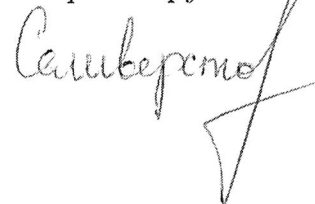


На правах рукописи



Селиверстов Сергей Валерьевич

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ИНТЕГРИРОВАННОГО С АНТЕННОЙ
ТЕРАГЕРЦОВОГО N_bN МИКРОБОЛОМЕТРА НА ГОРЯЧИХ ЭЛЕКТРОНАХ

01.04.03 — Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва
2017

Работа выполнена в Учебно-научном радиофизическом центре
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Московский педагогический
государственный университет» (МПГУ).

Научный руководитель: **Гольцман Григорий Наумович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Кошелец Валерий Павлович**
доктор физико-математических наук, профессор,
и.о. гл. науч. сотр. лаб. «Сверхпроводниковых
устройств для приема и обработки информации»
ФГБУН Института радиотехники и электроники
им. В.А.Котельникова РАН

Розанов Сергей Борисович
кандидат физико-математических наук,
зав. лаб. «Спектроскопия миллиметровых
волн» ФГБУН Физического института им.
П.Н.Лебедева РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образо-
вательное учреждение высшего образования «Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова» (физический факультет)

Защита диссертации состоится "21" апреля 2017 года, в 10-00, на заседа-
нии совета Д 002.231.02 на базе Федерального государственного бюджетно-
го учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А.
Котельникова РАН (ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН) по адресу: 125009,
Москва, ул. Моховая 11, корп.7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. Котельникова
и на сайте <http://www.cplire.ru/rus/dissertations/Seliverstov/index.html>

Автореферат разослан "___" _____ 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,



Потапов А.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В последнее десятилетие наблюдается значительный рост заинтересованности исследователей к терагерцовому (ТГц) диапазону электромагнитного излучения (100 ГГц – 10 ТГц [1]). Объясняется этот интерес тем, что данное излучение может быть использовано и используется в настоящее время во многих важных практических областях, связанных с системами безопасности, биологией, медициной и др. [2, А7] Среди этих приложений укажем, к примеру, контроль фармацевтической продукции с помощью ТГц спектроскопии, обнаружение взрывчатых и наркотических веществ, диагностика кожных болезней [3] и др. Для аналитической спектроскопии ТГц диапазон привлекателен тем, что в нем лежат наиболее интенсивные вращательные спектры многих легких молекул и низкочастотные колебательные спектры поглощения тяжёлых органических молекул [А3]. Регистрация спектров поглощения газов в ТГц частотном диапазоне с высоким (вплоть до кГц) разрешением является сложной задачей. Для этого требуются стабильные (10^{-8} – 10^{-9} от несущей частоты) и перестраиваемые в широком диапазоне источники, а также быстродействующие и чувствительные приемники ТГц излучения, такие как болометры на эффекте электронного разогрева, исследуемые в рамках данной диссертационной работы.

Однако существенной проблемой, препятствующей дальнейшему развитию применения ТГц излучения в перечисленных выше важнейших практических приложениях, в настоящее время является то, что современные источники ТГц излучения зачастую являются маломощными, характеризуются низкой стабильностью, сложностью в эксплуатации, а также являются дорогостоящими. В то же время существует ряд импульсных ТГц источников, которые оказываются востребованными в указанных выше приложениях. Существует несколько методов генерации импульсного ТГц излучения, такие как оптическое выпрямление [4], генерация на разностной частоте в нелинейных оптических кристаллах [5], а также с помощью фотопроводящей антенны [6]. Источники ТГц излучения, основанные на данных методах, являются относительно недорогими и легкими в эксплуатации. В то же время, системы, основанные на использовании импульсного ТГц излучения, должны быть оснащены чувствительными и быстродействующими детекторами, поскольку применение медленных детекторов приводит к искажению формы принимаемых импульсов и ухудшению отношения сигнал-шум.

Довольно перспективными в этом отношении являются детекторы на основе болометров на эффекте электронного разогрева, исследуемые в настоящей диссертационной работе. Данные детекторы демонстрируют высо-

кую чувствительность в сравнении с другими детекторами ТГц излучения, работающими при околотемиельных температурах (эквивалентная мощность шума $\sim 10^{-13}$ Вт·Гц^{-0.5}) [А8], но при этом обладают на несколько порядков меньшей постоянной времени (~ 50 пс).

Цель работы. Целью настоящей диссертационной работы являлось исследование физики работы NbN микроболометра на эффекте электронного разогрева в режиме детектирования коротких (длительностью менее 50 пс) импульсов излучения ТГц и ближнего ИК диапазона.

Основные результаты. В ходе работы были получены следующие научные результаты:

1. Исследована оптическая эквивалентная мощность шума детекторной системы на основе интегрированного с антенной ТГц NbN болометра на эффекте электронного разогрева, изготовленного по оптимизированной технологии. Исследована зависимость эквивалентной мощности шума детектора от размеров его чувствительного элемента. Для детектора с оптимизированными размерами чувствительного элемента наилучшее полученное значение эквивалентной мощности шума составило $2,0 \times 10^{-13}$ Вт·Гц^{-0.5} на частоте излучения 2,5 ТГц.
2. Проведено прямое измерение энергетического разрешения детекторной системы на основе интегрированного с антенной NbN болометра на эффекте электронного разогрева, изготовленного по оптимизированной технологии. Данные измерений подтвердили расчёты энергетического разрешения, основанные на экспериментальных данных об эквивалентной мощности шума и постоянной времени детектора, полученных в двух различных экспериментах.
3. Разработана модель болометра, позволяющая учесть неоднородность разогрева его чувствительного элемента, находящегося в резистивном состоянии, под действием тепловой мощности тока смещения и мощности падающего излучения. С помощью разработанной модели исследовано влияние вклада данной неоднородности на вольт-ваттную чувствительность, эквивалентную мощность шума и энергетическое разрешение детектора при различных размерах его чувствительного элемента.
4. Экспериментально продемонстрирована возможность регистрации с рекордным временным разрешением импульсов ТГц излучения наносекундной длительности, сгенерированных в нелинейной оптической среде методом оптического выпрямления и методом генерации на разностной частоте, с помощью детекторной системы на основе NbN болометра на эффекте электронного разогрева.

5. Разработаны методы определения степени гидратации наружных оболочек глаза (роговицы и склеры) с использованием ТГц излучения, исследована зависимость коэффициента отражения наружных оболочек глаза от процентного содержания в них воды по массе.

Положения выносимые на защиту.

1. Эквивалентная мощность шума детекторной системы на основе быстрогодействующего (постоянная времени менее 100 пс) интегрированного с антенной NbN болометра на эффекте электронного разогрева достигает $2,0 \times 10^{-13} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-0,5}$ на частоте излучения 2,5 ТГц.
2. Энергетическое разрешение детекторной системы на основе NbN болометра на эффекте электронного разогрева достигает 1,5 аДж.
3. Учёт неоднородности разогрева чувствительного элемента болометра под действием тока смещения и падающей мощности позволяет получить значение вольт-ваттной чувствительности, соответствующее экспериментально измеренному значению в 2500 В/Вт.
4. Зарегистрированная с помощью детекторной системы на основе NbN болометра на эффекте электронного разогрева пиковая мощность в импульсе ТГц излучения наносекундной длительности, полученного в нелинейной оптической среде методом оптического выпрямления и методом генерации на разностной частоте, составляет от 0.07 до 0.7 мВт.

Практическая значимость. В настоящее время на базе компании ЗАО “Сверхпроводниковые нанотехнологии”, созданной сотрудниками и аспирантами Учебно-научного радиофизического центра МПГУ, основываясь на результатах диссертационного исследования, проводится разработка оптимизированных ТГц импульсных детекторных систем, включающих в себя охлаждающее оборудование, обеспечивающее достижение необходимых для работы сверхпроводниковых детекторов криогенных температур: заливного гелиевого криостата или рефрижератора замкнутого цикла. Данные системы используются в научных исследованиях многими ведущими лабораториями мира, которые являются заказчиками продукции компании.

Апробация работы. Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на следующих международных и всероссийских конференциях:

1. Международная конференция по прикладной сверхпроводимости, Шарлотт, Северная Каролина, США, 10-15 августа 2014 г. (Applied

Superconductivity Conference 2014, Charlotte NC, USA, August 10-15, 2014);

2. Международный симпозиум «Нанопизика и нанопэлектроника», 10–14 марта 2014 г., Нижний Новгород, Россия;
3. 25th International Symposium on Space Terahertz Technology, 27-30 April 2014, Moscow, Russia;
4. The 4th Russia-Japan-USA Symposium on Fundamental and Applied Problems of Terahertz (THz) Devices and Technologies (RJUS 2015), 9-12 June 2015, Chernogolovka, Russia.
5. Конференция–конкурс молодых физиков, 13 февраля 2012, Москва, Россия;
6. 2-я Международная Конференция «Терагерцовое и микроволновое излучение: генерация, детектирование и применения» (International Conference «Terahertz and Microwave radiation: Generation, Detection and Applications») ТЕРА-2012 (TERA-2012), Москва, Россия, 2012.
7. Международная Школа и Конференция «Saint Petersburg OPEN 2016», 28-30 марта 2016, Санкт-Петербург, Россия.
8. X Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, 29 февраля - 3 марта 2016, Нижний Новгород, Россия.
9. Superconductors-based sensors and quantum technologies, 18-21 April 2016, Moscow, Russia.

Результаты работы неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах учебно-научного радиофизического центра Московского педагогического государственного университета.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 15 печатных работах, из них 7 статей в рецензируемых журналах, перечисленных в соответствующем разделе диссертации, 3 статьи в сборниках трудов конференций, 4 тезиса докладов и 1 патент на изобретение. Общий объем опубликованных по теме диссертации работ составил 153 мп. стр.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка условных обозначений и библиографии. Общий объем диссертации 102 страница, из них 85 страниц текста, включая 26 рисунков. Библиография включает 108 наименований на 11 страницах.

Содержание работы

Во **введении** содержится информация об актуальности темы проводимого в рамках диссертации исследования, сформулированы цели и задачи исследования, его научная новизна и практическая значимость, представлены результаты, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных данных, описана структура диссертации.

В **первой главе** представлен обзор теоретических и экспериментальных работ по тематике исследования и постановке самой проблемы исследования. Представлен обзор публикаций по исследованию физики работы и техническим характеристикам сверхпроводниковых болометров на эффекте электронного разогрева.

В п. 1.1 кратко изложены теоретические основы принципа работы детектора на основе сверхпроводникового болометра на эффекте электронного разогрева. В п. 1.2 представлен обзор основных публикаций, посвященных исследованиям смесителей на основе электронно-разогревных болометров. В п. 1.3 представлены основные результаты исследований физики работы болометров на эффекте электронного разогрева в режиме прямого детектирования. В п. 1.4 дается обоснование выбора объекта исследования, а также формулируется задача диссертационной работы.

Физика работы смесителей на основе болометров на эффекте электронного разогрева в ультратонких пленках NbN ранее подробно исследовалась, начиная с пионерских работ сотрудников Московского педагогического государственного университета [7]. Этой же научной проблеме были посвящены работы многих других исследователей из ведущих мировых лабораторий [8-10]. В настоящее время результаты этих исследований являются хорошо известными и общепринятыми. Вместе с тем, недостаточное внимание уделялось исследованию данных болометров, работающих в режиме прямого детектирования, в особенности быстродействующим.

Известно, что основными характеристиками прямых детекторов являются их чувствительность и постоянная времени. При этом оба этих параметра находятся в обратной зависимости друг от друга. В основном они определяются термоизоляционными свойствами болометра, а также условиями его работы. Традиционно болометры относят к типу довольно медленных приемников излучения. При этом их чувствительность может достигать предельно допустимых значений. К примеру, в литературе представлены ультрачувствительные T_i болометры [11], работающие в режиме электронного разогрева при температуре около 360 мК, с эквивалентной мощностью шума 3×10^{-19} Вт·Гц^{-0.5}. Детекторы на границе перехода также работающие при субмилликельвиновых температурах со столь же высокими чувствительностями, соответствующими эквивалентной мощности

шума $2 \times 10^{-18} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-0.5}$ [12]. Исследованы также сверхпроводниковые наноболометры на эффекте электронного разогрева, дизайн которых препятствовал обмену энергией между разогретыми электронами и контактами за счет блокировки диффузионного канала охлаждения. Это позволило достичь эквивалентной мощности шума детектора $9 \times 10^{-21} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-0.5}$ [13]. Такой беспрецедентный уровень чувствительности открывает возможность использования данных устройств для детектирования одиночных фотонов ТГц излучения.

При этом следует отметить, что описанные выше болометры, обладающие столь высокой чувствительностью, являются чрезвычайно медленными приборами. Для решения обратной задачи получения быстродействующего болометра необходимо эффективно отводить тепло, которое выделяется в его чувствительном элементе под действием падающего излучения. Данный подход реализован в работах других авторов [14] за счет использования сверхпроводника Nb в качестве материала чувствительного элемента болометра. Описанный в литературе болометр на висячем мостике характеризуется эквивалентной мощностью шума $1,4 \times 10^{-14} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-0.5}$, но при этом обладает внутренней постоянной времени порядка 0,9 мкс и не требует охлаждения до субмилликельвиновых температур, а работает вблизи температуры кипения жидкого гелия, что на порядки снижает стоимость используемого криогенного оборудования.

С точки зрения повышения рабочих температур весьма перспективным кажется использование высокотемпературных сверхпроводников. Такие интегрированные с антенной высокотемпературные микроболометры на висячих мостиках с эквивалентной мощностью шума $9 \times 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-0.5}$ и рабочей температурой 87,4 К представлены в работе [15]. Однако, основной проблемой, связанной с использованием высокотемпературных сверхпроводников в качестве материала болометров, является то, что так называемый тепловой (джонсоновский) шум и шум термодинамических флуктуаций существенно возрастают с переходом к более высоким рабочим температурам, что оказывает существенное влияние на чувствительность болометров на основе высокотемпературных сверхпроводников.

В данной диссертационной работе представлены результаты исследования быстрого и чувствительного интегрированного с планарной антенной прямого детектора ТГц излучения на основе NbN болометра на эффекте электронного разогрева, работающего при температуре 9,0 К. Измеренное значение эквивалентной мощности шума детектора составило $2,0 \times 10^{-13} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-0.5}$ [A8]. Полученное из измерений полосы преобразования болометра при критической температуре значение внутренней постоянной времени детектора составило 35 пс. В рамках диссертационного исследования впервые в прямом эксперименте было измерено энергетиче-

ское разрешение детектора, которое составило 1.5 аДж [A10].

Во **второй главе** представлено описание технологии изготовления использованных в работе болометров, а также контроля качества изготавливаемых образцов детекторов.

В п. 2.1 представлен краткий обзор основных технологических процессов, использованных в процессе изготовления исследуемых болометров (реактивное магнетронное распыление, термическое испарение, электронно-лучевое испарение, фотолитографию, электронную литографию, отжиг, ионное и жидкостное травление). В п. 2.2 детально изложена *in situ* технология изготовления исследуемых образцов болометров. В п. 2.3 представлено описание методики первичного тестирования изготовленных образцов детекторов на постоянном токе. В п. 2.4 приведены краткие выводы по второй главе диссертации.

Исследуемые в работе детекторы изготавливались из двуслойной структуры NbN/Au, осажденной на поверхность подложки из высокоомного кремния. Слой сверхпроводника NbN наносился в процессе реактивного магнетронного осаждения на постоянном токе в смеси газов Ar/N₂. Диаметр мишени Nb составлял 3 дюйма. Скорость осаждения составляла 100 нм в секунду. Температура подложки в процессе осаждения составляла порядка 800 °С. Слой Au осаждался при температуре подложки 200 °С в том же технологическом цикле (без разрыва вакуума - *in situ* [A2]). Скорость осаждения Au составляла 120 нм в секунду. Толщина слоев NbN и Au составляла 4 нм и 20 нм соответственно. Для формирования чувствительного элемента длиной 0.2 мкм и шириной 1.2 мкм слой золота травливался в окне из электронного резиста посредством жидкостного и плазмохимического травления. Типичное значение поверхностного сопротивления NbN пленки при комнатной температуре составляло 500 Ом на квадрат. Поэтому выбранное соотношение длины к ширине чувствительного элемента обеспечивало приемлемое согласование с планарной антенной на частоте излучения. Для согласования с падающим излучением мы используем логарифмическую спиральную антенну [6]. На Рис. 1 представлены фотографии чувствительного элемента детектора, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа.

В **третьей главе** содержатся основные научные результаты автора, выносимые им на защиту в качестве положений. Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования вольт-ваттной чувствительности, оптической эквивалентной мощности шума и энергетического разрешения детекторной системы на основе сверхпроводникового электронно-разогревного болометра.

В п. 3.1 представлено описание методики моделирования вольт-ваттной чувствительности болометра при температуре вблизи критической в раз-

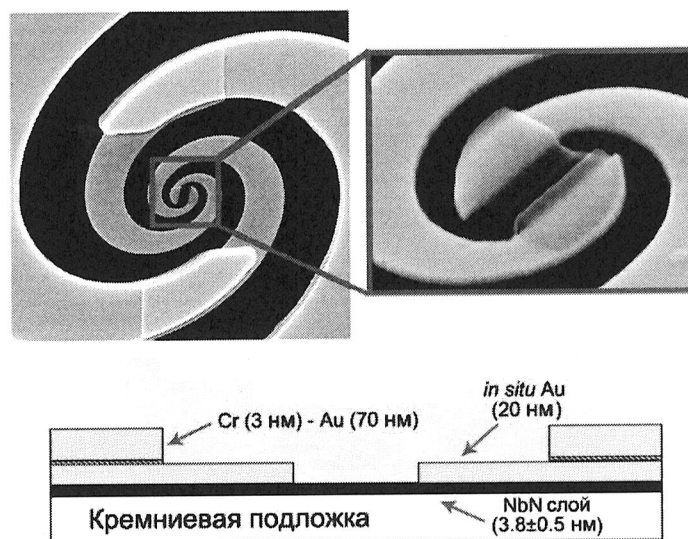


Рис. 1: Фотографии детектора, интегрированного в планарную логарифмическую спиральную антенну, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа. На фотографии справа изображен собственно чувствительный элемент болометра. На рисунке снизу представлена вертикальная структура слоев детектора.

личных точках на вольт-амперной характеристике с учетом приближения неоднородного разогрева током смещения и падающей мощностью чувствительного элемента болометра вдоль его длины. В п. 3.2 представлено описание проводимых экспериментов по измерению вольт-ваттной чувствительности детектора, а также сравнение полученных экспериментальных данных с результатами моделирования. В п. 3.3 представлен расчёт эквивалентной мощности шума детекторной системы и его сравнение с экспериментально измеренными значениями. В п. 3.4 описаны результаты эксперимента по прямому измерению энергетического разрешения детекторной системы и их сравнение с расчетными значениями, полученными из экспериментов по определению эквивалентной мощности шума и постоянной времени болометра. В п. 3.5 представлены краткие выводы по третьей главе диссертации.

Существуют две основные модели болометра на эффекте электронного разогрева: модель однородного разогрева и модель горячего пятна, представляющего собой область плёнки с подавленной сверхпроводимостью, которая возникает вследствие поглощения плёнкой падающего излучения и разогрева транспортным током. Модель однородного разогрева является по своей сути моделью сосредоточенного элемента, а то время как модель горячего пятна является моделью распределенного элемента.

В случае, если частота модуляции излучения много меньше обратной постоянной времени болометра, теоретическое значение вольт-ваттной чув-

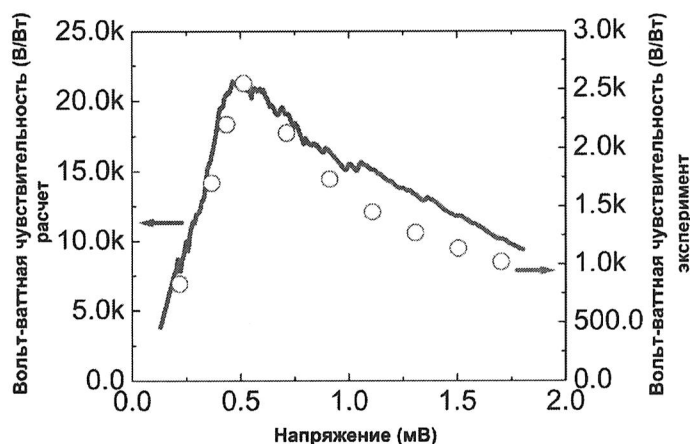


Рис. 2: Рассчитанные в соответствии с теорией Мазера значения вольт-ваттной чувствительности детектора (сплошная линия) в сравнении с измеренными значениями (незакрашенные точки) при различных напряжениях смещения детектора.

ствительности в приближении однородного разогрева болометра может быть вычислено по формуле, полученной в работах Мазера [16]:

$$S = \frac{1}{2I_b} \cdot \frac{(R_d/R) - 1}{(R_d/Z_L) + 1}, \quad (1)$$

где I - сила тока смещения болометра, $R_d = dV/dI$ - дифференциальное сопротивление в рабочей точке, R - сопротивление болометра по постоянному току, Z_L - динамическое нагрузочное сопротивление (в нашем случае оно равно входному импедансу усилителя, который на нашей частоте модуляции был практически равен его омическому сопротивлению). В наших измерениях мы получили следующие значения: $I = 29$ мкА, $R = 17$ Ом, $Z_L = 50$ Ом и $R_d = 70$ Ом. Подставляя данные значения в формулу 1, получаем расчетное значение вольт-ваттной чувствительности 22 кВ/Вт. На Рис. 2 представлены расчетные в соответствии с формулой 1 значения вольт-ваттной чувствительности в сравнении с измеренными значениями при различных значениях напряжения смещения для оптимальной вольт-амперной характеристики, полученной при температуре ванны 8,5 К.

Из Рис. 2 видно, что измеренные значения вольт-ваттной чувствительности отличаются от расчетных почти на порядок. Данное расхождение стало предпосылкой анализа отклика детектора с точки зрения распределенной модели, исключаяющей однородный разогрев чувствительного элемента детектора.

В основе предлагаемой в диссертационной работе модели болометра как распределенного элемента лежит теоретический анализ, основанный

на численном решении методом Эйлера системы уравнений теплового баланса, примененного к чувствительному элементу болометра [17]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} (\chi \frac{\partial}{\partial x} T_e) + p_{dc} + p_{rf} - p_{es} = c \frac{\partial}{\partial t} T_e, \\ p_{ep} - p_{es} = c \frac{\partial}{\partial t} T_e, \end{cases} \quad (2)$$

где χ - коэффициент теплопроводности, T_e - локальная температура электронной подсистемы, p_{dc} - джоулевая мощность тока на единицу объёма, c - теплоёмкость болометра на единицу объёма, p_{ep} и p_{es} - мощности теплового потока на единицу объёма между электронной и фоновой подсистемами, а также между фоновой подсистемой и подложкой, p_{rf} - поглощённая мощность излучения на единицу объёма.

В расчётах была использована полученная в эксперименте зависимость сопротивления болометра от температуры. Коэффициент теплопроводности, относящейся к сопротивлению нормального состояния сверхпроводника, определялся из закона Видемана-Франца:

$$\chi = \frac{\pi^2 k_B^2 S}{3e^2} \left(\frac{T_b}{\rho} \right), \quad (3)$$

где $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - постоянная Больцмана, $T_b = 8.5$ К - температура тепловой ванны, $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл - заряд электрона, $S = 8 \cdot 10^{-15}$ м² - площадь поперечного сечения чувствительного элемента болометра, ρ - удельное сопротивление сверхпроводника в нормальном состоянии, рассчитанное из экспериментальных данных.

Мощность теплового потока на единицу объёма между фоновой подсистемой и подложкой задавалась следующим соотношением:

$$p_{es} = G(T_e)(T_e - T_b), \quad (4)$$

где $G = c/\tau_{e-ph}$ - коэффициент теплопередачи, $c = 1.84 \times 10^2 T_e$ Дж/м³·К² - электронная теплоемкость, $\tau_{e-ph} = 10^3 T_e^{-1.6}$ пс·К^{-1.6} - время электрон-фононного взаимодействия [18].

Используя данный подход, были получены температурные профили чувствительного элемента болометра (зависимость электронной температуры болометра от координаты вдоль его длины) при различных значениях тока смещения и температуры ванны. Сопротивление детектора по постоянному току в оптимальной рабочей точке с максимальным измеренным значением отношения сигнал-шум равно 17 Ом. Соответствующее значение температуры ванны равно 8,5 К. В то же время температура ванны, соответствующая оптимальной вольт-амперной характеристике для этого значения сопротивления болометра равна 9,0 К (см. Рис. 3). Данный результат хорошо согласуется со вычисленным средним значением температуры

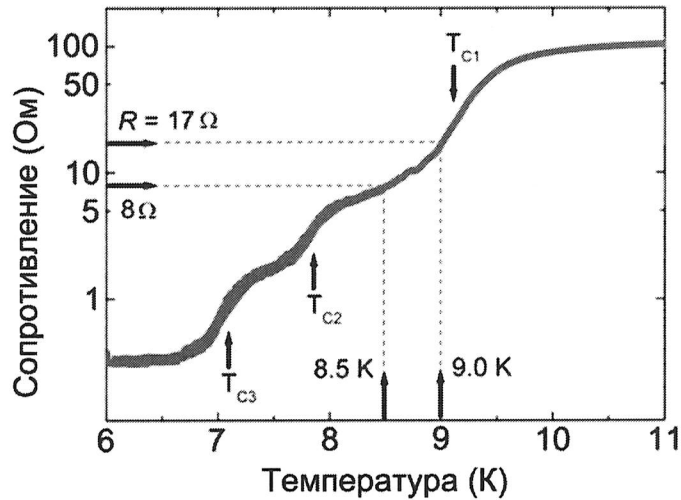


Рис. 3: Температурная зависимость сопротивления детектора. Сопротивление детектора по постоянному току в оптимальной рабочей точке составляет 17 Ом. Рабочая температура болометра равна 9.0 К. Соответствующая температура ванны равна 8.5 К.

электронной подсистемы:

$$\bar{T}_e = \frac{1}{l} \int_0^l T_e(x) dx, \quad (5)$$

где l – длина чувствительного элемента детектора.

Используя полученные профили и экспериментальную зависимость сопротивления болометра от температуры, мы рассчитали сопротивление чувствительного элемента детектора при различных значениях температуры ванны вблизи критической:

$$R(I) = \frac{1}{l} \int_0^l R(T_e(I, x)) dx, \quad (6)$$

где I – ток смещения.

В этих вычислениях мы пренебрегли нетермическим влиянием тока, что является приемлемым приближением, в случае если температура тепловой ванны близка к критической. Используя эти данные, были рассчитаны вольт-амперные характеристики без излучения и под воздействием излучения заданной мощности. Из полученных вольт-амперных характеристик рассчитывалось значение вольт-ваттной чувствительности при различных токах смещения:

$$S(I) = \frac{R_L}{R_L + R_d} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta P}, \quad (7)$$

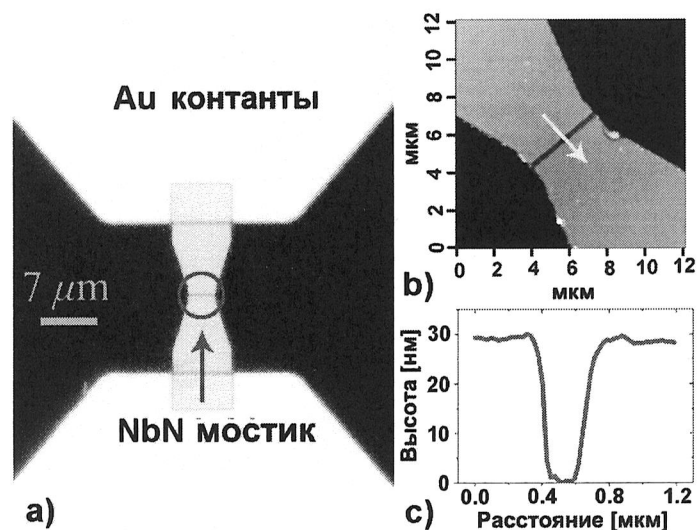


Рис. 4: Изображения центральной части болометра, изготовленного для прямого экспериментального измерения энергетического разрешения: а – полученное с помощью оптического микроскопа, б – полученное с помощью атомно-силового микроскопа, с – вертикальный профиль чувствительного элемента болометра вдоль линии, обозначенной жёлтой стрелкой.

где R_L – нагрузочное сопротивление (в нашем случае 50 Ом – входное сопротивление используемого усилителя), $R_d = \Delta U / \Delta I$ – дифференциальное сопротивление болометра в данной точке на вольт-амперной характеристике, ΔV – изменение напряжения при данном токе смещения при изменении мощности падающего излучения на ΔP . Расчетное значение вольт-ваттной чувствительности в рабочей точке составило 13 кВ/Вт.

Далее мы оценили оптические потери в компонентах экспериментальной установки. Потери в кремниевой линзе составляют приблизительно 1,5 дБ. Данные потери обусловлены преимущественно отражением от поверхности линзы, поскольку на линзе не было антиотражающего покрытия. Измеренное значение потерь в окне криостата и охлаждаемых фильтров инфракрасного излучения составляют около 2 дБ. С учетом этих потерь значение вольт-ваттной чувствительности детектора составляет 6 кВ/Вт. Оставшуюся часть расхождения мы связываем с неидеальным согласованием между детектором и падающим излучением, а также между планарной антенной и чувствительными элементами (неидеальным согласованием между радиационным сопротивлением антенны и импедансом болометра на частоте падающего излучения).

Измеренное значение эквивалентной мощности шума детекторной системы составило $NEP_{Rx} = 2,0 \times 10^{-13}$ Вт·Гц^{-0.5}. Опубликованное в литературе [18] граничное значение полосы промежуточных частот при критической температуре смесителя на эффекте электронного разогрева, анало-

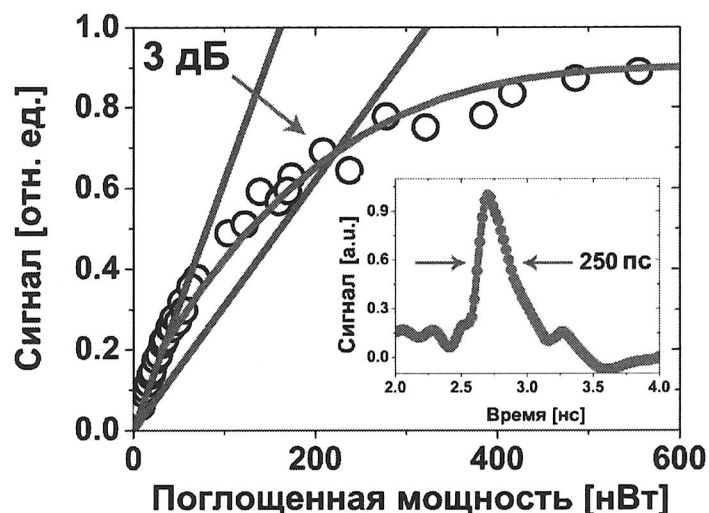


Рис. 5: Полученная экспериментальная зависимость сигнала с детектора от поглощенной мощности. Точка трёхдецибелльной компрессии обозначена на рисунке стрелкой. Красная линия представлена для облегчения визуального восприятия. На вставке представлена временная развертка отклика детектора на импульсы излучения 1,55-микронного лазера длительностью менее 50 пс.

гичного тому, что исследован в настоящей работе, позволяет сделать оценку энергетического разрешения детектора. Оно должно составлять около 3 аДж.

Однако, данный результат следовал лишь из расчета и требовал прямого экспериментального подтверждения, что было сделано в рамках данной диссертационной работы. Для этой цели были изготовлены специальным образом оптимизированные образцы болометров различных размеров в плане. Изображения центральной части одного из таких болометров длиной около 0,4 мкм и шириной около 4 мкм, полученные с помощью оптического и атомно-силового микроскопов, представлены на Рис. 4. Для получения изображения со сканирующего микроскопа атомных сил верхний защитный слой SiO_2 стравливался посредством жидкостного травления, которое приводило также к частичному стравливанию кварцевой подложки.

Детекторы были изготовлены на основе тонких пленок NbN (толщиной около 4 нм), нанесенных на полированную поверхность кварцевых подложек. Процесс изготовления был в целом аналогичен тому, что описан в предыдущих разделах с той лишь разницей, что чувствительный элемент здесь не интегрировался с планарной антенной. Объяснялось это тем, что длина волны принимаемого излучения составляла 1,55 мкм, что вполне сравнимо с размерами самого чувствительного элемента.

На Рис. 5 представлена полученная зависимость сигнала с детектора от

поглощенной мощности в импульсе излучения 1,55-микронного лазера длительностью менее 50 пс. Величина поглощенной мощности определялась с помощью методики, которая подробно описана в литературе [19]. Верхняя граница трехдецибелного динамического диапазона детектора соответствует 220 нВт поглощенной мощности. Минимально различимый сигнал соответствует поглощенной мощности 8,3 нВт. Таким образом, трехдецибелный динамический диапазон детектора составляет приблизительно 14 дБ.

На вставке к Рис. 5 представлена временная развертка отклика детектора. Длительность переднего фронта составляет около 130 пс и определяется высокочастотными свойствами тракта. Длительность заднего фронта составляет около 400 пс. Длительность импульса на полувысоте составляет около $\tau_0 = 250$ пс. Полученное в эксперименте значение эквивалентной мощности шума составило $NEP_{Rx} = 1,1 \times 10^{-13}$ Вт·Гц^{-0,5}. Это значение хорошо согласуется с результатом, полученным для аналогичных NbN детекторов в ТГц диапазоне, что подтверждает частотную независимость физического механизма формирования отклика сверхпроводникового болометра на эффекте электронного разогрева на падающее излучение. Таким образом, в прямом эксперименте было продемонстрировано энергетическое разрешение изучаемого в работе детектора порядка $\delta E = NEP_{Rx} \sqrt{\tau_0} = 1,5$ аДж на полувысоте импульса [A10].

В **четвёртой главе** представлен обзор экспериментов по регистрации ТГц импульсного излучения, которые были проведены в рамках диссертационной работы.

В п. 4.1 приведено описание эксперимента по регистрации импульсов ТГц излучения наносекундной длительности, сгенерированных методом оптического выпрямления в нелинейном оптическом кристалле, с помощью исследуемых в диссертационной работе детекторов. В п. 4.2 представлено описание эксперимента по регистрации исследуемым в работе болометром импульсного ТГц излучения, полученного методом генерации на разностной частоте. В п. 4.3 представлены краткие выводы по четвёртой главе диссертации.

В эксперименте по регистрации ТГц импульсов наносекундной длительности, сгенерированных методом оптического выпрямления [A1], с помощью исследуемого в работе детектора на основе болометра на эффекте электронного разогрева были зарегистрированы импульсы излучения 1.5 ТГц (данное значение было косвенно определено, исходя из величины периода доменной структуры используемого кристалла PPLN, равной 65 мкм) наносекундной длительности. Также была исследована зависимость пиковой мощности сгенерированного ТГц излучения от энергии импульсов накачки. Таким образом, также была на практике продемонстри-

рована возможность использования исследуемого в работе детектора в качестве измерителя пиковой мощности коротких импульсов излучения ТГц диапазона.

В эксперименте по регистрации коротких импульсов ТГц излучения, полученных методом генерации на разностной частоте в нелинейной оптической среде [А5], использование болометра на эффекте электронного разогрева позволило существенно увеличить измеренное отношение сигнал-шум. Детекторы с большой постоянной времени, такие как ячейка Голея, способны регистрировать лишь среднее значение мощности сгенерированного ТГц излучения, в то время как детекторы с малой постоянной времени, такие как исследованный болометр на эффекте электронного разогрева, способны зарегистрировать пиковое значение мощности, увеличивая тем самым отношение сигнал-шум. За счет этого удалось с высокой точностью измерить зависимость мощности сгенерированных импульсов ТГц излучения от угла между оптической осью Z кристалла GaSe и коллинеарными пучками излучения накачки (так называемая кривая фазового синхронизма).

Заключение содержит список основных результатов, полученных в работе.

Работы автора по теме диссертации

Статьи в научных журналах из перечня ВАК РФ:

- [А1] Селиверстов, С. В., Тучак, А. Н., Гольцман, Г. Н., Китаева, Г. Х., Пенин, А. Н., Финкель, М. И., Якунин, П. В. Генерация терагерцовых импульсов наносекундной длительности методом оптического выпрямления // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2012. – Т. 96. – №. 2. – С. 97-101.
- [А2] Третьяков И.В., Финкель М.И., Рябчун С.А., Кардакова А.И., Селиверстов С.В., Петренко Д.В., Гольцман Г.Н. Смесители на эффекте электронного разогрева с *in situ* контактами // Известия высших учебных учреждений. Радиофизика. – 2013. – Т. 56. – № 8-9. – С. 657-665.
- [А3] Анфертьев В. А., Вакс В. Л., Пентин И. В., Гольцман Г. Н., Селиверстов С. В., Финкель М.И., Рябчун С. А., Третьяков И. В. Широкодиапазонный спектрометр высокого разрешения ТГц частотного диапазона // Вестник Нижегородского университета им. НИ Лобачевского. – 2014. – №. 1-2.

Статьи в иностранных журналах, включенных в международные системы цитирования Web of Science и Scopus:

- [A4] I. V. Tretyakov, M. I. Finkel, S. A. Ryabchun, A. I. Kardakova, S. V. Seliverstov, D. V. Petrenko, G. N. Goltsman. Hot-electron bolometer mixers with in situ contacts // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2014. – Т. 56. – №. 8-9. – С. 591-598.
- [A5] A A Angeluts, V V Bezotosnyi, E A Cheshev, G N Goltsman, M I Finkel, S V Seliverstov, M N Evdokimov, M V Gorbunkov, G Kh Kitaeva, A L Koromylov Compact 1.64 THz source based on a dual-wavelength diode end-pumped Nd: YLF laser with a nearly semiconfocal cavity // Laser Physics Letters. 2013. – Т. 11. – №. 1. – С. 015004.
- [A6] Shurakov A., Seliverstov S., Kaurova N. Et al. Input bandwidth of hot electron bolometer with spiral antenna // Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on. – 2012. – Vol. 2, no. 4. – P. 400–405.
- [A7] Iomdina E. N., Goltsman G. N., Seliverstov S. V. et al. Study of transmittance and reflectance spectra of the cornea and the sclera in the THz frequency range // Journal of Biomedical Optics. – 2016. – Vol. 21, no. 9. – P. 097002–097002.
- [A8] Seliverstov S., Maslennikov S., Ryabchun S. et al. Fast and Sensitive Terahertz Direct Detector Based on Superconducting Antenna-Coupled Hot Electron Bolometer // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2015. – Vol. 25, no. 3.
- [A9] Galin M. A., Klushin A. M., Seliverstov S. V. et al. Towards local oscillators based on arrays of niobium Josephson junctions // Superconductor Science and Technology. – 2015. – Vol. 28, no. 5. – P. 055002.
- [A10] Seliverstov, S. V., Rusova, A. A., Kaurova, N. S., Voronov, B. M., Goltsman, G. N. (2016, August). Attojoule energy resolution of direct detector based on hot electron bolometer. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 741, No. 1, p. 012165). IOP Publishing.

Патенты на изобретения:

- [A11] Гольцман Г.Н., Финкель М.И., Селиверстов С.В. и др. Матрица сверхпроводящих детекторов субмиллиметрового и дальнего инфракрасного излучения. Патент РФ №2515416, 2014.

Список литературы

- [1] Linfield E. Terahertz applications: A source of fresh hope //Nature Photonics. – 2007. – Т. 1. – №. 5. – С. 257-258.
- [2] Siegel P. H. Terahertz technology in biology and medicine //IEEE transactions on microwave theory and techniques. – 2004. – Т. 52. – №. 10. – С. 2438-2447.
- [3] Woodward R. M. et al. Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer and skin tissue //Physics in medicine and biology. – 2002. – Т. 47. – №. 21. – С. 3853.
- [4] Морозов Б. Н., Айвазян Ю. М. Эффект оптического выпрямления и его применения (обзор) //Квантовая электроника. – 1980. – Т. 7. – №. 1. – С. 5-33.
- [5] Слабко В. В. Нелинейно-оптические преобразования частот //Сороковский образовательный журнал. – 1999. – №. 5. – С. 105-111.
- [6] Grischkowsky D. et al. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors //JOSA B. – 1990. – Т. 7. – №. 10. – С. 2006-2015.
- [7] Karasik B. S., Elantiev A. I. Noise temperature limit of a superconducting hot-electron bolometer mixer //Applied physics letters. – 1996. – Т. 68. – №. 6. – С. 853-855.
- [8] Baselmans J. J. A. et al. Doubling of sensitivity and bandwidth in phonon cooled hot electron bolometer mixers //Applied Physics Letters. – 2004. – Т. 84. – №. 11. – С. 1958-1960.
- [9] Karasik B. S. et al. A low-noise 2.5 THz superconductive Nb hot-electron mixer //IEEE transactions on applied superconductivity. – 1997. – Т. 7. – №. 2. – С. 3580-3583.
- [10] Cherednichenko S. et al. Gain bandwidth of NbN hot-electron bolometer terahertz mixers on 1.5 μm $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ membranes //Journal of applied physics. – 2007. – Т. 101. – №. 12. – С. 124508.
- [11] Karasik B. S., Cantor R. Demonstration of high optical sensitivity in far-infrared hot-electron bolometer //Applied Physics Letters. – 2011. – Т. 98. – №. 19. – С. 193503.
- [12] Morozov D. et al. Ultrasensitive TES bolometers for space-based FIR astronomy //IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2011. – Т. 21. – №. 3. – С. 188-191.
- [13] Wei J. et al. Ultrasensitive hot-electron nanobolometers for terahertz astrophysics //Nature nanotechnology. – 2008. – Т. 3. – №. 8. – С. 496-500.

- [14] Luukanen A., Pekola J. P. A superconducting antenna-coupled hot-spot microbolometer //Applied Physics Letters. – 2003. – Т. 82. – №. 22. – С. 3970-3972.
- [15] Rice J. P., Grossman E. N., Rudman D. A. Antenna-coupled high-Tc air-bridge microbolometer on silicon //Applied physics letters. – 1994. – Т. 65. – №. 6. – С. 773-775.
- [16] Mather J. C. Bolometer noise: nonequilibrium theory //Applied Optics. – 1982. – Т. 21. – №. 6. – С. 1125-1129.
- [17] Barends R. et al. Current-induced vortex unbinding in bolometer mixers //Applied Physics Letters. – 2005. – Т. 87. – №. 26. – С. 263506.
- [18] Tretyakov I. et al. Low noise and wide bandwidth of NbN hot-electron bolometer mixers //Applied Physics Letters. – 2011. – Т. 98. – №. 3. – С. 033507.
- [19] С.Н.Масленников. Смесители на эффекте электронного разогрева для терагерцового и инфракрасного диапазонов: Кандидатская диссертация / Московский педагогический государственный университет. 2007.