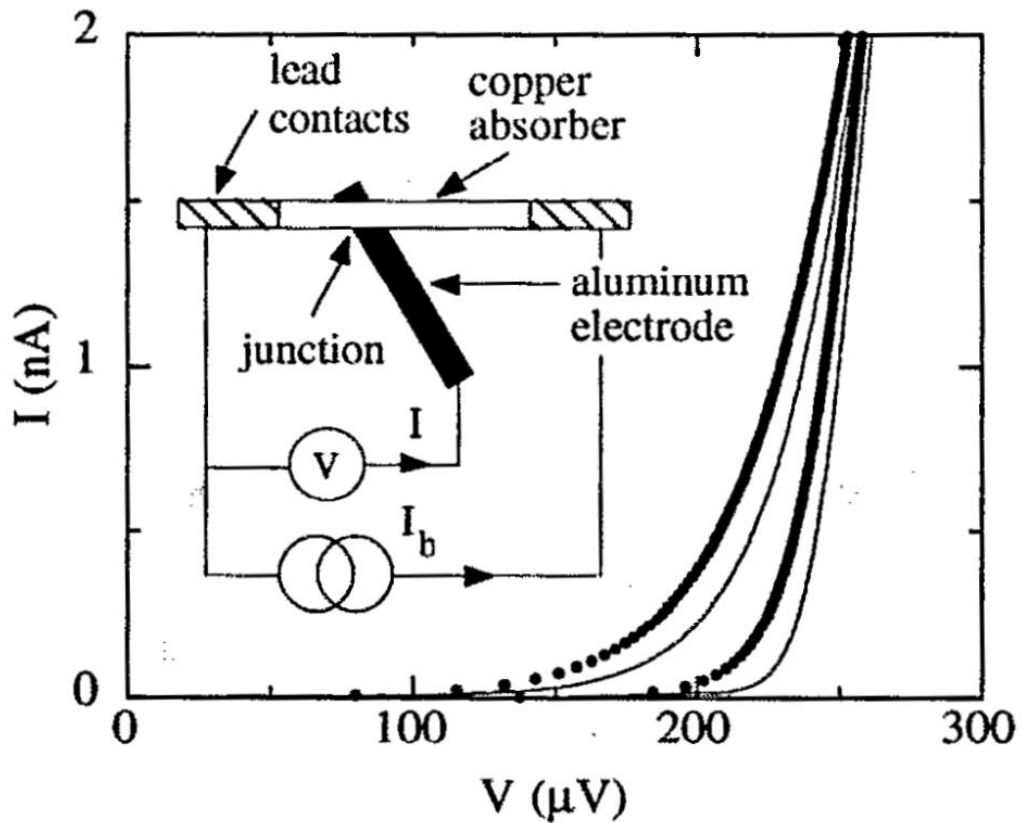


Рисунок 1.2. Вольт-амперные характеристики СИН перехода и схема устройства. Сплошные кривые соответствуют температурам 40 мК (справа) и 300 мК (слева). Точками обозначены кривые при поглощении 20 фВт и 2 пВт мощности в абсорбере соответственно. Иллюстрация из работы [54].

Механизм электронного охлаждения заключается в энергетически селективном туннелировании. При подаче смещения на переход часть высокоэнергичных электронов с энергией выше энергии Ферми (находящихся в хвосте распределения) имеют возможность туннелировать в сверхпроводник (рис. 1.3). Именно наличие энергетической щели в плотности состояний сверхпроводника приводит к тому, что туннелировать могут только наиболее горячие электроны из нормального металла. Эта мощность выводится из нормального металла в сверхпроводник.

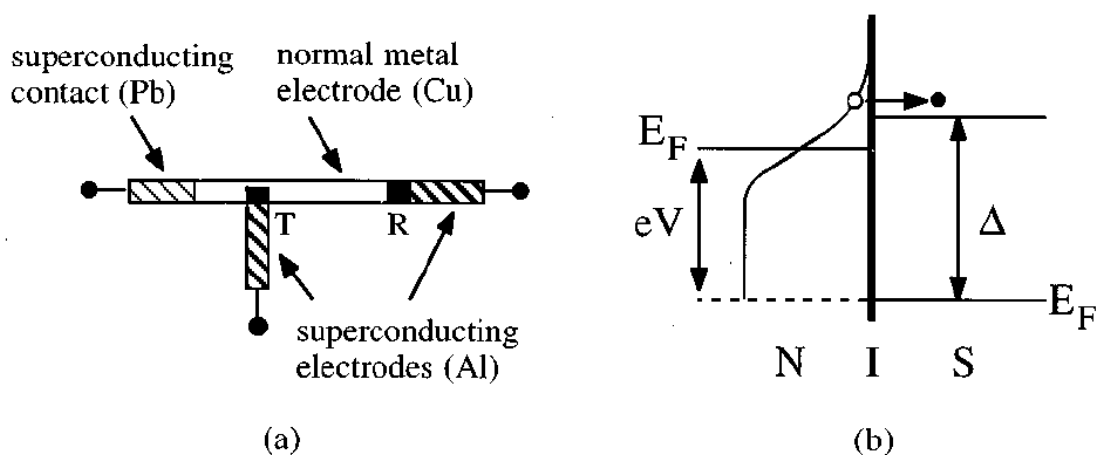


Рисунок 1.3. а) Схематичное изображение электронного охладителя. Термометрический и охлаждающий туннельные переходы обозначены черными квадратами T и R соответственно. б) Энергетическая диаграмма охлаждающего перехода, которая демонстрирует уход электронов из нормального металла с энергией выше E_F при приложении напряжения V . Иллюстрация из работы [56].

Исследования получили продолжение в работе [57] в 1996 году. В данной работе предложена и исследована симметричная структура с двумя СИН переходами – СИНИС структура. В работе используется пара СИН переходов для охлаждения, на них подается постоянное смещение и пара СИН переходов в качестве термометра (рис. 1.4). В работе продемонстрировано охлаждение с базовой температуры 300 мК до примерно 100 мК и максимальная мощность охлаждения оценивается в 1.5 пВт при охлаждении СИН переходами суммарной площади 0.8 мкм^2 . Максимум охлаждения достигается при напряжении, примерно соответствующем двойной щели в сверхпроводнике, 400 мкВ для алюминия.

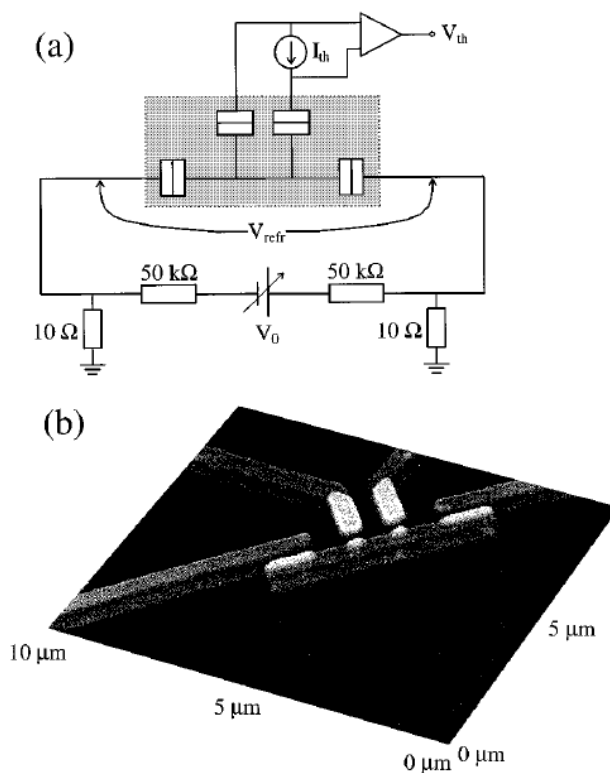


Рисунок 1.4. Схема СИНИС охладителя, используемого для измерений и изображение изготовленной структуры в микроскопе атомных сил. Иллюстрация из работы [57]

В 1998 г. появляются первая работа [58], где предлагается и изучается концепция, в которой параметры «андреевского» болометра предполагается улучшить за счет прямого электронного охлаждения абсорбера из нормального металла (рис 1.5). Авторы надеются, что вместо сложных и тяжелых криостатов растворения для достижения температуры 100мК можно будет использовать криостаты с откачкой He^3 и прямое электронное охлаждение абсорбера. При этом авторы осторожны относительно прямого электронного охлаждения и пишут, что «эффект электронного охлаждения сталкивается с «эффектом горячих электронов» детектора». Декларируется достижений МЭШ на уровне $4.3 \cdot 10^{-17}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ при температуре 300 мК в случае ограничение шумов собственными шумами усилителя (30 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$). Работа носит теоретический и расчетный характер, образцы по разработанному дизайну не изготавливались и не исследовались. В названии

данной работе впервые появляется словосочетание «Cold-electron bolometer» – болометр на холодных электронах (БХЭ), хотя далее вплоть до 2004 года оно не употреблялось.

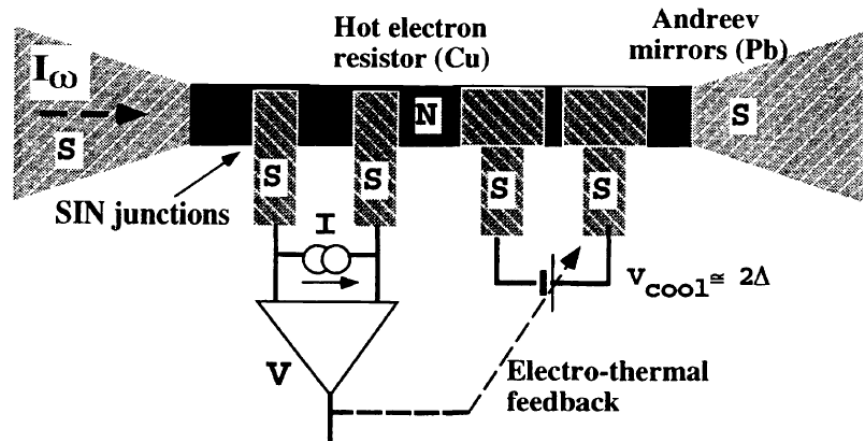


Рисунок 1.5 Схема микроболометра с прямым электронным охлаждением. Иллюстрация из работы [58]

В 1999г. выходит работа, в которой данная концепция уже развита до реальных образцов и проведено исследование характеристик таких болометров [59]. Но в этой работе используется нагрев абсорбера постоянным током, а не внешним излучением (рис. 1.6). В работе оценены постоянная времени до 0.2 мкс при 300мК и МЭШ $2 \cdot 10^{-19}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ при 100мК, если шум принять равным тепловому. Параллельно активно развивается и просто ННЕВ, без электронного охлаждения [60]. В работе [61] исследуются дополнительные СИН переходы в качестве защиты от электрических шумов. Измеренные в данной работе шумы составили 45 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$, соответствующие МЭШ $1.5 \cdot 10^{-17}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$. В работе [62] сделан шаг к измерениям отклика на внешнее излучение, а не на нагрев постоянным током. В работе [63] впервые исследован отклик на внешнее электромагнитное излучение (переключение между теплой и холодной (77К) нагрузкой). Максимальный измеренный отклик ($S = dV/dP = 1.7 \cdot 10^6$ В/Вт) оказался значительно ниже, чем в измерениях с нагревом постоянным током ($1.5 \cdot 10^7$ В/Вт) при температуре 0.5 К. Оптическая

МЭШ составила $9 \cdot 10^{-15}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ при 0.5 К. В 2001 г. была защищена диссертация Дениса Шуваева «Normal metal hot-electron microbolometer superconducting Andreev mirrors» [64], в которой достаточно подробно и комплексно рассмотрена тема андреевских болометров, в том числе рассмотрены вопросы, связанные с электронным охлаждением.

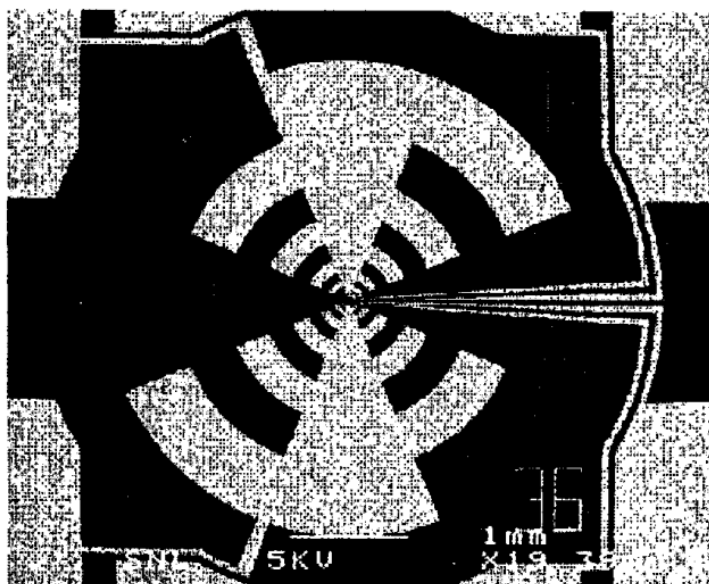


Рисунок 1.6. Вид чипа с логопериодической антенной с интегрированным болометром с дополнительными линиями для электронного охлаждения. Иллюстрация из работы [59].

Стал очевиден недостаток такого болометра - ограничение «андреевских» контактов металл – сверхпроводник по частоте для эффективной защиты от энергетических утечек: для энергии поглощенного кванта выше энергетической щели сверхпроводника «андреевские» контакты становятся прозрачными для переноса энергии. У андреевского болометра, где в качестве сверхпроводника используется алюминий, при прямых измерениях на частотах выше 50 ГГц сильно падает чувствительность, относительно измерений при нагреве постоянным током, это и было обнаружено в работе [63]. Несмотря на это, некоторые группы до сих пор пытаются продвинуть такой болометр, как высокочувствительный приемник в ТГц области [65].

1.2.7 От андреевского болометра к «болометру на холодных электронах»

Для преодоления частотных ограничений болометра на горячих электронах в нормальном металле с андреевскими зеркалами (ННЭВ-А), было предложено заменить андреевские зеркала на ёмкостную связь [66], [13]. То есть, вместо простых контактов сверхпроводник – нормальный металл (СН) использовать контакты сверхпроводник – изолятор – нормальный металл (СИН) или нормальный металл – изолятор – нормальный металл. Приведенные в этих работах оценки, показали сопротивление абсорбера составит порядка 100 Ом и при емкости переходов 15 фФ, импеданс перехода составит порядка 10 Ом на частоте 1 ТГц. Показано, что для типичного барьера толщиной 1.2 нм и высотой барьера 2 эВ, прозрачность барьера составит $T = 4 \cdot 10^{-8}$, для энергии hf ниже потенциального барьера (соответствует частотам ниже 500 ТГц) (рис. 1.7).

В данной работе предлагается использовать СИН не только в качестве емкостной развязки, а также для измерения температуры абсорбера. Дается оценка для измерений на постоянном токе; показано, что на фоне типичного дифференциального сопротивления СИН переходов 100 кОм, сопротивление абсорбера 80 Ом весьма мало и не дает существенного вклада при измерении напряжения на этой структуре.

Экспериментально болометр на горячих электронах в нормальном металле с ёмкостной связью (БГЭНЕ) впервые был реализован и экспериментально исследован в работе [67]. Болометр представлял собой СИНИС структуру, изготовленную с использованием теневого напыления: в качестве сверхпроводника использовался алюминий, в качестве нормального металла – двухслойка хром / алюминий. Контактные площадки и антенна изготавливались с использованием УФ литографии, а трехслойка СИНИС с использованием прямой электронной литографии (рис. 1.8). В целом данная технология не сильно изменилась вплоть до последующих публикаций по болометрам на основе СИНИС структуры.

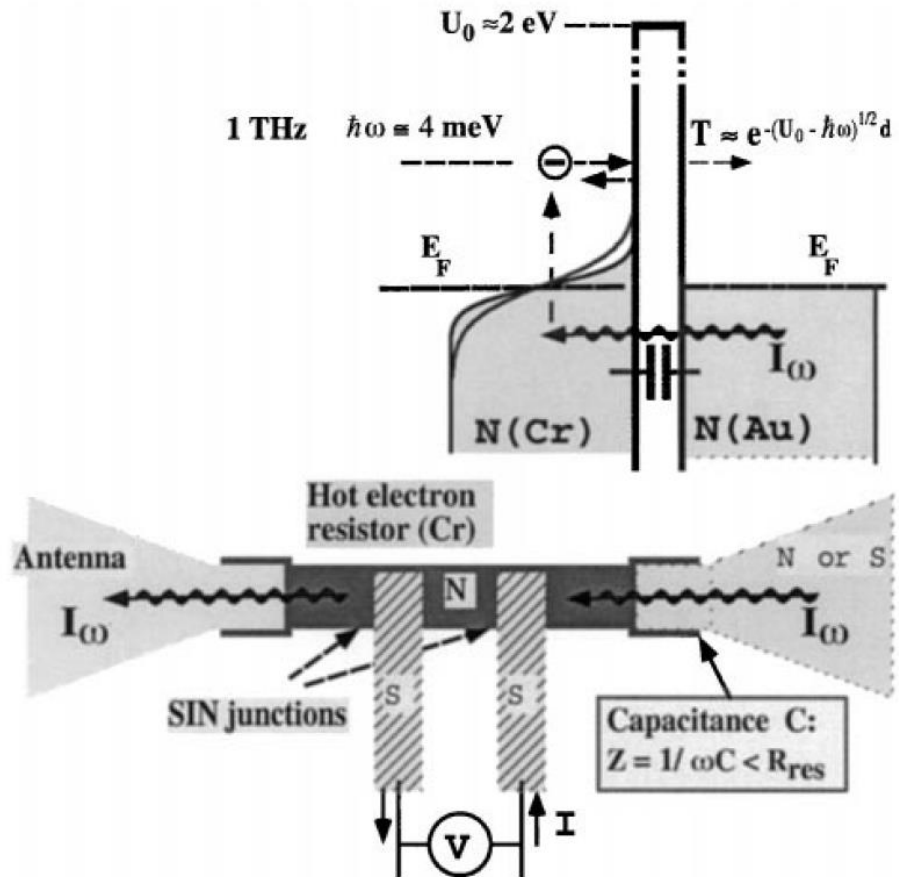


Рисунок 1.7. Схематичное изображение болометра на горячих электронах в нормальном металле с ёмкостной связью (БГЭНЕ) и энергетическая диаграмма, иллюстрирующая изоляцию горячих электронов в абсорбере высоким потенциальным барьером туннельного перехода. Иллюстрация их работы [13].

В работе [67] приводятся результаты экспериментального измерения отклика на излучение черного тела. Но при этом приводятся только оценки и пересчет из других измеренных характеристик вольт-ваттной чувствительности и МЭШ, которые составили $0.4 \cdot 10^9 \text{ В/Вт}$ и $10^{-17} \text{ Вт/Гц}^{-1/2}$.

В дальнейшем данная концепция болометра получила развитие в ряде работ [68, 69, 70, 71], где исследовались предельные характеристики такого болометра и его оптимальные конструкции. В этих и в последующих статьях использовался целый ряд названий для болометра на основе СИНИС структур:

NCEB-CC, NHEB-CC, NEB with NIS, SCEB with traps, просто СЕВ и SINIS. В последующие почти 20 лет данный тип болометров активно развивался, конструкции оптимизировались, углублялось понимание принципов работы, исследовались возможности использования таких болометров в матрицах антенн. Принципиальная схема приведена на рисунке 1.9. В 2011 году успешно прошла защита диссертационной работы М.Ю. Фоминского «Разработка и исследование криогенного болометра на холодных электронах» [72]. Работа по этой тематике [73] в 2011г. получила престижную премию «IEEE Van Duzer Prize for the Best Publication of the Year».

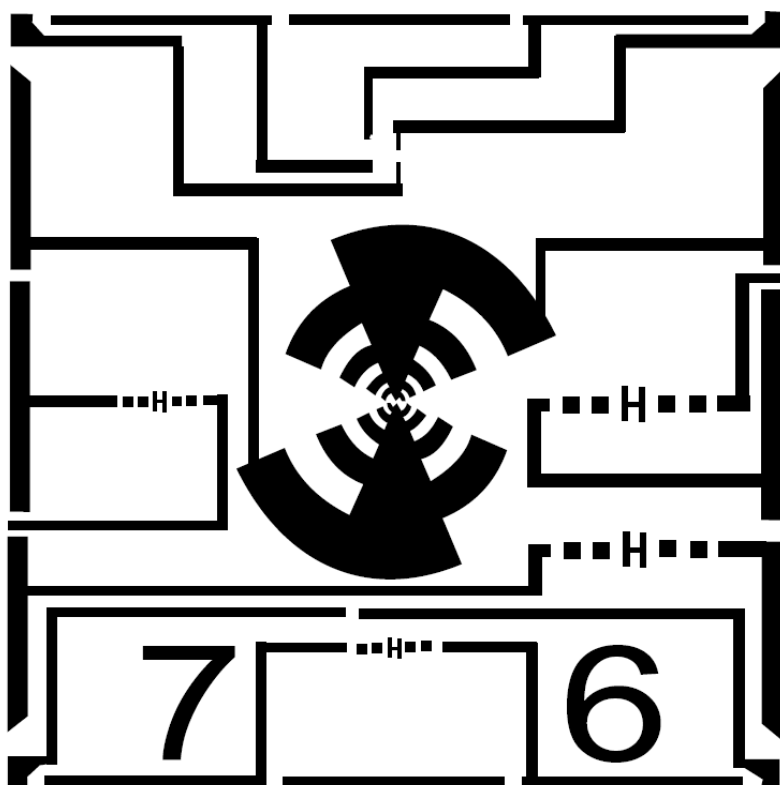


Рисунок 1.8. Иллюстрация дизайна чипа с БГЭНЕ, интегрированного в логопериодическую антенну. Иллюстрация из работы [67].

Несмотря на высокие оценки чувствительности и МЭШ для болометров на основе СИНИС структур в ряде теоретических статей, на практике данные рекордные чувствительности до 10^{11} В/Вт не реализуются. В последних статьях [74] сообщается о наблюдении фотонного шума БХЭ; однако учитывая что приведенная в работе вольт-ваттная чувствительность

$1.5 \cdot 10^8$ В/Вт при температуре 200 мК не является предельной, утверждение о наблюдении фотонного шума является достаточно спорным. Следует отметить, что сам болометр с 2002 года конструктивно особо не изменялся, а для оценки его чувствительности используются принципы, заложенные в той же работе [68].

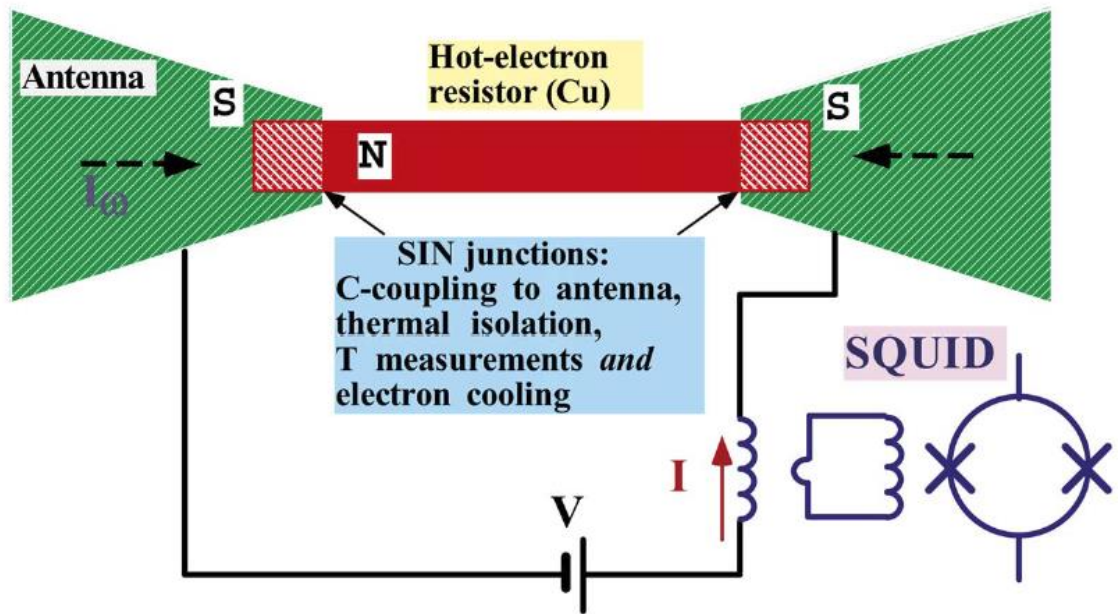


Рисунок. 1.9. Схема болометра на холодных электронах в нормальном металле с ёмкостной связью с антенной (NCEB-CC). Два СИН Перехода используются сразу для 4 целей: высокочастотная связь антенны и абсорбера, термическая изоляция абсорбера, измерение температуры и электронное охлаждение. Авторы предполагали, что для работы в режиме задания напряжения можно будет использовать систему считывания со СКВИДом. Иллюстрация из статьи [69].

ГЛАВА 2: РАДИО- ТЕПЛО- ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И КОНСТРУКЦИЯ БОЛОМЕТРА НА ОСНОВЕ СИНИС СТРУКТУРЫ С ПОДВЕШЕННЫМ АБСОРБЕРОМ

2.1 Режимы работы СИНИС болометра

Одним из главных преимуществ болометра на основе СИНИС структуры считается возможность прямого электронного охлаждения СИН переходами, что и послужило появлению названия Болометр на Холодных Электронах (БХЭ). В такой конструкции возможно получить понижение электронной температуры с 300 мК до 100 мК, что создает надежду на возможность значительного снижения мощности эквивалентной шуму (МЭШ), которую в равновесном случае оценивают как

$$\text{МЭШ} = \sqrt{4kT^2G}, \quad (1)$$

где T - равновесная температура, G - теплопроводность [75]. В случае, когда электроны и фононы имеют разную температуру [76] излучение и поглощение фононов некоррелированное и эти два процесса дают два независимых шумовых вклада. Согласно расчетам Голубева [77]

$$\text{МЭШ} = \sqrt{2kG_e T_e^2 + 2kG_p T_p^2} = \sqrt{10k\Sigma\nu(T_e^6 + T_p^6)} \quad (2)$$

где T_e и T_p электронная и фононная температуры. Таким образом, даже в идеальном случае охлаждения электронной температуры до нуля, МЭШ уменьшится не более чем в 1.4 раза.

О величине электронной температуры можно судить по форме вольт-амперной характеристики СИН перехода, у которого форма ВАХ непосредственно зависит от электронной температуры нормального металла. Если считать, что распределение электронов по энергии описывается функцией Ферми, то форму ВАХ при температурах много меньше критической с высокой точностью можно описать выражением [67]

$$I(V, T) = \frac{1}{eR_n} \sqrt{2\pi kT\Delta} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta}{kT}\right) \cdot \sinh\left(\frac{eV}{kT}\right), \quad (3)$$

где R_n нормальное сопротивление перехода, T электронная температура, Δ энергетическая щель, e заряд электрона, k постоянная Больцмана, V напряжение. Из этого уравнения можно получить зависимость дифференциальной проводимости G на переходе от напряжения смещения при разных температурах.

$$G = 1/R_d(V, T) = \frac{1}{R_n} \sqrt{\frac{2\pi \cdot 1.76 T_c}{T}} \cdot \exp\left[-\frac{1.76 T_c}{T}\right] \cdot \cosh(eV/kT) \quad (4)$$

Поскольку в эксперименте при задании тока реально измеряется дифференциальное сопротивление, то в качестве примера на рисунке 2.1 приведено семейство зависимостей дифференциального сопротивления от напряжения смещения для температуры в диапазоне 100 - 500 мК [A1], рассчитанных по формуле 4 и нормированных на нормальное сопротивление. Видно, что в случае низких температур (порядка 100 мК) отношение сопротивлений могло бы достигать 10^9 , чего не наблюдается в эксперименте.

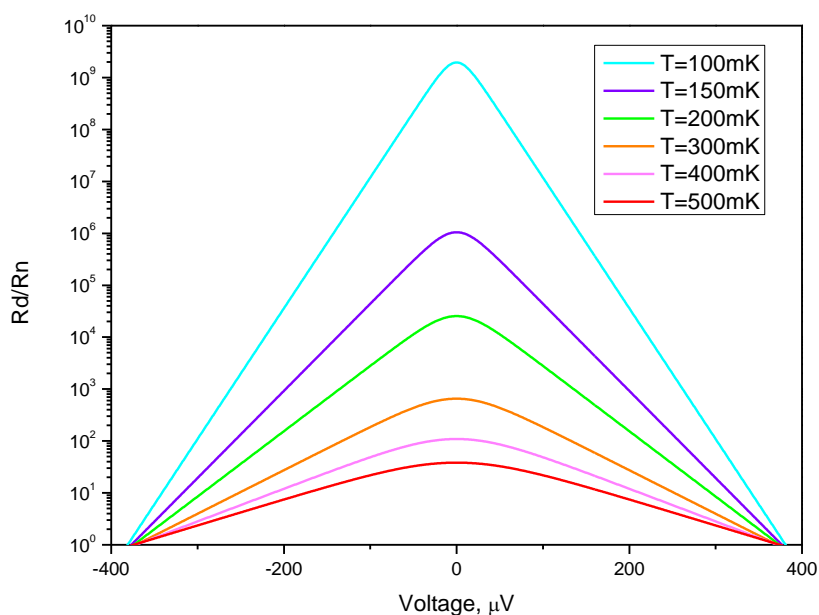


Рисунок 2.1. Зависимости нормированного дифференциального сопротивления от напряжения, для различных температур в диапазоне 100-500 мК, рассчитанные по формуле 4 для идеальной СИНИС структуры с энергетической щелью в районе 380 мкВ.

Эффект электронного охлаждения должен существенно модифицировать форму ВАХ СИНИС структуры, поскольку вблизи энергетической щели электронная температура может быть значительно снижена. В реальных условиях на структуру также воздействует внешнее излучение и электромагнитные наводки, приводящие к разогреву электронной системы, в результате на вольт-амперной характеристике можно выделить участки с электронной температурой как выше фоновой температуры, так и ниже. Эти процессы количественно можно попытаться описать с помощью уравнения теплового баланса, в котором естественным образом учитываются основные известные источники тепла и механизмы их релаксации

$$P_{sig} + P_{bg} = 5 \Sigma \nu (T_e^5 - T_{ph}^5) + P_{cool}, \quad (5)$$

где P_{sig} - мощность сигнала, P_{bg} - мощность теплового фона, $5 \Sigma \nu T^4$ мощность электрон-фононного взаимодействия и P_{cool} мощность электронного охлаждения. Исходя из этих оценок, вольт-ваттная чувствительность:

$\frac{dV}{dP} = 2k / (\Sigma \nu T_e^4)$ для СИНИС болометров должна превышать $3 \cdot 10^8$ В/Вт при 300 мК, $1.5 \cdot 10^9$ В/Вт при 200 мК и $2.5 \cdot 10^{10}$ В/Вт при 100 мК. При нагревании абсорбера постоянным током удается получить сравнимые значения отклика, однако при нагреве внешним излучением на частотах порядка 300 ГГц, значения отклика оказываются более чем на порядок хуже. Это наблюдается даже в работах, где болометры интегрированы в матрицы планарных антенн, для уменьшения мощности, приходящейся на отдельный болометр, и расширения динамического диапазона [A7, A12, A15 – A19]. Сказывается упрощенность такого подхода, хотя и были попытки учесть в уравнение теплового баланса дополнительные каналы ухода тепла (например, уход тепла из абсорбера в подложку), но уравнения с большим количеством членов становилось сложным для анализа и численных расчетов [78]. В этом случае проявляется иной механизм поглощения микроволнового фотона, когда квантовая эффективность, равная количеству возбужденных электронов на

один фотон, может достигать $n=hf/kT$ при смещении вблизи энергетической щели. Однако, вблизи щели присутствует эффект электронного охлаждения, который оперативно удаляет возбуждения из абсорбера, они не успевают размножиться, квантовая эффективность не превышает единицы, и амперваттная чувствительность снижается до $dI/dP=e/kf$.

В модели Голубева предполагается, что вся энергия кванта преобразуется в тепло, и квантовая эффективность составляет $n=hf/kT=480$ на 1 ТГц при температуре 100мК (рис 2.2).

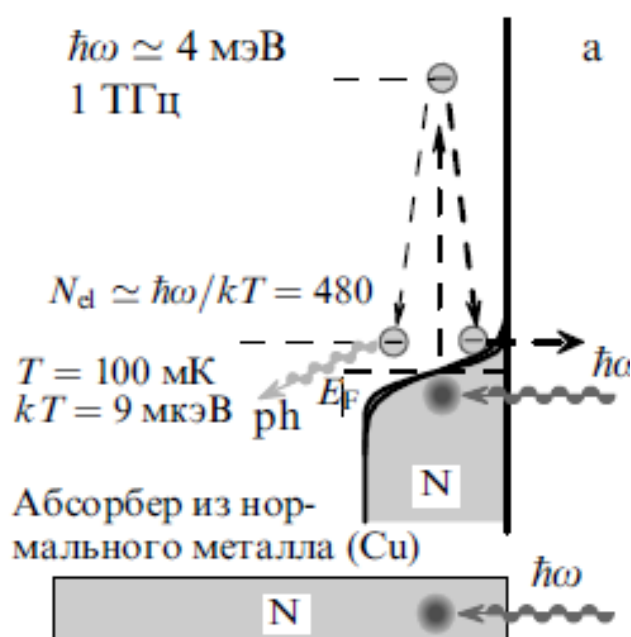


Рисунок 2.2 Квантовая эффективность металлического абсорбера. Иллюстрация из работы [14].

Реальная картина квантового поглощения [79] оказывается существенно более сложной. При поглощении электроном фотона с энергией сильно выше тепловой, энергия электрона будет соответствовать электронной температуре $hf=kT_e$ около 15 К для 350 ГГц. Время электрон-электронных взаимодействий при этой температуре значительно больше времен электрон-фононных взаимодействий (рис. 2.3). В результате рождается высокоэнергетичный фотон. У него есть три пути: уйти в подложку, уйти в сверхпроводящие

электроды или провзаимодействовать с электронной системой с эффективностью 0.023 на 1 ТГц. При этом рождается пара: возбужденный электрон и возбужденная дырка с энергией $hf/2$. Возбужденный электрон $hf/2$ рождает фонон, с энергией $hf/2$, соответствует электронной температуре 7 К, опять происходит рождение пары электрон-дырка, с энергией $hf/4$, у них эффективно электрон-электронное взаимодействие с рождением двух электронов и дырки с энергией $hf/12$ от исходной, теперь уже электрон-электронные взаимодействия вступают в силу, происходит эффективное размножение оставшихся возбуждений. Схематично данный процесс изображен на рисунке 2.4.

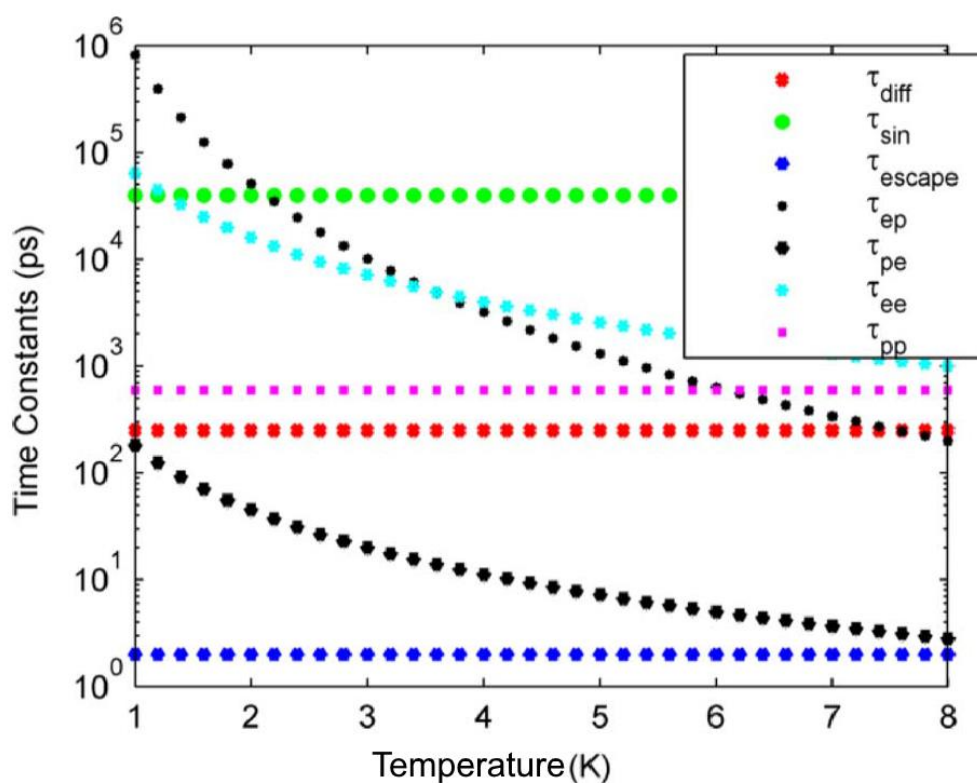


Рисунок. 2.3 Порядок характерных времен взаимодействий (постоянных времени) энергии возбуждения, построенной в Кельвинах, (E/k). Иллюстрация из работы [79]

В 2014 году вышла статья [18], в которой аккуратно анализируются характерные времена процессов в СИНИС болометре и сделан вывод о том, что при низких температурах (менее 100 мК), облучении квантами с частотой

выше 300 ГГц и мощности облучения больше 1 пВт неравновесность в системе электронов играет главную роль при формировании оптического отклика. Данные работы [79, 18], главным образом опираются на серию работ [16, 17] посвященных исследованию режимов (мод) работы болометра на основе СИНИС структуры. В работе показано, что в зависимости от степени неравновесности фононной подсистемы, данный детектор может работать или в моде «фотонного счетчика» или в болометрической моде.

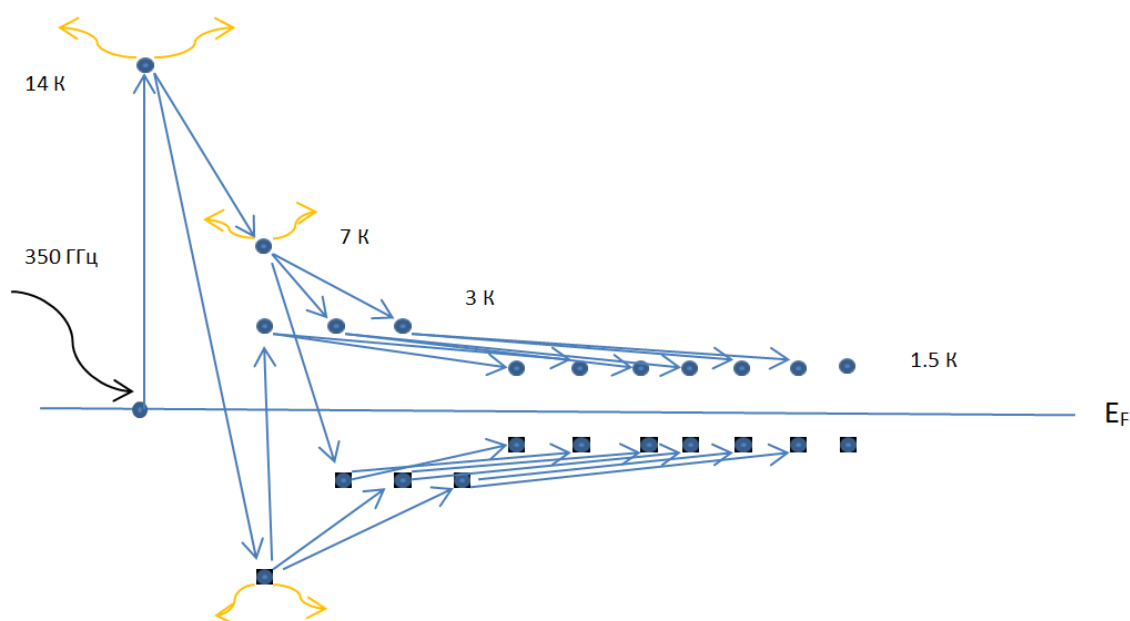


Рисунок. 2.4 Схематичное изображение процесса термализация кванта излучения с частотой 350 ГГц.

Решение кинетического уравнения для функции распределения электронов по энергиям и расчет интеграла столкновений в работах [16] [17] позволили рассчитать неравновесные функции распределения электронов (рис. 2.5) как при быстром уходе в СИН переходы (3) с сильным охлаждением, так и без охлаждения (4) для сигнала 1 ТГц мощностью 0.1 пВт. Без электронного охлаждения неравновесность может быть существенно выше и количество детектируемых возбуждений существенно увеличивается.

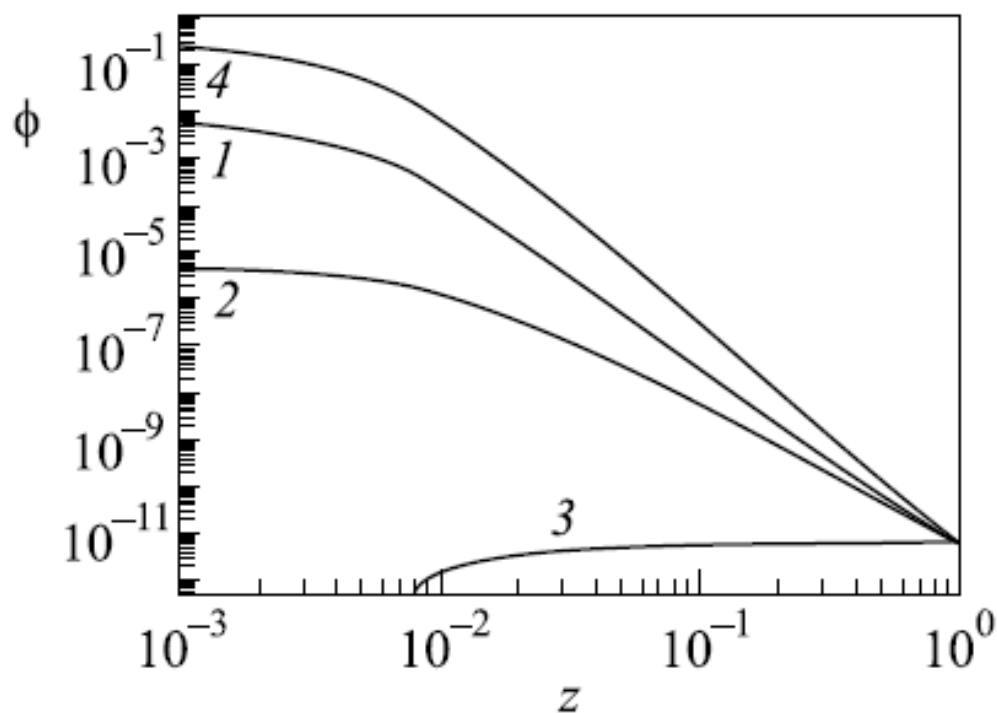


Рисунок. 2.5 Неравновесные функции распределения электронов в металлическом абсорбере детектора, возникающие под действием микроволнового электромагнитного излучения. Иллюстрация из работы [17].

Там же приведены зависимости эффективности детектирования от сопротивления туннельных переходов. Верхняя кривая максимально неравновесная, оптимальное сопротивление порядка 5 кОм (рис. 2.6); квантовая эффективность $30e/hf$. Меньше сопротивление – больше уход тепла в электроды. Электронное охлаждение сразу же выносит возбужденные электроны, не дает им термализоваться, поэтому квантовая эффективность (η/η_{fc}) может быть и меньше единицы с учетом потерь горячих фононов в подложку и толстые сверхпроводящие электроды.

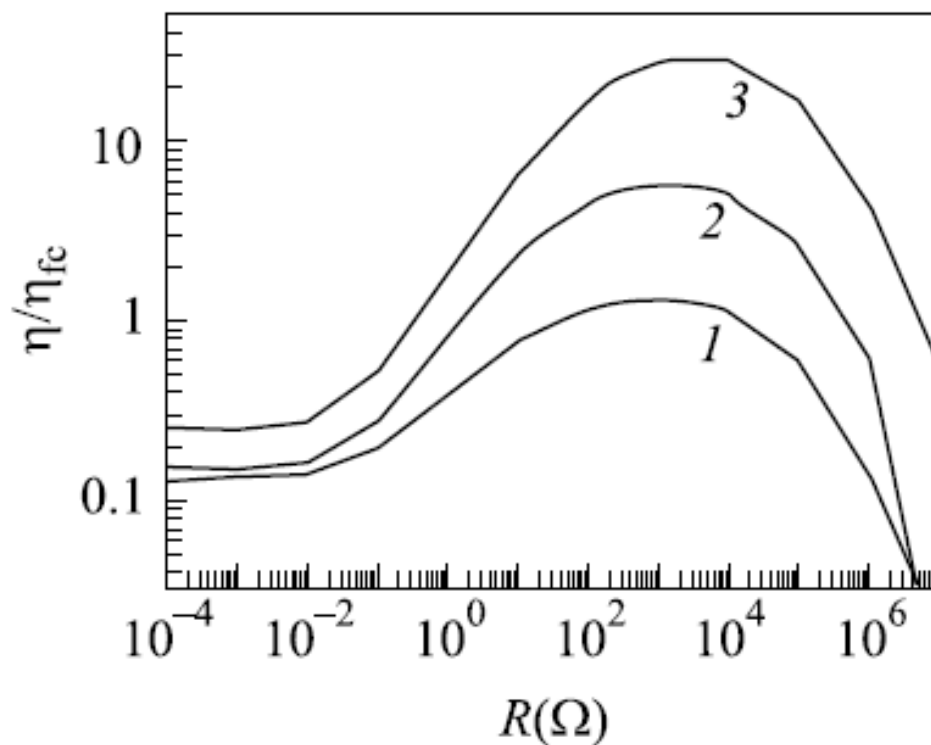


Рисунок. 2.6 Зависимость квантовой эффективности детектора от сопротивления СИН перехода при различных параметрах СИН перехода. Иллюстрация из работы [17].

Можно показать отличие токового отклика для болометрического режима и режима счетчика одиночных фотонов. На рисунке 2.7 приведен расчет зависимости ампер-ваттной чувствительности от частоты для случаев счетчика одиночных фотонов и болометрического режима в зависимости от частоты. Видно, что если для низких частот режим однофотонного счетчика демонстрирует достаточно высокую чувствительность, то с ростом частоты принимаемого электромагнитного излучения чувствительность сильно уменьшается.

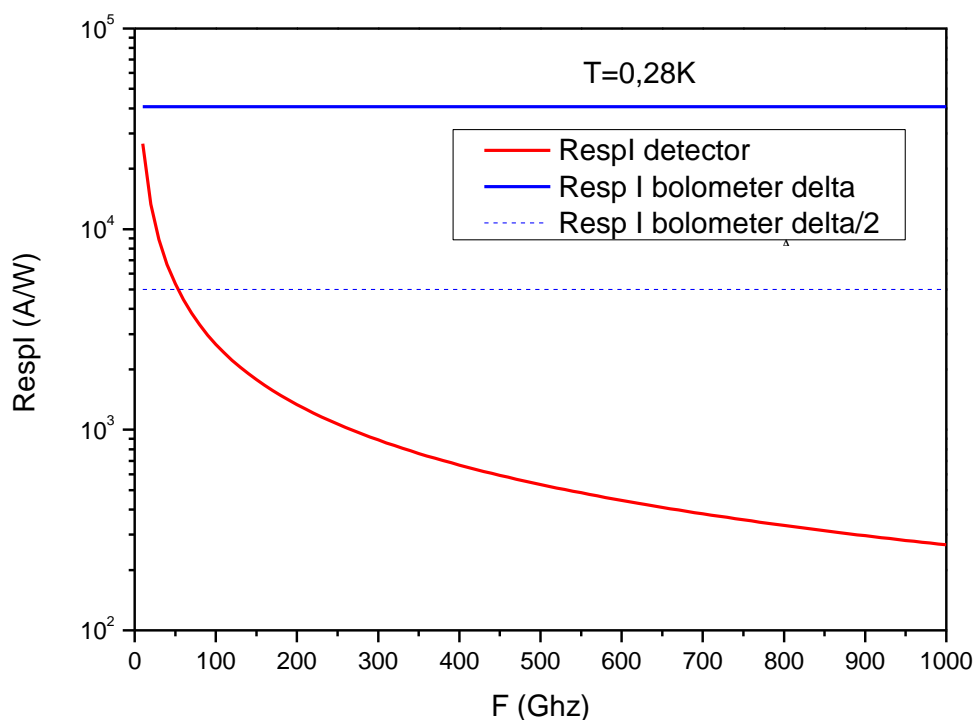


Рисунок. 2.7. Расчет зависимости ампер-ваттной чувствительности СИНИС структуры в зависимости от частоты поглощенного электромагнитного излучения для температуры 0.28 К. Синяя кривая – болометрический режим, $Respl=e/kT$ т.е. $4 \cdot 10^4$ А/Вт на 0.28 К. Пунктирная – болометрический на половине щели $Respl = e/0.5\Delta$ Красная кривая – режим фотонного счетчика $Respl=e/hF$ т.е. 762 А/Вт на 350 ГГц.

Можно перейти от отклика по току к более привычному отклику по напряжению. Максимальный отклик по напряжению наблюдается примерно на половине щелевого напряжения, кривая (рис. 2.8). На половине щели для СИН перехода с $R_n=1$ кОм имеем $R_d=35$ кОм при 0.28 К. Тогда отклик по напряжению для режима фотонного счетчика $RespV=Respl \cdot R_d=2.6 \cdot 10^7$ В/Вт. Для болометрического режима для той же температуре 0.28 К $RespV=Respl \cdot R_d=1.4 \cdot 10^9$ В/Вт

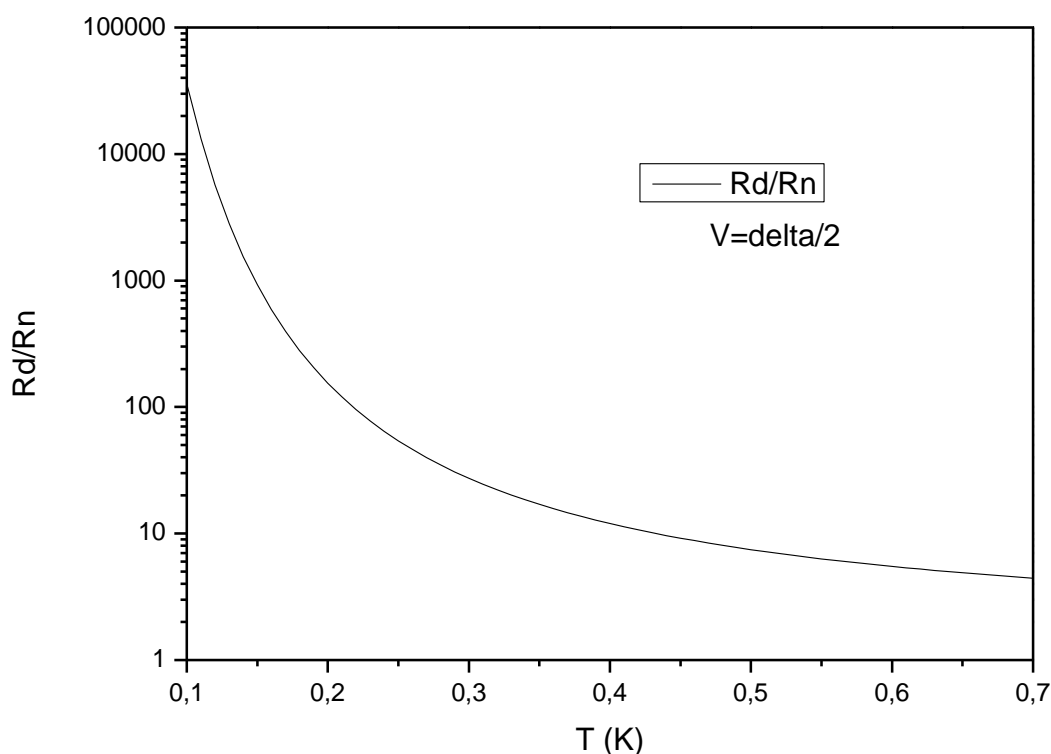


Рисунок 2.8. Дифференциальное сопротивление на половине щели в зависимости от температуры.

Электронное охлаждение при измерении отклика по напряжению заметного вклада не вносит, поскольку оно эффективно только вблизи щелевого напряжения. На рисунке. 2.9 приведена зависимость электронной температуры от напряжения смещения для наших параметров, рассчитанная аналогично зависимостям, приведенным в работе [77]. Мощность передаваемая от фоновой к электронной подсистеме составляет 0.12 пВт, а мощность охлаждения на половине щели менее 0.02 пВт. Вблизи щели мощность электронного охлаждения может составить уже существенные величины (P_{cool} до 1 пВт в идеале), но при этом охлаждение сразу выносит все возбужденные электроны, не давая им размножиться и термализоваться.

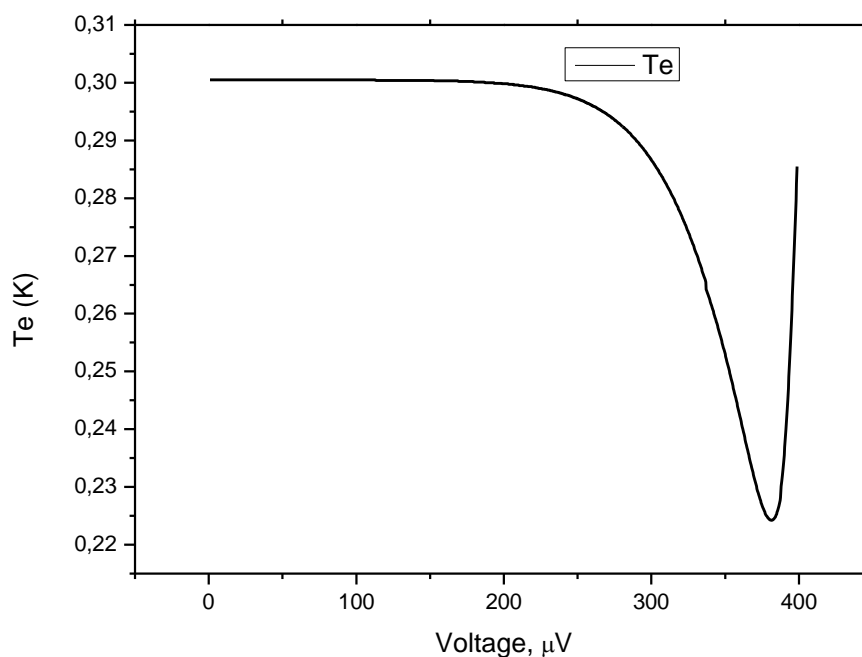


Рисунок 2.9. Расчет электронной температуры в зависимости от приложенного напряжения.

Для отклика можно воспользоваться упрощенным выражением [77]:

$$\frac{1}{S_I^{max}|_{\omega=0}} = 2 \frac{k_B T_e}{e} + 10 \frac{e R \Sigma \nu T^{9/2}}{\sqrt{k_B \Delta}} \quad (6)$$

На рисунке 2.10 приведены температурные зависимости токового отклика в модели квантового поглощения и в модели с уравнениями теплового баланса, рассчитанные по формуле 6. Видно, что ниже 0.5 К тепловой отклик мог бы быть выше в случае термализация высокоэнергичных электронов. Однако, в обычных СИНИС болометрах с абсорбером, изготовленном из того же алюминия с подавленной сверхпроводимостью и находящемуся непосредственно на подложке, помимо потерь за счет электронного охлаждения, существенными оказываются потери тепла в подложку и в сверхпроводящие электроды. В результате токовая квантовая эффективность оказывается в районе единицы. В случае использования в качестве абсорбера висящих пленок металла с высоким коэффициентом акустического рассогласования с материалом подложки и алюминиевыми электродами

возможно значительное повышение эффективности и достижение предельно возможных значений.

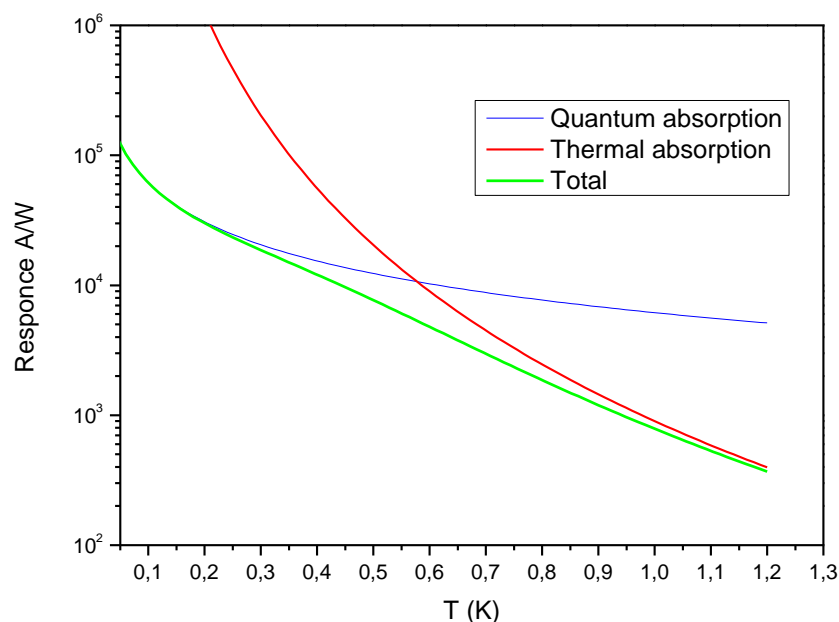


Рисунок 2.10. Чувствительность по току в зависимости от температуры в модели квантового поглощения и в модели с уравнениями теплового баланса.

При смещении по напряжению на половину щели алюминия квантовая эффективность $n = hf / (eV_A/2) = 13$, дифференциальное сопротивление $35R_n$. Если смещение в нуле, то квантовая эффективность будет нулевой, т.к. вероятность тока электронов в одну или другую сторону будет одинаковой и токовый отклик оказывается нулевым.

Режимы работы можно представить в виде таблицы для частоты сигнала 350 ГГц и температуры 280 мК (таблица 2.1). Максимум отклика по напряжению приведен на половине щели с дифференциальным сопротивлением 35 кОм для болометра с сопротивлением 1 кОм. На практике размножение горячих электронов идет только до уровня половины щели, где со стороны сверхпроводника находится расходящаяся плотность состояний и все возбужденные электроны туннелируют в систему считывания.

Таблица 2.1: Отклики по напряжению и току для различных режимов работы СИНИС болометра

Режим работы	Токовый отклик	dI/dP (А/Вт)	dV/dP (В/Вт)
Фотонный счетчик с эл. охлаждением	e/hf	762	$2.6 \cdot 10^7$
Практический болометр на пол щели $R_d=35$ кОм	$2/V_\Delta$	$5 \cdot 10^3$	$1.75 \cdot 10^8$
Квантовый болометр вблизи щели $R_d=2$ кОм	$e/2kT$	$2.2 \cdot 10^4$	$4.4 \cdot 10^7$
Электрический болометр на постоянном токе	$2k/(R_d e \Sigma v T^4)$	$3.7 \cdot 10^5$	$1.3 \cdot 10^{10}$

Наиболее реалистичны для практического болометра значения при смещении на половине щели с пренебрежимо малым электронным охлаждением. Идеализированный болометр не позволяет получить на СВЧ такие же высокие значения, которые реализуются при нагреве постоянным током по причине квантового механизма поглощения и отсутствия термализации возбуждений; отметим, что говорить об электронной температуре при воздействии СВЧ сигнала некорректно.

Таким образом, используемая модель [77] не учитывает квантовый характер поглощения, фонон-электронное взаимодействие, снижение квантовой эффективности за счет выноса возбуждений. Модель квантового [9] поглощения позволяет описать сильно неравновесные системы и предсказывает, что повысить отклик можно применив в качестве материала поглотителя материал с меньшим значением постоянной электрон-фононного взаимодействия, сильным электрон – электронным взаимодействием и акустически рассогласованный с алюминием, например, гафний [80]. Отклик может быть увеличен в случае акустического рассогласования металлической пленки абсорбера с материалом подложки, например, использование в качестве абсорбера «висящих» пленок металла и абсорбера поверх сверхпроводниковых контактов, а не под ними, как в существующих конструкциях [15].

2.2 Конструкция и технология изготовления СИНИС болометров с подвешенным абсорбером

Предлагается новый тип СИНИС болометра [A2, A4, A6], в котором мостик из нормального металла подвешивается между двумя сверхпроводниковыми электродами. Более традиционный подход использование структур на тонких подвешенных мембранах [81], но по сравнению с предлагаемой конструкцией он значительно более трудоёмкий.

В данной работе предлагается оригинальная конструкция СИНИС болометров, процесс изготовления которых существенно отличается, от ранее используемой техникой теневого напыления. Пленки могут быть нанесены различными способами, такими как термическое испарение, электронно-лучевое испарение или магнетронное распыление. Структура обоих слоев может быть сформирована с использованием простого процесса «взрывной» литографии.

На рисунке 2.11 показан схематический вид предлагаемой структуры: в первую очередь, мы наносим Ti/Au/Pd разводку с контактными площадками, далее в едином цикле напыления, без разрыва вакуума наносится трехслойная структура Al/оксид/нормальный металл. В конце процесса избирательно протравливается слой алюминия под абсорбером в области, определяемой окном в резисте. Алюминий под мостиком полностью удаляется травлением в слабом основании (например, Microposit MF CD 26 developer). Травление алюминия в кислотах не использовалось, так как такой процесс является неуправляемым и невоспроизводимым. Подробно весь техпроцесс описан в Приложении 1-технологическая карта. Как уже было указано выше, данная технология допускает достаточно широкие вариации по способам напыления пленок и типам литографии.

С уменьшением толщины абсорбера до 20 нм и ниже, проблемы сушки получившейся структуры после травления алюминия становятся решающими.

Сухое травление в плазме не применяется из-за её анизотропии и малых подтравов. Капиллярные силы при испарении жидкости после жидкостного травления приводят к провисанию мостов и их прилипанию к подложкам. Чтобы избежать этого мы использовали сушку в критической точке в жидком CO_2 . Особенно актуально это было для тонких и узких мостиков из меди. К сожалению, даже если после сушки данные мостики сохраняли форму, это не гарантирует, что они не провиснут позднее. Определение допустимых размеров висящих мостов было важной технологической частью данной работы.



Рисунок. 2.11. Схематическое изображение первоначальной конструкции болометра. Серый – кремниевая подложка, желтый – разводка и антенны из Ti/Au/Pd и антенны, синий – сверхпроводящий алюминий, красный – нормальный абсорбер (медь, палладий, или гафний), зеленый – область туннельного барьера, черный – окисел на поверхности алюминия.

В дальнейшем был добавлен еще один шаг - травление верхнего слоя нормального металла перед травлением алюминия, который позволил нам решить сразу несколько проблем: подавление сверхпроводимости нормальным металлом на границах СИН-переходов (подробно в разделе 3.4), а так же дал возможность легко менять размеры области СИН-перехода и получать переходы с субмикронными размерами [A5, A8]. Принципиальная схема болометра, изготовленного по такой технологии, приведена на рисунке 2.12. На рисунке 2.13 представлена схема травлений: травление нормального

металла (меди) производилось в азотной кислоте, разбавленной в пропорциях 1 к 30. Красной рамкой показана область, которая закрывалась резистом и предотвращала травление верхнего слоя меди; черной рамкой обозначена область, которая открывалась в резисте, и в которой происходило травление алюминия.



Рисунок. 2.12. Схематичное изображение конструкции болометра, окончательная версия. Серый – кремниевая подложка, желтый – разводка и антенны из Ti/Au/Pd, синий – сверхпроводящий алюминий, красный – нормальный абсорбер (медь, палладий, или гафний), зеленый – область туннельного барьера, черный – окисел на поверхности алюминия.

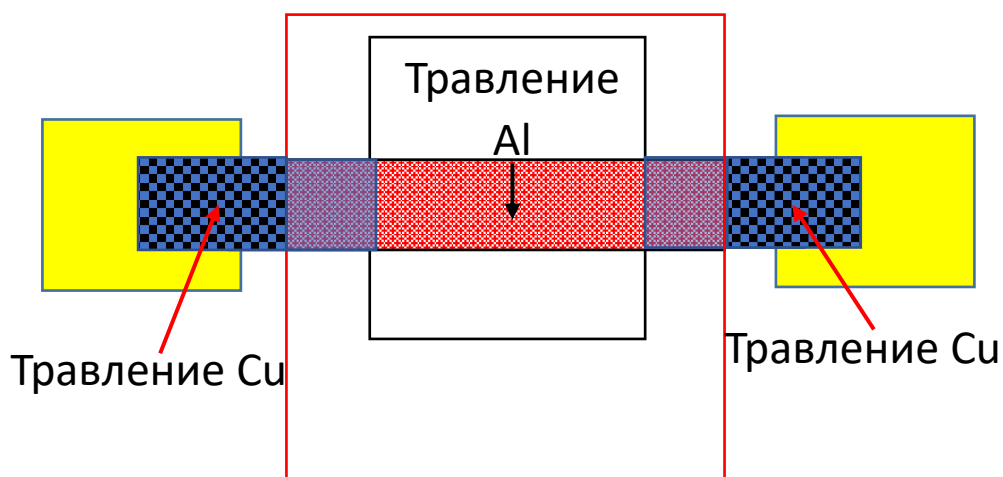


Рисунок. 2.13 Схема изготовления СИНИС структуры с двумя травлениями. Первым происходило травление меди вне прямоугольной области, закрытой резистом; вторым было травление алюминия в области, определяемой окном в сплошном слое резиста.

Результаты травления видны в сканирующем электронном микроскопе (рисунок 2.14). В качестве нормального металла исследовались палладий, медь, гафний. Первые попытки были с палладием, но качество туннельных переходов оказалось ниже, чем требовалось для нормальной работы СИНИС болометра. Создание высококачественных СИН переходов на основе палладия оказалось нетривиальной задачей и в данной работе от этого материала отказались. Медь удобный материал с точки зрения технологии, но, к сожалению, данный материал слишком пластичен, и мостики из меди в процессе сушки часто прилипают к подложке. Мостики из гафния более жесткие и лучше сохраняются в процессе сушки, к тому же обладают большим сопротивлением, но материал сложнее для напыления и последующей обработки.



Рисунок 2.14. СЭМ-изображение изготовленного образца, черно - белая картинка с электронного микроскопа была дополнительно раскрашена в соответствие со схематичным изображением на рисунке 2.11

2.3 Расчет характеристик планарных антенн.

В данной работе исследовались болометры, интегрированные в планарные антенны: логопериодическую и двойную щелевую антенны. По занимаемой площади логопериодическая антенна (в исследуемой конфигурации) несколько больше двойной щелевой, но в том и другом случае на тестовом чипе размещалось по три антенны: одна основная в центре чипа и две боковых. Очевидно, что для боковых антенн согласование с входящим излучением было в несколько раз хуже. Логопериодическая антенна в данном случае использовалась как представитель широкополосной антенны (0.1 – 1 ТГц). Исследования проводились на центральной частоте 350 ГГц. Антенна изготавливалась из трехслойной структуры 5 нм Ti/35 нм Au/ 10 нм Pd), две половинки антенны соединялись СИНИС болометром (рисунок 2.15).



Рисунок 2.15. Изображение в электронном микроскопе используемой логопериодической антенны с интегрированным болометром.

Было проведено численное моделирование основных параметров используемых антенн в программном пакете CST Studio 2016. Данные расчеты были проведены в первую очередь для определения параметров согласования используемых планарных антенн с изготовленными болометрами. Фотография моделируемого проекта представлена на рисунке 2.16. Моделировалась планарная антенна из золота толщиной 1 мкм на кремневой подложке толщиной 300 мкм.

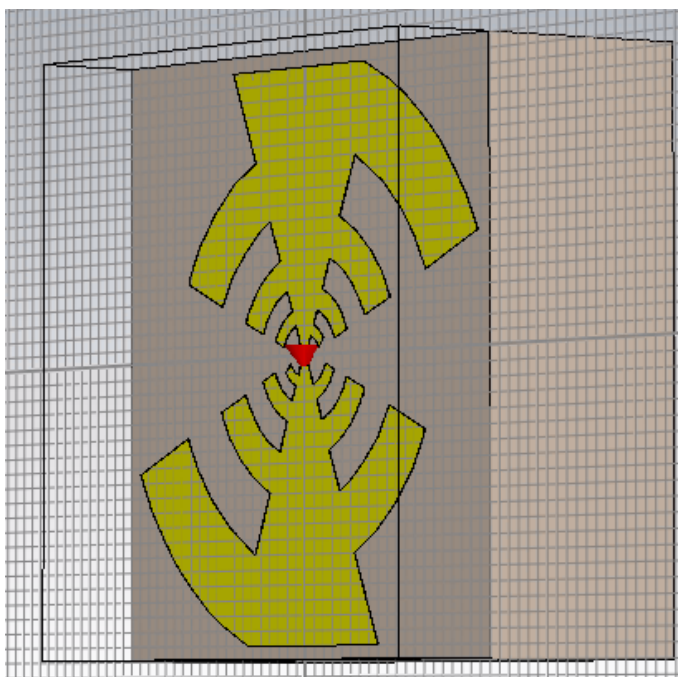


Рисунок 2.16 Вид моделируемой структуры в программе CST Studio.

Данная структура моделировалась с открытыми граничными условиями, источником излучения и одновременно приемником излучения был дискретный порт на месте болометра, с заданным импедансом 50 Ом. Для расчета использовался метод разбивки Time Domain Solver. Главной характеристикой в данном случае был параметр $s_{1,1}$, который показывает, какая часть излучения вернулась обратно в порт. Считая потери пренебрежимо малыми, все остальное антенна излучила в пространство; соответственно, по принципу обратимости, на прием её характеристики будут точно такими же.

По результатам моделирования в интересующей нас области частот 300 - 400 ГГц параметр $s_{1,1}$ меняется от -10 дБ до -5 дБ, не считая резонансов, связанных в первую очередь с размерами подложки, на которой

моделировалась данная антенна. Полученные результаты действительно подтверждают эффективность данной антенны в широкой полосе частот (рисунок 2.17). В случае моделирования антенны на полупространстве получается более гладкая зависимость. Оптимальный импеданс такой антенны находится в области 40 - 140 Ом, но на интересующей нас частоте около 350 ГГц составляет около 50 Ом.

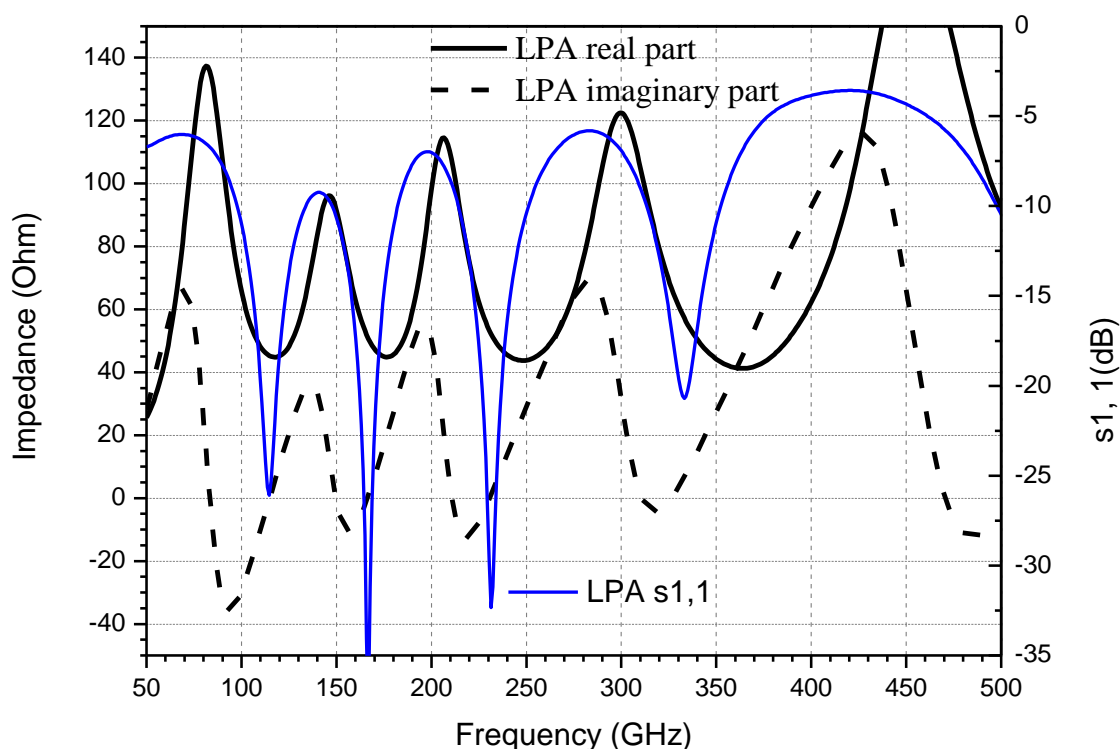


Рисунок 2.17. Расчет действительной и мнимой части импеданса и параметра $s_{1,1}$ для используемой логопериодической антенны.

Также было проведено численное моделирование основных характеристик двойной щелевой антенны с «неизлучающей» щелью, которая является модификацией широко известной двойной щелевой антенны [82] (рисунок 2.18). Как и в случае логопериодической антенны, моделировалась планарная антенна из золота толщиной 1 мкм на кремневой подложке толщиной 300 мкм.

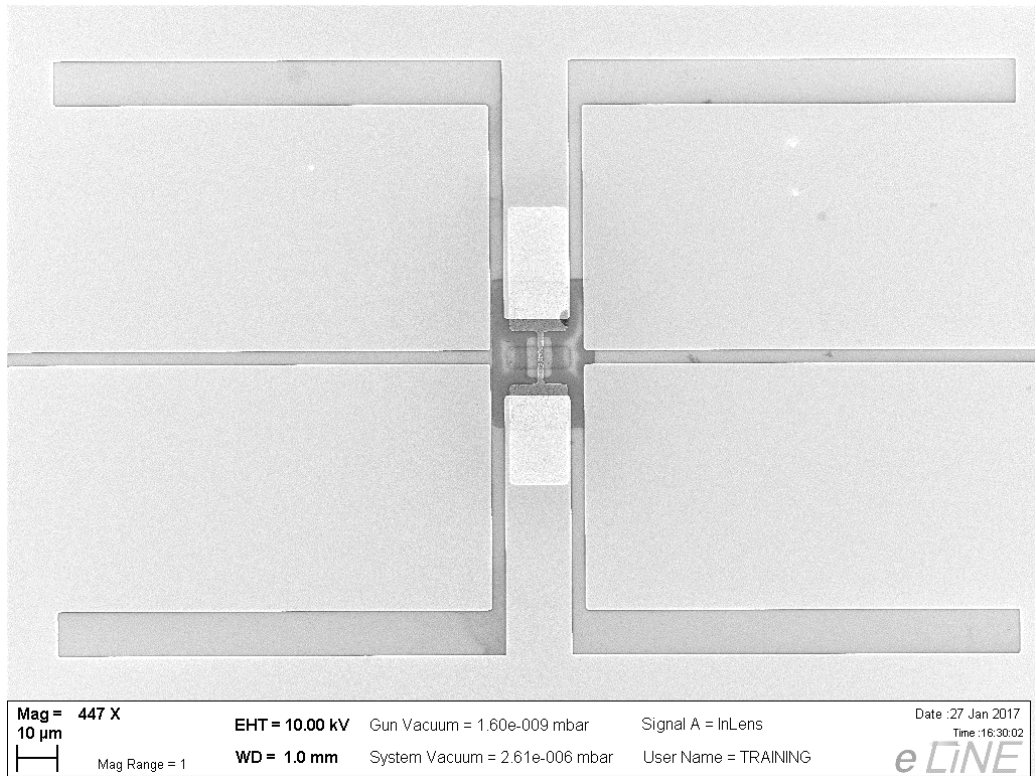


Рисунок 2.18. Вид двойной целевой антенны с интегрированным болометром.

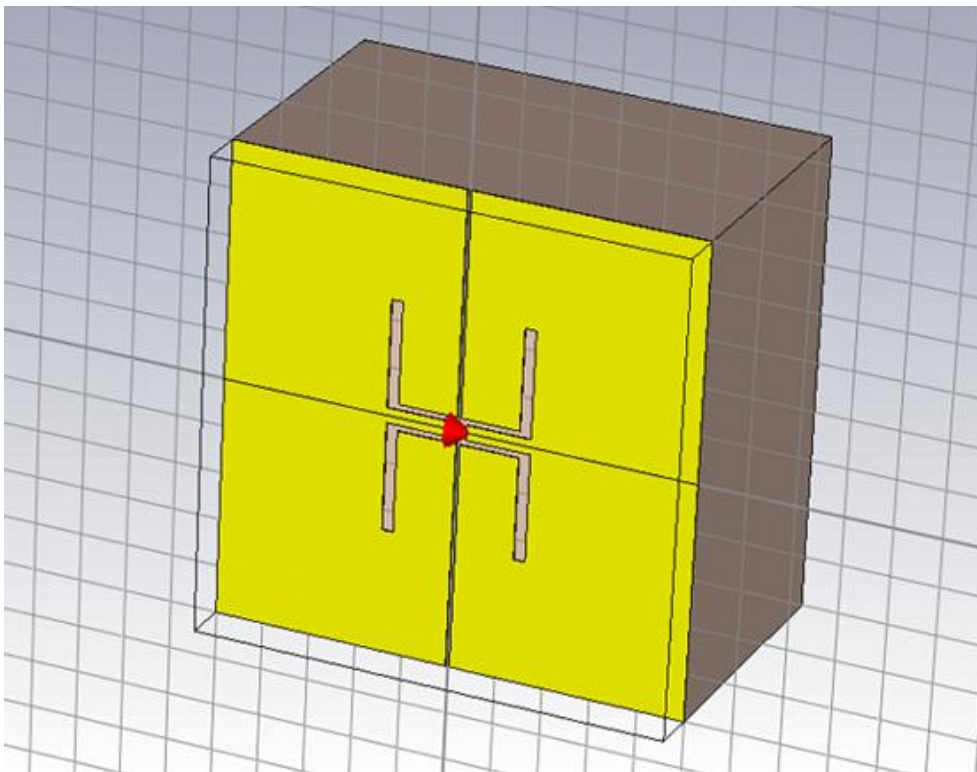


Рисунок 2.19. Вид моделируемой структуры в программе CST Studio.

Данная антенна изначально проектировалась на центральную частоту около 350 ГГц, что и подтверждает полученная зависимость $s_{1,1}$. Был произведен расчет импеданса как используемой конструкции (рисунок 2.19), так и классической, без дополнительных щелей. По результатам нашего численного моделирования (рисунок 2.20) первый резонанс был на низких частотах около 150 ГГц не попадает в полосу фильтров, так как мы работаем с фильтрами на центральную частоту 350 ГГц и шириной полосы примерно 70 ГГц. По результатам расчета импеданс антенны со щелью не имеет явного резонанса в этой области частот, в отличие от классической конструкции без щели, но мнимая часть импеданса стремится к нулю на частоте 360 ГГц. Данная особенность возникает из дополнительной щели, которая используется для интеграции болометра. Соответственно, действительная часть импеданса на этой частоте составляет 100 Ом. Типичное сопротивление абсорбера шириной 1 мкм, для нашего болометра составляет порядка 10 Ом для вариантов с медным поглотителем и до 50 Ом для образцов, где в качестве нормального материала использовался гафний.

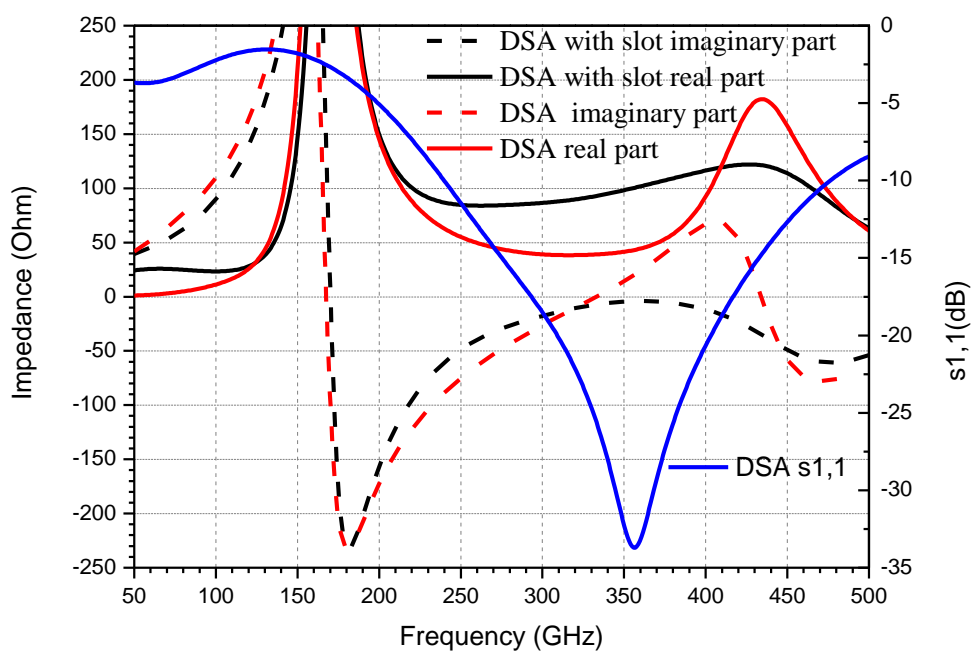


Рисунок 2.20. Расчет действительной и мнимой части импеданса и параметра $s_{1,1}$ используемой двойной щелевой антенны.

2.4 Вид изготовленных образцов, особенности конструкции и технологии

Первые успешные образцы болометров с подвешенным абсорбером были получены на основе СИНИС структур, где в качестве нормального металла использовался гафний. Критическим является соотношение длины подвешенной части мостика и его ширина. Под широкими мостиками сложно было протравить нижний слой алюминия, а узкие мостики легко протравливались и рвались. Оптимальные соотношения составили примерно 3-4 мкм в длину и шириной 1 мкм. Контроль проводился в сканирующем электронном микроскопе и оптических микроскопах. В обычном оптическом микроскопе была возможность контролировать только целостность мостика, а убедиться, что травление прошло полностью, удавалось только с помощью СЭМ (и только при установке образца под углом). Была использована система электронной литографии Raith e_LiNE в режиме электронного микроскопа. Проводились исследования изготовленных висящих мостов с установкой образцов под углами 75 и 85 градусов. При установке под меньшими углами никакой новой информации относительно горизонтального расположения получить не удавалось. При установке под углом 85 градусов в связи с очень маленькой глубиной резкости нормально сфокусироваться на мостик и получить информативное изображение также оказалось невозможным. Все изображения были получены при установке образца под углом 75 градусов к плоскости.

На рисунке 2.21 приведены изображения изготовленных болометров, интегрированных в двойную щелевую антенну с поглотителем из гафния. Видно, что пленка гафния достаточно гладкая и не пострадала при травлении нижнего слоя алюминия.

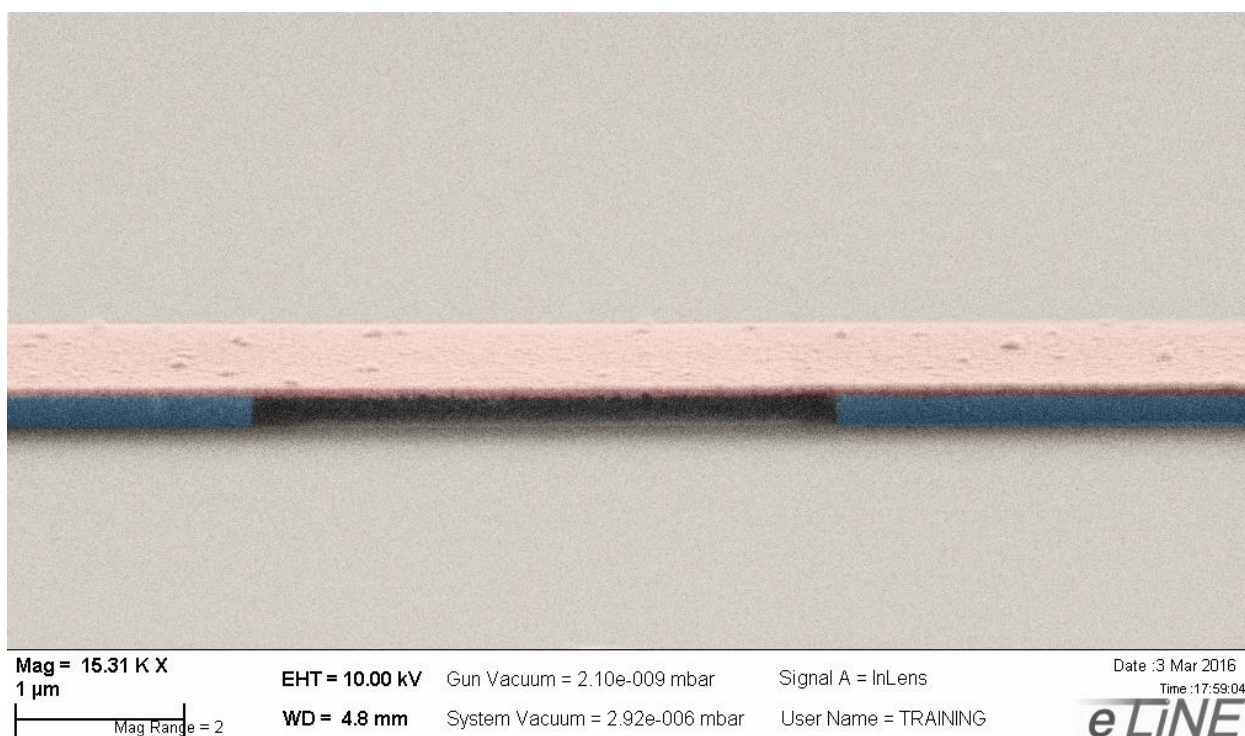


Рисунок 2.21. СЭМ-изображение изготовленной СИНИС структуры, сделанное под углом 75 градусов в разных масштабах. Толщина слоев Al (синий) – 80 нм, Al_2O_3 ~ 1 нм, Hf (красный) – 20 нм

Также были получены СЭМ изображения СИНИС структур с медным абсорбером. В случае меди мостики часто прилипали к подложке (рисунок 2.22). Но даже такие «прилипшие» мостики оказывались лучше, чем изначально лежащие на подложке. На данном изображении видны последствия второго травления: верхний слой меди стравлен в области контактных площадок. На этом изображении также видны тени от первого травления алюминия. Лучше результаты обоих травлений видны на изображении, снятом под прямым углом (рисунок 2.23). На этом же изображении видны следы области, которая была закрыта резинотом и определяла область, в которой будет стравлена медь.

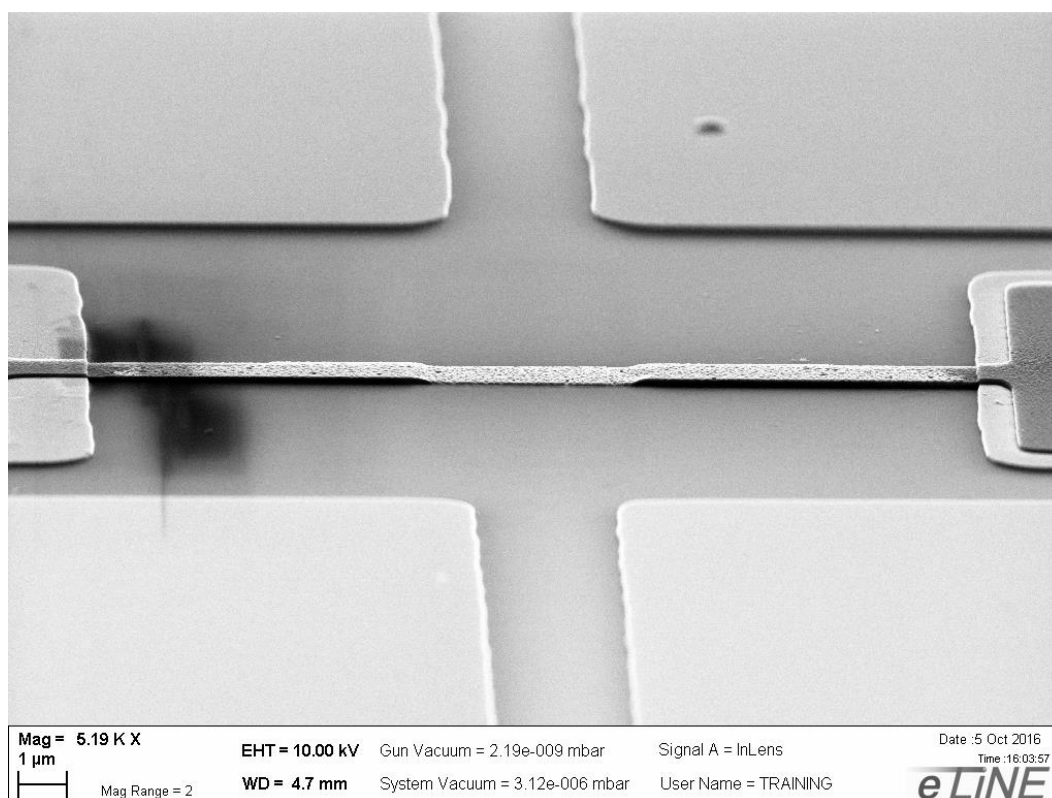


Рисунок 2.22. СЭМ-изображение изготовленной СИНИС структуры с медным абсорбером, снятое под углом 75 градусов.

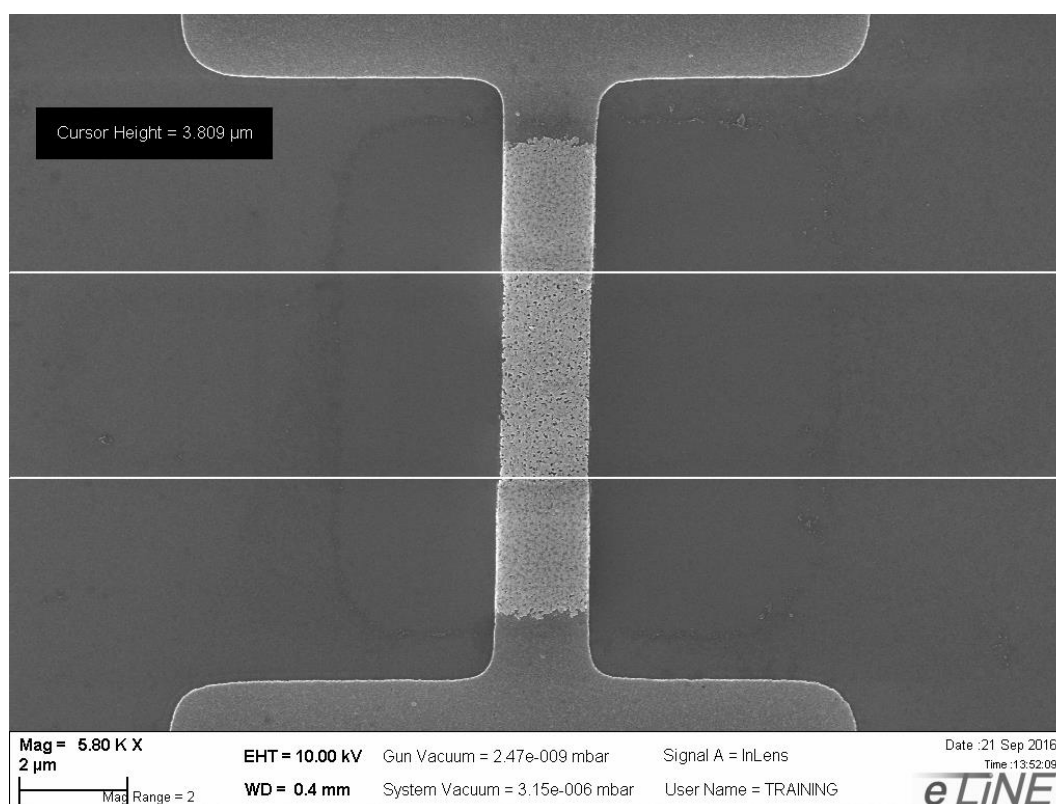


Рисунок 2.23. СЭМ-изображение изготовленной СИНИС структуры с медным абсорбером.

При обычном горизонтальном расположении образцов можно с высокой точностью измерить линейные размеры изготовленных структур. Например, на рисунке 2.23 длина висящей части мостика составила 3.8 мкм, а область травления по дизайну была 4 мкм. То есть, можно говорить о хорошем соответствии заложенных размеров в дизайне структур и размеров, полученных в изготовленных образцах. Учитывая, что в технологии достаточно много моментов, определяющих отклонения от изначально заложенных размеров, такие как перезасветка, перепроявка резиста, перетравы и недотравы, хорошее соответствие итоговых размеров дизайну позволяет сделать вывод о воспроизводимости разработанной технологии и возможности создания болометров с контролируемыми параметрами.

ГЛАВА 3: МЕТОДИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ИЗМЕРЕНИЯ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

3.1 Схема измерений на постоянном току

Измерения проводились по четырехзондовой схеме в режиме задания тока. Для усиления сигнала использовались операционные усилители, размещенные при комнатной температуре. Вся схема, включая балластные сопротивления от 200 кОм до 10 ГОм, усилители по каналам тока и напряжения, а также коммутатор для выбора измерительных каналов, были собраны в экранированном корпусе, который имеет общую землю с корпусом криостата. В различных сериях измерений использовались операционные усилители AD743 (с JFET транзисторами) и операционные усилители на полевых транзисторах (MOSFET) OPA111 с параметрами, приведенными в таблице 3.1. Сопротивление болометра в рабочей точке при температурах около 300 мК было порядка 1 МОм; сопротивление возрастает до 30 МОм при температуре 100 мК.

Таблица 3.1: Основные характеристики используемых операционных усилителей.

	OPA111	AD743
Входной шум по напряжению	15 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ на 100 Гц	3.6 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ на 100 Гц
Входной шум по току	0.5 фА/ $\sqrt{\text{Гц}}$ от 0.1 Гц до 20кГц	6.9 фА/ $\sqrt{\text{Гц}}$ на 100Гц
Оптимальное сопротивление	30 МОм	520 кОм

Симметричная схема смещения по току реализована при помощи двух сопротивлений 820 к Ω , расположенных на разъёме в «холодной» части криостата, последовательно соединенных с СИНИС структурой. Оптимальное входное сопротивление с учетом этих параметров составило порядка

нескольких МОм. Также эти резисторы играют роль защитных от различных наводок и шумом. Принципиальная схема измерений показана на рисунке 3.1.

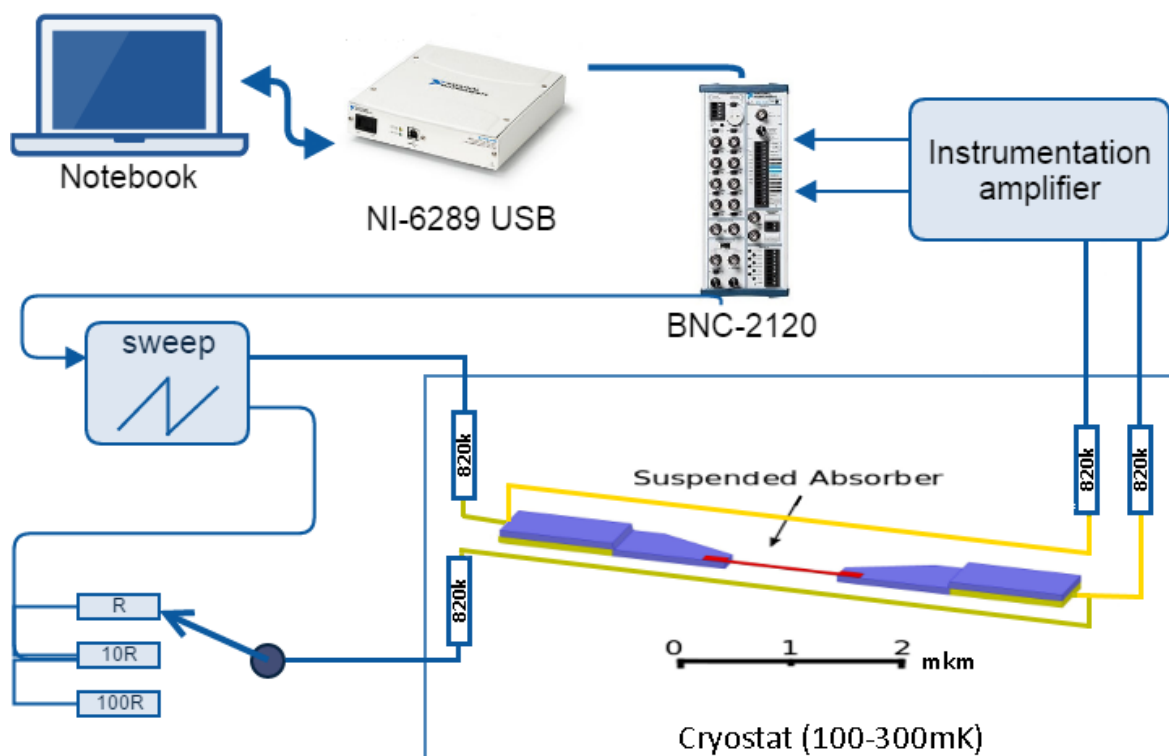


Рисунок. 3.1. Измерительная схема для снятия характеристик с СИНИС структуры.

Данная схема хорошо себя зарекомендовала при работе с болометрами и применяется нами для снятия ВАХ СИНИС структур. Сканирующее напряжение, задающие ток, задавалось с ЦАП с управляющего компьютера. Соединение теплого блока усилителей с коммутационной платой BNC-2120 осуществлялось с помощью стандартных экранированных коаксиальных кабелей. Все теплые усилители и система задания тока устанавливаются в экранированном корпусе непосредственно на разъём криостата. От разъёма криостата к холодной плате криостата идут витые пары тонких проводов из константана или манганина. Провода проложены внутри криостата и жестко закреплены для минимизации «микрофонных» шумов. Корпус криостата и все тепловые экраны представляют собой экраны от электромагнитных наводок. На холодной плате криостата витая пара соединена с «холодными» резисторами на разъёме держателя образцов.

Электромагнитные шумы, в конечном счете, одинаково воздействуют на оба провода – и на выходе дифференциального усилителя с хорошо сбалансированным фактором коэффициента ослабления синфазного сигнала можно устранить большую часть нежелательных шумов.

Для сбора и обработки информации при проведении экспериментов использовались специализированные АЦП-ЦАП платы производства National Instruments, USA. Подробные спецификации данной платы можно найти на официальном сайте производителя [83], важно лишь отметить, что точности измерений и точности задания напряжения встроенным АЦП более чем достаточно для представленных в работе измерений. Данные платы работали под управлением компьютера и специализированного программного обеспечения IRTECON [84]. Это многофункциональная автоматизированная система для измерения сложных сверхпроводниковых структур, разработанная в ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН Андреем Ермаковым и применяющаяся сейчас во многих научных группах, как в России, так и за рубежом. Вид рабочего интерфейса приведен на рисунке 3.2.

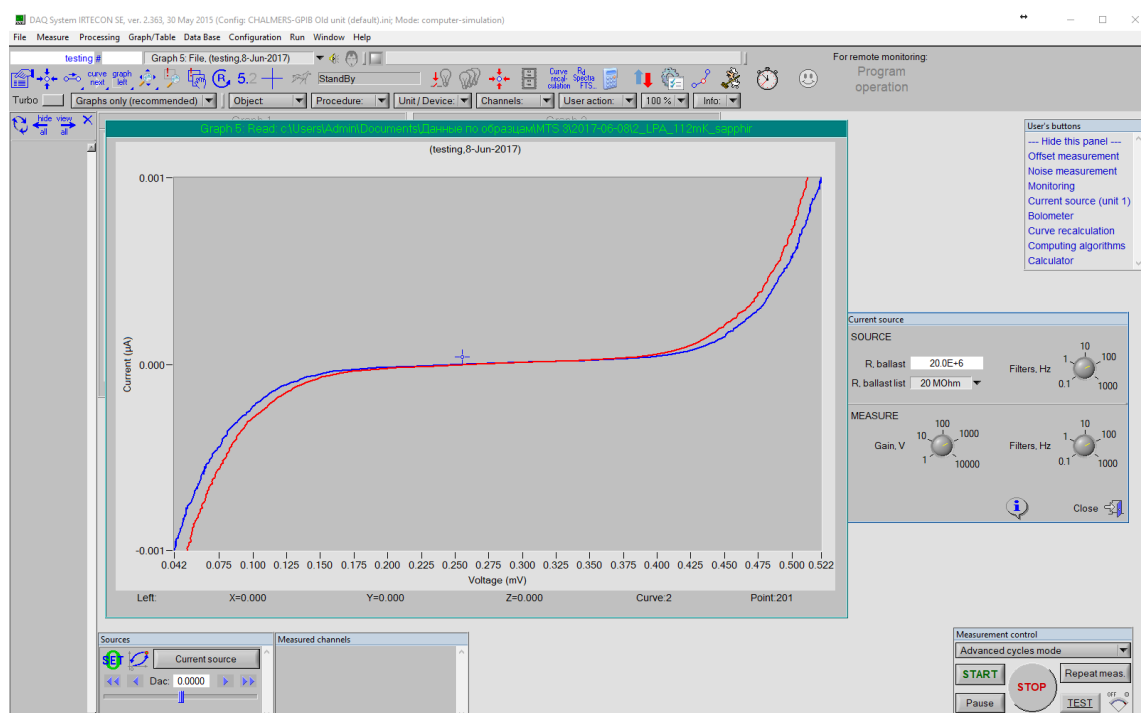


Рисунок. 3.2. Вид основного интерфейса программного пакета IRTECON.

3.2 Методика низкотемпературных измерений

Для измерения при низких температурах использовались два основных типа криостатов: криостаты растворения $^3\text{He}/^4\text{He}$ с минимально достижимой температурой 75 мК и криостаты с откачкой паров ^3He с рабочей температурой 280 мК. Основные результаты были получены на оригинальном криостате - вставке в транспортный гелиевый дьюар, разработанном В.С. Эдельманом и расположенном в Институте физических проблем имени П. Л. Капицы РАН [85]. Внешний вид закрытого криостата приведен на рисунке 3.3. Эта установка поддерживает температуру образца в течение 4 - 5 часов на уровне <0.1 К со стабильностью порядка 1 мК при полном отсутствии вибраций, которые неизбежны в случае использования криостатов на основе импульсной трубы. Такая конструкция криогенной системы позволяет снизить вибрационные и электрические шумы в десятки раз. Чип в держателе с СИНИС структурами размещался в верхней части криостата внутри медного экрана с температурой 0.3 К. Данный криостат был оборудован для одновременного измерения трех образцов.

Часть измерений была проведена в криостате Oxford – Helium 3 Refrigerator – Heliox AC–V, оснащенный для предварительного охлаждения криорефрижератором замкнутого цикла, показанном на рисунке 3.4.

Основные характеристики – Heliox AC–V:

- Собственный криогенный цикл с использованием адиабатического расширения ^3He .
- Широкий диапазон рабочих температур от 270 мК до 300 К.
- Наличие крио охладителя замкнутого цикла на пульсационных трубках, позволяющего избавиться от необходимости заливать жидкий гелий.
- Большой объем для загрузки образцов: до 147 мм в диаметре и высотой 100 мм. [86]

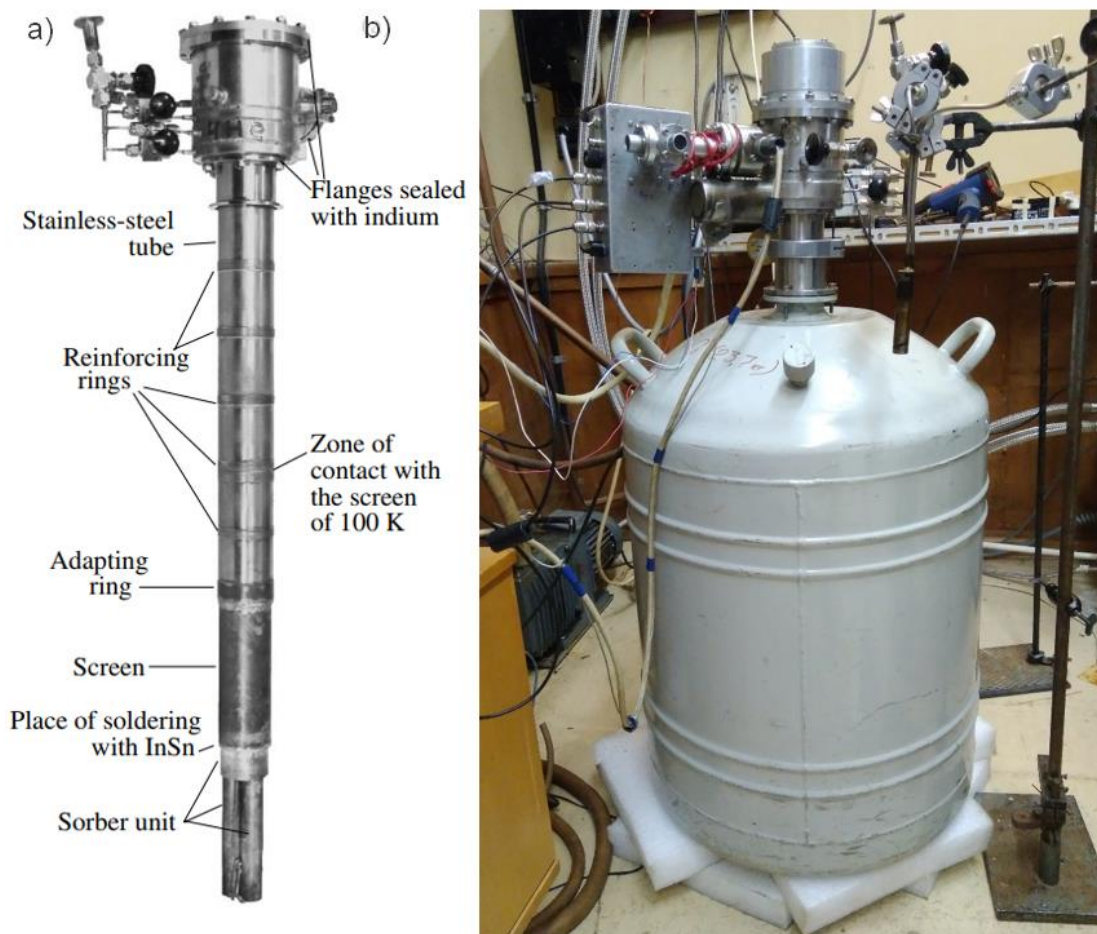


Рисунок 3.3. Внешний вид микрокриостата растворения конструкции В.С. Эдельмана: а) Вид криостата – вставки, рисунок из работы [85], б) Вид криостата в транспортном гелиевом дьюаре.

Основной недостаток данных видов криостатов напрямую связан с их достоинством – работа компрессора импульсной трубы создает большую электромагнитную наводку и много вибраций. Реальные измерения высокочувствительных устройств этого типа криостатов возможно только при выключенном компрессоре. Но какие-либо длительные измерения в таком режиме проводить невозможно из-за неизбежного дрейфа температур.



Рисунок 3.4. Внешний вид криостата фирмы Oxford – Heliox AC-V.

В данном криостате образец охлаждался до 280 мК и при этой температуре производились основные измерения. Длительность одного цикла достигала 6 часов. После того, как весь гелий-3 оказывался в сорбере, охлаждение прекращалось и требовалась регенерация криостата.

Как уже упоминалось в главе 2, образцы изготавливались на подложках размером 7 на 7 мм с 16 контактными площадками по периметру. Это позволило использовать существующие держатели образцов, обеспечивающими соединения со всеми 16 контактными площадками (рисунок 3.5). Для образцов использовались держатели «холодной» части криостата двух типов:

- для проведения электрических измерений
- для проведения оптических измерений.

Для проведения измерений без облучения внешним электромагнитным излучением использовались глухие держатели образцов, на которых чип располагался на медной пластине. Для проведения оптических измерений использовались держатели с линзой. В этом случае подложка из кремния с образцом закреплялась на сапфировой линзе. Держатели были изготовлены из меди и прижимались к холодной ступени несколькими винтами для надежного крепления и хорошего теплопровода. В отличие от ранее используемых алюминиевых и бакелитовых держателей, высокая теплопроводность меди обеспечивает хорошее охлаждение образцов и позволяет проводить измерения с внешним магнитным полем. В держателе электрический контакт с контактными площадками на образце осуществлялся с помощью пружинных контакт-зондов (pogo-pins), обеспечивающих надежное соединение при низких температурах и позволяющих избежать пайки проводов от измерительной системы к образцу. В этом случае, в отличие от варианта с бондированием, возможна оперативная замена образцов в держателе за короткое время и без использования специального оборудования.



Рисунок 3.5. Общий вид держатель для измерений в криостате с 25 контактными разъёмом с распаянными на нем защитными резисторами.

3.3 Измерения основных характеристик без внешнего нагрева

Все основные результаты получены на основе измеренных вольт-амперных характеристик СИНИС структуры, которые измерялись на постоянном токе в режиме задания тока. Диапазон тока определялся выбором соответствующего последовательного сопротивления в диапазоне 200 кОм – 10 ГОм, которые находились при комнатной температуре. Типичная вольт – амперная характеристика и зависимость дифференциального сопротивления от напряжения, измеренные при температуре 300 мК, представлены на рисунке 3.6.

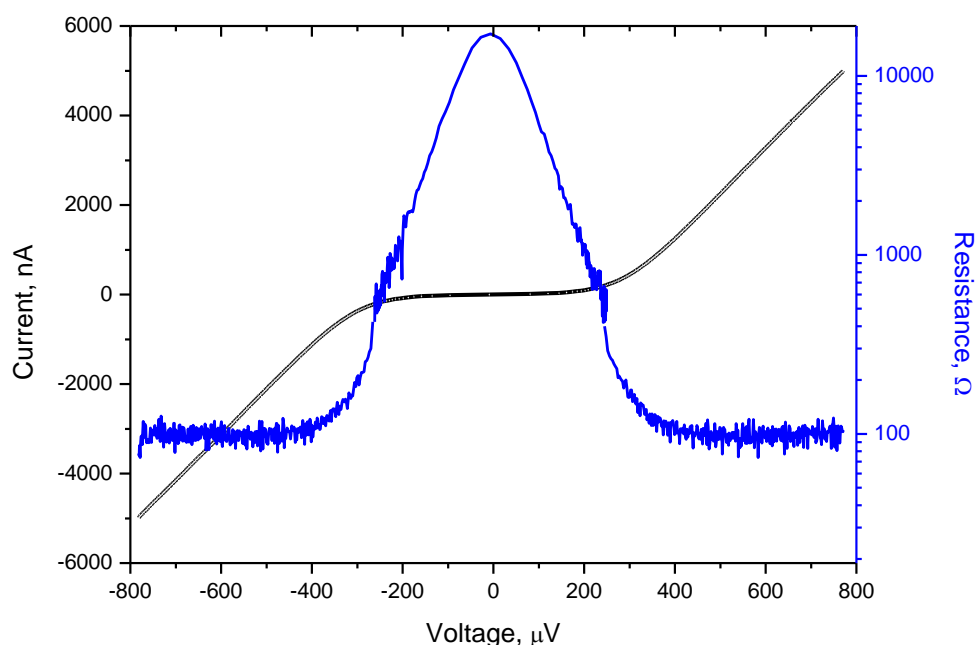


Рисунок 3.6. ВАХ и дифференциальное сопротивление при 300 мК.

Такие измерения очень чувствительны к значению сопротивления, через которое задается ток. При использовании сопротивления 10 ГОм уровень шумов ниже, но диапазон токов мал. Уменьшение задающего сопротивления смещения приводит к подавлению максимального динамического сопротивления с 300 кОм до 20 кОм за счет влияния наводок. Соответственно, максимальное дифференциальное сопротивление снималось при минимальном размахе по току, а нормальное сопротивление - при большем

размахе, чтобы дойти по напряжению как минимум до щели сверхпроводника; для двойной структуры СИНИС на основе алюминия данное значение составляет 400 мкВ. На рисунке 3.6 кривая дифференциального сопротивления состоит из двух частей, измеренных при большом и минимальном диапазоне развертки по току. Отношение максимального дифференциального сопротивления к нормальному является важным показателем качества переходов и реальной электронной температуры в СИНИС структуре. При 300 мК $R_n/R_d = 200$ для структуры большой площади с небольшим нормальным сопротивлением порядка 100 Ом.

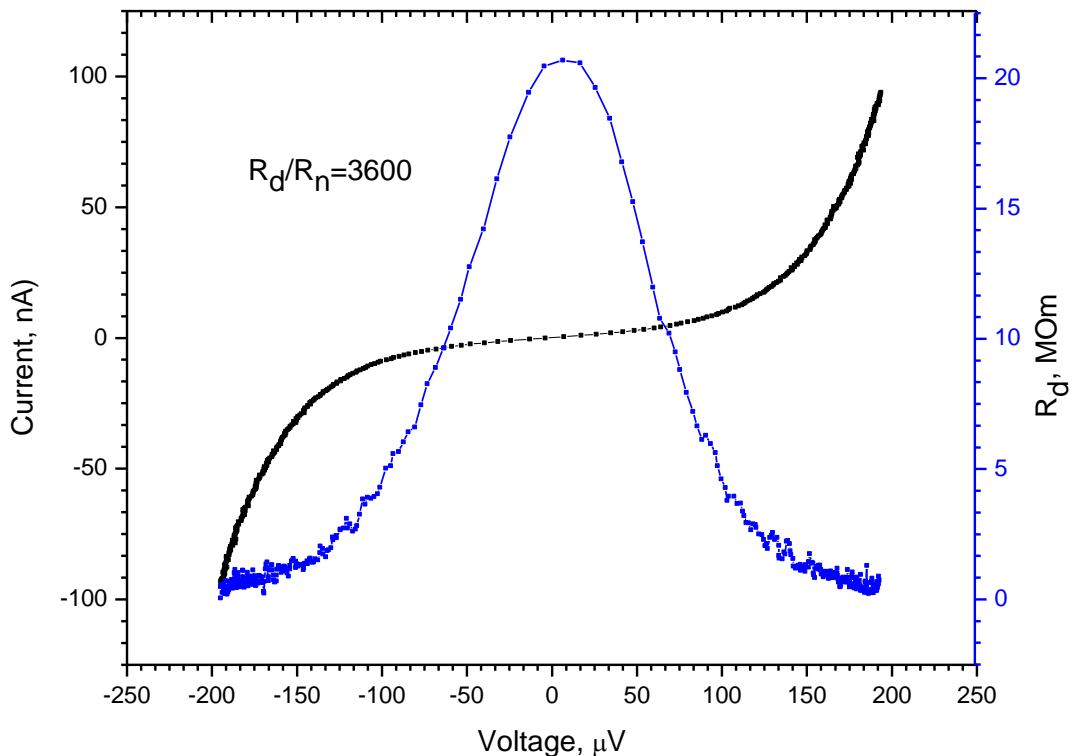


Рисунок 3.7. ВАХ и дифференциальное сопротивление при 120 мК.

При понижении температуры дифференциальное сопротивление растет, пропорционально увеличивается и отношение сопротивлений R_d/R_n . Для другой структуры с маленькими по площади переходами при 120 мК максимальное дифференциальное сопротивление выросло до 20 М Ω при нормальном сопротивлении 5.5 к Ω и R_n/R_d составило 3600. Данное значение все равно сильно ниже предельных оценок для идеального СИН перехода в

разделе 2.1 и соответствует электронной температуре 250 мК. Несмотря на наличие перегрева при измерении данных СИНИС структур достигнутое отношение сопротивлений свидетельствует о высоком качестве изготовленных переходов и пригодности в целом такой технологии для изготовления высококачественных СИН переходов.

Была исследована температурная зависимость дифференциального сопротивления в диапазоне температур 133 - 480 мК (рисунок 3.8), асимптотическое сопротивление соответствует двум СИН переходам, участку абсорбера и подводящим проводам. В данном случае использовались различные диапазоны задания тока для того, чтобы максимально качественно промерить область с максимальным дифференциальным сопротивлением. На данном графике видно, как сильно и нелинейно увеличивается дифференциальное сопротивление при уменьшении температуры. Такая зависимость согласуется с теоретическими оценками в главе 2.1.

На данной кривой также виден характерный провал дифференциального сопротивления около нулевого напряжения при низких температурах, ниже примерно 150 мК. Данный эффект по нашим наблюдениям указывает на присутствие андреевского отражения в таких структурах, данный вопрос будет подробнее обсужден в параграфе 3.5.

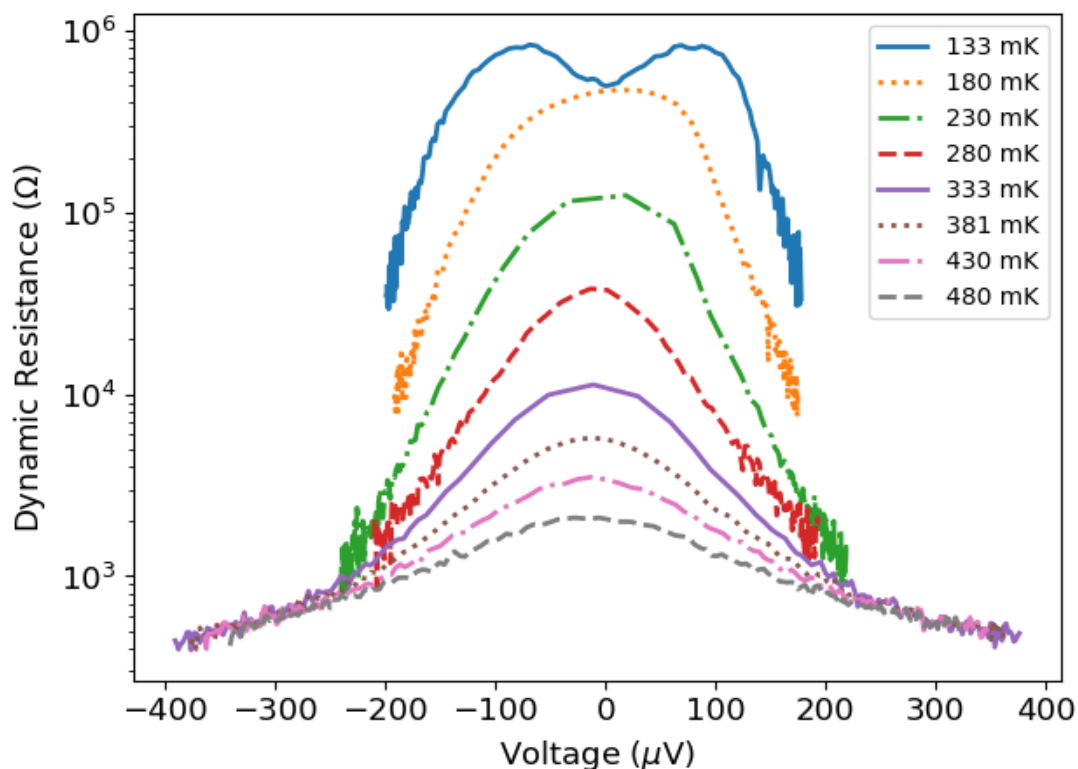


Рисунок 3.8. Температурные зависимости дифференциальное сопротивление сопротивления в диапазоне 133-480 мК

3.4 Проблема подавления щели

В первых партиях образцов мы столкнулись с проблемой несоответствия значений наблюдаемой энергетической щели сверхпроводника (алюминия) с табличными значениями. Наблюдалось также общее низкое «качество» переходов. Эта проблема была связана с обратным эффектом близости сверхпроводниковых контактов и разводки нормального металла. Такой механизм хорошо известен, но не был достаточно хорошо изучен и освещен для СИНИС структур.

Для решения данной проблемы была доработана технология и добавлено травление верхнего слоя нормального металла с целью отодвинуть область СИН перехода от разводки из нормального металла (золота). На рисунке 3.9 приведены кривые нормированного на нормальное сопротивление дифференциального сопротивления, иллюстрирующие энергетическую щель для двух конструкций: изначальной и доработанной. В данном случае щель

двойная так как мы рассматриваем два последовательных перехода – СИНИС структуру. Как видно из приведенного графика в доработанной конструкции щель в сверхпроводнике строго соответствует теории. Все дальнейшие измерения и результаты получены именно для конструкции с дополнительным травлением.

Вопрос подавления сверхпроводящей щели разводкой из нормального металла при температуре 280 мК был более подробно исследован в работе [A11] и сделан вывод, что ловушка из нормального металла с непосредственным контактом со сверхпроводником не способствует охлаждению сверхпроводящего электрода, но при этом может заметно подавить щель сверхпроводника, как за счет обратного эффекта близости, так и за счет джоулева разогрева малого объема сверхпроводника. В работе была исследована аналогичная серия образцов с подводными электродами из золота. В этом случае при контакте сверхпроводящего алюминия с золотом на границе образуется потенциальный барьер, который препятствует подавлению энергетической щели сверхпроводника, однако такая ловушка не улучшает теплоотвод.

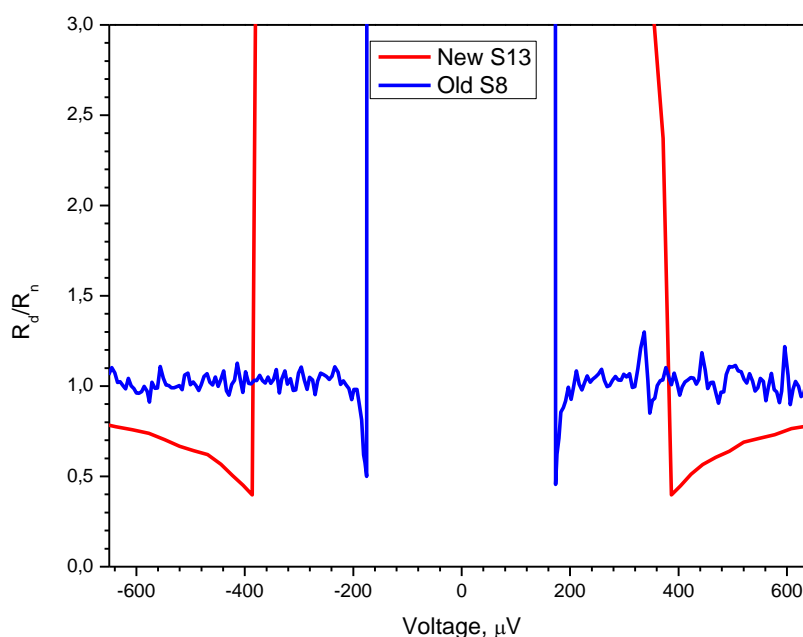


Рисунок 3.9. Энергетическая щель для двух различных конструкций СИНИС болометров с дополнительным травлением (S13) и без (S8).

3.5 Эффект андреевского отражения

Андреевское отражение — процесс отражения электрона, падающего из нормального металла на границу со сверхпроводником, при котором электрон превращается в дырку, меняет обе компоненты скорости на противоположные (при ретро-отражении), а в сверхпроводник попадает два электрона (куперовская пара). Назван этот эффект по имени Александра Фёдоровича Андреева, теоретически предсказавшего такой тип отражения в 1964 году [53]. Известно, что такой же эффект может иметь место и в СИН переходах, несмотря на наличие слоя изолятора между сверхпроводником и нормальным металлом (рис. 3.10) [87]. Физически это означает, что на границе налетающая квазичастица находит себе парную частицу и вместе с ней переходит в конденсат, а образующаяся дырка возвращается в нормальный металл.

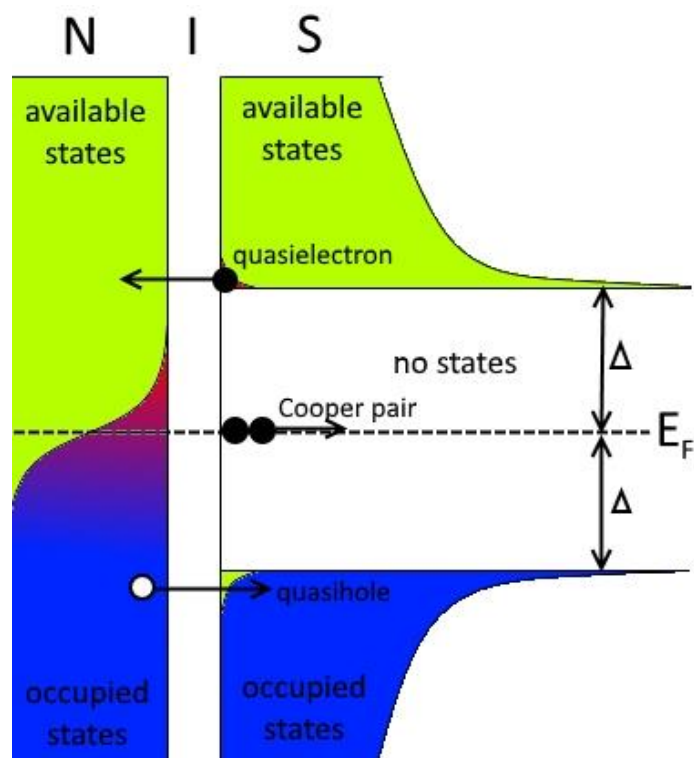


Рисунок 3.10. Энергетическая диаграмма СИН перехода со схематичным изображением процессов андреевского отражения.

Для исследования этого эффекта была снята зависимость дифференциального сопротивления от магнитного поля (рисунок 3.11), для

этого криостат помещался в поле электромагнита. Измерения проводились с использованием погружного криостата растворения, в котором образцы размещаются на держателе, охлаждаемом до температуры ниже 0.1 К. Их можно помещать как горизонтально, так и вертикально. При этом вертикальное магнитное поле, создаваемое соленоидом, установленным снаружи криостата, будет направлено примерно по нормали или по касательной к плоскости туннельного перехода. Для изменения направления поля можно наклонять соленоид в пределах $\pm 10^\circ$.

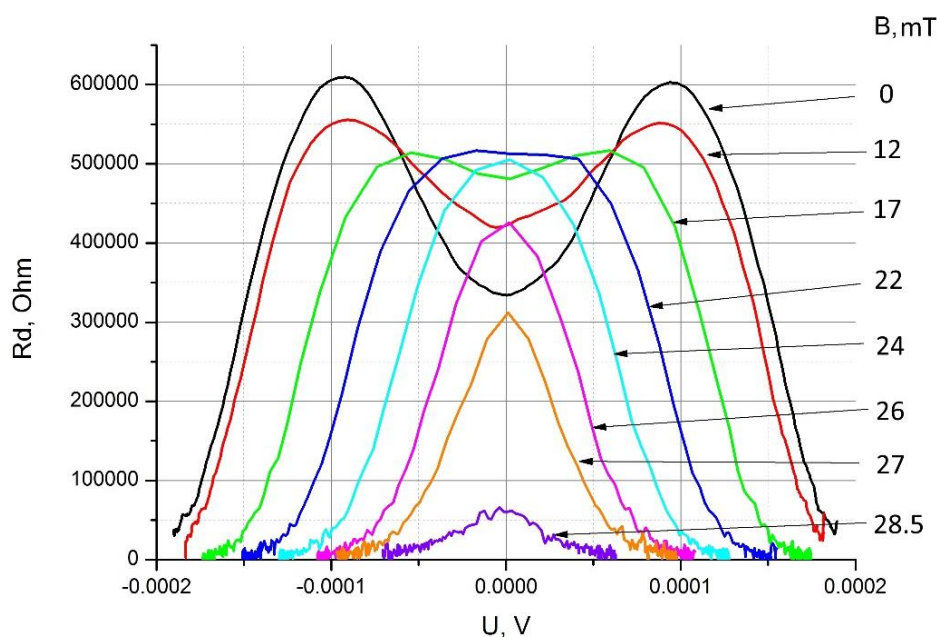


Рисунок 3.11. Дифференциальные сопротивления при нескольких значениях внешнего продольного магнитного поля.

Отметим, что при магнитных полях 0.24 мТл исчезает anomальная проводимость около нуля напряжений. Таким образом, нами экспериментально установлено, что умеренное магнитное поле, приложенное в плоскости планарной туннельной СИН структуры, подавляет ее проводимость при малых напряжениях и низких температурах. Этот мезоскопический эффект связан с расфазированием куперовской пары в нормальном металле

3.6 Отклик на нагрев постоянным током

Для оценки максимального возможного оптического отклика изготовленных структур был исследован отклик на нагрев болометра постоянным током. Данные измерения проводились в двойных СИНИС структурах с общим слоем нормального металла (рисунок 3.12). В данной структуре есть возможность задания постоянного тока через одну пару переходов (внешних) и измерение характеристик другой пары, в зависимости от приложенного тока; схема таких измерений приведена на рисунке 3.13. Возможны различные конфигурации измерений в данной структуре: нагрев внутренней парой переходов, измерения внешней; нагрев с одного края, измерения с другого; нагрев через первый и третий и измерения через второй и четвертый, но каноничной схемой таких измерений является нагрев внешними переходами всего объёма нормального металла и измерения центральными.

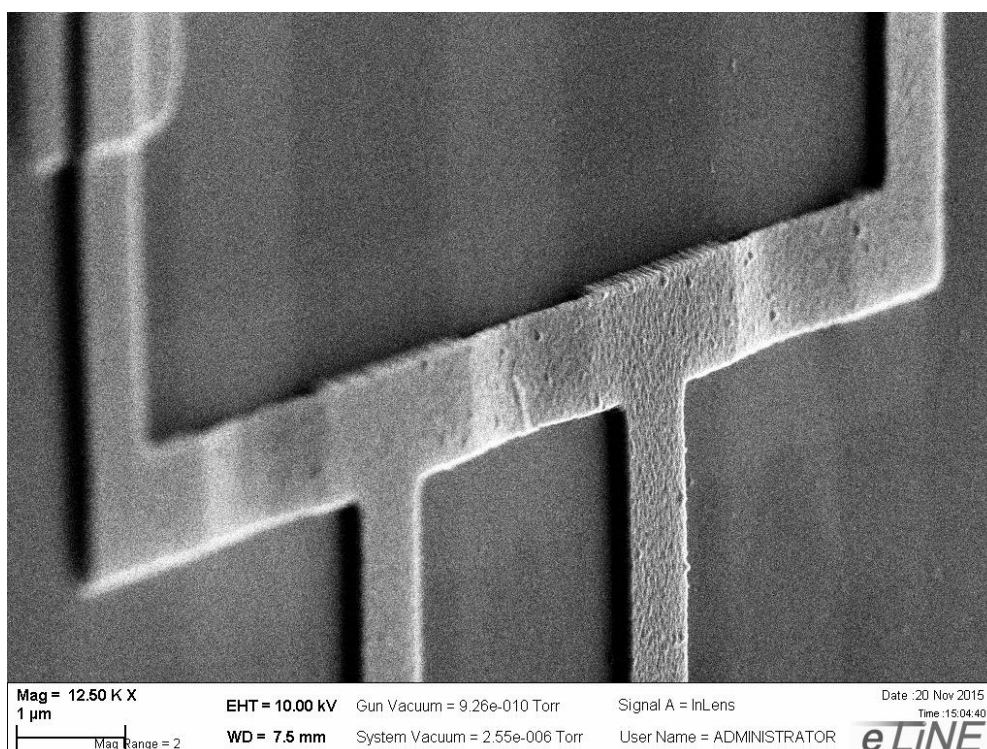


Рисунок 3.12. СЭМ-изображение структуры для измерений отклика на нагрев постоянным током.

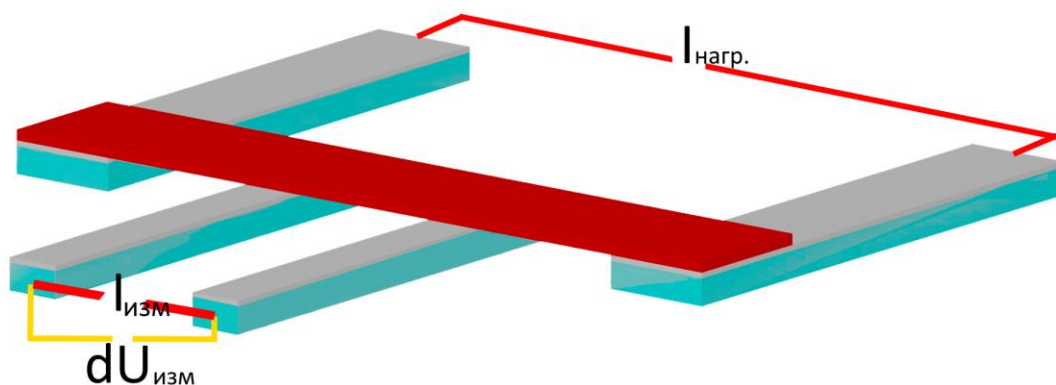


Рисунок 3.13. Схема измерения отклика структуры на нагрев постоянным током в двойной СИНИС структуре.

Отклик по напряжению — это разница между значениями напряжения при наличии излучения (нагрева) и без него, измеренная при фиксированном токе смещения. Для этого снималось последовательно две вольт-амперные характеристики при подогреве через дополнительную пару переходов и без и строилась зависимость отклика от напряжений. Максимальный отклик по напряжению наблюдается при напряжении, примерно равном половине щели, и составляет существенные 11 мкВ. Соответственно вольт-ваттная чувствительность составила в наших измерениях более 10^9 В/Вт при выделяемой в нормальном металле мощности 10 фВт. На рисунке 3.14 приедена ВАХ и характерная кривая отклика на нагрев при температуре образца 75 мК.

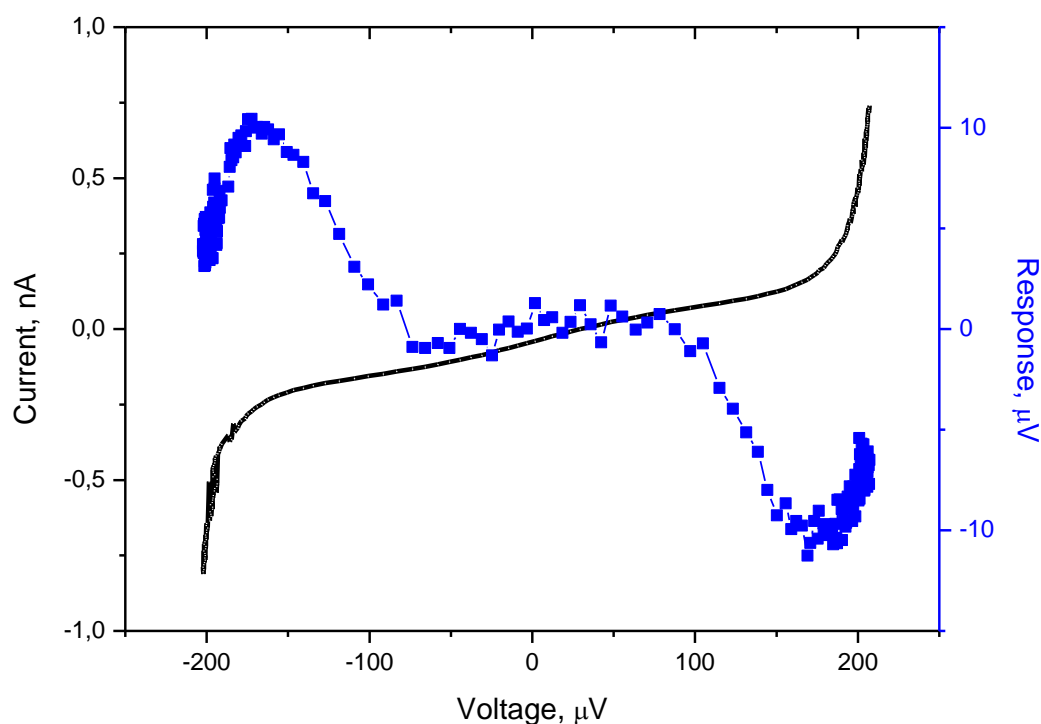


Рисунок 3.14. ВАХ и отклик болометра на нагрев постоянным током при температуре образца 75 мК. Величина отклика составила более 10^9 В/Вт

3.7 Выводы к главе

В ходе низкотемпературных измерений ВАХ изготовленных СИНИС структур отношение сопротивлений (R_d/R_n) достигло 3600 при температуре 100мК, что значительно меньше, чем предсказывается теорией для идеального СИН перехода в отсутствие перегрева фоновым излучением, но находится на типичном уровне для реальных измерений СИНИС структур. Что позволяет утверждать, что разработанная технология позволяет изготавливать высококачественные СИН переходы; и отметим, что образцы, изготовленные по такой технологии, оказываются не хуже изготовленных по технологии с теневым нападением.

Особенностью данных образцов является провал на дифференциальной кривой при нуле напряжения, который мы связываем с наличием андреевского

отражения в таких структурах. Для изучения данного эффекта была исследована зависимость дифференциального сопротивления от внешнего магнитного поля. Экспериментально установлено, что умеренное магнитное поле, приложенное в плоскости планарной туннельной СИН структуры, подавляет ее проводимость при малых напряжениях и низких температурах. Этот мезоскопический эффект связан с расфазированием андреевских пар в нормальном металле

На первых конструкциях СИНИС болометров было обнаружено несовпадение щели в алюминии с расчетными значениями. Данная проблема была связана с обратным эффектом близости сверхпроводниковых контактов и разводки нормального металла. Экспериментально показано, что одним из вариантов устранения влияния нормальной разводки на сверхпроводящую щель может быть дополнительное травление верхнего слоя нормального металла для удаления области СИН-переходов от электродов.

Был измерен отклик на нагрев постоянным током, вольт-ваттная чувствительность составила более 10^9 В/Вт при выделяемой в нормальном металле мощности 10 фВт (при нагреве постоянным током в специальной четырех контактной структуре).

ГЛАВА 4: ОТКЛИК НА ВНЕШНЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

4.1 Схема измерений отклика на внешнее излучение

Основная характеристика болометра – это величина отклика на внешнее излучение; последующие экспериментальные исследования заключались в непосредственном измерении отклика болометров, интегрированных в двойную щелевую и логопериодическую антенны, на внешнее излучение. Измерения проводились в погружном криостате растворения при температурах до 100 мК. Оптическая схема эксперимента приведена на рисунок 4.1. Источником излучения было черное тело (ЧТ), расположенное на ступени криостата с температурой 0.5 К и нагреваемое до температур порядка 11 К, из широкого спектра излучения которого вырезалась необходимый диапазон частот с помощью полосно-пропускающих фильтров с центральной частотой 345 ГГц.

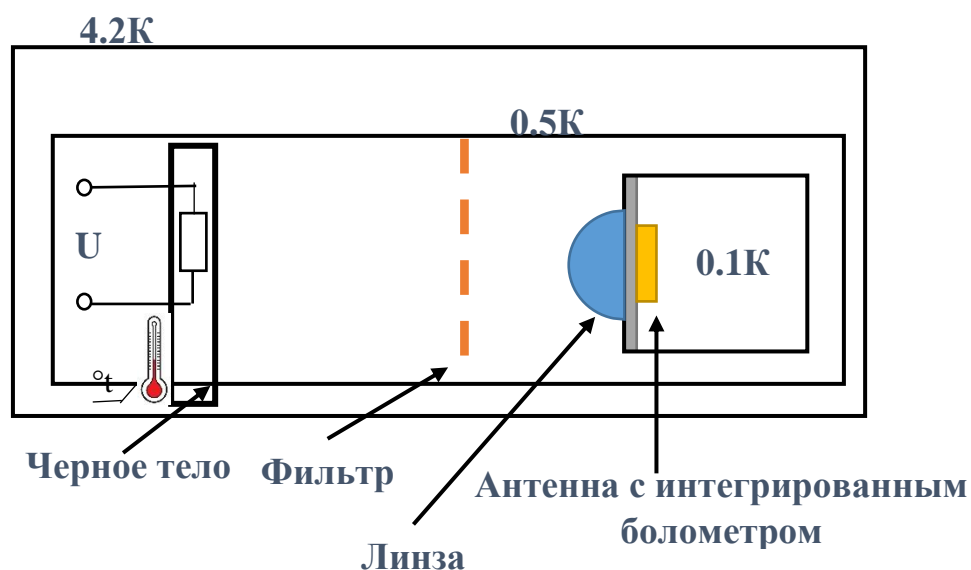


Рисунок 4.1. Оптическая схема измерений.

За один измерительный цикл исследовалось до трех образцов с линзами на держателях, установленных на холодную ступень в верхней части криостата (рисунок 4.2). Напротив каждой линзы устанавливались фильтры на диафрагме диаметром 9 мм. Фильтры располагались на дне радиационного экрана с температурой примерно 0.5 К (рисунок 4.3). Фильтры представляли

собой два кусочка медной фольги со специально протравленной структурой, напаянные на оба конца короткой медной трубочки длиной 3 мм и внешним диаметром 10 мм. Полосно-пропускающие фильтры изготавливались собственными силами [А3] и были настроены на центральную частоту около 345 ГГц с шириной на полувысоте 70 ГГц. Пропускание итоговой сборки из 2-х фильтров, в расчетах аппроксимировалось Лоренцовским спектром (множитель А) (рисунок 4.4). Фильтры были рассчитаны, изготовлены, а потом измерены на стенде с перестраиваемым источником в ранних работах [88].



Рисунок 4.2. Внешний вид внутренней части криостата с тремя установленными образцами в держателях с линзами.

Так как ЧТ имеет широкий спектр излучения, именно фильтры определяли полосу излучения, принимаемую логопериодической антенной с интегрированным СИНИС болометром. В случае двойной щелевой антенны необходимо также учитывать спектральные свойства самой антенны, но в любом случае данные фильтры необходимы, так как они отсекают паразитную засветку в ИК диапазоне, которая даже при невысоких температурах ЧТ сильно перегревает болометр и оказывает значительное влияние на его характеристики. Ранее использовались капиллярные фильтры низких частот [89], от которых отказались из-за невысокой надежности и сложности в изготовлении.

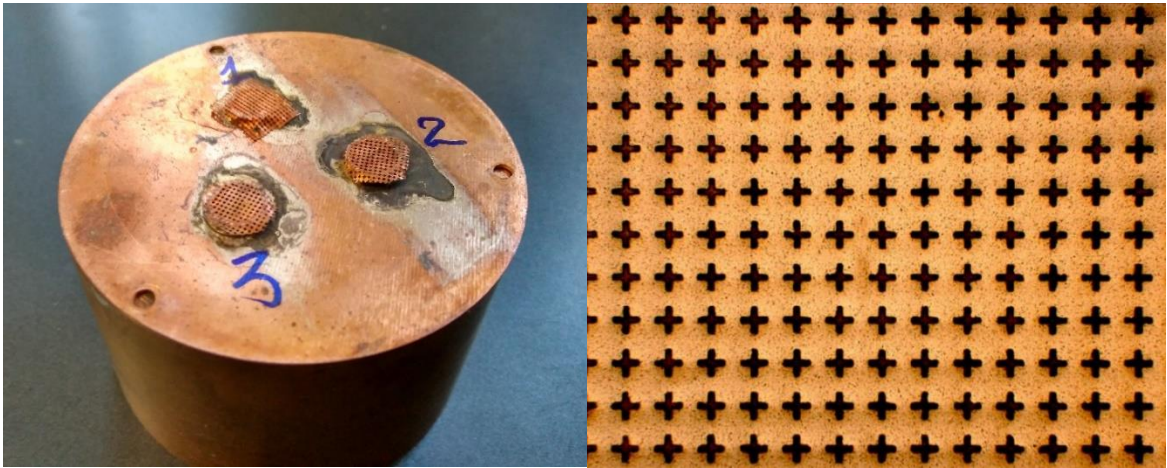


Рисунок 4.3. Внешний вид металлопленочных фильтров на крышке экрана и увеличенное изображение, полученное в оптическом микроскопе.

В расчете учитывается дополнительно фильтр низких частот по формуле:

$$B = \frac{f}{f_0 \sqrt{1.5 + f^2/f_0}}, \quad (7)$$

где $f_0 = 350$ ГГц – центральная частота.

В итоге в первом приближении мощность, попадающая на линзу $P_0 = A \cdot P_{Plank} \cdot B$, где P_{Plank} – мощность, рассчитанная по формуле Планка для конкретной температуры черного тела.

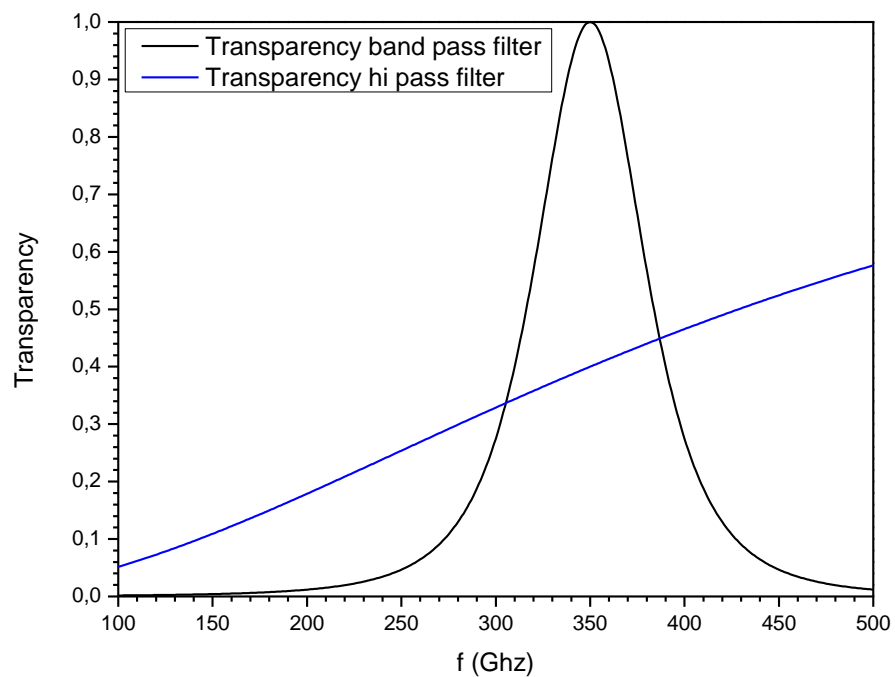


Рисунок. 4.4. Пропускание полосового фильтра и фильтра низких частот.

4.2 Конструкция источника излучения в виде черного тела

Подробнее остановимся на конструкции источника излучения – черном теле. Принцип работы такого источника основан на том факте, что все тела с ненулевой температурой излучают электромагнитное излучение. Для абсолютно черного тела существует формула Планка — выражение для спектральной плотности мощности излучения (спектральной плотности энергетической светимости). Подробнее о расчете излученной и принятой мощности смотри в разделе 4.5. В данном разделе описана конструкция используемых черных тел.

Излучателем служила тонкая пленка нихрома на прямоугольной подложке из кремния или сапфира. На края пленки нихрома нанесены золотые контактные площадки для обеспечения равномерного распределения тока по пленке. Чернотельный излучатель был подвешен на манганиновых проводах, электрически изолированных от медного основания с температурой 0.5 К. Подвес обеспечивал тепловую изоляцию от основания, а по проводам подавался ток, нагревающий пленку. При пропускании постоянного тока мощностью порядка десятков микроватт излучатель нагревался до $T = 2 - 15$ К. Температура излучателя контролировалась с точностью около 0.1 – 0.2 К термометром на основе RuO_2 резистора, приклеенного к подложке с тыльной стороны.

В наших работах использовались ЧТ, изготовленные на подложках 20x15 мм с рабочей областью примерно 15x15 мм, что достаточно для перекрытия диафрагмы в фильтрах.

Важнейшим вопросом является выбор подложки, которая оказывает непосредственное влияние на характеристики ЧТ. Нами использовались ЧТ на кремниевых и сапфировых подложках (рисунок 4.5). Кремний - стандартный материал для микроэлектроники, дешев и широко распространен, имеет хорошую адгезию, но обладает большой теплоемкостью при низких

температурах. Сапфир же лишен такого недостатка, но достаточно сложен с точки зрения технологии. ЧТ на сапфировой подложке позволяет проводить быстрые измерения с импульсом нагрева порядка 1 мкс.

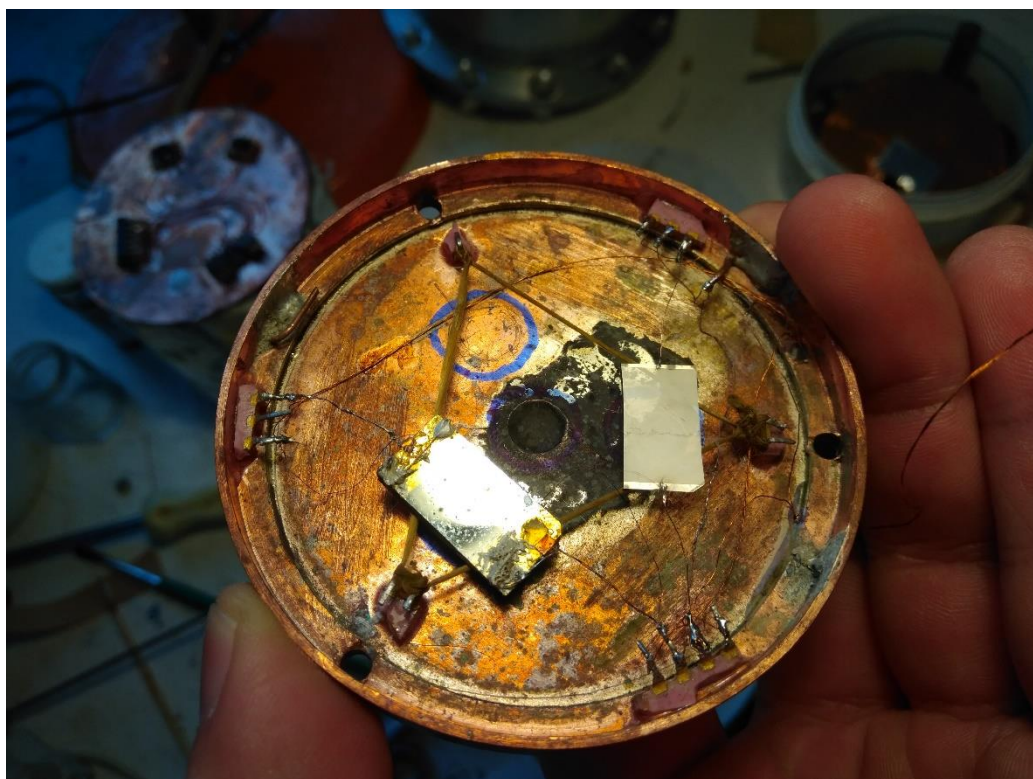


Рисунок 4.5. Фото крышки 300 мК экрана с двумя подвешенными чернотельными излучателями.

4.3 Результаты измерений отклика болометра на внешнее излучение

В структуре с гафниевым абсорбером наибольший измеренный отклик составил 7 мкВ для температуры ЧТ 5 К и существенные 35 мкВ для $T=18$ К; чувствительность в результате составила более 10^8 В/Вт (рисунок 4.6). Мощность, попадающая на антенну, рассчитывалась по формуле Планка, с учетом геометрии установки и с учетом полосового фильтра. В итоговых расчетах учитывалось согласование антенны и болометра, которое в случае медных абсорберов сопротивлением 5 Ом составляло примерно 0.1, а для образцов с гафнием (сопротивление абсорбера порядка 30 Ом) порядка 0.5 (с учетом результатов моделирования в разделе 2.4).

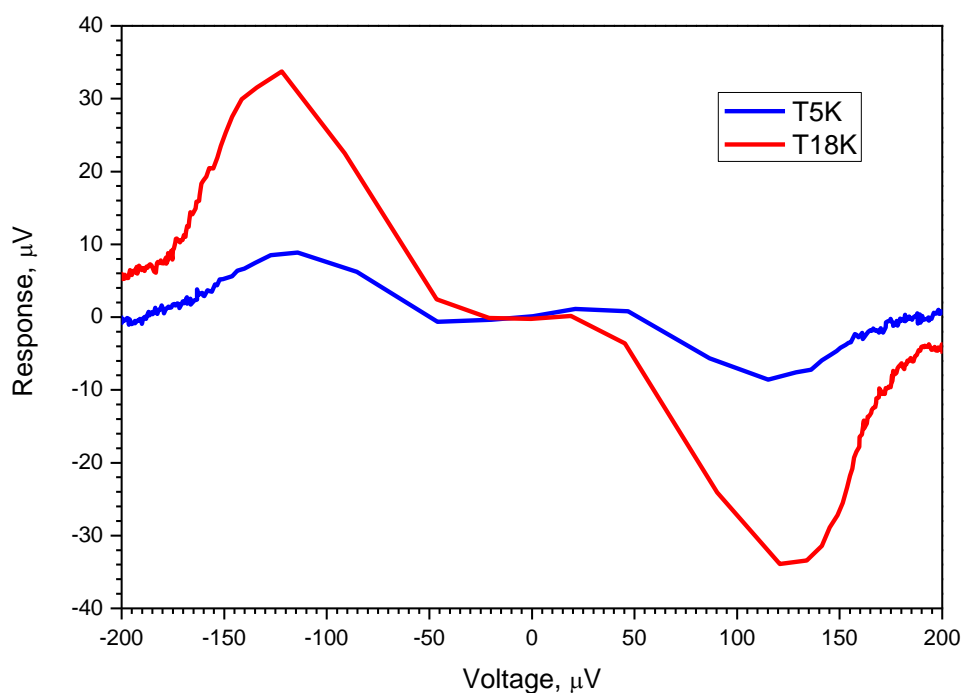


Рисунок 4.6. Оптический отклик по напряжению и току болометра с гафниевым абсорбером на температуру черного тела 5 К и 18 К.

В дальнейшем в более поздних версиях изготовленных образцов удалось достигнуть отклика по напряжению 12 мкВ (рисунок 4.7) для температуры черного тела 4.5 К в образцах с медным абсорбером. Был получен оптический отклик не менее $2 \cdot 10^8$ В/Вт при рассчитанной мощности 0.6 пВт. Отклик по току (разница токов при выбранном фиксированном напряжении) на такой температуре ЧТ составил 0.7 нА, что соотвечает $1.1 \cdot 10^4$ А/Вт чувствительности по току.

Также был измерен отклик болометра с медным абсорбером на излучение черного тела с различной температурой, соответственно на разные мощности излучения (рисунок. 4.8) [A1]. Мощность рассчитана по формуле Планка с учетом дополнительных коэффициентов, описанных в следующей главе. Отклик может достигать 70 мкВ, но при достаточно больших мощностях излучения 1 пВт. Данный график иллюстрирует динамический диапазон – отклик болометра при изменении мощности излучения более чем на порядок.

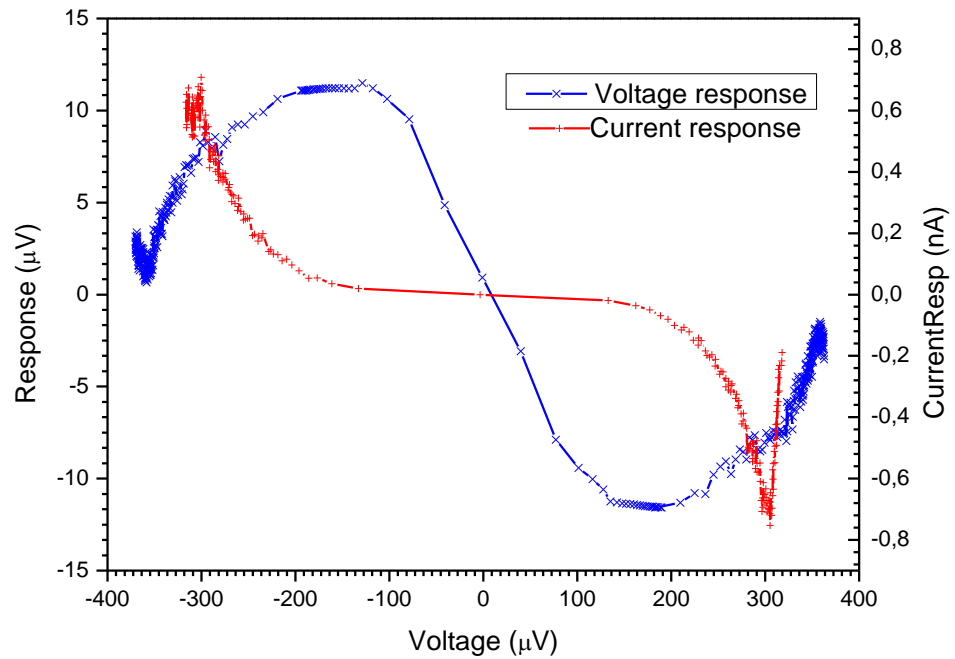


Рисунок 4.7. Оптический отклик по напряжению и току болометра с медным абсорбером на температуру черного тела 4.5 К.

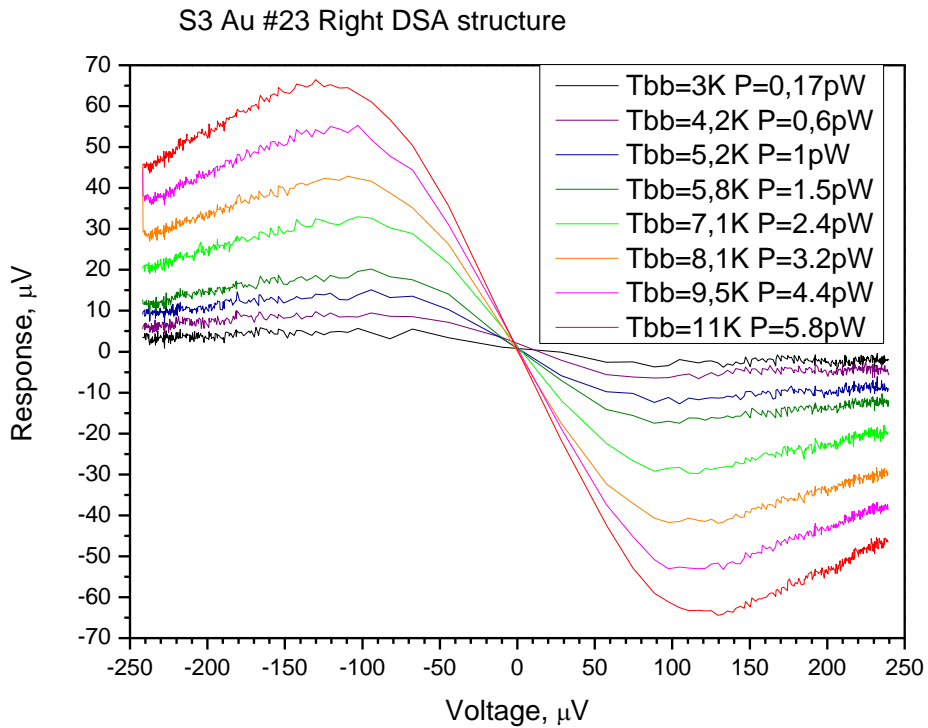


Рисунок 4.8. Отклики по напряжению при различных температурах черного тела.

4.4 Расчет мощности, принимаемой болометром

Расчет излучаемой мощности ЧТ проводился по формуле Планка для энергии абсолютно черного тела

$$u(\omega, T) = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \cdot \frac{\hbar \omega}{e^{kT} - 1} \quad (9)$$

Данная формула возникает из достаточно простых соображений. Средняя энергия одного квантовомеханического осциллятора

$$\epsilon = \frac{hf}{e^{hf/kT} - 1} \quad (10)$$

Число стоячих волн в единице объема

$$dn = 8\pi \frac{f^2 df}{c^3} \quad (11)$$

Из этих соотношений получается плотность энергии в единице объёма

$$U = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{f^3}{e^{hf/kT} - 1} \quad (12)$$

Поскольку излучение одинаково во всех направлениях и распространяется со скоростью света, излучение от маленького отверстия в единичный телесный угол за одну секунду составит

$$B = U \cdot c / 4\pi \quad (13)$$

Интенсивность излучения

$$B(f, T) = \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{e^{hf/kT} - 1} \quad (14)$$

с единичной площади в единичном телесном угле и в единичной полосе частот; интенсивность излучения будет иметь размерность Вт/(м²√Гц)

Для перехода в режим одной моды следует воспользоваться соотношением $\lambda^2 = c^2/f^2 = S \cdot \Omega$ для одной пространственной моды, с помощью которого мощность для двух поляризаций

$$P_{Plank} = B\lambda^2 = 2hf \frac{1}{e^{hf/kT} - 1} \quad (15)$$

На рисунке 4.9 приведен график зависимости спектральной плотности от частоты для температуры 4.5 К. Далее, с учетом полосы фильтров можно рассчитать мощность, попадающую на приемную структуру.

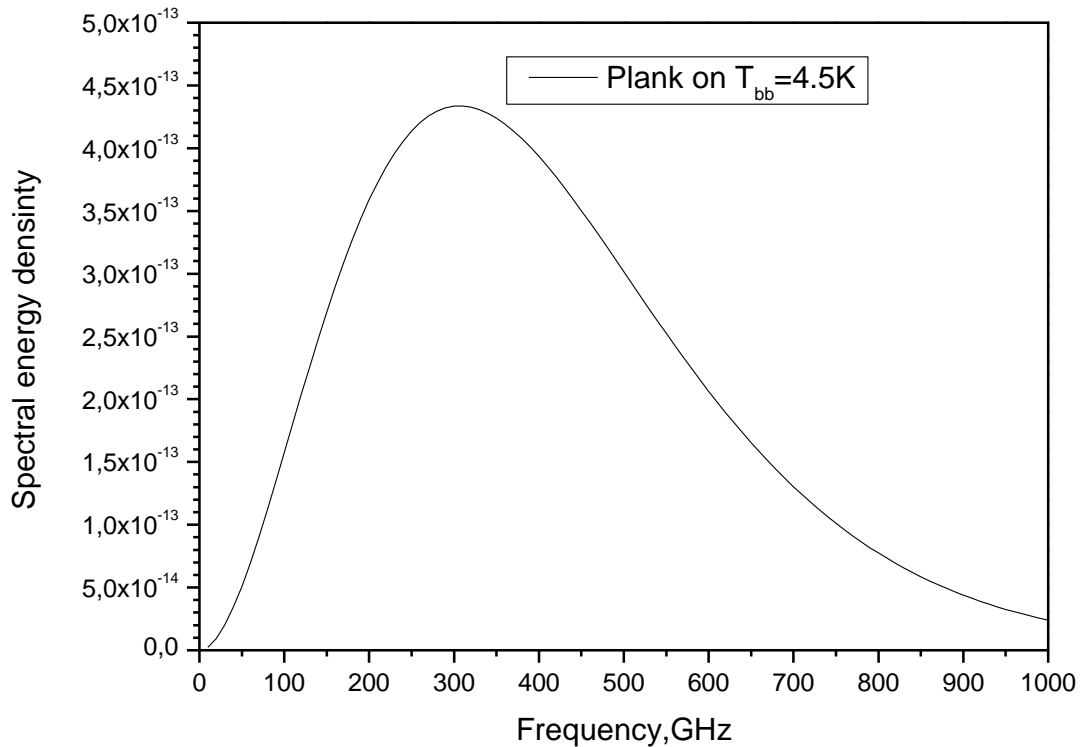


Рисунок. 4.9 График спектральной плотности по планковскому распределению для температуры черного тела 4.5 К

В нашем случае далеко не вся излученная мощность принимается антенной даже с учетом линзы. Важно учесть поправки на отражения от границ раздела сред и не согласованность импеданса болометра и используемых антенн. Оценочная мощность, принятая болометром, рассчитана по формуле

$$P_{correct} = P_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5, \quad (16)$$

где K_1 – учет отражения от сапфировой линзы, $n_{\text{сапф}}=1.77$ $T = \frac{4n_1n_2}{(n_1+n_2)^2} = 0.92$

$K_1 = T^2 = 0.92^2 = 0.83$ (отражение от двух поверхностей)

K_2 – рассогласование импедансов антенны и болометра (согласование)

$$K_2 = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1+Z_2)^2} \quad (17)$$

Считаем, что мнимая часть импеданса равна нулю (условие резонанса), согласовываем только действительную часть импеданса. Сопротивление болометров берем равным сопротивлению абсорберов болометра. Для изготовленных образцов $R_{Cu} = 10$ Ом, $R_{HF} = 30$ Ом, на основе измерений абсорбера в 4-ногой структуре. $Z_{LPA} = 50$ Ом, $Z_{DSA} = 100$ Ом (по результатам оценочного моделирования на частоте 350 ГГц, см. раздел 2.3)

Для случая медного абсорбера в двойной целевой антенне получаем:

$$K_2 = \frac{4 \cdot 100 \cdot 10}{(100 + 10)^2} = 0.33$$

K_3 - Коэффициента черноты черного тела. Для пленки NiCr нами оценивается на уровне $K_3 = 0.8$

K_4 – коэффициент, связанный с тем, что антенна может находится находится не точно в фокусе, а на краю пятна Эйри. $K_4 = 0.5$

K_5 – Собственная полоса для антенны. Оценки эффективности используемых антенн были сделаны в разделе 2.3.

То есть, с учетом K_1, K_2, K_3, K_4 (без учета полосы антенны) получается примерно 11% от P_{Plank} - мощность, приходящая на антенну с интегрированным болометром.

4.5 Расчеты МЭШ и квантовой эффективности

С учетом поправок описанных в предыдущем разделе рассчитываются вольт-ваттные и ампер-ваттные характеристики и квантовые отклики. Например, для температуры ЧТ 4.2 К $P_{\text{Plank}}=0.58$ пВт. $P_{\text{correct}}= 0.063$ пВт, $\text{RespV}= 12$ мкВ, $\text{RespI} = 0.7$ нА.

Тогда советующие чувствительности:

$$V/W = \frac{12 \cdot 10^{-6}}{6.3 \cdot 10^{-14}} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ В/Вт} \quad I/W = \frac{7 \cdot 10^{-10}}{6.3 \cdot 10^{-14}} = 1.1 \cdot 10^4 \text{ А/Вт}$$

$$\text{Количество электронов } I/q = \frac{7 \cdot 10^{-10}}{1.6 \cdot 10^{-19}} = 4.4 \cdot 10^9$$

$$\text{Количество квантов } P/h\nu = \frac{6.3 \cdot 10^{-14}}{6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 350 \cdot 10^9} = \frac{6.3 \cdot 10^{-14}}{2.3 \cdot 10^{-22}} = 2.7 \cdot 10^8 \text{ с}$$

частотой 350 ГГц

$$\text{То есть, квантовая эффективность } n = \frac{4.4 \cdot 10^9}{2.7 \cdot 10^8} = 16.3$$

Отклик по напряжению на внешнее излучение с частотой около 350 ГГц при температуре 100 мК, составил более $2 \cdot 10^8$ В/Вт (рисунок 4.13). Отклик по току при той же температуре составил 0.7 нА, что советует чувствительности по току $1.1 \cdot 10^4$ А/Вт. Ток 0.7 нА это $4.3 \cdot 10^9$ электронов в секунду, а мощность 0.6 пВт соответствует $2.8 \cdot 10^8$ квантов с частотой 350 ГГц в секунду; следовательно, квантовая эффективность достигла более 15 электронов на квант. Достигнутая эффективность заметно выше значений 1–2 электронов на квант в традиционных СИНИС–болометрах и приближается к теоретическим оценкам в статье [17].

Также из данных графика 4.8 можно рассчитать вольт-ваттную чувствительность при различных мощностям принимаемого излучения (рис. 4.10). Максимальная чувствительность достигается при небольших мощностях излучения; при больших идет «перегрев» болометра, то есть излучение не полностью термализируется. И при этом вольт-ваттная чувствительность выходит на уровень приблизительно 10^8 В/Вт.

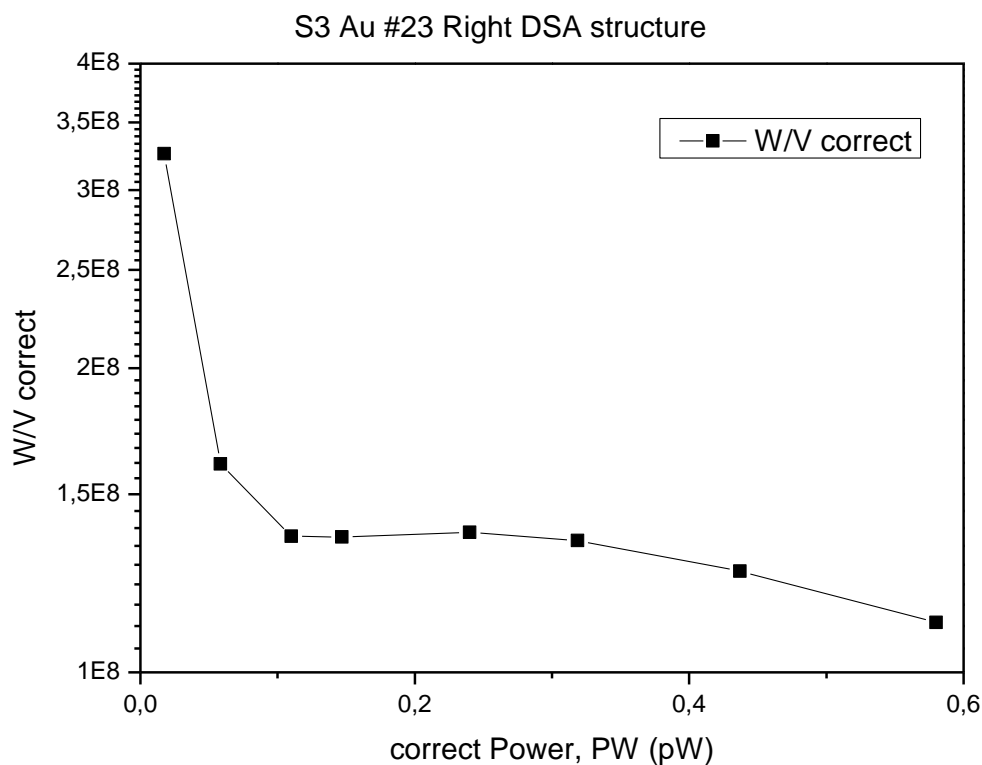


Рисунок 4.10 Вольт-ваттная чувствительность при разных мощностях внешнего излучения.

Для практических применений важно оценить шумы в системе. Мы оцениваем низкочастотные шумы на уровне $20 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ в нашей системе (складываются из собственных шумов усилителя и внешних наводок). Для измеренной вольт-ваттной чувствительности более $2 \cdot 10^8 \text{ В/Вт}$ получим значение МЭШ= $10^{-16} \text{ Вт}/\sqrt{\text{Гц}}$. Кроме того, полезно оценить температурную чувствительность, которая представляет интерес для практической астрономии. При нагреве черного тела с $4,7 \text{ К}$ до $5,8 \text{ К}$ значение отклика 14 мкВ , т.е. $dV/dT=14,7 \text{ мкВ/К}$. Взяв шумы $20 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$, получаем флуктуационную чувствительность (эквивалентную шуму разницу температуру) $\text{NETD}=1,57 \cdot 10^{-3} \text{ К}/\sqrt{\text{Гц}}$.

Еще одним важным свойством исследуемых болометров является схожесть формы дифференциального сопротивления при нагреве внешним излучением и при увеличении фоновой температуры (рис. 4.11). Это свидетельствует о том, что в таких болометрах получена высокая эффективность термализации принятого излучения, что и обеспечивает

лучшую квантовую эффективность. В традиционных болометрах с абсорберами непосредственно на подложке отклик имеет нетепловой характер вследствие неравновесных эффектов и нефермиевского распределения электронов по энергиям [90].

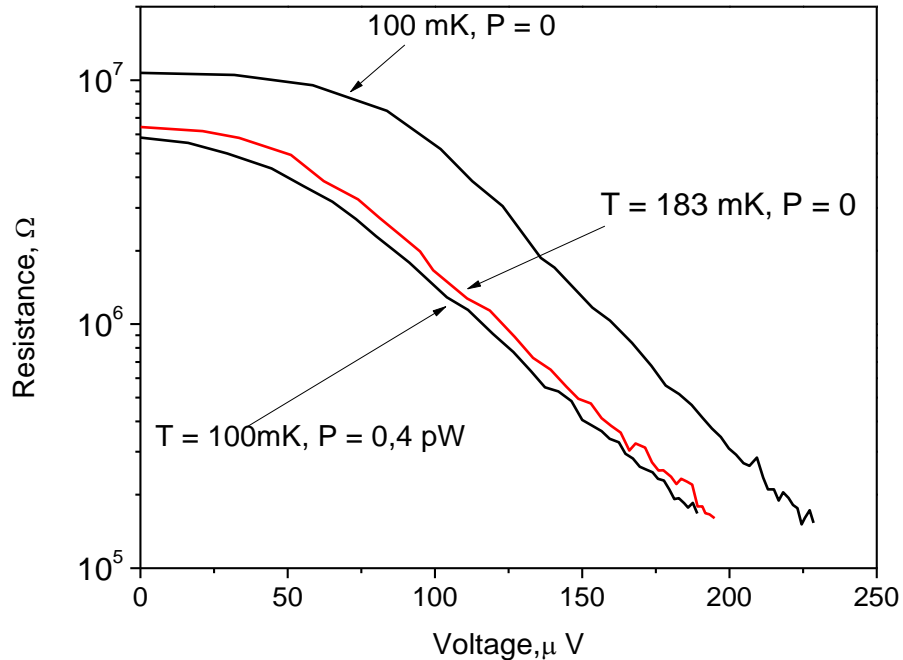


Рисунок 4.11 Дифференциальное сопротивление болометра без внешнего излучения при фоновой температуре 100 мК и 183 мК и при нагрузке 3.8 пВт при фоновой температуре 100 мК.

Оценить предельную фундаментальную МЭШ изготовленных болометров можно по формуле:

$$\text{МЭШ} = \sqrt{4kT^2G + \frac{(V_j^2 + V_n^2)}{S^2}}, \quad (18)$$

где флуктуации напряжения V_j на СИН-переходе и шумы усилителя V_n . Если пренебречь шумами вообще, то остается фундаментальный предел $\text{МЭШ} = \sqrt{4kT^2G}$, где T – рабочая температура болометра, G – коэффициент теплопроводности тепловой связи болометра с низкотемпературным резервуаром.

$$G_{e-ph} = \frac{dP}{dT} = 5\Sigma VT^4 \quad (19)$$

Для нашего болометра измеренные: $\frac{dV}{dP} = 2 \cdot 10^8 \text{ В/Вт}$, $\frac{dV}{dT} = 14.7 \text{ мкВ/К}$

$$G = dP/dT = 1.47 \cdot 10^{-5} / 2 \cdot 10^8 = 7.3 \cdot 10^{-14} \text{ Вт/К, тогда для } T=100 \text{ мК} = 10^{-1} \text{ К}$$

$$\text{МЭШ} = \sqrt{4kT^2G} = \sqrt{4 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 10^{-2} \cdot 7.3 \cdot 10^{-14}} = 2 \cdot 10^{-19} \text{ Вт}/\sqrt{\text{Гц}}$$

Аналогичное значение получается, если оценить $G_{e-ph} = 5\Sigma VT^4$ (20)

Считая для меди $\Sigma = 2 \cdot 10^{-9} \text{ Вт} \cdot \text{мкм}^{-3} \text{ К}^5$ и $V_{\text{абс}} = 0.1 \text{ мкм}^3$

Получаем $G = 10^{-13} \text{ Вт/К}$, что согласуется с измеренными значениями.

Данные оценки носят справочный характер, так как использованы некие усредненные значения параметров реальных образцов.

4.6 Измерение быстродействия болометра

Для практических применений в таких областях, как радиоастрономия, зондирование Земли со спутников, экологии и др., время отклика определяет быстродействие приемника излучения и возможность частотного мультиплексирования многопиксельных систем. Ожидаемые времена установления отклика СИНИС-болометров на три–четыре порядка меньше, чем у широко используемых для подобных целей болометров на краю сверхпроводящего перехода постоянной времени в единицы миллисекунд, что открывает возможность частотного мультиплексирования для многопиксельных систем на основе СИНИС болометров. Совместно с С.А. Лемзяковым было проведено исследование быстродействия разработанных и изготовленных СИНИС болометров [А9, А37].

При исследовании динамических характеристик болометра использовались импульсы излучения с крутым фронтом, формируемые при нагреве источника с сапфировой подложкой площадью 2.35 см^2 и толщиной 0.34 мм [91]. Ее теплоемкость при низких температурах равна $C_{\text{sapphire}} = 29T^3 \text{ нДж/К}$ [92]. Это намного больше теплоемкости нихромовой пленки и контактных золотых пленок толщиной менее 1 мкм . При подаче

электрического импульса мощностью 1 Вт и длительностью 1 мкс (полная энергия 1 мкДж) источник нагревается примерно до 3.5 К, а затем сохраняет эту температуру в течение нескольких сотен миллисекунд благодаря хорошей теплоизоляции. Предварительные измерения с импульсным нагревом излучателей на кремнии показали, что время реакции термометра на основе RuO₂ резистора из-за его высокой теплоемкости и плохого теплового контакта превышает 200 мкс, и при измерении в импульсном режиме его использование бесполезно. Для оценки мощности излучения источника на сапфировой подложке в зависимости от рассеиваемой мощности на постоянном токе мы использовали сравнение отклика болометра с ранее измеренным откликом с источником на кремнии.

Согласно результатам, представленным на рис. 4.12, при импульсах нагрева напряжением 20 В и длительностью 10 мкс перегрев пленки невелик, и оценка $\tau_{bol} = 1.8 \pm 0.5$ мкс близка к истинному значению собственного времени отклика СИНИС-болометра. Это значение по порядку величины сравнимо с постоянной времени RC цепочки $\tau=1$ мкс, для которой взяты дифференциальное сопротивление 1 МОм и паразитная емкость 1 пФ.

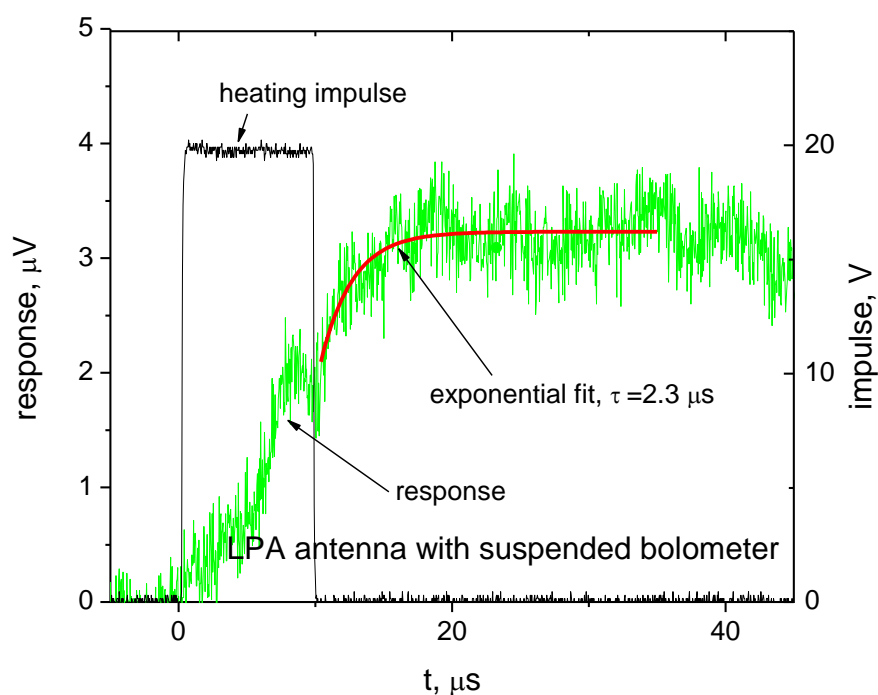


Рисунок 4.12 Отклик по напряжению одиночного СИНИС болометра с подвешенным абсорбером. Иллюстрация из работы [A9].

4.7 Выводы к главе

Измерения, проведенные в данной главе, дают представление о реальных характеристиках разработанных СИНИС болометров. Ключевым моментом в данном эксперименте является определение мощности излучения, принимаемой болометром. С учетом пяти факторов, описанных в работе, сложно говорить о высокой точности в определении этой мощности. Одним из способов избежать данной проблемы могло быть размещение (замещение болометра) на калиброванный приемник излучения, в качестве такого болометра нами рассматривается, например приёмник на основе RuO_2 резистора, но по нему возможно прокалибровать только сравнительно большие мощности излучения.

Измеренная оптическая вольт–ваттная чувствительность составила не менее $2 \cdot 10^8$ В/Вт при рассчитанной мощности 0.06 пВт, отклик по току $1.1 \cdot 10^4$ А/Вт, что меньше, чем измеренные значения на нагрев постоянным током. Данное различие связано с особенностями приема ТГц излучения в таких структурах, что было описано в главе 2.1 и согласуется с опытом для андреевских приемников, описанном в главе 1.2.6. Оптическая МЭШ, с учетом шумов, измеренных в отдельных экспериментах, оценивается на уровне 10^{-16} Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Температурная чувствительность составила $dV/dT = 14.7$ мкВ/К и флуктуационная чувствительность 1.57 мК/ $\sqrt{\text{Гц}}$.

Квантовая эффективность достигла 15 электронов на квант, что больше, чем в СИНИС болометрах с абсорбером на подложке. Это позволяет говорить о том, что данная структура действительно работает в болометрическом режиме, как и было предсказано в разделе 2.1. Однако предельные значения еще не достигнуты, что определяет направления для дальнейшей работы в этой области.

Впервые были проведены прямые измерения постоянной времени СИНИС болометров, и постоянная времени в серии специальных «быстрых» измерений составила $\tau_{\text{bol}} = 1.8 \pm 0.5$ мкс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Разработана, реализована и исследована новая оригинальная конструкция болометра на основе структуры сверхпроводник – изолятор – нормальный металл – изолятор – сверхпроводник (СИНИС) с подвешенным абсорбером, позволяющая решить проблему утечки тепла, поглощенного абсорбером, в подложку, позволяющая реализовать предельные параметры СИНИС болометра. Разработана технология изготовления таких болометров с использованием различных материалов в качестве абсорбера. Решена проблема подавления сверхпроводимости в области СИН перехода разводкой из нормального металла. С помощью разработанной методики были изготовлены СИНИС структур отношении сопротивлений туннельных переходов (R_d/R_n) порядка 10^4 при температурах 100 мК и сопротивлением абсорбера 5 - 50 Ом. Структуры с такими параметрами подходят для криогенных болометров терагерцового диапазона, интегрированных с планарными антеннами, при этом разработанная техника изготовления проще по сравнению с ранее используемой технологией теневого напыления

2) Исследованы болометры, интегрированные в двойную щелевую и в логопериодическую антенны терагерцового диапазона частот, основные характеристики которых были рассчитаны с помощью трехмерного компьютерного моделирования. Рассчитано согласование используемых антенн с изготовленными болометрами. Показано, что при использовании СИНИС структур в качестве болометров целесообразно использовать материалы абсорбера с высоким удельным электрическим сопротивлением для согласования с импедансом планарной антенны.

3) Проведены измерения изготовленных болометров в криостате растворения при температурах до 85 мК. Была исследована температурная зависимость дифференциального сопротивления и продемонстрировано наличие эффекта андреевского отражения при температурах ниже 150 мК.

Измерен электрический отклик на нагрев постоянным током абсорбера в специальной структуре. Электрический отклик составил более 10^9 В/Вт,

4) Измерен оптический отклик, на частоте 345 ГГц при температуре 100 мК, составил более $2 \cdot 10^8$ В/Вт (с учетом рассогласования импедансов антенны и болометра). Токовый отклик при той же мощности излучения составил $1.1 \cdot 10^4$ А/Вт, квантовая эффективность достигает 15 электронов на квант. Оптическая МЭШ и температурная флуктуационная чувствительность, ограниченные системой считывания, составили 10^{-16} Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ и 1.6 мК/ $\sqrt{\text{Гц}}$ соответственно. Продемонстрирована схожесть формы дифференциального сопротивления при нагреве внешним излучением и при увеличении температуры чипа, что свидетельствует о высокой эффективности термализация принятого излучения в таких болометрах, тем самым обеспечивает их высокую квантовую эффективность.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

DSA (Double Slot Antenna) – двойная щелевая антенна

HEB (Hot Electron Bolometer) – болометр на горячих электронах

KID (Kinetic Inductance Detector) – болометр на основе кинетической индуктивности

LPA (Log-periodic Antenna) – логопериодическая антенна

TES (Transition-Edge Sensor) – болометр на краю сверхпроводящего перехода

NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) – эквивалентная шуму разница температур – флуктуационная чувствительность

БТА – большой телескоп азимутальный

ВАХ – вольт-амперная характеристика

ИК – инфракрасный диапазон длин волн

МЭШ – мощность эквивалентная шуму (NEP)

ММ – миллиметровый диапазон длин волн

СИН – туннельный переход сверхпроводник – изолятор – нормальный металл (NIS)

СИНИС болометр – болометр на основе структуры сверхпроводник - изолятор – нормальный металл – изолятор – сверхпроводник (SINIS)

СКВИД (SQUID) - сверхпроводящий квантовый интерферометр (Superconducting Quantum Interference Device)

СЭМ – сканирующий электронный микроскоп

субТГц – субтерагерцовый частотный диапазон

ТГц – терагерцовый частотный диапазон

ЧТ – источник излучения в виде черного тела

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Penzias A. A., Wilson R. W. A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s //The Astrophysical Journal. – 1965. – Т. 142. – С. 419-421.
2. Melchiorri F. et al. Fluctuations in the microwave background at intermediate angular scales //The Astrophysical Journal. – 1981. – Т. 250. – С. L1-L4.
3. Strukov I. A. et al. The Relikt-1 experiment–new results //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 1992. – Т. 258. – №. 1. – С. 37P-40P.
4. Струков И.А., Брюханов А.А., Скулачев Д.П., Сажин М.В. Анизотропия фонового радиоизлучения // Письма в Астрономический журнал. — 1992. — Т. 18, № 5. — С. 387—395.
5. Fixsen D. J. et al. Cosmic microwave background dipole spectrum measured by the COBE FIRAS instrument //The Astrophysical Journal. – 1994. – Т. 420. – С. 445-449.
6. Spergel D. N. et al. Three-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: implications for cosmology //The Astrophysical Journal Supplement Series. – 2007. – Т. 170. – №. 2. – С. 377.
7. Mennella A. et al. Planck early results. III. First assessment of the Low Frequency Instrument in-flight performance //Astronomy & Astrophysics. – 2011. – Т. 536. – С. A3.
8. Neugebauer G. et al. The infrared astronomical satellite (IRAS) mission //Astrophysical Journal. – 1984. – Т. 278. – С. L1.
9. Режим доступа: http://www.esa.int/Our_Activities/Operations/Herschel.
10. Gardner J. P. et al. The james webb space telescope //Space Science Reviews. – 2006. – Т. 123. – №. 4. – С. 485-606.
11. Режим доступа: <http://www.asc.rssi.ru/millimetron/millim.htm>.
12. Farrah D. et al. Far-infrared instrumentation and technological development for the next decade //Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems. – 2019. – Т. 5. – №. 2. – С. 020901.
13. Kuzmin L. S. On the concept of a hot-electron microbolometer with capacitive coupling to the antenna //Physica B: Condensed Matter. – 2000. – Т. 284. – С. 2129-2130.
14. Кузьмин Л. С. Сверхчувствительные болометры на холодных электронах для исследования темной материи и темной энергии //Успехи физических наук. – 2005. – Т. 175. – №. 5. – С. 549-555.
15. Kuzmin L. S. et al. Photon-noise-limited cold-electron bolometer based on strong electron self-cooling for high-performance cosmology missions //Communications Physics. – 2019. – Т. 2. – №. 1. – С. 1-8.

16. Девятков И. А., Куприянов М. Ю. Исследование неравновесности электронной подсистемы в низкотемпературных детекторах микроволнового излучения // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2004. – Т. 80. – №. 10. – С. 752-757.
17. Девятков 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. – 2006. – Т. 84. – №. 2. – С. 61-66.
18. Тарасов М. А. и др. Нетепловой оптический отклик туннельных структур сверхпроводник-изолятор-нормальный металл-изолятор-сверхпроводник // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2014. – Т. 146. – №. 1. – С. 123-132.
19. Зинченко И. И. Современная миллиметровая и субмиллиметровая астрономия // Изв. вузов. Радиофизика. – 2003. – Т. 46. – №. 8. – С. 9.
20. Режим доступа: <https://www.almaobservatory.org/en/about-alma-at-first-glance/how-alma-works/technologies/receivers/>.
21. 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. – 2013. – Т. 430. – №. 4. – С. 2513-2533..
22. Режим доступа: <https://www.sofia.usra.edu>.
23. Bensch F. et al. Submillimeter Wave Astronomy Satellite observations of Comet 9P/Tempel 1 and Deep Impact // Icarus. – 2006. – Т. 184. – №. 2. – С. 602-610.
24. Россия и Узбекистан договорились достроить уникальный радиотелескоп "Суффа" (рус.), РИА Новости (20180621T1800+0300Z). <https://ria.ru/20180621/1523161846.html>.
25. Бубнов Г. М. и др. Результаты наблюдения астроклимата в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн на плато Суффа // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2016. – Т. 59. – №. 8-9. – С. 852-861.
26. Режим доступа: <http://w0.sao.ru/hq/sekbt/>.
27. Болومتر // Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона: в 86 т. (82 т. и 4 доп.). — СПб., 1890—1907.
28. Шалькевич Ф. Е. Методы аэрокосмических исследований. – 2005.
29. Lemzyakov S. A., Edelman V. S. The use of RuO₂ resistors as broadband low-temperature radiation sensors // Instruments and Experimental Techniques. – 2016. – Т. 59. – №. 4. – С. 621-626..
30. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов. — 4-е перераб. и доп. изд. — М.: Высшая школа, 1987. — С. 407—408. — 479 с.

31. Режим доступа:
http://rielta.ru/components/com_jshopping/files/demo_products/bolometers.pass.pdf.
32. Режим доступа: <http://www.infraredlaboratories.com>.
33. Day P. et al. Distributed antenna-coupled TES for FIR detector arrays //Journal of Low Temperature Physics. – 2008. – Т. 151. – №. 1-2. – С. 477-482.
34. Andrews D. H. et al. Attenuated Superconductors I. For Measuring Infra-Red Radiation //Review of Scientific Instruments. – 1942. – Т. 13. – №. 7. – С. 281-292.
35. D. J. Goldie, J. R. Gao, D. M. Glowacka, et al., “Ultra-low-noise transition edge sensors for the SAFARI L-band on SPICA,” in Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VI, Proc. SPIE 8452, 84520A (2012).
36. D. J. Goldie, D. M. Glowacka, S. Withington, et al., “Performance of horn-coupled transition edge sensors for L- and S-band optical detection on the SAFARI instrument,” in Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astro.
37. P. Khosropanah, T. Suzuki, M. L. Ridder, et al., “Ultra-low noise TES bolometer arrays for SAFARI instrument on SPICA,” in Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VIII, Proc. SPIE 9914, 99140B (2016).
38. Meservey R., Tedrow P. M. Measurements of the kinetic inductance of superconducting linear structures //Journal of Applied Physics. – 1969. – Т. 40. – №. 5. – С. 2028-2034.
39. McDonald D. G. Novel superconducting thermometer for bolometric applications //Applied physics letters. – 1987. – Т. 50. – №. 12. – С. 775-777.
40. J. Zmuidzinas, B.A. Mazin, A. Vayonakis, P.K. Day, H.G. LeDuc //AIP Conf. Proc. – 2002. – Т.1. – С. 309–312.
41. Sergeev A. V., Mitin V. V., Karasik B. S. Ultrasensitive hot-electron kinetic-inductance detectors operating well below the superconducting transition //Applied physics letters. – 2002. – Т. 80. – №. 5. – С. 817-819.
42. Day P. K. et al. A broadband superconducting detector suitable for use in large arrays //Nature. – 2003. – Т. 425. – №. 6960. – С. 817.
43. Baselmans J. J. A. et al. A kilo-pixel imaging system for future space based far-infrared observatories using microwave kinetic inductance detectors //Astronomy & Astrophysics. – 2017. – Т. 601. – С. A89.
44. Гершензон Е. М. и др. Разогрев квазичастиц в сверхпроводящей пленке, находящейся в резистивном состоянии //Письма в ЖЭТФ. – 1981. – Т. 34. – №. 5. – С. 281-284.
45. Sergeev A. V. Nonselective effect of electromagnetic radiation on a superconducting film in the resistive state //JETP Lett. – 1982. – Т. 36. – №. 7.

46. Gershenzon E. M. et al. Heating of electrons in superconductor in the resistive state due to electromagnetic radiation //Solid state communications. – 1984. – Т. 50. – №. 3. – С. 207-212.
47. Wellstood F. C., Urbina C., Clarke J. Hot-electron effects in metals //Physical Review B. – 1994. – Т. 49. – №. 9. – С. 5942.
48. Semenov A. D. et al. Design and performance of the lattice-cooled hot-electron terahertz mixer //Journal of Applied Physics. – 2000. – Т. 88. – №. 11. – С. 6758-6767.
49. Cherednichenko S. et al. Hot-electron bolometer terahertz mixers for the Herschel Space Observatory //Review of scientific instruments. – 2008. – Т. 79. – №. 3. – С. 034501.
50. N.V. Kinev, L.V. Filippenko, R.V. Ozhegov, K.N. Gorshkov, G.N. Gol'tsman and V.P. Koshelets, "Superconducting Integrated Receiver with HEB-Mixer", presented at the 25th International Symposium on Space Terahertz Technology ISSTT-2014, 27-30 April 2014.
51. Korneev A. et al. Sensitivity and gigahertz counting performance of NbN superconducting single-photon detectors //Applied Physics Letters. – 2004. – Т. 84. – №. 26. – С. 5338-5340..
52. Gol'Tsman G. N. et al. Picosecond superconducting single-photon optical detector //Applied physics letters. – 2001. – Т. 79. – №. 6. – С. 705-707..
53. Андреев А. Ф. Теплопроводность промежуточного состояния сверхпроводников //Журн. эксперим. и теорет. физики. – 1964. – Т. 46. – С. 1823-1828.
54. Nahum, M. and Martinis, J. M. Ultrasensitive-hot-electron microbolometer. Appl. Phys. Lett. Nov. 29, 1993, Vol. 63, 22, pp. 3075-3077.
55. Nahum M., Richards P. L., Mears C. A. Design analysis of a novel hot-electron microbolometer //IEEE transactions on applied superconductivity. – 1993. – Т. 3. – №. 1. – С. 2124-2127.
56. Nahum M., Eiles T. M., Martinis J. M. Electronic microrefrigerator based on a normal-insulator-superconductor tunnel junction //Applied Physics Letters. – 1994. – Т. 65. – №. 24. – С. 3123-3125..
57. Leivo M. M., Pekola J. P., Averin D. V. Efficient Peltier refrigeration by a pair of normal metal/insulator/superconductor junctions //Applied physics letters. – 1996. – Т. 68. – №. 14. – С. 1996-1998..
58. Kuzmin, L., Devyatov, I. & Golubev, D. (1998). Cold-electron bolometer with electronic microrefrigeration and the general noise analysis. Proceeding of SPIE, v. 3465, San-Diego, pp. 193-199.
59. Kuzmin L. et al. On the concept of a normal metal hot-electron microbolometer for space applications //IEEE transactions on applied superconductivity. – 1999. – Т. 9. – №. 2. – С. 3186-3189.

60. Выставкин А. Н. и др. Болومتر на горячих электронах в нормальном металле с андреевским отражением в сверхпроводящих берегах //ЖЭТФ. – 1999. – Т. 15. – С. 1085.
61. Chouvaev D., Kuzmin L., Tarasov M. Normal-metal hot-electron microbolometer with on-chip protection by tunnel junctions //Superconductor Science and Technology. – 1999. – Т. 12. – №. 11. – С. 985.
62. Chouvaev D., Kuzmin L. An SNS antenna-coupled direct detector of submillimeter radiation //Physica C: Superconductivity. – 2001. – Т. 352. – №. 1-4. – С. 128-130.
63. Chouvaev D. et al. Optical qualification of the normal metal hot-electron microbolometer (NHEB) //12th Int. Symp. Space Thz Technol., San Diego. – 2001. – С. 446-456.
64. Chouvaev D. Normal metal hot-electron microbolometer with superconducting Andreev mirrors. – Chalmers University of Technology, 2001.
65. Kokkonieni R. et al. Nanobolometer with ultralow noise equivalent power //Communications Physics. – 2019. – Т. 2. – №. 1. – С. 1-8.
66. 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. – С. 99-103.
67. Тарасов М. А. и др. Экспериментальное исследование болометра на горячих электронах в нормальном металле с емкостной связью //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2002. – Т. 76. – №. 8. – С. 588-591.
68. Kuzmin L., Golubev D. On the concept of an optimal hot-electron bolometer with NIS tunnel junctions //Physica C: Superconductivity. – 2002. – Т. 372. – С. 378-382.
69. Kuzmin L. Superconducting cold-electron bolometer with proximity traps //Microelectronic Engineering. – 2003. – Т. 69. – №. 2-4. – С. 309-316.
70. Тарасов М. А. и др. Электронное охлаждение в болометре на горячих электронах в нормальном металле //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2003. – Т. 78. – №. 11. – С. 1228-1231.
71. Kuzmin L. Ultimate cold-electron bolometer with strong electrothermal feedback //Millimeter and Submillimeter Detectors for Astronomy II. – International Society for Optics and Photonics, 2004. – Т. 5498. – С. 349-362.
72. Фоминский М. Ю. Разработка и исследование криогенного болометра на холодных электронах : дис. – М. : МЮ Фоминский.–Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 2011.
73. Tarasov M. A. et al. Optical response of a cold-electron bolometer array integrated in a 345-ghz cross-slot antenna //IEEE transactions on applied superconductivity. – 2011. – Т. 21. – №. 6. – С. 3635-3639.

74. A.V. Gordeeva, L.S. Revin, A.L. Pankratov, A. Gunbina, V Shamporov and L.S. Kuzmin. Observation of the Photon Noise by Array of Cold-Electron Bolometers. *Applied Physics Letter*, 110, 162603 (2017).
75. Richards P. L. Bolometers for infrared and millimeter waves // *Journal of Applied Physics*. – 1994. – Т. 76. – №. 1. – С. 1-24.
76. Golwala S. R., Jochum J., Sadoulet B. Noise considerations in low resistance NIS junctions // *Proc. 7th Int. Workshop on Low Temp. Detectors LTD-7*. – 1997. - С. 64-65.
77. Golubev D., Kuzmin L. Nonequilibrium theory of a hot-electron bolometer with normal metal-insulator-superconductor tunnel junction // *Journal of Applied Physics*. – 2001. – Т. 89. – №. 11. – С. 6464-6472.
78. O'Neil G. C. Improving NIS tunnel junction refrigerators: Modeling, materials, and traps. – 2011.
79. Tarasov M. A. et al. Quantum Efficiency of Cold Electron Bolometer Optical Response // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2014. – Т. 5. – №. 1. – С. 44-48.
80. Gershenson M. E. et al. Millisecond electron–phonon relaxation in ultrathin disordered metal films at millikelvin temperatures // *Applied Physics Letters*. – 2001. – Т. 79. – №. 13. – С. 2049-2051.
81. Yung C. S., Schmidt D. R., Cleland A. N. Thermal conductance and electron-phonon coupling in mechanically suspended nanostructures // *Applied physics letters*. – 2002. – Т. 81. – №. 1. – С. 31-33.
82. Thayne I. G. et al. On-wafer determination of impedance of planar 100 GHz double slot antenna // *Electronics Letters*. – 1999. – Т. 35. – №. 16. – С. 1291-1292.
83. Режим доступа : <http://www.ni.com/pdf/manuals/375222c.pdf>.
84. Ermakov A. B. et al. A data acquisition system for test and control of superconducting integrated receivers // *IEEE transactions on applied superconductivity*. – 2001. – Т. 11. – №. 1. – С. 840-843..
85. Edelman V. S. A dilution microcryostat-insert // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2009. – Т. 52. – №. 2. – С. 301-307.
86. Режим доступа: <http://www.oxford-instruments.com/products/cryogenic-environments/3he-inserts/cryogen-free-helium-3-refrigerators/cryogen-free-helium-3-refrigerator-helioxas-v>.
87. Селиверстов А. В., Тарасов М. А., Эдельман В. С. ИССЛЕДОВАНИЕ АНДРЕЕВСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ СТРУКТУР СВЕРХПРОВОДНИК–ИЗОЛЯТОР–НОРМАЛЬНЫЙ МЕТАЛЛ // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2017. – Т. 151. – №. 4. – С. 752-766.

88. M.A.Tarasov, A.M.Chekushkin, V.S.Edelman, L.S.Kuzmin, Metamaterial bandpass structures made of two-dimensional arrays of planar resonators, TERA2012, The 2-nd Int. Conf. “Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection, and Applications”, 20.
89. V.Edelman, M.Tarasov, A.Chekushkin, Capillary quasioptical highpass filter, presented at the 25th International Symposium on Space Terahertz Technology ISSTT-2014, 27-30 April 2014, p.37.
90. Tarasov M., Edelman V. Nanodevices with Normal Metal—Insulator—Superconductor Tunnel Junctions //Functional Nanostructures and Metamaterials for Superconducting Spintronics. – Springer, Cham, 2018. – С. 91-116.
91. Лемзяков С. А., Тарасов М. А., Эдельман В. С. ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СИНИС-БОЛОМЕТРА НА ЧАСТОТЕ 350 ГГц // ЖЭТФ. - 2018 - Т. 153 - №6 - С. 992–1000.
92. Ditmars D. A. et al. Enthalpy and heat-capacity standard reference material: synthetic sapphire (α -Al₂O₃) from 10 to 2250 K //J Res Natl Bur Stand. – 1982. – Т. 87. – №. 2. – С. 159-63.
93. Sergeev A. V., Yu. Reizer M. Photoresponse mechanisms of thin superconducting films and superconducting detectors //International Journal of Modern Physics B. – 1996. – Т. 10. – №. 06. – С. 635-667.

СПИСОК АВТОРСКИХ ПУБЛИКАЦИЙ

Основные публикации по теме диссертации

- A1 **Юсупов Р. А.** Измерение температуры и электронное охлаждение СИН-переходами //Нелинейный мир. – 2013. – Т. 11. – №. 2. – С. 102-103.
- A2 Тарасов М. А., Эдельман В.С., Фоминский М.Ю., **Юсупов Р.А.**, Юргенс А.А. Криогенный болометр с подвешенным абсорбером //Журнал радиоэлектроники. – 2016. – №. 1. – С. 1-8.
- A3 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.
- A4 **Юсупов Р.А.**, Фоминский М.Ю., Эдельман В.С., Тарасов М.А., Юргенс А.А. Болометр на основе структуры сверхпроводник-изолятор-нормальный металл с подвешенным мостиком из нормального металла //Журнал радиоэлектроники. – 2017. – №. 3. – С. 1-6.
- A5 **Юсупов Р.А.** Фоминский М.Ю., Эдельман В.С., Тарасов М.А. СИНИС-болометр с подвешенным абсорбером //Нелинейный мир. – 2017. – Т. 15. – №. 2. – С. 21-23.
- A6 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 tunneling-current thermometers //Applied Physics Letters. – 2017. – Т. 110. – №. 24. – С. 242601.
- A7 Тарасов М.А., Махашабде С., Гунбина А.А., Фоминский М.Ю., **Юсупов Р.А.**, Ермаков А.Б., Чекушкин А.М., Соболев А.С., Эдельман В.С., Мансфельд М.А., Вдовин В.Ф.. Матрица кольцевых антенн с криогенными болометрами диапазона 345 ГГц в интегрирующей полости. // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – №. 1
- 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. – Т. 969. – №. 1. – С. 012088.
- A9 S. Lemzyakov, M. Tarasov, S.Mahashabde, **R. Yusupov**, L. Kuzmin, V.Edelman, Experimental study of a SINIS detector response time at 350 GHz signal frequency //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing. – 2018. – Т. 969. – №. 1. – С. 012081.

- A10 **Юсупов Р.А.**, Тарасов М.А., Фоминский М.Ю., Эдельман В.С. Оптический отклик болометра на основе структуры сверхпроводник - изолятор - нормальный металл с подвешенным мостиком из нормального металла // Труды МФТИ. — 2018. — Т.10, № 2. — С. 90–94.
- A11 Чекушкин А.М., Тарасов М.А., **Юсупов Р.А.**, Эдельман В.С., Гунбина А.А., Влияние ловушек из нормального металла, андреевского отражения и эффекта близости на охлаждение сверхпроводника в СИНИС структурах // Труды МФТИ. — 2018. — Т. 10, № 2. — С. 64–71.
- A12 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 of Conferences. – EDP Sciences, 2018. – Т. 195. – С. 05009.
- A13 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 of Conferences. – EDP Sciences, 2018. – Т. 195. – С. 05010.
- A14 G. Yakopov, M. Tarasov, A. Gunbina, M. Mansfeld, **R. Yusupov**, V. Edelman and V. Vdovin, SubTHz Arrays of Planar Antennas with SINIS bolometers for BTA //EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2018. – Т. 195. – С. 05014.
- A15 Чекушкин А.М., **Юсупов Р.А.**, Эдельман В.С., Соболев А.С., Тарасов М.А., Матрицы метаматериалов с интегрированными СИНИС-болометрами // Нелинейный мир, №1, 2019, С.74-78
- A16 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. – 2019. – Т. 125. – №. 17. – С. 174501.
- A17 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. – Т. 30. – №. 3. – С. 1-6.
- A18 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. – Т. 65. – №. 1. – С. 60–68. (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.)

Патенты

- A19 Тарасов М.А, Чекушкин А.М., **Юсупов Р.А**, Способ изготовления устройств со свободно висящими микромостиками, Патент № 2632630. Дата государственной регистрации 06.10.2017
- A20 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
- A21. 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

Тезисы докладов на конференциях.

- A22 **Юсупов Р. А.**, Измерение температуры и электронное охлаждение СИН-переходами. //Сборник трудов 55-я научной конференции МФТИ, Секция Физическая и квантовая электроника / Долгопрудный, 2012 С. 20-22,
- A23 Тарасов М.А. **Юсупов Р.А.**, Измерение электронной температуры в структурах сверхпроводник-изолятор-нормальный металл. // Сборник трудов 56-я научной конференции МФТИ, Секция Физическая и квантовая электроника /Долгопрудный, 2013 С. 20-22,
- A24 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
- A25 Тарасов М.А., Эдельман В.С., Фоминский М.Ю., **Юсупов Р.А.**, Юргенс А.А. Криогенный болометр с подвешенным адсорбером // Сборник трудов III Всероссийской микроволновой конференции / Москва, 2015, С. 63-67
- A26 Тарасов М.А., Эдельман В.С., **Юсупов Р.А.**, Фоминский М.Ю., СИНИС болометр с подвешенным абсорбером// Сборник трудов IV Всероссийской микроволновой конференции / Москва, 2016, С. 28-32

- A27 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
- A28 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, abstract No 723, August 9-16, 2017, Gothenburg, Sweden
- A29 S.Lemzyakov, M.Tarasov, S.Mahashabde, **R.Yusupov**, L.Kuzmin, V.Edelman, Experimental study of the response time of SINIS detectors at signal frequency of 350 GHz, Int. Conf. Low Temp. Physics – 28, abstract No 727, August 9-16, 2017, Gothenburg, Sweden.
- A30 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
- A31 **Р.А. Юсупов**. и др. Оптический отклик болометра на основе структуры сверхпроводник - изолятор–нормальный металл с подвешенным мостиком из нормального металла // Сборник трудов 60-ой Научной конференции МФТИ, Электроника, фотоника и молекулярная физик / Долгопрудный, 2017, С. 114-116
- A32 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
- A33 **Юсупов Р.А.** и др. Метаматериалы с интегрированными СИНИС болометрами // Материалы докладов 28-ой Международной Крымской конференции / 2018. Том 4, С.856-861.
- A34 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.

- A35 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
- A36 Тарасов М.А., Лемзяков С.А., **Юсупов Р.А.**, Эдельман В.С., БЫСТРОДЕЙСТВИЕ СИНИС-БОЛОМЕТРА НА ЧАСТОТЕ 350 ГГц //Тезисы докладов 38 Совещания по физике низких температур (НТ-38), 2018, С. 195
- A37 S. Mahashabde, A. Gunbina, M. Tarasov, G. Yakopov, **R. Yusupov**, V. Edelman, V. Vdovin, Array of annular antennas with SINIS bolometers, Applied Superconductivity Conference, Seattle Oct 28- Nov 2, 2018
- A38 V. Vdovin, M. Tarasov, A. Gunbina, M.Mansfeld, G. Yakopov, **R. Yusupov**, V. Edelman, Arrays of annular antennas with SINIS bolometers for SubTHz radioastronomy, TERA2018, N.Novgorod Oct. 22-25 2018.
- A39 V. Vdovin, M. Tarasov, A. Gunbina, M.Mansfeld, G. Yakopov, **R. Yusupov**, V. Edelman, Characterization of SubTHz planar antennas with SINIS bolometers for optical 6 meter reflector BTA, TERA2018, N.Novgorod Oct. 22-25 2018
- A40 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
- A41 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.
- A42 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Технологическая карта изготовления болометров с подвешенным абсорбером

Слой 1: Контактные площадки, номера, метки для совмещения, разводка, антенны (Тонкое золото: TiAuPd)

Слой 2: Трехслойка Al/оксид/нормальный металл (Pd)

Слой 3: Травление (Жидкостное травление в проявителе + кислота+ CPD)

Слой 1:

Тонкое золото

Резист

(Ацетон + пропанол чистка (3000 об/мин 1 мин))

Сушка на горячей поверхности при 180 С

HMDS праймер 3000 об/мин @ 20 с, без запекания

Резист LOR3A 3000 об/мин @ 1 мин., (360 нм)

Запекание 180 С @ 5 мин.

Нанесение резиста UV 60-0.75 3000 об/мин (0.75 мкм) @ 1 мин.

Запекание на горячей поверхности 130 С @ 2 мин.

Экспозиция (установка 264)

Линза: 4^{ая}

Доза: 16 мкКл/см², на линию 0.24 мкКл/см²

Модуляция А,6 шаг 0.15 уход 0.075

Ток: 10нА

Пост запекание 130С, 2 мин. на горячей поверхности.

Проявление

Ванна MFCD-26 @ 45с.

Промывка в воде.

Сушка в потоке N₂

Чистка в плазме 30 сек 50 Вт

1 напыление в установке LESKER 5 нм. Ti, 35 нм. Au, 10 нм. Pd Всего 50 нм

Lift-off

Mg-Rem-400 ремувер, ультразвуковая ванна в конце

Промывка в изопропаноле, воде, сушка N₂, чистка в плазме 30 с.

Слой 2: Трехслойка Al/оксид/Hf

Резист

Нанесение LOR3A 3000 об/мин @ 1 мин.,

Запекание 180 С @ 5 мин.

Нанесение UV60-0.75 3000 об/мин (0.75 мкм) @ 1 мин.

Запекание на горячей поверхности 130 С @ 2 мин.

Экспозиция (установка 264)

Линза: 4^{ая}

Доза: 24 мкКл/см²
 Модуляция А,2 шаг 0.05 уход 0.025
 Ток: 1нА
 130С, 2 мин. на горячей поверхности.

Проявление

Ванна MFCD-26 @ 1мин.

Промывка в воде.

Сушка в потоке N₂

Чистка в плазме 20 сек 50 Вт

2 напыление в установке LESKER

Lesker R Al Ox:

SIGMA: R Al напыление Al 70 nm,

SIGMA: окисление при давлении выше 1 т (10 торр 15 мин)

LESKER R Pd (SIGMA: R Hf напыление 15 нм)

Lift-off MR REM 400, 60 С ультразвуковая ванна

Слой 3: Травление Al

Резист

Без LOR! (для формирования вертикального профиля резиста без подтравов)

Нанесение резиста UV60-0.75 3000 об/мин @ 1 мин

Запекание на горячей поверхности 130 С @ 2 мин.

Exposure (установка 264)

Линза: 4^{ая}

Доза: 16 мкКл/см² +80% (1 μm)

+45% (2 мкм)

+25% (3 мкм)

Модуляция А,2 шаг 0.05 уход 0.025

Ток: 1нА

Пост запекание 130С, 2 мин. на горячей поверхности.

Проявление

Ванна MF-CD-26 @ 20с.-40с.-60с., сразу в ацетон.

Сушка в критической точке установка №1170

Примерно 3 мин. 350 Вт (или больше)

Травление Al, установка для жидкостного травления алюминия, №652

Оценка скорости травления 100 нм/мин

30 с. 45 с. 1 мин.