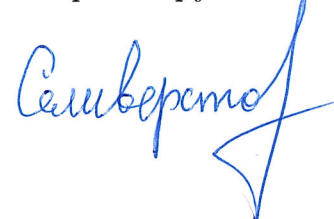


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования "Московский педагогический государственный  
университет"

На правах рукописи



Селиверстов Сергей Валерьевич

**Энергетическое разрешение интегрированного с  
антенной терагерцового NbN микроболометра на  
горячих электронах**

01.04.03 – Радиофизика

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель

д. ф.-м. н., проф.

Гольцман Г.Н.

Москва – 2016

# Оглавление

<b>Введение</b> . . . . .	4
<b>Глава 1. Обзор литературы и постановка задачи исследования</b>	24
1.1. Эффект электронного разогрева в сверхпроводниках . . . . .	24
1.2. Болومتر на эффекте электронного разогрева как смеситель . . .	29
1.3. Электронно-разогревной болومتر как прямой детектор . . . . .	31
1.4. Выводы к главе . . . . .	33
<b>Глава 2. Технология изготовления терагерцовых детекторов на эффекте электронного разогрева, интегрированных в планарную логарифмическую спиральную антенну</b> . . . . .	35
2.1. Обзор современных технологий изготовления микро- и наноразмерных устройств . . . . .	35
2.2. Технология изготовления образцов детекторов, исследуемых в диссертационной работе . . . . .	38
2.3. Первичные исследования изготовленных образцов на постоянном токе . . . . .	45
2.4. Выводы к главе . . . . .	50
<b>Глава 3. Исследование вольт-ваттной чувствительности, оптической эквивалентной мощности шума и энергетического разрешения болметра на основе эффекта электронного разогрева</b>	52
3.1. Моделирование вольт-ваттной чувствительности болметра при температуре близкой к критической . . . . .	53
3.2. Исследование вольт-ваттной чувствительности и оптической эквивалентной мощности шума по оптимизированной методике . . .	58
3.3. Теоретический расчёт эквивалентной мощности шума детектора	63

3.4. Прямое экспериментальное измерение энергетического разрешения детектора . . . . .	67
3.5. Выводы к главе . . . . .	72
<b>Глава 4. Применение детекторной системы для регистрации коротких импульсов терагерцового излучения . . . . .</b>	<b>73</b>
4.1. Регистрации ТГц импульсов наносекундной длительности, сгенерированных методом оптического выпрямления . . . . .	73
4.2. Детектирование коротких импульсов ТГц излучения, полученных методом генерации на разностной частоте в нелинейной оптической среде . . . . .	75
4.3. Исследование коэффициента отражения роговицы и склеры в субтерагерцовом диапазоне . . . . .	78
4.4. Выводы к главе . . . . .	81
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>82</b>
<b>Список сокращений и условных обозначений . . . . .</b>	<b>87</b>
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>91</b>

## Введение

В настоящее время активно развиваются различные направления научно-практических исследований и разработок, связанных с детектированием терагерцового излучения. В ряде задач, где необходимо высокое спектральное разрешение, используется когерентное (гетеродинное) детектирование излучения, и для реализации максимального эффекта в этих системах необходимо использовать смесители с низкой шумовой температурой, широкой полосой преобразования и малой мощностью гетеродина. В других задачах, где не требуется высокое спектральное разрешение, используется некогерентное (прямое) детектирование, и наиболее важными характеристиками прибора являются эквивалентная мощность шума, быстродействие, компактность одного детектора, особенно в случае использования больших матриц для получения изображений. Причём зачастую для реальных практических применений требуется сочетание одновременно низкой эквивалентной мощности шума и высокого быстродействия. В радиометрах, в простейшем случае, температурное разрешение обратно пропорционально квадратному корню из полосы детектирования и улучшается при уменьшении эквивалентной мощности шума. Таким образом, увеличение полосы детектирования и уменьшение эквивалентной мощности шума являются важными практическими задачами. Требования, предъявляемые к чувствительности и быстродействию приемников терагерцового диапазона, определили необходимость перехода к криогенным температурам, где достигается наименьший шум тепловых флуктуаций, и нанометровым размерам рабочих структур, что обеспечивает высокую чувствительность и быстродействие. При этом за последние несколько лет был достигнут существенный прогресс в разработке и производстве дешевых и компактных охлаждающих системах замкнутого цикла, не требующих жидкого гелия для достижения температур порядка нескольких кельвинов.

Обнаруженный ранее эффект электронного разогрева в тонких сверхпро-

водниковых пленках позволил разработать уникальные детекторы электромагнитного излучения, обладающие рекордной чувствительностью и быстродействием, а именно, *боллометры на эффекте электронного разогрева* в сверхпроводниковых наноструктурах (англ.: *hot-electron-bolometer*, *НЕВ*) [1, 2]. История данных боллометров началась в 80-х годах XX века, когда возник большой интерес научного сообщества к изучению неравновесной сверхпроводимости. Под горячими электронами понимаются носители заряда, энергетическое распределение которых смещено относительно равновесного при данной температуре в сторону больших энергий [3]. Исторически эффект электронного разогрева изучался сперва в металлах [4] и полупроводниках [5]. Впервые эффект разогрева электронов в тонких сверхпроводниковых плёнках, находящихся в резистивном состоянии, был обнаружен группой Е.М. Гершензона из Московского государственного педагогического института им. В.И. Ленина, ныне Московского педагогического государственного университета [6, 7]. Природа открытого явления была подтверждена и более глубоко теоретически и экспериментально исследована позже в работах [8–10]. В этих работах был представлен детальный теоретический анализ механизма электронного разогрева, а также проведено сравнение теоретических данных с экспериментом. Было исследовано влияние излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазона на физические свойства узких Nb полосок, находящихся в резистивном состоянии. Было показано, что под воздействием излучения возникает дополнительное сопротивление полоски. При этом было показано, что зависимость времени релаксации этого сопротивления от мощности падающего излучения и тока смещения может быть объяснена эффектом электронного разогрева. Использованная авторами модель, предполагающая однородное распределение электронной температуры полоски под действием падающего излучения, позволила получить количественное согласие с экспериментальными данными.

Базовый принцип работы детекторов на основе боллометров на эффекте электронного разогрева сводится к следующему. Электронная подсистема сверх-

проводника нагревается под действием падающего электромагнитного излучения до температуры, значение которой существенно выше температуры решетки (фононной температуры). Возникновение данного эффекта возможно только при криогенных температурах, поскольку при комнатной температуре электронная и фононная подсистемы в металлах сильно связаны [11]. Разогрев электронной подсистемы сверхпроводника становится причиной изменения сопротивления болометра. По величине этого изменения с использованием известной зависимости сопротивления болометра от температуры определяется мощность падающего излучения. При этом в качестве поглотителя и собственно болометрического элемента (элемента с известной температурной зависимостью сопротивления) могут выступать два различных физических объекта, или же один единственный объект, совмещающий в себе оба указанных свойства. В изучаемых в работе болометрах на эффекте электронного разогрева таким объектом является электронная подсистема ультратонкой пленки сверхпроводника. Механизм охлаждения электронной подсистемы болометра связан с электрон-фононным взаимодействием и уходом неравновесных фононов из пленки в подложку [10], а также уходом неравновесных электронов в металлические контакты за счет диффузии [12–15] для болометров с длиной чувствительного элемента меньше диффузионной длины.

Успехи в понимании физики происходящих процессов в тонких сверхпроводниковых плёнках под воздействием излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазона стимулировали создание практических устройств (болометров), работающих на этом принципе. Главным стал вопрос согласования чувствительного элемента болометра с падающим излучением. В этом направлении стали активно развиваться два подхода: волноводный и квазиоптический. В случае волноводного согласования болометр зажимается между двумя секциями волноводного блока. Передняя секция несет гофрированный рупор. Длина волновода в задней секции подбирается таким образом, чтобы обеспечить оптимальное согласование болометра с излучением [16]. На частотах выше 1 ТГц

традиционно используется квазиоптическая схема согласования, поскольку изготовление рупора на эти частоты представляет собой сложную техническую задачу. В случае квазиоптического согласования болометр интегрируется с планарной антенной, расположенной в фокусе вытянутой полусферической или эллиптической линзы [17–19].

Существенным преимуществом болометра на эффекте электронного разогрева является то, что он может работать как в режиме прямого детектора, так и в режиме смесителя. В том случае, если требуется получить предельно высокое спектральное разрешение, или же требуется получить фазовую информацию о сигнале относительно известного источника (гетеродина), болометр может быть использован в когерентном (гетеродинном) режиме работы.

В этом случае на болометр одновременно подается сигнал гетеродина известной частоты  $\omega_{LO}$  и мощности:

$$E_{LO} \cos(\omega_{LO}t). \quad (1)$$

А также сигнальное излучение частоту  $\omega_{RF}$ , фазу  $\varphi_{RF}$  и мощность которого требуется определить:

$$E_{RF} \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}). \quad (2)$$

В формулах 1 и 2  $E_{LO}$  и  $E_{RF}$  - амплитудные значения напряженностей полей излучения гетеродина и сигнального источника, соответственно. Как уже говорилось ранее, болометр регистрирует мощность поглощенного излучения, которая пропорциональна квадрату амплитуды колебаний напряженности суммарного поля. Из-за этой нелинейности и возникает возможность работы болометра в режиме смесителя, когда сигнал формируется на разностной частоте между частотой сигнала и гетеродина. Поэтому в случае  $\omega_{RF} \approx \omega_{LO}$  получаем:

$$\begin{aligned} V_S(t) &\propto [E_{RF} \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) + E_{LO} \cos(\omega_{LO}t)]^2 = \\ &= E_{RF}E_{LO} \cos(\omega_{IF}t + \varphi_{RF}) + H(t), \end{aligned} \quad (3)$$

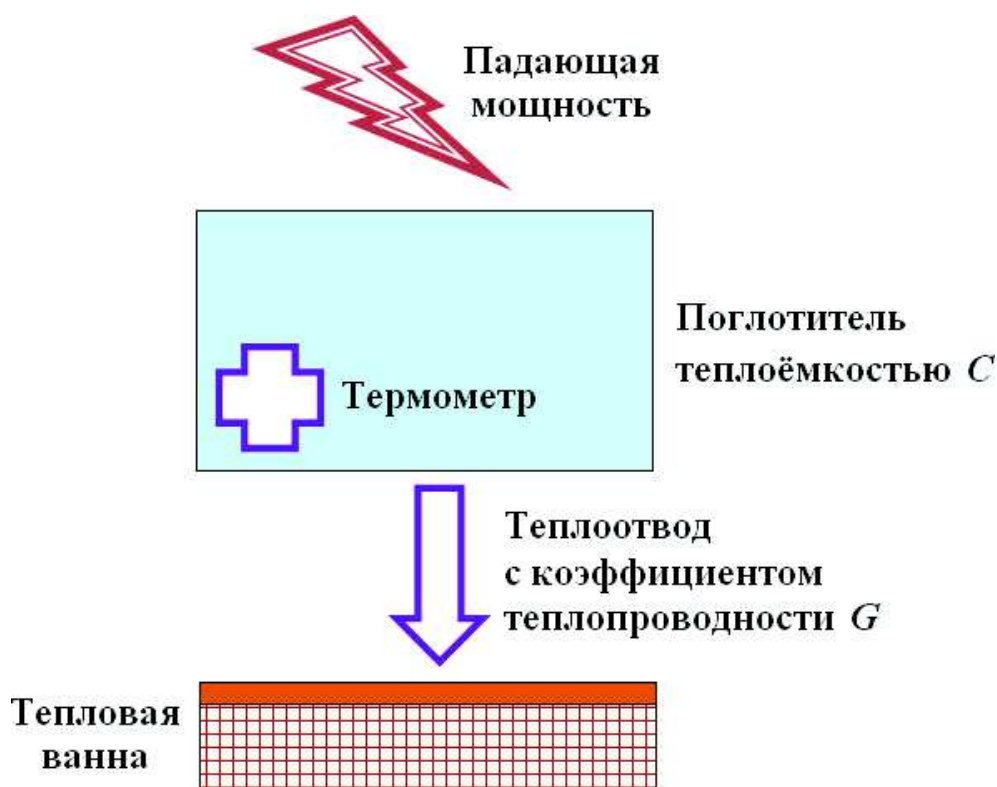


Рис. 1. Принципиальная схема болометра. В случае исследуемых в работе болометров на эффекте электронного разогрева поглотитель и термометр объединены в одном физическом объекте – электронной подсистеме ультратонкой пленки сверхпроводника.

где  $V_S(t)$  - временная зависимость напряжения сигнала со смесителя,  $H(t)$  - временная зависимость высокочастотной составляющей сигнала, которая отфильтровывается в компонентах гетеродинной системы. Таким образом сигнал формируется на т. н. разностной или промежуточной частоте:

$$\omega_{IF} = |\omega_{RF} - \omega_{LO}|. \quad (4)$$

В этом сигнале содержится фазовая и амплитудная информация об излучении сигнального источника. На практике предельное значение спектрального разрешения, получаемого в данном режиме работы болометра, определяется шириной линии генерации гетеродина и стабильностью его работы. Фундаментальный предел со стороны болометра ограничен его временем Аллана и может достигать единиц герц.

В режиме прямого детектирования, который также называют некогерент-



ным режимом работы, болометр регистрирует величину поглощенной мощности излучения, приходящего во входной полосе. При этом для получения спектрального разрешения могут быть использованы различные узкополосные фильтры, призмы, дифракционные решетки и т. п. Принципиальная блок-схема работы любого болометра в режиме прямого детектора представлена на Рис. 1. Особенностью исследуемых в работе болометров на эффекте электронного разогрева является то, что поглотитель и термометр объединены в одном физическом объекте – электронной подсистеме ультратонкой сверхпроводниковой пленки.

Важным параметром болометра является его *внутренняя постоянная времени*:

$$\tau_0 = \frac{C}{G}, \quad (5)$$

где  $C$  – теплоемкость поглотителя,  $G$  – коэффициент теплопроводности теплоотвода, соединяющего поглотитель с тепловой ванной. Постоянная времени характеризует быстродействие болометра. Чувствительность болометра, работающего в режиме прямого детектора, с точки зрения возможности регистрации сигналов минимальной мощности характеризуется *эквивалентной мощностью шума* (англ.: *noise-equivalent power, NEP*):

$$NEP_{Rx} = \frac{V_{noise}}{S_{Rx}\sqrt{B_d}}, \quad (6)$$

где  $NEP_{Rx}$  – эквивалентная мощность шума детекторной системы,  $V_{noise}$  – среднее квадратическое значение шума системы в полосе  $B_d$  регистрирующего электрический сигнал прибора (селективного вольтметра, синхронного усилителя и т. п.),  $S_{Rx} = V_{out}/P_{inc}$  – вольт-ваттная чувствительность детекторной системы,  $V_{out}$  – напряжение сигнала под воздействием падающей мощности  $P_{inc}$ . Очевидно, чем меньше значение эквивалентной мощности шума, тем более слабые сигналы может зарегистрировать детекторная система. Интересно, что постоянная времени и эквивалентная мощность шума детектора всегда находятся в обратной зависимости друг от друга (Табл. 1). Стремление к увеличению

быстродействия детектора за счёт улучшения теплоотвода при фиксированной теплоёмкости непременно приводит к снижению его чувствительности и наоборот.

Зная эквивалентную мощность и постоянную времени детекторной системы, можно оценить ее *энергетическое разрешение* (минимальное значение энергии излучения в импульсе, которое способна зарегистрировать детекторная система):  $\delta E \sim NEP_{Rx} \cdot \sqrt{\tau_0}$ . В данной работе исследуется работа болометра в режиме прямого детектирования, экспериментально и теоретически характеризуется его постоянная времени, эквивалентная мощность шума и энергетическое разрешение.

**Актуальность темы исследования.** В последнее десятилетие наблюдается значительный рост заинтересованности исследователей к терагерцовому диапазону электромагнитного излучения (100 ГГц – 10 ТГц [20]). 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. [21]. Среди этих приложений укажем, к примеру, контроль фармацевтической продукции с помощью терагерцовой спектроскопии [22], обнаружение взрывчатых и наркотических веществ, диагностика кожных болезней [23] и др. Для аналитической спектроскопии терагерцовый диапазон привлекателен тем, что в нем лежат наиболее интенсивные вращательные спектры многих легких молекул и низкочастотные колебательные спектры поглощения тяжёлых органических молекул [24]. Регистрация спектров поглощения газов в терагерцовом частотном диапазоне с высоким (вплоть до кГц) разрешением является сложной задачей. Она требует как наличия стабильных ( $10^{-8}$ - $10^{-9}$  от несущей частоты) и перестраиваемых в широком диапазоне источников, так и чувствительных приемников терагерцового излучения, таких как болометры на эффекте электронного разогрева, исследуемые в рамках данной диссертационной работы.

Другим весьма перспективным направлением является использование те-

рагерцового излучения для контроля состояния водного баланса наружных оболочек глаза [25] для диагностики патологий глаза, связанных с инвалидизирующими нарушениями рефракции. Это связано с тем, что в данном частотном диапазоне вода обладает большим поглощением и диэлектрической проницаемостью, определяющей высокое значение коэффициента отражения. Это открывает возможность использования ТГц сканирования в отраженном свете от поверхности биологических материалов с целью определения малейших изменений концентрации содержащейся в них воды.

Над разработкой системы ТГц сканирования гидратации в биологических тканях работают ряд научных коллективов в мире. Членом одного из таких коллективов, сформировавшегося на базе Московского педагогического государственного университета, является автор настоящей диссертационной работы. В основном в подобных исследованиях используются импульсные ТГц источники. К примеру, в работе [26] представлен ТГц метод сканирования гидратации свиных роговиц. Авторами была использована традиционная схема получения импульсного ТГц излучения, состоящая из фотопроводящей антенны и накачивающего фемтосекундного лазера. В качестве приёмника использовался детектор на основе диода с барьером Шоттки. Вместо него в предложенной схеме может быть использован быстродействующий и более чувствительный детектор на основе болометра на эффекте электронного разогрева, исследуемый в данной диссертационной работе. Похожая методика использовалась ранее другими авторами, в частности, в работе [27] представлена ТГц система построения изображений, которая позволяет с высокой точностью очерчивать в тканях области с различным содержанием воды. В других работах успешно продемонстрирована возможность ТГц диагностики кожной карциномы [28] и меланомы, а также анализ состояния кожных ожогов на основе определения концентрации воды [27, 29]. В работе [30] представлены результаты измерения коэффициента отражения свиной роговицы в зависимости от ее гидратации в диапазоне 0.2-1 ТГц. Авторами этой работы выявлена приблизительно линейная зависимость

коэффициента отражения от концентрации воды в ткани с монотонно уменьшающимся коэффициентом наклона при росте частоты излучения. В работе [31] представлены результаты прижизненных измерений коэффициента отражения роговицы кролика на основе использования импульсной ТГц системы построения изображений (0.47-0.58 THz) и миллиметрового волнового рефлектометра миллиметрового диапазона (100 ГГц). Получены положительные корреляции между толщиной роговицы и отражением коэффициентом отражения в миллиметровом волновом диапазоне.

Однако существенной проблемой, препятствующей дальнейшему развитию применения ТГц излучения в перечисленных выше важнейших практических приложениях, в настоящее время является то, что современные источники терагерцового излучения зачастую являются маломощными, характеризуются низкой стабильностью, сложностью в эксплуатации, а также являются дорогостоящими. Сказанное относится в первую очередь к источникам непрерывного терагерцового излучения, в то время как источники импульсного терагерцового излучения не имеют указанных недостатков. Существует несколько методов генерации импульсного терагерцового излучения, таких как оптическое выпрямление [32], генерация разностной частоты в нелинейных оптических кристаллах [33], а также с помощью фотопроводящей антенны [34]. Источники терагерцового излучения, основанные на данных методах, являются относительно недорогими и легкими в эксплуатации. В то же время, системы, основанные на использовании импульсного терагерцового излучения, должны быть оснащены чувствительными и быстродействующими детекторами, поскольку применение медленных детекторов приводит к искажению формы принимаемых импульсов и ухудшению отношения сигнал-шум.

В последнее время разрабатывались различные детекторы терагерцового излучения. Среди их многообразия выделим детекторы на границе перехода (*англ.*: Transition Edge Sensor, TES), которые имеют нанометровые размеры и изготавливаются из сверхпроводниковых материалов с критическими темпе-

ратурами порядка 100-200 мК, что позволяет достичь ультравысоких чувствительностей (эквивалентная мощность шума  $\sim 10^{-19}$  Вт·Гц $^{-0.5}$  [35]). В то же время подобные детекторы обладают сравнительно низким быстродействием (постоянная времени  $\sim 1$  мс) и не пригодны для регистрации коротких импульсов терагерцового излучения. Эта же проблема свойственна детекторам на кинетической индуктивности [36]. Кроме того, данные детекторы могут быть использованы только в условиях низкой фоновой засветки и требуют охлаждения окружающей оптики до гелиевых температур, то есть не всегда пригодны для лабораторных применений.

В противоположность данным детекторам, диоды Шоттки работают при комнатной температуре и характеризуются высоким быстродействием (постоянная времени  $\sim 25$  пс). При этом они обладают сравнительно небольшой чувствительностью (эквивалентная мощность шума  $\sim 10^{-10}$  Вт·Гц $^{-0.5}$  [37]) В работе [40] описаны интегрированные в планарную антенну Nb болометры, эквивалентная мощность шума для которых составляет  $\sim 10^{-14}$  Вт·Гц $^{-0.5}$ , а постоянная времени  $\sim 1$  нс. Удобным комнатным ТГц детектором является также ячейка Голея (оптоакустический детектор). Однако этот детектор характеризуется большой постоянной времени порядка 0.1 с и сравнительно высокой эквивалентной мощностью шума  $\sim 10^{-10}$  Вт·Гц $^{-0.5}$  [38].

Сводная характеристика существующих ТГц детекторов представлена в Табл. 1.

Довольно перспективными на фоне представленных детекторов выглядят детекторы на основе болометров на эффекте электронного разогрева, исследуемые в данной работе. Данный эффект возникает в ультратонких (толщиной менее 10 нм) пленках сверхпроводников, таких как Al, Nb и NbN. С микроскопической точки зрения используемые в работе детекторы представляют собой структуры, состоящие из трех взаимосвязанных подсистем: электронной и фононной подсистем сверхпроводниковой пленки и фононной подсистемы подложки. Энергия падающего излучения поглощается электронной подсистемой

Детектор	Эквивалентная мощность шума, Вт·Гц <sup>-0.5</sup>	Постоянная времени	Рабочая температура
NbN болометр на горячих электродах [39]	$2.0 \cdot 10^{-13}$ (оптическая)	35 пс	9.0 К
Детекторы на диодах Шоттки [37]	$5.0 \cdot 10^{-10}$ (оптическая)	Единицы пикосекунд	Комнатная температура
Nb болометры на висячих мостиках [40]	$1.0 \cdot 10^{-14}$ (электрическая)	0.9 мкс	4.2 К
Nb болометр на горячих электродах [41]	$1.3 \cdot 10^{-13}$ (оптическая)	0.7 нс	около 5.8 К
Ti наноболометр [42]	$10^{-20}$ (электрическая)	0.5 мс	около 40 мК
Оптоакустический детектор [38]	$0.8 \cdot 10^{-10}$ (оптическая)	50 мс	Комнатная температура
Детектор на границе перехода [43]	$6.5 \cdot 10^{-19}$ (электрическая)	порядка 10 мс	около 50 мК
Детектор на кинетической индуктивности [36]	$\sim 10^{-19}$ (электрическая)	порядка 1 мс	Температура жидкого гелия He <sub>4</sub>

Таблица 1. Сравнительная характеристика эквивалентной мощности шума, постоянной времени и рабочей температуры существующих детекторов терагерцового диапазона.

сверхпроводниковой пленки. В течение малого времени электрон-электронного взаимодействия  $\tau_{ee}$  эта энергия перераспределяется между электронами, за счет чего для них устанавливается функция распределения Ферми с увеличенной относительно первоначальной эффективной температурой. За счет электрон-фононного взаимодействия энергия за время электрон-фононного взаимодействия  $\tau_{eph}$  передается фононной подсистеме сверхпроводника. Поскольку  $\tau_{eph} \gg \tau_{ee}$ , то перераспределение энергии между электронами электронной подсистемы происходит намного быстрее, чем релаксация этой энергии на фоновых. Неравновесные фононы в пленке могут уходить в подложку, а могут за счет фонон-фононного взаимодействия передавать свою энергию фононной подсистеме, повышая тем самым ее температуру. Детекторы на основе эффекта электронного разогрева демонстрируют высокую чувствительность в сравнении с другими детекторами терагерцового излучения, работающими при околосверхпроводниковых температурах (эквивалентная мощность шума  $\sim 10^{-13}$  Вт·Гц $^{-0.5}$ ), но при этом обладают на несколько порядков меньшей постоянной времени ( $\sim 35$  пс) [39].

В то же время в последнее десятилетие терагерцовый частотный диапазон активно изучается в рамках самых передовых направлений современной астрономии [44, 45]. Это связано с тем, что на данную часть спектра электромагнитного излучения приходится почти половина всей мощности излучения Вселенной и 98% всех фотонов, которые были излучены с момента Большого Взрыва [46]. Известно большое число галактик с повышенным излучением именно в этой области спектра электромагнитного излучения. Пик их излучения приходится на  $\lambda \approx 100$  мкм. Сканирование в этом частотном диапазоне дает возможность обнаружения и исследования более далеких галактик [46]. Излучение объектов молодой Вселенной, формирование которых началось через 300 тыс. лет после Большого взрыва, происходит в субмиллиметровом диапазоне длин волн электромагнитного излучения. Также к этому диапазону частично относится реликтовое излучение. Терагерцовое излучение холодных межзвезд-

ных облаков пыли таких пожилых галактик, как наш Млечный Путь, может дать нам информацию о происхождении Вселенной [47]. Применение наноболометров на эффекте электронного разогрева в качестве прямых детекторов для решения задач терагерцовой астрофизики успешно продемонстрировано ранее в работе [42].

Известно, что терагерцовое излучение сильно поглощается в атмосфере Земли, что объясняется присутствием в ней паров воды. По этой причине наземные обсерватории, сканирующие космическое пространство в терагерцовом и субмиллиметровом диапазоне, располагаются обычно в очень засушливых районах, находящихся на больших высотах над уровнем моря. Однако, наиболее перспективными являются телескопы и обсерватории космического базирования, такие как Herschel Space Observatory [48], Cosmic Background Explorer (COBE) [49] и Миллиметон [50], а также установленные на бортах воздушных судов, такие как Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy (SOFIA) [51].

При этом наблюдение чрезвычайно слабых источников, зачастую сводится к регистрации единичных терагерцовых фотонов, что возможно только с использованием наноболометров, работающих в режиме прямого детектирования [42]. При этом, для того чтобы сверхпроводимость чувствительного элемента наноболометра не была подавлена фоновым излучением, вся используемая вспомогательная оптика охлаждается до сверхнизких температур, так что мощность теплового излучения достигает уровня космического фона, что существенно расширяет диапазон слабых объектов, доступных для наблюдения. Для достижения предельно возможных чувствительностей наноболометры специальным образом термически изолируются от окружающей среды, при этом их объем уменьшается до предельно возможного значения. Специальная конструкция таких наноболометров исключает возможность диффузии горячих электронов в контактные металлические площадки за счет использования андреевских зеркал, что приводит к дополнительному увеличению чувствительности.

**Цели и задачи диссертационной работы:** Целью настоящей диссертации



ционной работы являлось прямое измерение вольт-ваттной чувствительности, эквивалентной мощности шума и энергетического разрешения прямого детектора терагерцового излучения на основе эффекта электронного разогрева в ультратонких пленках NbN и проведение научного сравнения полученных данных с результатами проведенных расчетов и численного моделирования.

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

1. Разработана и изготовлена терагерцовая детекторная система на основе болометра на эффекте электронного разогрева в ультратонкой пленке NbN, интегрированного в широкополосную планарную антенну;
2. Проведено прямое измерение вольт-ваттной чувствительности, эквивалентной мощности шума и энергетического разрешения изготовленной системы;
3. Проведено численное моделирование вольт-ваттной чувствительности и расчет эквивалентной мощности шума и энергетического разрешения детектора на эффекте электронного разогрева в ультратонких пленках NbN;
4. Выполнено научное сравнение полученных результатов с экспериментальными данными;
5. Проведена экспериментальная демонстрация работы изготовленной системы на примере детектирования коротких и ультракоротких импульсов терагерцового излучения.

### **Научная новизна.**

1. Исследована эквивалентная мощность шума детекторной системы на основе интегрированного с антенной NbN болометра на эффекте электронного разогрева. Оптическая эквивалентная мощность шума детекторной системы составила  $2,0 \times 10^{-13}$  Вт·Гц<sup>-0,5</sup> на частоте излучения 2,5 ТГц.

2. Проведено прямое измерение энергетического разрешения детекторной системы на основе сверхпроводникового болометра на эффекте электронного разогрева в ультратонкой пленке NbN. Полученное значение энергетического разрешения составляет 1,5 аДж.
3. Разработана модель сверхпроводникового болометра на эффекте электронного разогрева, учитывающая влияние неоднородности разогрева чувствительного элемента болометра под действием тока смещения и падающей мощности, позволившая получить значения вольт-ваттной чувствительности детектора вблизи сверхпроводящего перехода, соответствующие экспериментальным данным.
4. Экспериментально продемонстрирована возможность регистрации с помощью прямого детектора на основе NbN болометра на эффекте электронного разогрева импульсов терагерцового излучения наносекундной длительности, сгенерированных в нелинейной оптической среде методом оптического выпрямления и методом генерации на разностной частоте.
5. Разработаны методы использования излучения терагерцового диапазона для определения степени гидратации наружных оболочек глаза (роговицы и склеры), исследована зависимость коэффициента отражения этих оболочек от процентного содержания в них воды по массе.

**Теоретическая и практическая значимость.** Результаты, полученные в рамках диссертационного исследования, могут быть использованы для создания коммерческих терагерцовых детекторных систем. Данный частотный диапазон электромагнитного излучения (0,1-10 ТГц) привлекает в последние годы все большее внимание учёных и инженеров многих ведущих лабораторий мира. Уникальные особенности делают возможным использование терагерцового излучения во многих важных практических применениях, таких как обнаружение наркотических и взрывчатых веществ, медицинских приложениях [21], а также

в таких передовых научных направлениях, как ближнепольная спектроскопия, генерация в нелинейной оптической среде.

Вместе с тем, использование терагерцового излучения в настоящее время сопряжено с рядом трудностей, связанных с тем, что существующие источники являются маломощными и обладают низкой стабильностью либо сложны в эксплуатации и чрезвычайно дорогостоящи. Это касается в первую очередь источников непрерывного терагерцового излучения. По этой причине одним из перспективных путей дальнейшего развития применения терагерцового излучения является разработка эффективных методов генерации и детектирования импульсного терагерцового излучения, источники которого, как правило, лишены указанных недостатков [52]. Практические же приемные устройства импульсного терагерцового излучения должны быть, прежде всего, чувствительными и быстродействующими, позволяющими воспроизводить импульсы без искажения их формы.

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 терагерцовых импульсных детекторных систем, включающих в себя охлаждающее оборудование, обеспечивающее достижение необходимых для работы сверхпроводниковых детекторов криогенных температур: заливного гелиевого криостата или рефрижератора замкнутого цикла.

**Положения, выносимые на защиту.** В ходе работы были получены следующие **научные результаты**:

1. Исследована эквивалентная мощность шума детекторной системы на основе интегрированного с антенной терагерцового NbN болометра на эффекте электронного разогрева, изготовленного по оптимизированной технологии. Результаты расчётов эквивалентной мощности шума показали хоро-

шее соответствие с экспериментальными данными ( $2,0 \times 10^{-13}$  Вт·Гц<sup>-0,5</sup> 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 косвенные расчёты энергетического разрешения, основанные на экспериментальных данных об эквивалентной мощности шума и постоянной времени детектора, полученных ранее в двух различных экспериментах.
3. Проведен теоретический анализ влияния неоднородности разогрева чувствительного элемента болометра под действием тока смещения и падающей мощности на вольт-ваттную чувствительность.
4. Экспериментально продемонстрирована возможность регистрации импульсов терагерцового 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 использования излучения терагерцового диапазона для определения степени гидратации наружных оболочек глаза (роговицы и склеры), 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 быстродействующего (постоянная времени менее 100 пс) интегрированного с антенной NbN болометра на эффекте электронного разогрева достигает  $2,0 \times 10^{-13}$  Вт·Гц<sup>-0,5</sup> 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 терагерцового 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.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов обеспечивается и подтверждается согласием полученных данных с экспериментальными и теоретическими исследованиями других авторов.

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

- 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);
- Международный симпозиум «Наноп физика и наноэлектроника», 10–14 марта 2014 г., Нижний Новгород, Россия;
- 25th International Symposium on Space Terahertz Technology, 27-30 April 2014, Moscow, Russia;
- 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.

- Конференции–конкурса молодых физиков, 13 февраля 2012, Москва, Россия;
- 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.
- Международная Школа и Конференция «Saint Petersburg OPEN 2016», 28-30 марта 2016, Санкт-Петербург, Россия.
- X Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, 29 февраля - 3 марта 2016, Нижний Новгород, Россия.
- 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.

**Личный вклад автора.** Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка условных обозначений и библиографии. Общий объем

диссертации 101 страница, из них 84 страниц текста, включая 25 рисунков.  
Библиография включает 108 наименований на 11 страницах.

## Глава 1

# Обзор литературы и постановка задачи исследования

Глава 1 посвящена обзору 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 Параграфе 1.1 кратко изложены теоретические основы принципа работы детектора на основе сверхпроводникового болометра на эффекте электронного разогрева. В Параграфе 1.2 представлен обзор основных публикаций, посвященных исследованиям смесителей на основе электронно-разогревных болометров. В Параграфе 1.3 представлены основные результаты исследований физики работы болометров на эффекте электронного разогрева в режиме прямого детектирования. В Параграфе 1.4 дается обоснование выбора объекта исследования, а также формулируется задача диссертационной работы.

### 1.1. Эффект электронного разогрева в сверхпроводниках

Физический принцип действия исследуемых в работе детекторов основывается на так называемом эффекте электронного разогрева в ультратонких пленках сверхпроводников, описание которого впервые было представлено в работе [6]. Данный эффект возникает при условии, что время установления равновесной температуры электронной подсистемы пленки (так называемое время термализации) мало по сравнению с временем электрон-фононного взаимодействия. В этом случае поглощение пленкой электромагнитного излучения не приводит к разогреву всей пленки в целом. Вместо этого происходит разогрев лишь электронной подсистемы, описывающейся функцией распределения



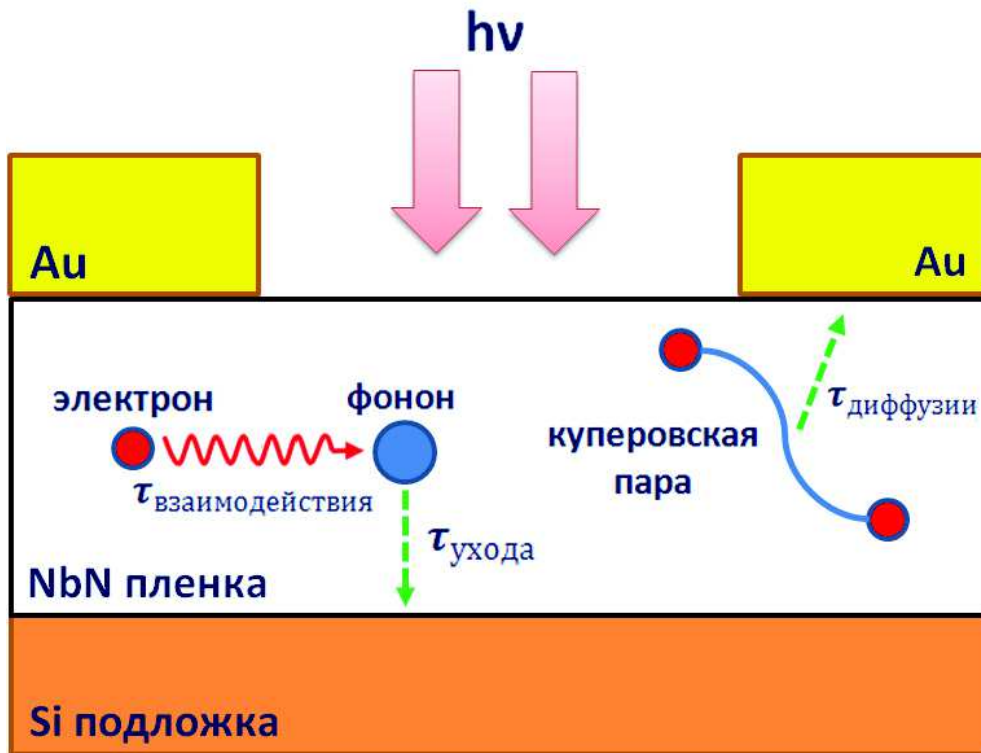


Рис. 1.1. Схематическое изображение физических процессов, происходящих в детекторе. Эффект электронного разогрева возникает в случае, когда время ухода неравновесных фононов из пленки в подложку мало по сравнению с временем электрон-фононного взаимодействия. Различают болометры с фононным и диффузионным механизмами охлаждения.

Ферми с температурой, величина которой выше температуры фононов. Схематически этот процесс представлен на Рис. 1.1. Основные параметры сверхпроводника NbN представлены в Табл. 1.1. Из приведенных данных видно, что все необходимые условия для возникновения эффекта электронного разогрева в исследуемых детекторах выполнены.

По характеру релаксации температуры электронной подсистемы в пленке различают два типа болометров на эффекте электронного разогрева: с *диффузионным* механизмом охлаждением (когда время электрон-фононного взаимодействия велико по сравнению с временем диффузии электронов из пленки) и с *фононным* охлаждением (в противоположном случае). В случае рассматриваемых в работе NbN детекторов, диффузионный канал охлаждения подключается, когда длина чувствительного элемента становится меньше [57]:

Время термализации электронной подсистемы $\tau_{th}$	7 пс [61]
Время электрон-фононного взаимодействия $\tau_{ep}$	17 пс [58]
Время ухода неравновесных фононов в подложку $\tau_{es}$	78 пс* [61] (зависит от толщины плёнки NbN $d$ , коэффициента пропускания фотонов на границе плёнка-подложка $\alpha$ , и скорости звука в плёнке NbN $u$ по закону $\tau_{es} = 4d(\alpha u)^{-1}$ [62])

Таблица 1.1. Характерные времена энергетической релаксации в пленке NbN толщиной около 6,0 нм при температуре близкой к критической ( $T_c = 10$  К).

$$L = \pi \sqrt{D\tau_{ep}}, \quad (1.1)$$

где  $D = 0,45 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  – коэффициент диффузии NbN в нормальном состоянии,  $\tau_{ep} = 17$  пс – время электрон-фононного взаимодействия в тонкой пленке NbN при критической температуре [58]. Расчеты дают значение  $L \approx 0.1$  мкм. При этом эффективная релаксация электронной температуры за счет диффузии разогретых электронов в область металлических контактов возможна только если весь чувствительный элемент находится в резистивном состоянии, иначе электроны будут андреевски отражены [59]. Данное условие выполняется в случае работы болометра в режиме прямого детектора, но может не выполняться в случае гетеродинного режима работы, когда в рабочую точку болометр выводится путем его накачки мощностью гетеродина [60]. В этом случае учет андреевского отражения критически важен.

Исследуемый в работе детектор на основе болометра на эффекте электронного разогрева фактически представляет из себя полосу сверхпроводника, характерные планарные размеры которой не превышают нескольких микрон, а

толщина – нескольких нанометров. Данная полоска, которую далее в тексте работы мы будем называть чувствительным элементом детектора, интегрируется с планарной антенной, используемой для согласования детектора с падающим ТГц излучением. Данное излучение, попадая на антенну, возбуждает в ней высокочастотные токи, протекание которых по чувствительному элементу детектора приводит к увеличению его электронной температуры. Зависимость сопротивления сверхпроводника от температуры вблизи сверхпроводящего перехода имеет очень резкий характер, поэтому даже незначительное изменение электронной температуры детектора приводит к значительному изменению его сопротивления, что является электрическим сигналом о наличии излучения для считывающей электроники.

Термодинамика чувствительного элемента болометра может быть описана с использованием модели однородного разогрева, а также более продвинутой модели горячего пятна [2]. В модели однородного разогрева предполагается, что температура электронной подсистемы болометра во всех его точках повышается на одну и ту же величину под воздействием падающего электромагнитного излучения и транспортного тока, и чувствительный элемент болометра находится при этом в резистивном состоянии. Строго говоря, при температуре ниже критической термодинамика чувствительного элемента болометра описывается системой нелинейных уравнений теплового баланса, которые могут быть решены лишь численно [63]. Линеаризация уравнений возможна для случая, когда температура болометра близка к критической, а состояние сверхпроводниковой плёнки близко к равновесному [64, 65]. В этом случае соответствующие уравнения теплового баланса могут быть представлены в следующем виде [2]:

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{T_p - T_e}{\tau_{ep}} + \frac{W(t)}{C_e} \quad (1.2)$$

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{C_e T_e - T_p}{C_p \tau_{ep}} - \frac{T_p - T_0}{\tau_{es}} \quad (1.3)$$

где  $W(t)$  - временная зависимость поглощённой электронной подсистемой мощности,  $\tau_{ep}$  и  $\tau_{es}$  - время электрон-фононного взаимодействия и время ухода неравновесных фононов из плёнки, соответственно,  $C_e$  и  $C_p$  - электронная и фононная теплоёмкости, соответственно,  $T_e$ ,  $T_p$  и  $T_0$  - температуры электронной подсистемы, фононной подсистемы и тепловой ванны, соответственно.

В модели горячего пятна предполагается, что под воздействием падающей мощности и транспортного тока в чувствительном элементе болометра формируется некоторая область (домен), в которой сверхпроводимость разрушена [60, 66]. В данном случае уравнения теплового баланса записываются в следующем виде [2]:

$$-K \frac{d^2 T_e}{dx^2} + \frac{c_e}{\tau_e} (T_e - T_0) = j^2 \rho_n + N_{rf} \quad (1.4)$$

$$-K \frac{d^2 T_e}{dx^2} + \frac{c_e}{\tau_e} (T_e - T_0) = N_{rf} \quad (1.5)$$

где уравнение 1.4 относится к области, находящейся внутри горячего пятна, а уравнение 1.5 - вне этой области. При этом решения каждого из уравнений «сшиваются» на границе нормального домена на основании требования непрерывности решения. В записанных уравнениях  $K$  - коэффициент теплопроводности,  $\tau_e$  - время релаксации электронной температуры,  $c_e$  - теплоёмкость электронной подсистемы на единицу объёма,  $j$  - плотность транспортного тока,  $\rho_n$  - удельное сопротивление сверхпроводника в нормальном состоянии,  $N_{rf}$  - поглощённая электронной подсистемой мощность электромагнитного излучения на единицу объёма.

## 1.2. Болومتر на эффекте электронного разогрева как смеситель

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 [67]. Этой же научной проблеме были посвящены работы многих других исследователей из ведущих мировых лабораторий, таких как Германский центр авиации и космонавтики [68], Гарвард-Смитсоновский центр астрофизики [69], Лаборатория физической электроники Технического университета Чалмерса [70], Лаборатория реактивного движения Калифорнийского технологического института [71], Нидерландский институт космических исследований [72], Обсерватория Пурпурной горы Китайской академии наук [73], Институт нанонауки Кавли Технологического университета Делфта [74] и др.

Исследованию смесителей на основе электронно-разогревных болометров посвящены также работы многих сотрудников коллектива Учебно-научного радиофизического центра МПГУ. В частности, работа [75] посвящена исследованию шумовой температуры квазиоптических электронно-разогревных смесителей субмиллиметрового диапазона с фоновым каналом охлаждения, изготовленных из пленок NbN толщиной 2-4 нм с использованием подслоя MgO толщиной 200 нм, а также исследованию влияния эффекта прямого детектирования в экспериментах по измерению шумовой температуры приемников. В работе [76] исследованы шумовые характеристики NbTiN смесителя с подслоем MgO на частоте 2,5 ТГц, измерены время энергетической релаксации и коэффициент диффузии в ультратонких NbTiN пленках, нанесенных на различные подложки (кремний, сапфир и кремний с подслоем MgO), а также исследован супергетеродинный приёмник на частоту 30 ТГц на основе электронно-разогревного безантенного NbN смесителя. Работа [77] посвящена исследованию полосы преобразования NbN смесителя на эффекте электронного разогрева с диффузионным

каналом охлаждения и получено ее значение 6.5 ГГц при критической температуре, а также исследована система компенсации влияния нестабильности мощности излучения гетеродина на рабочую точку смесителя на вольт-амперной характеристике путем контролируемого введения СВЧ мощности одновременно с излучением гетеродина. В работе [78] представлены результаты исследования зависимости времени энергетической релаксации электронной подсистемы смесителей на основе пленки NbZr от ее толщины, а также представлен теоретический расчет полосы преобразования квазиоптических NbN электронно-разогревных смесителей с помощью модели неоднородного электронного разогрева.

Известно, что ключевыми параметрами, определяющими чувствительность смесителей, а значит и спектр научно-исследовательских проблем, которые могут быть решены с их использованием, являются шумовая температура и полоса преобразования. Основной практической задачей, стоявшей перед исследователями на протяжении последних лет, являлось уменьшение шумовой температуры смесителя и увеличение его полосы преобразования, поскольку это важно как для спектральных измерений, так и для измерений в широкой входной полосе. К примеру, полоса преобразования смесителей, которые были использованы в таких инструментах, как HI-FI, GREAT, CASIMIR составляла менее 3,5 ГГц [79]. В дальнейших работах с целью расширения полосы преобразования улучшалось акустическое согласование плёнки сверхпроводника с подложкой. Данная проблема решалась путем подбора материал и толщины буферного слоя, что позволило увеличить полосу преобразования квазиоптического смесителя до 4 ГГц [70]. Последующее уменьшение толщины сверхпроводниковой плёнки, а вместе с тем и уменьшение времени ухода неравновесных фононов в подложку, позволило расширить полосу преобразования до 5,2 ГГц [80].

Другим важным параметром, определяющим частотный диапазон работы смесителя, является так называемая шумовая полоса. Верхняя граница шумовой полосы определяется промежуточной частотой, при которой шумовая температура приемника уменьшается в 2 раза. Экспериментально установлено, что

для смесителей на основе электронно-разогревных болометров шумовая полоса обычно шире, чем полоса преобразования. К примеру, в работе [80] для смесителя с полосой преобразования 4,7 ГГц измеренное значение шумовой полосы составило 5,6 ГГц. Знание шумовой полосы важно, поскольку фактически именно она определяет рабочий диапазон приёмника, так как изменения коэффициента преобразования могут быть легко выровнены современными способами цифровой обработки сигналов [53].

Широко известно также, что качество контактов имеет решающее значение для уменьшения шумовой температуры смесителя. Так, чистка сверхпроводниковой пленки перед нанесением слоя металла для формирования контактов в процессе изготовления смесителя, а также использование дополнительного буферного слоя сверхпроводника, уменьшающего влияние эффекта близости, позволило улучшить шумовую температуру смесителя в 2 раза до значения 950 К на частоте гетеродина 2,5 ТГц [74]. Логичным развитием этой идеи стало нанесение слоя металла сразу после процесса осаждения пленки сверхпроводника в едином технологическом процессе без разрыва вакуума (*in situ*), что гарантировало отсутствие паразитных окислов на поверхности сверхпроводниковой пленки и улучшения контакта между сверхпроводником и нормальным металлом. Эти улучшения позволили существенно расширить полосу преобразования смесителя до 6,5 ГГц (вблизи критической температуры) и получить значение шумовой температуры 600 К на частоте гетеродина 2,5 ТГц [81].

### **1.3. Электронно-разогревной болометр как прямой детектор**

В настоящее время описанные в предыдущей главе результаты, касающиеся исследований физики работы электронно-разогревного болометра в режиме смесителя, 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 работе [35] представлены ультрачувствительные  $Ti$  болометры, работающие в режиме электронного разогрева при температуре около 360 мК, с эквивалентной мощностью шума  $3 \times 10^{-19}$  Вт·Гц<sup>-0.5</sup>. Детекторы на границе перехода также работающие при субмилликульвиновых температурах со столь же высокими чувствительностями, соответствующими эквивалентной мощности шума  $2 \times 10^{-18}$  Вт·Гц<sup>-0.5</sup>, представлены в работе [82]. В работе [42] представлены сверхпроводниковые наноболометры на эффекте электронного разогрева, дизайн которых препятствовал обмену энергией между разогретыми электронами и контактами за счет блокировки диффузионного канала охлаждения и эмиссии фотонов. Это позволило достичь эквивалентной мощности шума детектора  $9 \times 10^{-21}$  Вт·Гц<sup>-0.5</sup>. Такой беспрецедентный уровень чувствительности открывает возможность использования данных устройств для детектирования одиночных фотонов терагерцового 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 работе [40] за счет использования сверхпроводника Nb в качестве материала чувствительного элемента болометра. Описанный в работе болометр на висячем мостике характеризуется эквивалентной мощностью шума  $1,4 \times 10^{-14}$  Вт·Гц<sup>-0.5</sup>, 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  $9 \times 10^{-12}$  Вт·Гц<sup>-0.5</sup> и рабочей температурой 87,4 К представлены в работе [83]. 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 терагерцового излучения на основе NbN болометра на эффекте электронного разогрева, работающего при температуре 9,0 К. Измеренное значение эквивалентной мощности шума детектора составило  $2,0 \times 10^{-13}$  Вт·Гц<sup>-0.5</sup> [39]. Полученное из измерений полосы преобразования болометра при критической температуре значение внутренней постоянной времени детектора составило 35 пс [81]. В рамках диссертационного исследования впервые в прямом эксперименте было измерено энергетическое разрешение детектора, которое составило 3 аДж.

## 1.4. Выводы к главе

В Главе 1 представлен обзор литературы по тематике диссертационной работы, кратко охарактеризованы имеющиеся публикации, посвященные исследованию

дованию эффекта электронного разогрева в сверхпроводниках, а также болометров на эффекте электронного разогрева, работающих в режиме смесителей и прямых детекторов. Представленный обзор наглядно подтверждает, что тематика проводимого в рамках диссертационной работы является актуальной научной проблемой, а ее результаты представляют собой востребованные научные знания мирового уровня.

Исследование, проводимое в рамках диссертационной работы, призвано частично восполнить пробел в научных представлениях о физике работы болометров на эффекте электронного разогрева в качестве прямых детекторов, образовавшийся вследствие исторически сложившейся практики исследования этих болометров в режиме смесителей. Целью настоящей диссертационной работы стало исследование энергетического разрешения прямых детекторов на основе сверхпроводниковых электронно-разогревных болометров, изготовленных по усовершенствованному технологическому маршруту, характеристика их чувствительности и быстродействия.

## Глава 2

# Технология изготовления терагерцовых детекторов на эффекте электронного разогрева, интегрированных в планарную логарифмическую спиральную антенну

В Главе 2 представлено описание технологии изготовления использованных в работе болометров, а также контроля качества изготавливаемых образцов детекторов.

В Параграфе 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 Параграфе 2.2 детально изложена *in situ* технология изготовления исследуемых образцов болометров. В Параграфе 2.3 представлено описание методики первичного тестирования изготовленных образцов детекторов на постоянном токе. В Параграфе 2.4 приведены краткие выводы по Главе 2.

### 2.1. Обзор современных технологий изготовления микро- и наноразмерных устройств

Прежде чем перейти к описанию технологии изготовления детекторов, охарактеризуем кратко основные задействованные технологические процессы. Среди них выделим реактивное магнетронное распыление, термическое испарение, электронно-лучевое испарение, фотолитографию, электронную литографию, отжиг, ионное и жидкостное травление.

### **2.1.1. Напыление пленок: негативное магнетронное распыление и термическое испарение**

При изготовлении детекторов использовались две основные техники напыления пленок: реактивное магнетронное распыление [84, 85] и термическое испарение. Принцип магнетронного распыления основан на образовании над поверхностью катода (так называемой мишени, изготовленной из напыляемого материала) кольцеобразной плазмы в результате столкновения электронов с молекулами газа (чаще всего Ar). Для эффективной ионизации Ar, распыляемый материал размещают на магните. В результате эмиссионные электроны, вращающиеся вокруг магнитных силовых линий, локализуются в пространстве и многократно сталкиваются с атомами Ar, превращая их в ионы. Ионы, образующиеся в разряде, ускоряются в направлении катода, бомбардируют его поверхность, выбивая частицы материала, которые потом осаждаются на поверхность подложки. Магнетронное распыление проводилось на установке магнетронного распыления на постоянном токе Leybold Heraeus Z400.

При термическом испарении напыляемый материал разогревается до температуры, достаточной для его испарения. В зависимости от механизма разогрева на разных этапах изготовления детекторов были использованы две технологические установки: ВУП-5 (разогрев распыляемого материала током) и Evatec ВАК-501 (электроннолучевое испарение, разогрев поверхности распыляемого материала осуществляется локально сфокусированным пучком электронов). В первом случае скорость напыления контролировалась с помощью величины разогревающего тока, во втором - варьированием интенсивности электронного пучка.

### **2.1.2. Фотолитография, электроннолучевая литография и травление**

Для формирования структуры чувствительных детекторов использовались такие технологические процессы, как фотолитография и электроннолучевая ли-

тография [86]. В обоих случаях перед проведением процесса поверхность на специальной центрифуге покрывалась тонким слоем резиста, чувствительного к ультрафиолетовому излучению (для фотолитографии) или к высокоэнергетическим электронам (для электроннолучевой литографии). Перед проведением процесса литографии структура с нанесенным резистом подвергалась задублению в специальной печи.

Минимальный размер структур, изготавливаемых методом фотолитографии, составлял порядка 1 мкм. Для формирования рисунка структуры проводилась засветка (экспонирование) фоторезиста ультрафиолетовым излучением через специальный фотошаблон. Облученные участки фоторезиста изменяли свою растворимость для некоторых проявителей, и их можно было удалить химическим способом (процесс проявления). Освобожденные от фоторезиста участки тоже удаляются, таким образом формируется требуемая структура (процесс травления). Минимальные размеры чувствительного элемента детектора составляли около 100 нм. Поэтому для их изготовления наряду с фотолитографией была также использована электроннолучевая литография. Рисунок структуры на поверхности электронного резиста в этом случае формировался непосредственно пучком высокоэнергетических электронов (энергия пучка порядка 30 кэВ), движение которого контролировалось с помощью программы, установленной на компьютере. Диаметр электронного пучка составлял несколько десятков нанометров, что позволило изготовить структуры, минимальные размеры которых составляли 100 нм в плане.

Далее в зависимости от задачи для формирования требуемой структуры использовалось травление (плазмохимическое или жидкостное) или так называемый *lift-off* процесс.

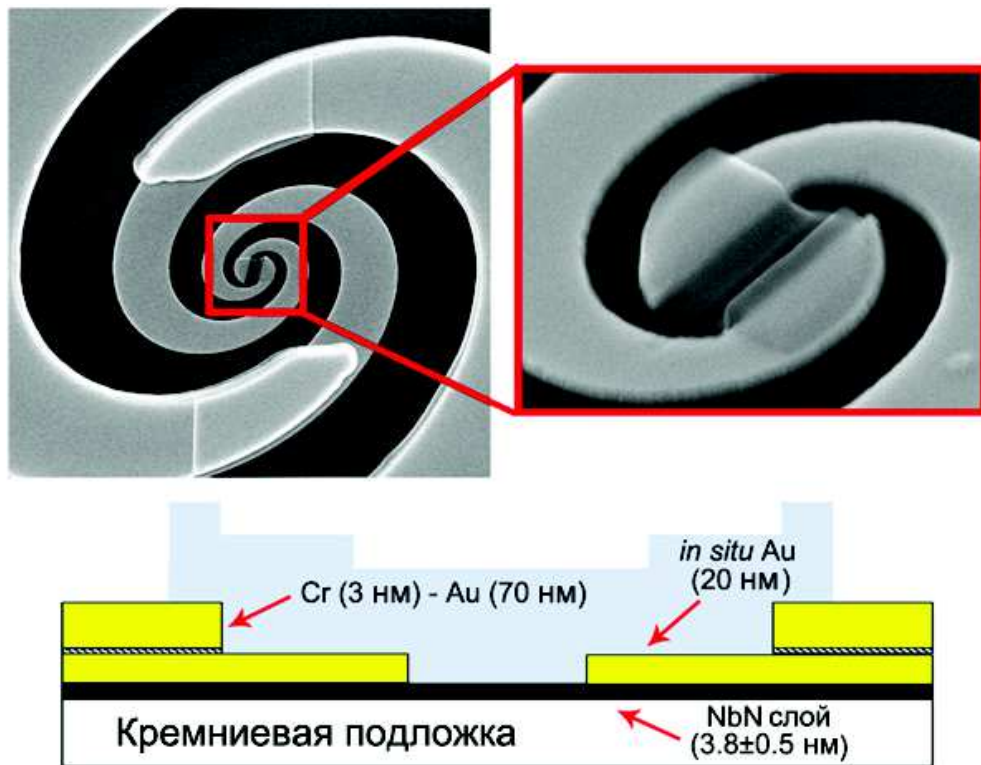


Рис. 2.1. Фотографии детектора, интегрированного в планарную логарифмическую спиральную антенну, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа. На фотографии справа изображен собственно чувствительный элемент болометра. На рисунке снизу представлена вертикальная структура слоев детектора.

## 2.2. Технология изготовления образцов детекторов, исследуемых в диссертационной работе

Весь технологический маршрут изготовления образцов детекторов был организован на базе технологического сектора Учебно-научного радиофизического центра Московского педагогического государственного университета.

Сперва кратко опишем технологический маршрут изготовления болометров. В последующих главах процесс изготовления будет описан более детально. Изучаемые 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/N<sub>2</sub>. Диаметр мишени Nb составлял 3 дюйма. Скорость осаждения составляла 100 нм в секунду. Темпе-

ратура 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*) [87]. 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 стравливался 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 [17, 88]. На Рис. 2.1 представлены фотографии чувствительного элемента детектора, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа.

### 2.2.1. Магнетронное напыление двуслойной структуры NbN/Au на Si подложку

Первым этапом изготовления образцов детекторов было формирование наноразмерных структур, состоящих из двух слоев NbN и Au (толщины 3,5 нм и 20 нм, соответственно). Данные структуры изготавливались на подложках из высокоомного (удельное сопротивление от 5 до 20 кОм·см) Si двусторонней полировки с ориентацией (100) и толщиной до 410 мкм. Слой NbN наносился на полированную поверхность Si подложки, нагретую до температуры 830 °С, в процессе реактивного магнетронного распыления на постоянном токе NbN мишени в атмосфере Ar (парциальное давление Ar в рабочей камере составляла около  $5 \cdot 10^{-3}$  мбар).

С целью повышения точности контроля содержания N<sub>2</sub> в рабочей камере, источник питания электрического разряда работал в режиме генератора тока. Это позволило значительно улучшить качество изготавливаемых пленок сверх-

проводников. Причина состоит в том, что все основные характеристики тонких сверхпроводниковых пленок имеют существенную зависимость от их стехиометрического состава. В этой связи необходим строгий контроль содержания Nb и Au в приповерхностном слое над Si подложкой в процессе изготовления пленок. Содержание Nb определяется парциальным давлением Ar в рабочей камере, мощностью разряда и процентной долей Nb в мишени. Содержание N<sub>2</sub> в газовой смеси определяется скоростью его поступления в рабочую камеру, а также интенсивностью его абсорбции распыленным Nb. Описанные процессы приводят к возникновению неоднозначности вольт-амперной характеристики газового разряда, которую и удается преодолеть, если в качестве рабочего режима источника питания газового разряда выбрать режим генератора тока. В этом случае давление N<sub>2</sub> определяется из изменения величины напряжения разряда при напуске газа из баллона в камеру. Нами была установлена эмпирическая зависимость критической температуры получаемых сверхпроводниковых пленок от величины изменения данного напряжения. В дальнейшем все пленки напылялись в таком режиме, что получаемая критическая температура пленок оказывалась наибольшей. Такой подход обеспечил высокую воспроизводимость процесса напыления изготавливаемых сверхпроводниковых пленок.

Также была установлена зависимость критической температуры получаемых сверхпроводящих тонких пленок NbN от температуры подложки, при которой происходило напыление. Было установлено, что оптимальной с точки зрения получения пленок с наибольшими значениями критической температуры является температура подложки в 750-850 °C. Скорость напыления определялась в тестовом калибровочном процессе по времени осаждения  $\tau$  и толщине полученной пленки  $D$ , измеренной профилометром-профилографом:  $V = D/\tau$ . В дальнейших процессах толщина изготавливаемых пленок контролировалась по времени осаждения.

Вслед за нанесением слоя NbN без разрыва вакуума (*in situ*) следовал процесс напыления слоя Au толщиной 20 нм [81]. Использование технологии



*in situ* позволило улучшить омический контакт между слоями NbN и Au, что способствовало существенному повышению чувствительности детектора. Кроме того, это также привело к улучшению его быстродействия за счет реализации одновременно двух каналов охлаждения горячих электронов – фононного и диффузионного, о чем будет подробно рассказано ниже.

Контроль качества получаемых структур NbN/Au проводился по спутникам, с которых стравливался слой Au (в процессе химического или ионно-лучевого травления). Далее исследовались зависимости их сопротивления от температуры. По результатам измерений проводился отбор наиболее качественных структур, на основе которых далее изготавливались образцы детекторов.

### **Изготовление двухслойной структуры NbN/Au**

**Технологические параметры процесса реактивного магнетронного распыления на постоянном токе**

- установка напыления: Z-400 Leybold Heraeus;
- температура подложки: 830 °С;
- остаточное давление в рабочей камере:  $1,5 \cdot 10^{-6}$  мбар;
- давление Ar в рабочей камере:  $5 \cdot 10^{-3}$  мбар;
- ток разряда: 300 мА;
- толщина слоя NbN: 3,5-4,0 нм;
- толщина слоя Au: 10-20 нм.

**Технологические параметры ионно-лучевого и жидкостного травления Au спутников**

- установка: ВУП-5М
- рабочий газ: Ar;

- парциальное давление Ar в рабочей камере:  $5 \cdot 10^{-4}$  мм. рт. ст.;
- ток разряда: 40 мА;
- общее время процесса травления: 25 с.

### 2.2.2. Формирование чувствительного элемента детектора

Чувствительным элементом детектора фактически являлся открытый небольшой участок пленки NbN, с поверхности которого удалялся слой Au. Процесс формирования этого зазора в слое Au проходил в два этапа. Сперва на поверхность слоя Au наносился электронный резист, методом электронной литографии происходило формирование маски, по которой в дальнейшем Au стравливалось в процессе ионного (предварительного) и химического (более мягкого с целью недопущения деградации слоя NbN) травлений. Размеры чувствительного элемента детектора выбирались следующим образом: длина (размер вдоль направления протекания тока) – 0,2 мкм, ширина – 2 мкм. С учетом того, что типичное значение поверхностного сопротивления изготавливаемых пленок при комнатной температуре составляло 500 Ом на квадрат, соответствующее типичное значение сопротивления чувствительного элемента составляло около 50 Ом. Это обеспечивало приемлемое согласование чувствительного элемента с используемой планарной антенной, речь о которой пойдет ниже [17].

#### Этапы формирования чувствительного элемента детектора

- Покрытие структуры электронным резистом (PMMA 950К 2% + анизол):
  - а) установка нанесения: центрифуга Sawatec;
  - б) скорость вращения: 3000 об/мин;
  - в) общее время: 60 с;
  - г) толщина наносимого слоя резиста: 0.08 мкм.
- Термообработка:

- a) температура термостата: 170 °С;
- b) общее время: 0,5 ч.
- Собственно формирование зазора методом электронной литографии:
  - a) установка: JEOL JSM-6380 (электронный литограф);
  - b) напряжение разряда: 30 кВ.
- Проявление:
  - a) метилбензол:изопропанол = 1:5;
  - b) общее время проявления: 25 с.
- Травление слоя Au в зазоре:
  - a) установка: ВУП-5М;
  - b) рабочий газ: Ar.
  - c) парциальное давление Ar:  $5 \cdot 10^{-4}$  мм. рт. ст.;
  - d) ток разряда: 40 мА;
  - e) общее время травления: 25 с;
- Удаление резиста в подогретом диметилкетоне:
  - a) Общее время процесса: 5 мин.

### **2.2.3. Последующие технологические этапы изготовления образцов детекторов**

Последующие технологические этапы изготовления образцов детекторов связаны с формированием планарной логарифмической спиральной антенны, с которой интегрировался чувствительный элемент детектора. Использование

этой антенны было продиктовано тем, что длина волны принимаемого излучения ТГц частотного диапазона была много больше характерных размеров чувствительного элемента детектора. Проведенные нами исследования, результаты которых представлены в работе [17], показали, что данная антенна характеризуется ультраширокой входной полосой, верхняя граничная частота которой превышает 8 ТГц.

Выбор данной топологии антенны для проводимых в рамках диссертационной работы исследований объяснялся несколькими причинами. Во-первых, это было связано с простотой технологии ее изготовления. Во-вторых, с низкими омическими потерями данной антенны относительно других аналогов. Наконец, ультраширокая входная полоса антенны позволила проводить измерения с одним и тем же образцом детектора на разных частотах, что позволило уйти от ряда неопределенностей, связанных с заменой образца детектора и его совмещением с геометрическим центром используемой кремниевой линзы.

Методом электронной литографии происходило формирование внутренней части спиральной антенны, представляющей собой структуру:



Здесь и далее перечисление слоев идет от подложки. Здесь Cr использовался для обеспечения лучшей адгезии, а Ti в качестве защитного материала. Внешние контакты и внешняя часть спиральной антенны формировались в процессе фотолитографии. Схема структуры:



Здесь для обеспечения лучшей адгезии использовался слой Ti. Далее следовало нанесение защитной маски SiO для последующего травления структуры Au/NbN по полю. Схематичное изображение вертикальной структуры слоев изготовленных образцов детекторов представлено на Рис. 2.1. На отдельные чипы подложка разрезалась с помощью скрайбера.

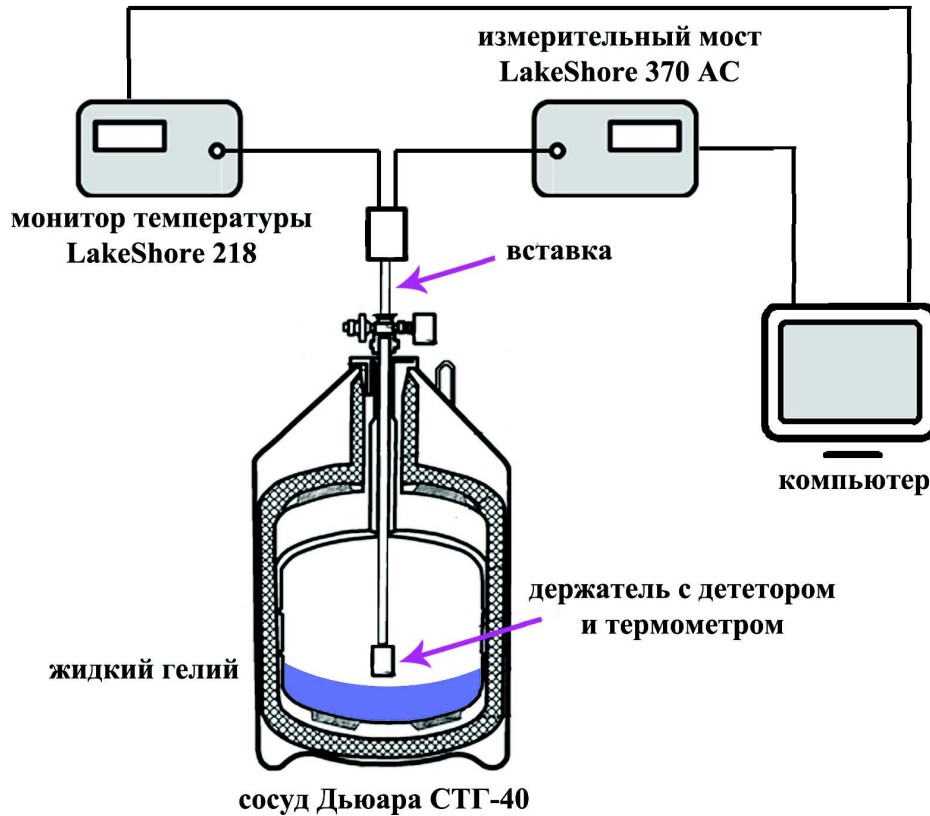


Рис. 2.2. Схема экспериментальной установки по измерению температурной зависимости сопротивления изготовленных образцов детекторов.

## 2.3. Первичные исследования изготовленных образцов на постоянном токе

В данном параграфе представлено описание методики первичного тестирования образцов на постоянном токе, включающего исследование температурной зависимости сопротивления образцов детекторов, а также исследование их вольт-амперных характеристик при различных значениях тепловой ванны.

### 2.3.1. Исследование температурной зависимости сопротивления образцов детекторов

Схема экспериментальной установки по исследованию температурной зависимости сопротивления изготовленных образцов детекторов представлена на Рис. 2.2. Температура термометра и образца, детектора установленного в непо-

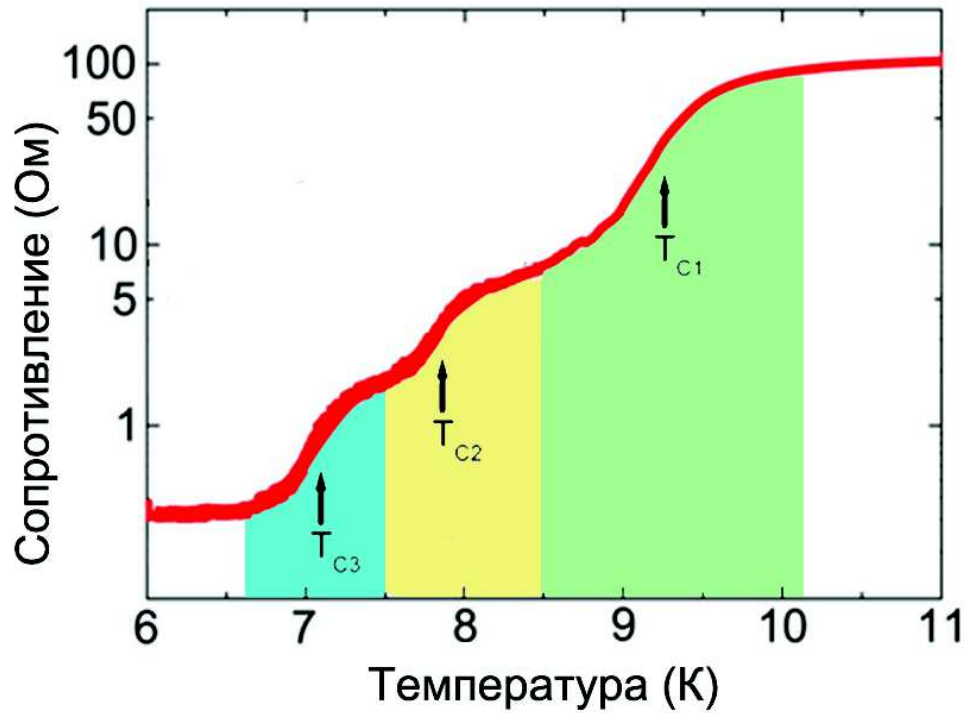


Рис. 2.3. Температурная зависимость сопротивления детектора. Основной сверхпроводящий переход, возникающий при температуре ( $T_{c1}$ ), соответствует переходу чувствительного элемента детектора. Два дополнительных сверхпроводящих перехода возникают вследствие эффекта близости между слоем сверхпроводника NbN и слоями нормального металла Au толщиной 20 нм ( $T_{c2}$ ) и 70 нм ( $T_{c3}$ ), соответственно.

средственной близости к термометру на специальном латунном держателе, контролировалась с помощью монитора LakeShore 218 Temperature Monitor. Существенным усовершенствованием используемой методики относительно повышения точности измерения сопротивления стало использованием в качестве измерителя сопротивления детектора измерительного моста LakeShore 370 AC Resistance Bridge, амплитуда переменного зондирующего тока которого составляла 300 нА и меньше. Это позволило практически полностью исключить влияние так называемого эффекта саморазогрева чувствительного элемента болометра под воздействием протекающего по нему зондирующего тока при измерении сопротивления.

Полученная кривая температурной зависимости сопротивления образца детектора в логарифмическом масштабе по оси сопротивлений представлена на Рис. 2.3. Наличие дополнительных переходов при более низких температурах от-

носителем главного перехода объясняется влиянием так называемого эффекта близости [89–91]. Данный эффект возникает в месте контакта сверхпроводника и нормального металла (NS-контакт). Эффект близости проявляется в том, что в области NS-контакта небольшой участок нормального металла начинает проявлять свойства сверхпроводника, в то время как свойства контактирующего сверхпроводника частично подавляются. Это проявляется, в частности, в уменьшении критической температуры участка сверхпроводниковой пленки, находящейся под слоем нормального металла [92].

Это именно та ситуация, которая реализуется в нашем случае. Основной сверхпроводящий переход, возникающий при температуре ( $T_{c1}$ ), соответствует переходу собственно чувствительного элемента детектора (участка пленки NbN, с которого слой Au полностью удален). Два дополнительных перехода возникают вследствие эффекта близости между слоем сверхпроводника NbN и слоями нормального металла Au толщиной 20 нм ( $T_{c2}$ ) и 70 нм ( $T_{c3}$ ), соответственно. Строго говоря, на участке антенны, который формировался в процессе фотолитографии, существует еще одна область, где толщина слоя Au превышает 200 нм. Однако, четвертого сверхпроводящего перехода на Рис. 2.3 не наблюдается. Объясняется это тем, что длина когерентности в тонкой пленке NbN существенно меньше 70 нм [93], поэтому дальнейшее увеличение толщины слоя Au не приводит к еще большему подавлению сверхпроводимости контактирующего слоя NbN за счет эффекта близости.

### **2.3.2. Исследование вольт-амперных характеристик изготовленных образцов детекторов при различных значениях температуры тепловой ванны**

Схема экспериментальной установки по исследованию вольт-амперных характеристик изготовленных образцов детекторов при различных значениях температуры тепловой ванны представлена на Рис. 2.4. Температура детектора контролировалась с помощью монитора LakeShore 218 Temperature Monitor. Криво-

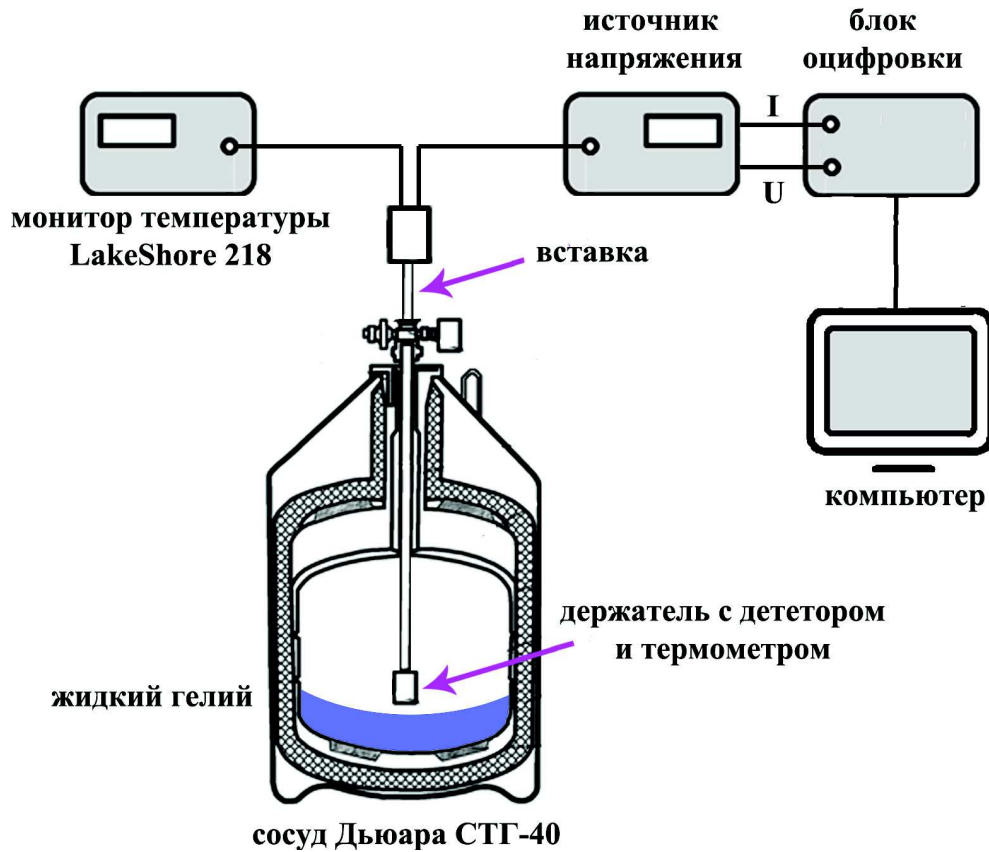


Рис. 2.4. Схема экспериментальной установки по исследованию зависимости вольт-амперных характеристик образцов детекторов от температуры.

генный термометр располагался в непосредственной близости от образца детектора в специальном латунном держателе, расположенном на конце вставки в гелиевый сосуд Дьюара. Источник смещения работал в режиме стабилизации напряжения.

Полученное в эксперименте семейство вольтамперных характеристик образца детектора при различных значениях тепловой ванны представлено на Рис. 2.5. Подобные вольт-амперные характеристики были детально описаны ранее, к примеру, в работе [94]. Вольт-амперную характеристику детектора при температуре 4,2 К (красная кривая на рисунке) называют ненакаченной. Условно ее можно разбить на три участка, которые выделены на рисунке различными цветами.

Левый почти прямолинейный участок соответствует сверхпроводящему состоянию чувствительного элемента детектора. Небольшой наклон объясняется



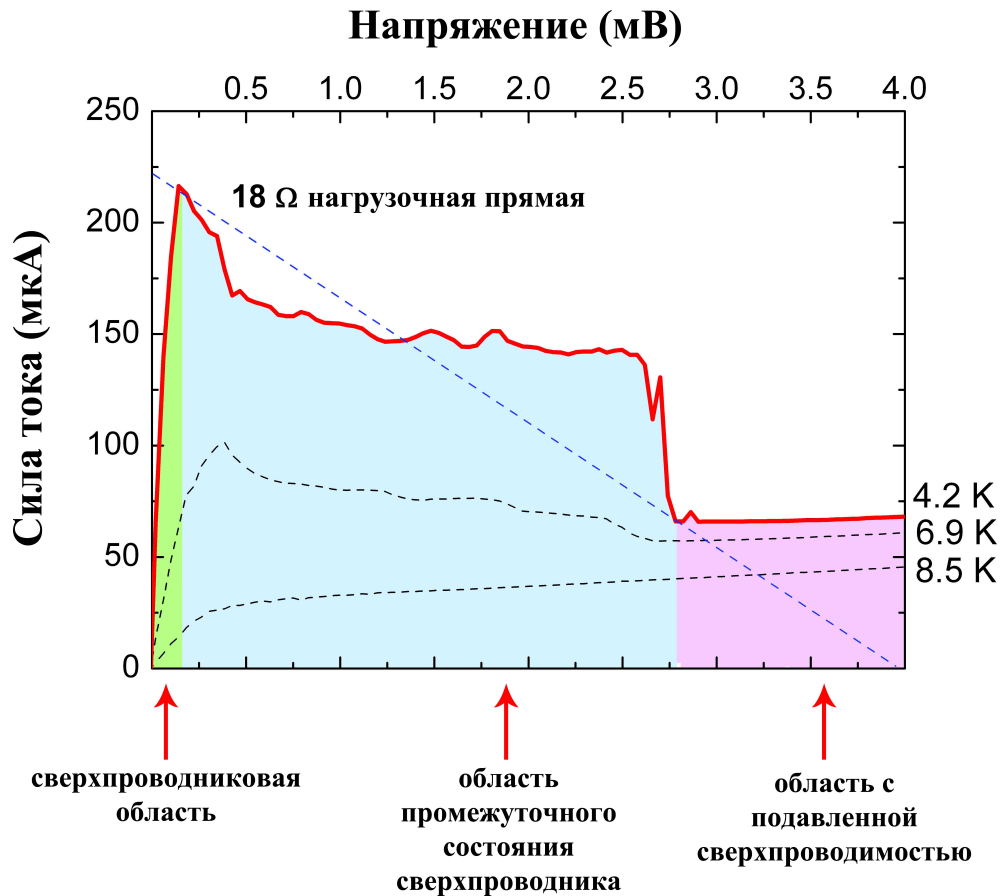


Рис. 2.5. Вольт-амперные характеристики детектора при различных значениях температуры тепловой ванны. С повышением температуры вольт-амперные характеристики становятся все более линейными, а значение критического тока уменьшается. На рисунке проведена 18-омная нагрузочная прямая детектора.

наличием некоторого остаточного сопротивления (около 2 Ом) между слоями в структуре детектора. Пиковое значение тока смещения на данном участке вольт-амперной характеристики соответствует критическому току, при котором сверхпроводимость чувствительного элемента детектора начинает разрушаться. Далее следует участок так называемого промежуточного состояния сверхпроводника [95], в каждой точке которого чувствительный элемент детектора находится одновременно в сверхпроводящем и нормальном состояниях. Наличие данного состояния свойственно сверхпроводникам II рода, к числу которых относится и NbN. Данная область является нестабильной, здесь наблюдаются осцилляции напряжения на детекторе между двумя соседними участками вольт-амперной характеристики [96]. Правый участок вольт-амперной характеристики

ки соответствует нормальному состоянию чувствительного элемента детектора. В этой области сверхпроводимость полностью подавлена, а наклон вольт-амперной характеристики соответствует нормальному сопротивлению образца детектора.

Из Рис. 2.5 видно, что с повышением температуры вольт-амперные характеристики становятся все более линейными, а значение критического тока уменьшается. На рисунке проведена 18-омная нагрузочная прямая детектора. Далее будет показано, что в процессе работы детектора рабочая точка на вольт-амперной характеристике осциллирует вдоль этой нагрузочной прямой с частотой модуляции падающего излучения. При этом, в том случае если детектор смещается в режиме стабилизации тока, эта прямая становится горизонтальной, так как нагрузочное сопротивление, соответствующее выходному сопротивлению источника, принимает значение много большее сопротивления детектора.

## 2.4. Выводы к главе

В Главе 2 охарактеризован процесс изготовления и контроля качества образцов исследуемых в рамках диссертационной работы детекторов. Представлен обзор основных технологических процессов, задействованных при изготовлении образцов детекторов, а также детально описан оптимизированный для задач диссертационного исследования технологический маршрут изготовления образцов детекторов.

Стоит отметить, что все описанные процессы проводились на базе Учебно-научного радиофизического центра МПГУ на самом современном технологическом оборудовании. При этом качество изготавливаемых наноструктур не только не уступает мировым аналогам, но и превосходит их по некоторым характеристикам. Это подтверждается в первую очередь тем, что ряд научных групп, являющихся мировыми лидерами в области исследований неравновесной

сверхпроводимости, предпочитают работать с наноструктурами, изготовленными именно на базе УНРЦ МПГУ [16, 97].

## Глава 3

# Исследование вольт-ваттной чувствительности, оптической эквивалентной мощности шума и энергетического разрешения болометра на основе эффекта электронного разогрева

Глава 3 соержжит основные научные результаты автора, выносимые им на защиту в качестве положений. В Главе 3 представлены результаты теоретического и экспериментального исследования вольт-ваттной чувствительности, оптической эквивалентной мощности шума и энергетического разрешения детекторной системы на основе сверхпроводникового электронно-разогревного болометра.

Стоит отметить, что компания ЗАО “Сверхпроводниковые нанотехнологии” (Сконтел), созданная сотрудниками и аспирантами Учебно-научного радиофизического центра МПГУ, начала осуществлять продажу детекторных систем на основе болометров, исследованных в настоящей диссертационной работе, начиная с 2010 года, сразу после получения автором настоящей диссертационной работы первых результатов по исследованию работы болометров в качестве прямых детекторов. До этого в течение 5 лет компания Сконтел продавала терагерцовые смесители на основе тех же наноструктур. Автор настоящей диссертационной работы продолжал свои исследования, главная цель которых состояла в исследовании физики работы болометра в режиме прямого детектирования коротких импульсов терагерцового и ближнего ИК диапазона. Исследования были направлены на создание адекватной модели болометра как прямого импульсного детектора, разработку и верификацию методики, позволяющей проводить точную метрологическую характеристику детекторных систем с точки зрения чувствительности и энергетического разрешения. При этом все

проводимые исследования шли параллельно с продажами детекторных систем и существенным образом способствовали повышению достоверности получаемых результатов и улучшению характеристик детекторных систем.

В Параграфе 3.1 представлено описание методики моделирования вольт-ваттной чувствительности болометра при температуре вблизи к критической в различных точках на вольт-амперной характеристике с учетом приближения неоднородного разогрева током смещения и падающей мощностью чувствительного элемента болометра вдоль его длины. В Параграфе 3.2 представлено описание проводимых экспериментов по измерению вольт-ваттной чувствительности детектора, а также сравнение полученных экспериментальных данных с результатами моделирования. В Параграфе 3.3 представлен элементарный расчёт эквивалентной мощности шума детекторной системы и его сравнение с экспериментально измеренными значениями. В Параграфе 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 Параграфе 3.5 представлены краткие выводы по Главе 3.

### **3.1. Моделирование вольт-ваттной чувствительности болометра при температуре близкой к критической**

Как уже было отмечено во введении, существует 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.

При этом физика работы болометра в исследованном в рамках данной

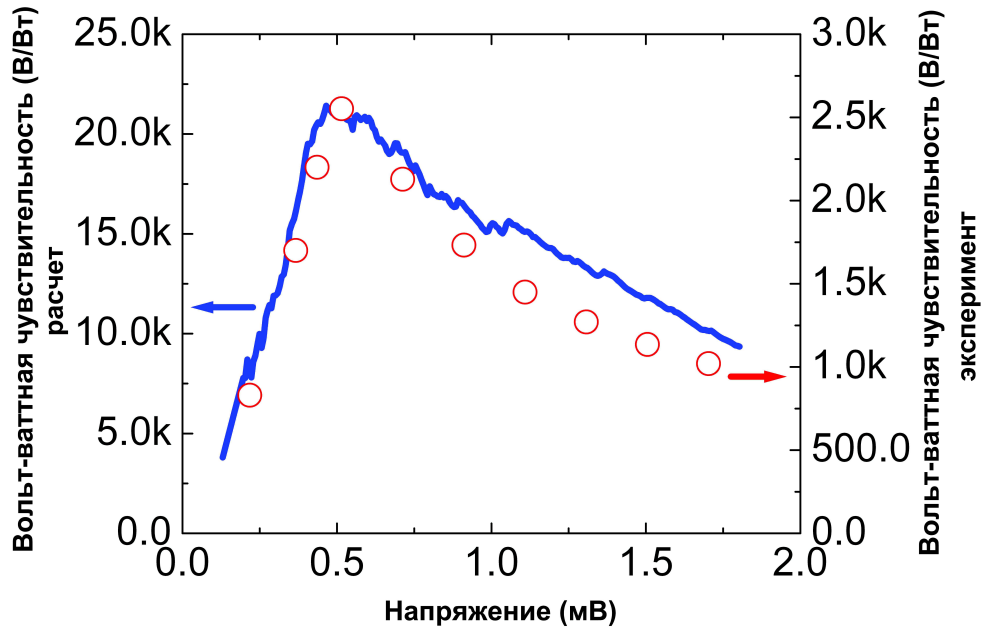


Рис. 3.1. Рассчитанные в соответствии с теорией Матера значения вольт-ваттной чувствительности детектора (сплошная линия) в сравнении с измеренными значениями (незакрашенные точки) при различных напряжениях смещения детектора.

диссертационной работы случае, когда рабочая температура детектора достигается за счёт фоновонного разогрева, существенно отличается от случая разогрева болометра излучением гетеродина. В последнем случае чувствительный элемент болометра, находящийся в резистивном состоянии, по сути соединён со сверхпроводящей антенной (т.н.  $S'SS'$ -система), тогда как в исследуемом случае участок сверхпроводника, находящийся под металлической антенной, также находится в резистивном состоянии (т.н.  $NSN$ -система). Это приводит к тому, что открывается дополнительный диффузионный канал охлаждения, который фактически блокирован в случае разогрева чувствительного элемента болометра излучением гетеродина.

### 3.1.1. Модель болометра как сосредоточного элемента по Мазеру

В случае, если частота модуляции излучения много меньше обратной постоянной времени болометра, теоретическое значение вольт-ваттной чувствительности в приближении однородного разогрева болометра может быть вы-

числено по формуле, полученной в работе [98]:

$$S = \frac{1}{2I_b} \cdot \frac{(R_d/R) - 1}{(R_d/Z_L) + 1}, \quad (3.1)$$

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 3.1, получаем расчетное значение вольт-ваттной чувствительности 22 кВ/Вт. На Рис. 3.1 представлены расчетные в соответствии с формулой 3.1 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. 3.1 видно, что измеренные значения вольт-ваттной чувствительности отличаются от расчетных почти на порядок. Данное расхождение заставило нас проанализировать отклик нашего детектора с точки зрения распределенной модели, исключив тем самым однородных разогрев детектора.

### 3.1.2. Модель болометра как распределенного элемента

Теоретический анализ обозначенной проблемы был основан на численном решении методом Эйлера системы уравнения теплового баланса [99], примененного к чувствительному элементу болометра [100]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} (\chi \frac{\partial}{\partial x} T_e) + p_{dc} + p_{rf} - p_{es} = c \frac{\partial}{\partial t} T_e, \\ p_{ep} - p_{es} = c \frac{\partial}{\partial t} T_e, \end{cases} \quad (3.2)$$

где  $\chi$  - коэффициент теплопроводности,  $p_{dc}$  - тепловая мощность тока на

единицу длины,  $c$  - теплоемкость материала болометра на единицу длины,  $p_{ep}$  - тепловой поток между электронной и фононной подсистемами болометра,  $p_{es}$  - тепловой поток между фононной подсистемой и подложкой,  $p_{rf}$  - мощность падающего излучения, отнесенная к длине болометра.

В своих численных расчетах мы использовали полученную в эксперименте зависимость сопротивления болометра от температуры. Коэффициент теплопроводности, относящейся к сопротивлению нормального состояния сверхпроводника, определялся из закона Видемана-Франца:

$$\chi = \frac{\pi^2 k_B^2 S}{3e^2} \left( \frac{T}{\rho} \right), \quad (3.3)$$

где  $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана,  $T = 8.5$  К – температура тепловой ванны,  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона,  $S = 8 \cdot 10^{-15}$  м<sup>2</sup> – площадь поперечного сечения чувствительного элемента болометра,  $\rho$  – удельное сопротивление сверхпроводника в нормальном состоянии, рассчитанное из экспериментальных данных.

Используя данный подход, мы получили температурные профили чувствительного элемента болометра (зависимость электронной температуры болометра от координаты вдоль его длины) при различных значениях тока смещения и температуры ванны. На Рис. 3.7 видно, что 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 из Рис. 3.7 видно, что температура ванны, соответствующая оптимальной вольт-амперной характеристике для этого значения сопротивления болометра равна 9,0 К. Данный результат хорошо согласуется с результатами нашего численного моделирования.

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



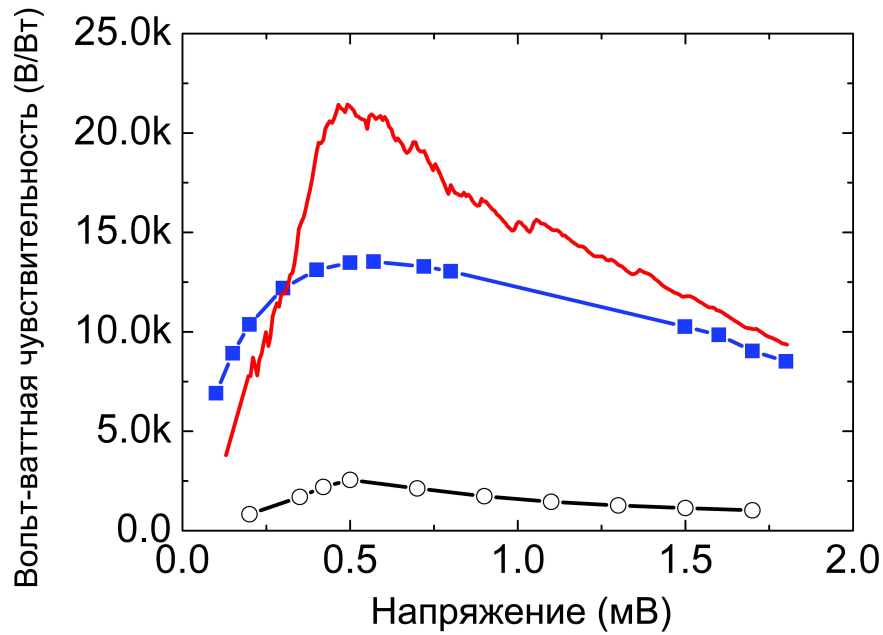


Рис. 3.2. Вольт-ваттная чувствительность детектора при различных значениях напряжения смещения для оптимальной вольт-амперной характеристики. Сплошная линия соответствует результатам расчетов, полученных на основе модели сосредоточенного элемента, закрашенные квадратики - модели распределенного элемента, незакрашенные кружочки - экспериментальным данным.

вблизи критической:

$$R(I) = \frac{1}{l} \int_0^l R(T(I, x)) dx, \quad (3.4)$$

где  $I$  – ток смещения,  $l$  – длина чувствительного элемента детектора.

В этих вычислениях мы пренебрегли нетермическим влиянием тока, что является приемлемым приближением, в случае если температура 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:

$$S(I) = \frac{R_L}{R_L + R_d} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta P}, \quad (3.5)$$

где  $R_L$  – нагрузочное сопротивление (в нашем случае 50 Ом – входное сопротивление используемого усилителя),  $Rd = \Delta U / \Delta I$  – дифференциальное сопротивление болометра в данной точке на вольт-амперной характеристике,  $\Delta V$  – изменение напряжения при данном токе смещения при изменении мощности падающего излучения на  $\Delta P$ . Расчетное значение вольт-ваттной чувствительности в рабочей точке составило 13 кВ/Вт. На Рис. 3.2 представлены результаты расчетов вольт-ваттной чувствительности детектора для различных точек на оптимальной вольт-амперной характеристике, соответствующих модели сосредоточенного элемента по Мазеру [98] и разработанной нами модели распределенного элемента, а также соответствующие экспериментальные данные.

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 чувствительным элементом (неидеальным согласованием между радиационным сопротивлением антенны и импедансом болометра на частоте падающего излучения).

### **3.2. Исследование вольт-ваттной чувствительности и оптической эквивалентной мощности шума по оптимизированной методике**

В эксперименте по определению вольт-ваттной чувствительности использовалась квазиоптическая схема согласования детектора с входным излучением.

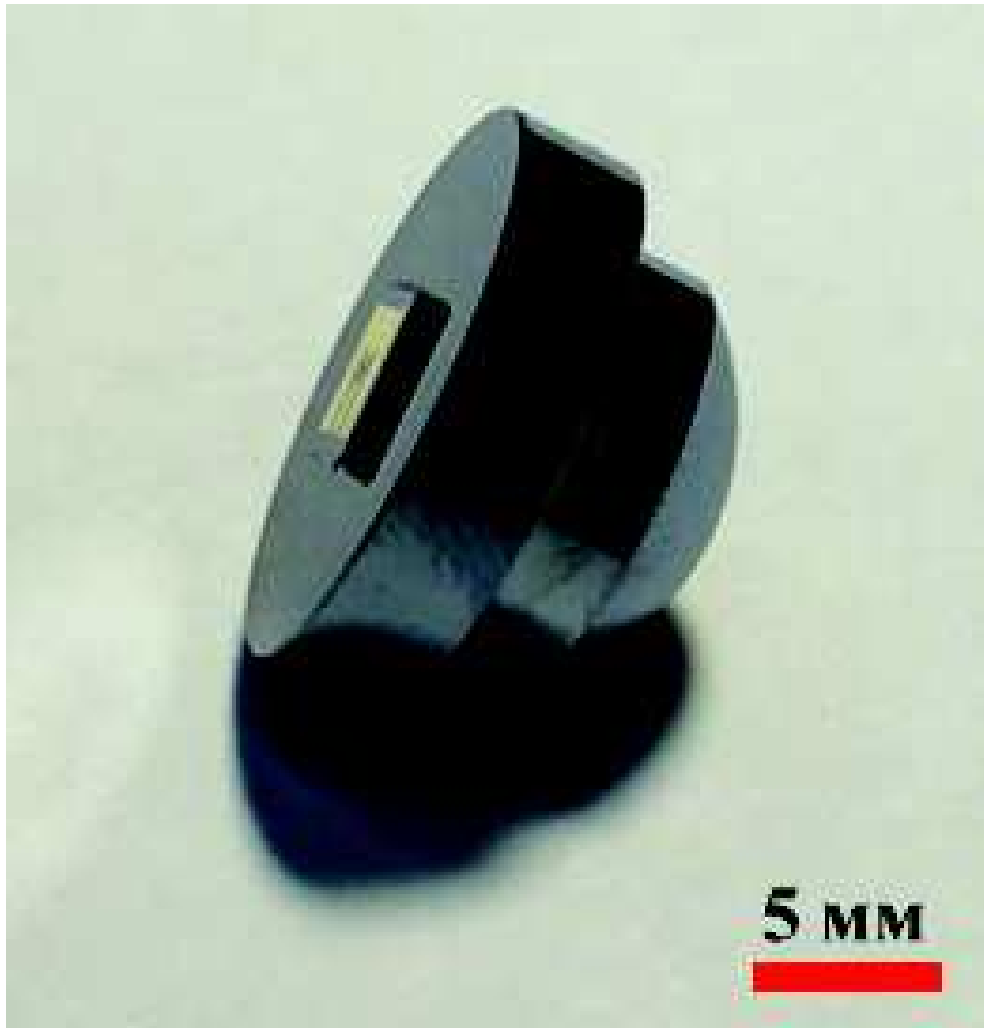


Рис. 3.3. Фотография чипа детектора, приклеенного к плоской поверхности эллиптической линзы из высокоомного кремния.

Чип детектора приклеивался к плоской поверхности эллиптической линзы из высокоомного кремния таким образом, что центральная часть планарной антенны попадала в фокус линзы. На Рис. 3.3 представлена фотография чипа детектора на линзе. Диаметр линзы составлял 12 мм.

Схема экспериментального стенда для определения вольт-ваттной чувствительности представлена на Рис. 3.5. Фотография холодной платы криостата, с размещенными на ней компонентами представлена на Рис. 3.6. Специальный латунный держатель с линзой и детектором, изображенный на Рис. 3.4, устанавливался на холодную плату оптического гелиевого криостата.

Окно криостата было выполнено из полиэтилена высокой плотности толщиной 0.5 мм. Для фильтрации комнатного фонового излучения использова-



Рис. 3.4. Латунный держатель линзы с детектором, устанавливаемый на холодную плату оптического гелиевого криостата. В качестве нагревателя использовался резистор с теплоотводом.

лись ИК-фильтры Zitex-104, которые устанавливались на радиационный экран криостата. В эксперименте использовался малошумящий криогенный усилитель с коэффициентом усиления 24 дБ в полуме 0,01-200 МГц и шумовой температурой порядка 10 К. К детектору он подключался посредством широкополосного адаптера смещения. В качестве источника излучения использовались два черных тела: при температурах 77 К и 300 К (лопасти механического модулятора), с полосно-пропускающим сеточным фильтром, центральная частота которого была равна 2,5 ТГц, а полоса 340 ГГц. Лопасти механического модулятора устанавливались в фокус системы из двух параболических зеркал. Частота модуляции составляла 10 кГц.

Измерения вольт-ваттной чувствительности и эквивалентной мощности

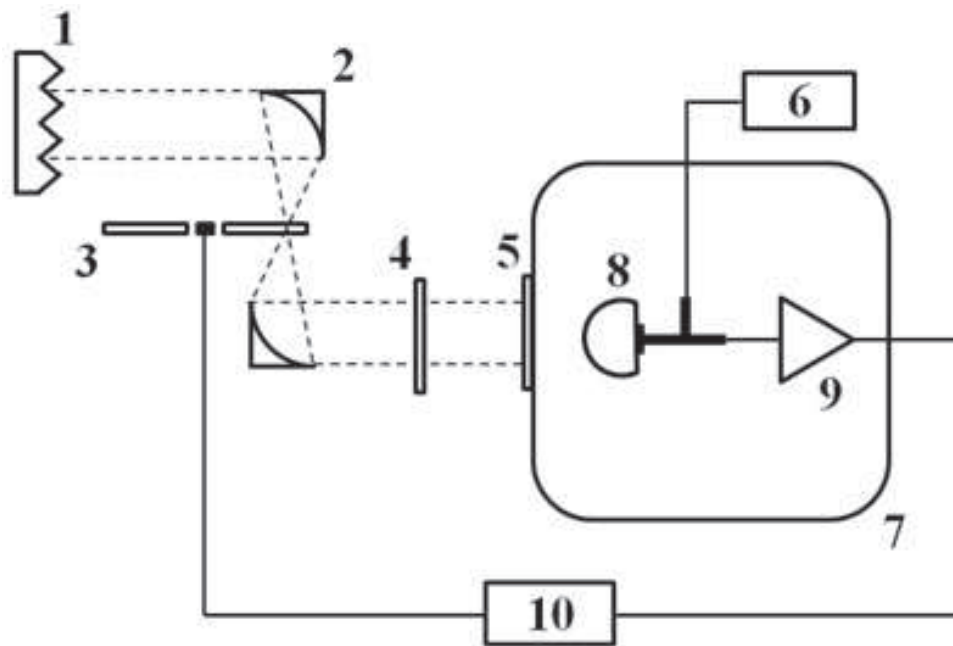


Рис. 3.5. Схематическое изображение экспериментального стенда для измерения вольт-ваттной чувствительности: 1 - черное тело при температуре 77 К, 2 - система параболических зеркал, 3 - механический модулятор, 4 - сеточный полосно-пропускающий фильтр, 5 - окно криостата из полиэтилена высокой плотности, 6 - источник смещения, 7 - оптический криостат для жидкого гелия, 8 - кремниевая линза с детектором, 9 - низкошумящий криогенный усилитель, 10 - фазочувствительный детектор (Lock-in).

шума проводились при температуре ванны близкой к критической температуре перехода NbN в сверхпроводящее состояние. Этот режим работы сильно отличается от того, что используется в работе болометра на горячих электронах в качестве смесителя. В последнем случае температура ванны составляет около 4.2 К, а рабочий режим достигается путем подачи на болометр большой мощности гетеродина. Данная методика впервые представлена в работе Карасика и Елантьева [67]. В случае, когда болометр работает в режиме смесителя, электронная температура сильно меняется вдоль мостика (чувствительного элемента болометра), при этом максимум температуры находится в центре мостика, а температура его берегов равна температуре ванны [100]. В нашем эксперименте разница между электронными температурами в центре мостика и на его берегах почти на порядок меньше. На Рис. 3.7 представлена зависимость сопротивления болометра от температуры в логарифмическом масштабе по вертикальной

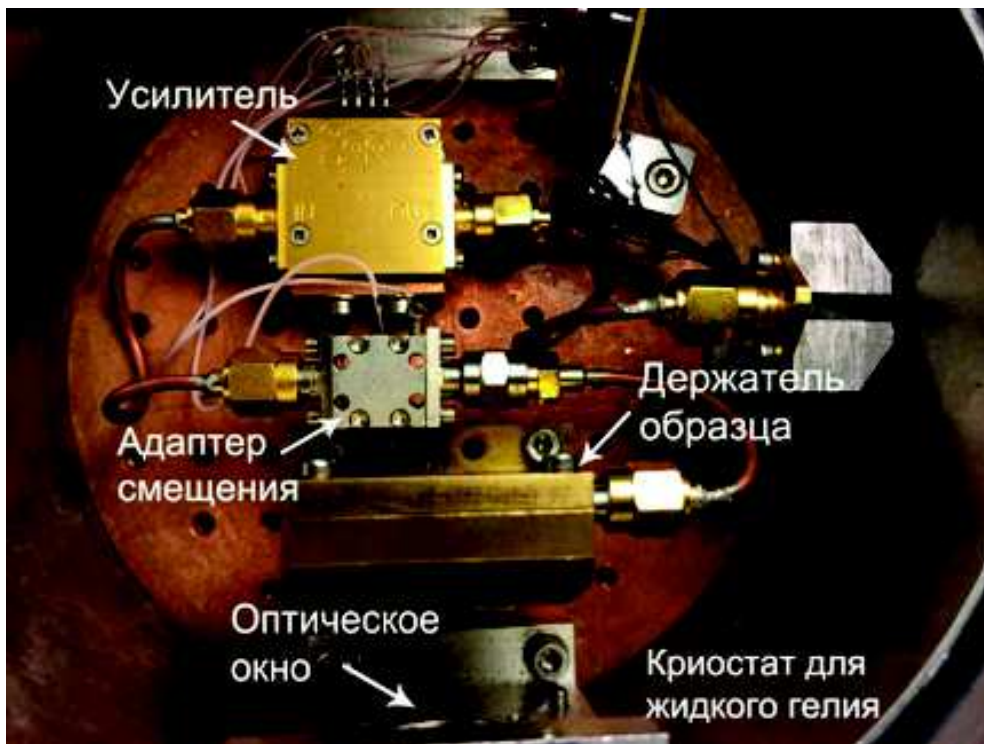


Рис. 3.6. Фотография холодной платы криостата для жидкого гелия.

оси. Значение сканирующего тока в эксперименте не превышало 300 нА, что позволило исключить влияние так называемого саморазогрева болометра.

На графике чётко выражены три сверхпроводящих перехода: первый при температуре 9.2 К соответствует переходу собственно чувствительного элемента болометра, два других наблюдаются при температурах 7.8 и 7.0 К и возникают вследствие эффекта близости между слоем сверхпроводника NbN и слоями нормального металла Au различной толщины.

Рабочая температура болометра устанавливалась с помощью специального нагревателя. На Рис. 3.8 представлено семейство вольт-амперных характеристик детектора, полученных при различных значениях температуры ванны. Модулированный входной сигнал порождал отклик болометра на частоте модуляции. Сигнал с болометра подавался на вход охлаждаемого низкошумящего усилителя и далее регистрировался синхронным усилителем (Lock-In). Мощность падающего сигнала вычислялась из известного профиля пропускания сеточного фильтра. На основании полученных данных оценивалась вольт-ваттная

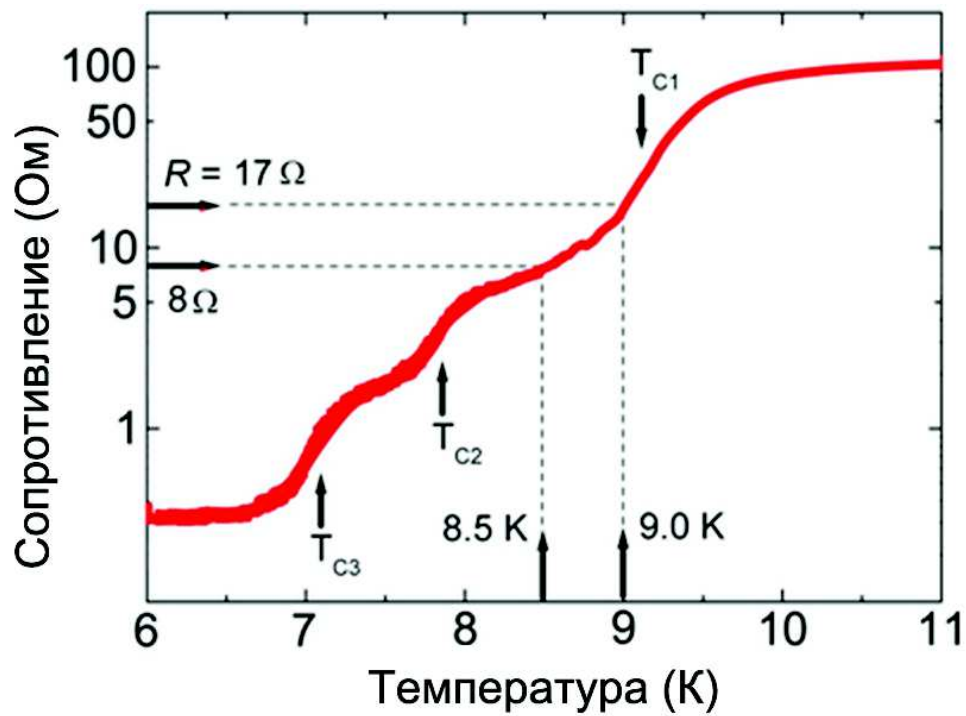


Рис. 3.7. Температурная зависимость сопротивления детектора. Сопротивление детектора по постоянному току в оптимальной рабочей точке составляет 17 Ом. Рабочая температура болометра равна 9.0 К. Соответствующая температура ванны равна 8.5 К.

чувствительность детекторной системы в соответствии с уравнением:

$$S_{Rx} = \frac{V_{out}}{P_{inc}}, \quad (3.6)$$

где  $V_{out}$  - отклик болометра, измеренный с помощью синхронного усилителя,  $P_{inc}$  - мощность падающего излучения.

В точке на вольт-амперной характеристике, соответствующей максимальному измеренному значению отношения сигнал-шум, измеренное значение вольт-ваттной чувствительности составило 2500 В/Вт.

### 3.3. Теоретический расчёт эквивалентной мощности шума детектора

В расчетах электрической эквивалентной мощности шума (NEP) нами были проанализированы вклады трёх основных видов шума, возникающих в условиях работы криогенных прямых детекторов [101]. Начнем с оценки теплового

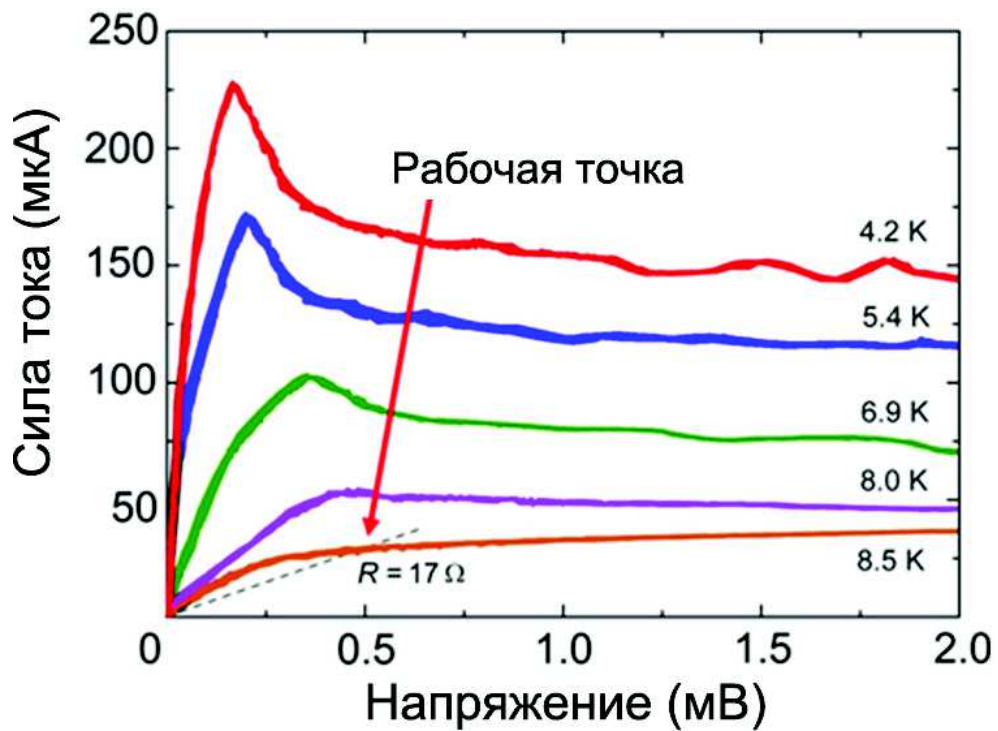


Рис. 3.8. Вольт-амперные характеристики детектора при различных температурах тепловой ванны. В оптимальной рабочей точке с наилучшим полученным в эксперименте значением отношения сигнал-шум ток смещения составлял 29 мкА, напряжения смещения было равно 0.5 мВ, сопротивление детектора по постоянному току было равно 17 Ом, дифференциальное сопротивление было равно 70 Ом.

шума, который непременно возникает в детекторе, как и в любом элементе, у которого есть активное сопротивление:

$$NEP_J^2 = \frac{4k_B T (R + 2R_d)}{S^2}, \quad (3.7)$$

где  $k_B = 1,6 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана,  $T = 9,0$  К – рабочая температура детектора,  $R = 17$  Ом – сопротивление детектора по постоянному току в рабочей точке,  $R_d = 70$  Ом – дифференциальное сопротивление детектора в рабочей точке,  $S = 13$  кВ/Вт – рассчитанное с помощью модели распределенного элемента значение электрической вольт-ваттной чувствительности детектора в рабочей точке на вольт-амперной характеристике.

Еще одним источником шума в детекторе являются термодинамические флуктуации. Данные флуктуации являются следствием того, что на микроскопическом уровне процесс передачи теплоты между чувствительным элементом



детектора и тепловой ванной является стохастическим, поскольку он может осуществляться только отдельными квантами за счет квазичастиц и фононов. По этой же причине величина шума термодинамических флуктуаций должна зависеть от коэффициента теплопроводности между чувствительным элементом детектора и тепловой ванной. Формула для вычисления эквивалентной мощности шума термодинамических флуктуаций имеет следующий вид [98]:

$$NEP_{th}^2 = 4k_B T^2 G, \quad (3.8)$$

где  $G = C_e/\tau = 16$  нВт/К,  $C_e = 5,6 \cdot 10^{-19}$  Дж/К – теплоемкость электронной подсистемы NbN при критической температуре [58],  $\tau = 35$  пс – постоянная времени детектора [39].

Последним рассматриваемым нами источником шума является усилитель. При оценке его вклада в общую электрическую эквивалентную мощность шума детектора мы пренебрегли небольшим рассогласованием импедансов между детектором и входным портом усилителя [102]:

$$NEP_{amp}^2 = \frac{4k_B T_N R}{S^2}, \quad (3.9)$$

где  $T_N = 10$  К – шумовая температура используемого в эксперименте усилителя.

Полное расчетное значение электрической эквивалентной мощности шума, с учетом отсутствия корреляции между всеми тремя указанными источниками, вычислялось по следующей формуле:

$$NEP^2 = NEP_J^2 + NEP_{th}^2 + NEP_{amp}^2. \quad (3.10)$$

После подстановки всех значений в уравнение 3.10 получили  $NEP = 2,4 \cdot 10^{-14}$  Вт·Гц<sup>-0.5</sup>.

Таким образом, данный элементарный расчёт показывает, что дальнейшее уменьшение входных потерь в оптических элементах детекторной системы, а

также улучшение согласования детектора с входным излучением и ВЧ компонентами потенциально может привести к уменьшению значения оптической эквивалентной мощности шума приблизительно на порядок, что видно из Рис. 3.2.

В данных расчетах мы не учитывали влияния других виды шумов, таких как  $1/f$  шум и дробовой шум фотонов, которое либо несущественно в случае работы нашего детектора, либо потенциально может быть сведено к минимуму. К примеру, вклад дробового шума фотонов может быть оценен следующим образом [92]:

$$NEP_{\gamma} = \frac{1}{K\sqrt{\nu_2 - \nu_1}} \int_{\nu_1}^{\nu_2} \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T_B}\right) - 1} d\nu, \quad (3.11)$$

где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж/с – постоянная Планка,  $T_B = 300$  К – фоновая комнатная температура,  $\nu_1 = 0,3 \cdot 10^{12}$  ТГц и  $\nu_2 = 8 \cdot 10^{12}$  ТГц – нижняя и верхняя границы входной полосы используемой антенны, соответственно, а  $K = 5,2$  – коэффициент согласования детектора с входным излучением. Подставляя все значения в формулу 3.11, получаем  $NEP_{\gamma} = 1,6 \cdot 10^{-15}$  Вт·Гц $^{-0.5}$ , что на несколько порядков меньше полного расчетного значение электрической эквивалентной мощности шума.

Что касается так называемого  $1/f$  или Фликкер-шума, то его спектральная плотность быстро уменьшается в ростом частоты. На частотах выше 1 МГц он становится практически неразличим в измерениях. При этом детектор может работать и на существенно более высоких частотах, вплоть до 6 ТГц [81]. Уход в более высокие частоты возможен, в частности, за счет использования высокочастотного смещения детектора взамен стандартного способа его смещения постоянным током. Данная методика подробно проанализирована на примере другого широко известного детектора на основе датчика на границе перехода в работе [103].

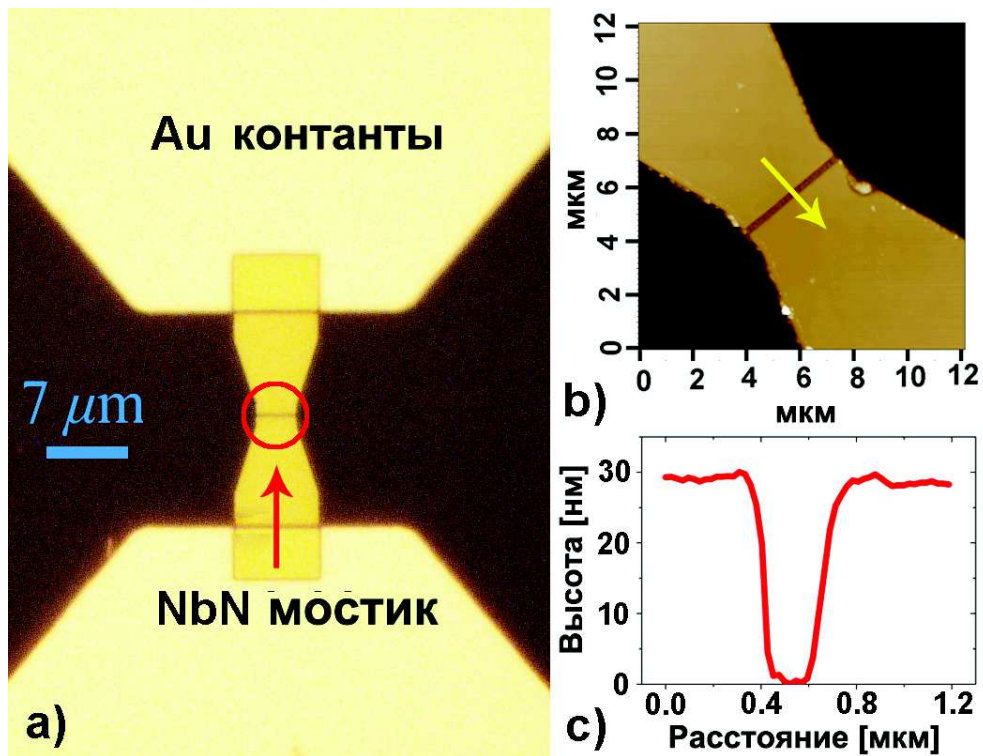


Рис. 3.9. Изображения центральной части болометра, изготовленного для прямого экспериментального измерения энергетического разрешения: а – полученное с помощью оптического микроскопа, б – полученное с помощью атомно-силового микроскопа, с – вертикальный профиль чувствительного элемента болометра вдоль линии, обозначенной жёлтой стрелкой.

### 3.4. Прямое экспериментальное измерение энергетического разрешения детектора

Измеренное значение эквивалентной мощности шума детекторной системы составило  $NEP_{Rx} = 2,0 \times 10^{-13}$  Вт·Гц<sup>-0.5</sup>. Опубликованное в статье [81] граничное значение полосы промежуточных частот смесителя на эффекте электронного разогрева в ультратонких пленках NbN с диффузионным каналом охлаждения при критической температуре составляет около  $B = 4,5$  ГГц. Следовательно, оценочное значение энергетического разрешения детектора должно составлять  $\delta E \sim NEP_{Rx} \cdot B^{-0.5} = 3$  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

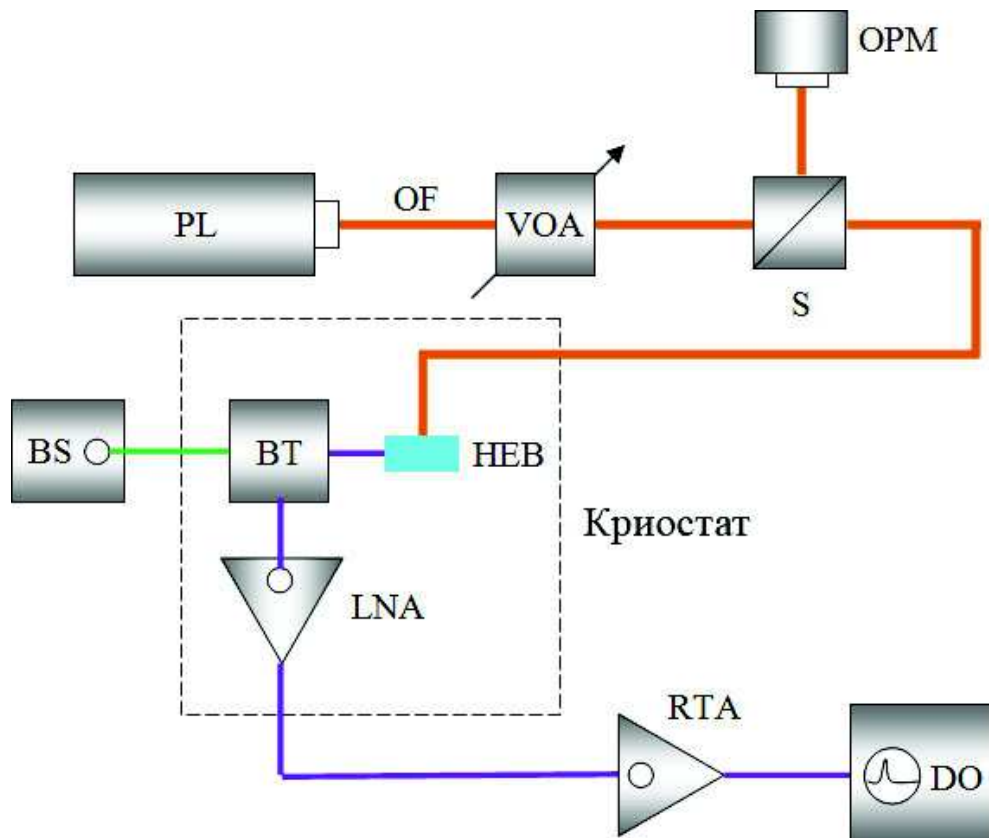


Рис. 3.10. Схема экспериментальной установки по измерению энергетического разрешения болометра. PL – 1,55-мкм лазерный диод с длительностью импульса излучения менее 50 пс, OF – оптическое волокно, VOA – оптической аттенюатор, S – делитель луча, OPM – оптический измеритель мощности, BS – источник смещения детектора, BT – широкополосный адаптер смещения, HEB – детектор, LNA – низкошумящий охлаждаемый усилитель, RTA – дополнительный усилитель, DO – цифровой осциллограф.

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. 3.9. Для получения изображения со сканирующего микроскопа атомных сил верхний защитный слой  $\text{SiO}_2$  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

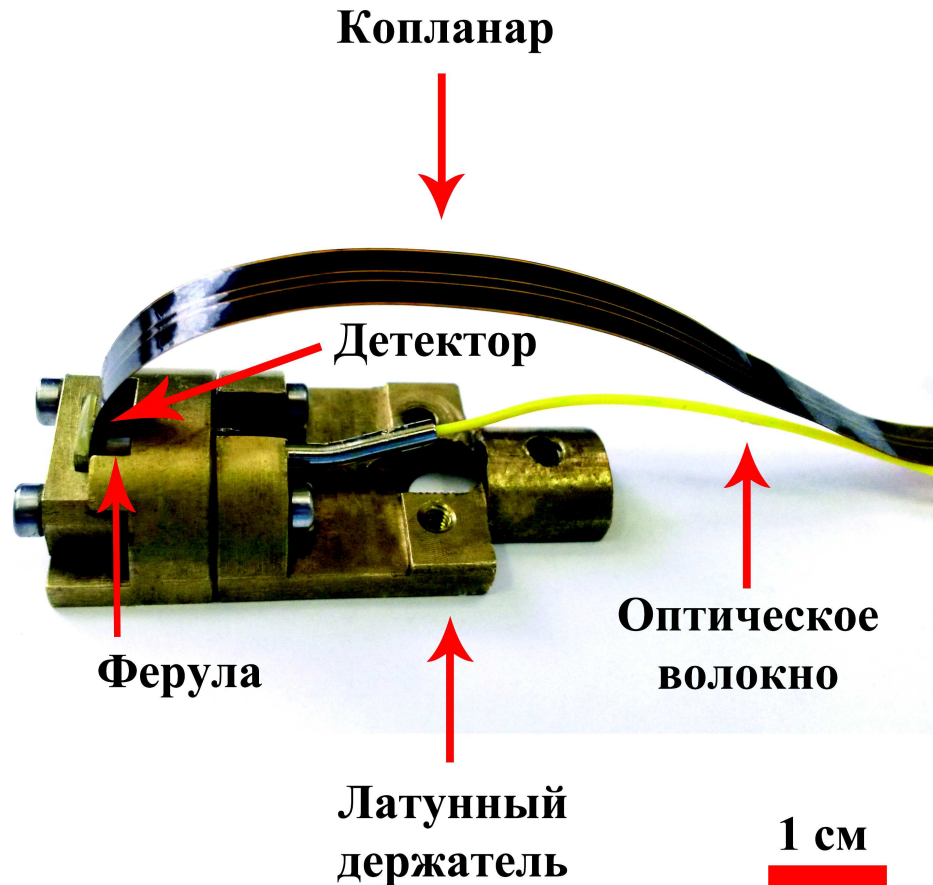


Рис. 3.11. Внешний вид используемого держателя для детектора на копланаре, совмещенного с оптическим волокном. Для электрического соединения детектора с копланаром использовалась технология микросварки.

разделах с той лишь разницей, что чувствительный элемент здесь не интегрировался с планарной антенной. Объяснялось это тем, что длина волны принимаемого излучения составляла  $1,55 \text{ мкм}$ , что вполне сравнимо с размерами самого чувствительного элемента. В качестве “плохой” антенны в данном случае выступали Au контакты к NbN мостику.

На Рис. 3.10 представлено схематическое представление экспериментальной установки по измерению энергетического разрешения болометра. В качестве источника излучения использовался импульсный лазерный диод с длиной волны излучения  $1,55 \text{ мкм}$ , частотой повторения импульсов  $10 \text{ МГц}$  и длительностью импульсов менее  $50 \text{ пс}$ . Чип детектора специальным образом бондировался на установке микросварки к копланарной линии и смещался источником

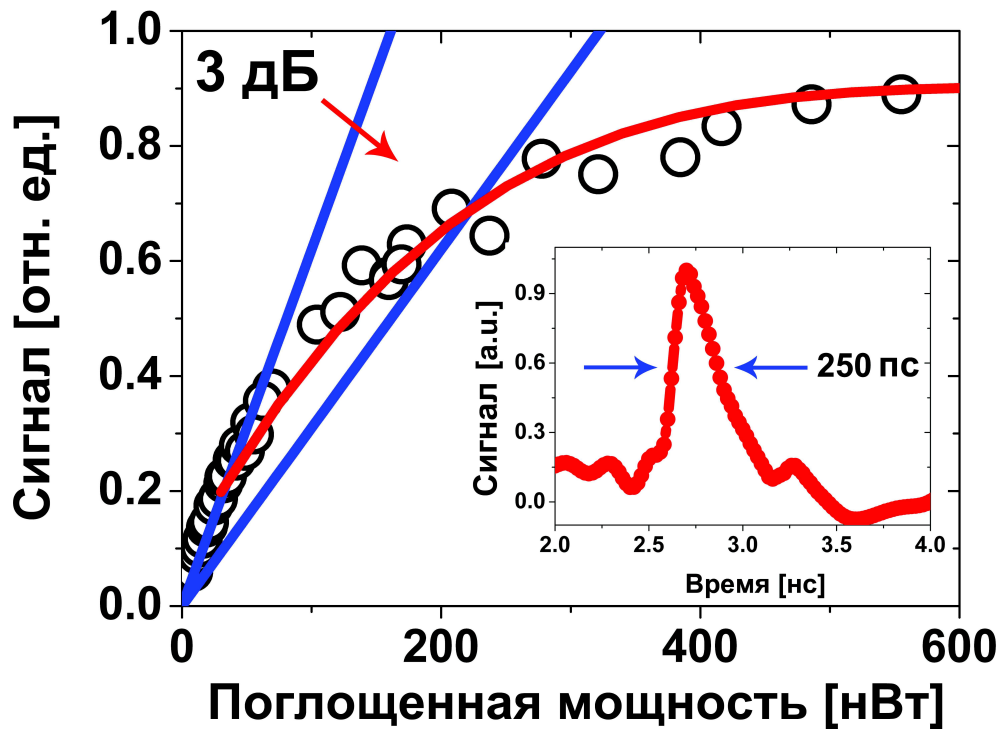


Рис. 3.12. Полученная экспериментальная зависимость сигнала с детектора от поглощенной мощности. Трехдецибелльный динамический диапазон обозначен на графике синими линиями. Красная линия представлена для облегчения визуального восприятия. На вставке представлена временная развертка отклика детектора на импульсы излучения 1,55-микронного лазера длительностью менее 50 пс.

напряжения с помощью широкополосного адаптера смещения. Импульсы, регистрируемые детектором, усиливались низкошумящим охлаждаемым усилителем с коэффициентом усиления 30 дБ в полосе частот 0,2–4 ГГц. Чип детектора, совмещенный с оптическим волокном и закрепленный в специальном держателе, изображенном на Рис. 3.11, вместе с низкошумящим охлаждаемым усилителем устанавливались на конце макета, опускаемого в сосуд Дьюара с жидким гелием. Сигнал дополнительно усиливался комнатным усилителем с коэффициентом усиления 24 дБ в частотной полосе 0.7-18 ГГц. Усиленный сигнал регистрировался цифровым осциллографом, верхняя частота входной полосы которого составляла 4 ГГц. Подстройка мощности падающего излучения осуществлялась с помощью оптического аттенюатора, для чего часть излучения лазера отводилась на него с помощью оптического делителя луча. Контроль поляризации излучения осуществлялся с помощью волоконного вращателя поляризации.

Температурная зависимость сопротивления образца имеет вид, аналогичный представленному на Рис. 3.7. На графике этой зависимости просматриваются два выраженных сверхпроводящих перехода. Первый при температуре 7.9 К соответствует переходу чувствительного элемента детектора, второй при температуре 6.0 К возникает вследствие эффекта близости между слоем сверхпроводника NbN и слоем нормального металла Au.

На Рис. 3.12 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, подробно описанной в работе [104]. Верхняя граница трехдецибельного динамического диапазона детектора соответствует 220 нВт поглощенной мощности. Минимально различимый сигнал соответствует поглощенной мощности 8,3 нВт. Таким образом, трехдецибельный динамический диапазон детектора составляет приблизительно 14 дБ.

На вставке к Рис. 3.12 представлена временная развертка отклика детектора. Длительность переднего фронта составляет около 130 пс и определяется высокочастотными свойствами тракта. Длительность заднего фронта составляет около 0.4 нс. 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<sup>-0,5</sup>. Это значение хорошо согласуется с полученным в работе [39] для аналогичных NbN детекторов в терагерцовом 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 [56], что соответствует длине волны излучения порядка 0,13 мкм.

### 3.5. Выводы к главе

В Главе 3 представлены основные научные результаты, полученные в рамках диссертационного исследования. Продемонстрированы чувствительность и быстродействие прямого детектора терагерцового излучения на основе интегрированного с антенной сверхпроводникового болометра на эффекте электронного разогрева в ультратонких пленках NbN, работающего при температуре 9,0 К. Описан впервые проведенный эксперимент по прямому измерению энергетического разрешения детектора.

Показано, что рассчитанное в приближении однородного разогрева значение вольт-ваттной чувствительности болометра существенно отличается от значения, полученного в эксперименте. Разработана модель, основанная на численном решении уравнений теплового баланса, примененных к чувствительному элементу болометра, позволяющая учесть влияние неоднородности разогрева чувствительного элемента болометра вдоль его длины. Применение данной модели позволило получить значение вольт-ваттной чувствительности детектора, более соответствующее экспериментальным данным. Проведены измерения и расчеты эквивалентной мощности шума детекторной системы, из экспериментов по измерению полосы промежуточных частот болометра при критической температуре вычислена постоянная времени болометра. На основании этих данных оценено энергетическое разрешение болометра. Полученное значение энергетического разрешения подтверждено в прямом эксперименте.



## Глава 4

# Применение детекторной системы для регистрации коротких импульсов терагерцового излучения

В Главе 4 представлен обзор экспериментов по регистрации импульсного излучения, которые были проведены в рамках диссертационной работы.

В Параграфе 4.1 приведено описание эксперимента по регистрации импульсов терагерцового излучения наносекундной длительности, сгенерированных методом оптического выпрямления в нелинейном оптическом кристалле, с помощью исследуемых в диссертационной работе детекторов. В Параграфе 4.2 представлено описание эксперимента по регистрации исследуемым в работе болометром импульсного ТГц излучения, полученного методом генерации на разностной частоте. В Параграфе 4.4 представлены краткие выводы по Главе 4.

### 4.1. Регистрации ТГц импульсов наносекундной длительности, сгенерированных методом оптического выпрямления

Изготовленная терагерцовая детекторная система была использована в совместном эксперименте с Международным учебно-научным лазерным центром МГУ по регистрации терагерцовых импульсов наносекундной длительности, полученных методом оптического выпрямления [54]. Принципиальная блок-схема экспериментальной установки представлена на Рис. 4.1.

Оптическое выпрямление осуществлялась в периодически поляризованном кристалле  $\text{Mg:Y:LiNbO}_3$  (PPLN). В качестве источника накачивающего излуче-

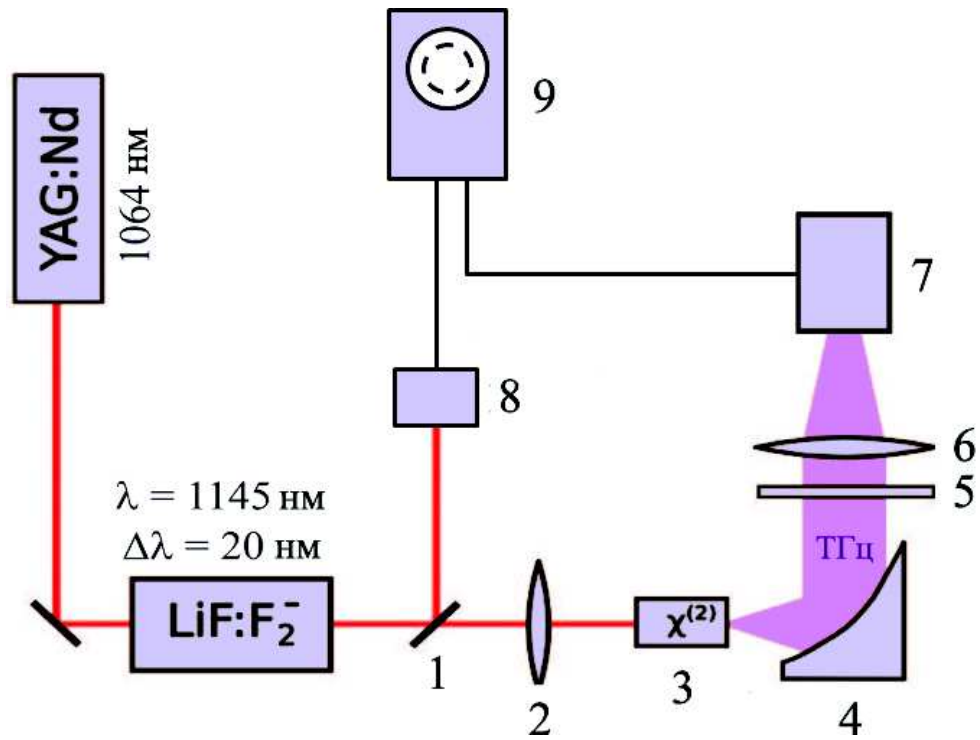


Рис. 4.1. Блок-схема экспериментальной установки по регистрации импульсов терагерцового излучения, полученных методом оптического выпрямления: 1 - делитель луча, 2 - линза, 3 - нелинейный оптический кристалл, 4 - внеосевое параболическое зеркало, 5 - набор фильтров излучения лазера, 6 - тефлоновая линза, 7 - болометр на эффекте электронного разогрева, 8 - фотодетектор, 9 - осциллограф.

Для генерации использовался лазер на кристалле LiF с центрами окраски с центральной длиной волны генерации 1145 нм и шириной полосы излучения 20 нм. Для накачки этого лазера использовался Nd:YAG-лазер. Длительность импульсов генерации LiF-лазера составляла 25 нс. Для предотвращения попадания оптического излучения на входное окно криостата с детектором, а также контролируемого ослабления терагерцового излучения использовались сменные фильтры из полиэтилена высокой плотности.

В описанном эксперименте 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 терагерцового излучения от энергии

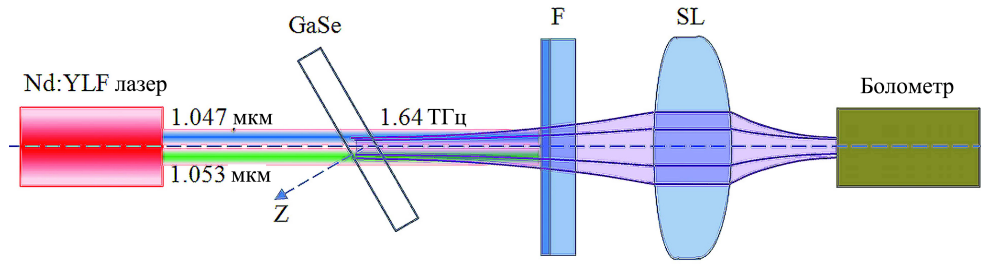


Рис. 4.2. Блок-схема экспериментальной установки: F - набор ИК-фильтров, SL - сферическая линза, Z - оптическая ось кристалла GaSe. В качестве детектора импульсов терагерцового излучения использовался болометр на эффекте электронного разогрева.

импульсов накачки. Таким образом, также была на практике продемонстрирована возможность использования исследуемого в работе детектора в качестве измерителя мощности коротких импульсов излучения терагерцового диапазона.

## 4.2. Детектирование коротких импульсов ТГц излучения, полученных методом генерации на разностной частоте в нелинейной оптической среде

В качестве демонстрации работы изготовленной детекторной системы совместно с Международным учебно-научным лазерным центром МГУ и Физическим институтом им. П. Н. Лебедева был проведен эксперимент, принципиальная блок-схема которого представлена на Рис. 4.2. Генерация разностной частоты в нелинейных оптических средах является одним из наиболее часто используемых методов генерации когерентного терагерцового излучения. Для возникновения генерации оптическая ось нелинейного кристалла ориентируется под таким углом по отношению к волновому вектору накачивающего излучения, что реализуется так называемое условие фазового синхронизма. В этом случае на выходе кристалла появляется сигнальное излучения, частота которого равна абсолютной разности частот пучков накачки. В качестве источника излучения накачки нами был использован диодный Nd:YLF лазера с модуляцией добротности. Подробное описание его работы можно найти в работе [52]. Выходное

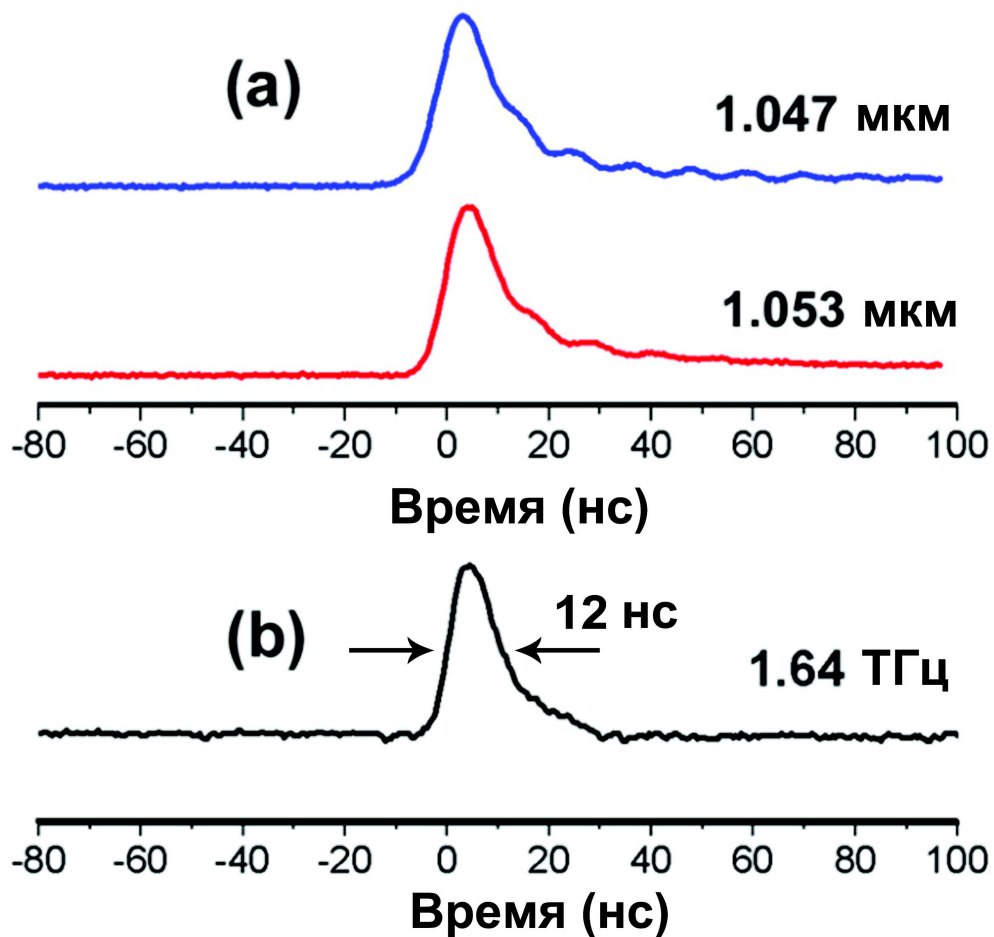


Рис. 4.3. Осциллограммы импульсов излучения лазера на длинах волн 1,047 мкм и 1,053 мкм (а), а также импульса терагерцового излучения (б), полученного с помощью болометра и цифрового осциллографа.

излучение лазера на длинах волн 1,047 мкм и 1,053 мкм с ортогональных поляризаций было отправлено на нелинейный оптический кристалл GaSe толщиной 5 мм. Угол между пучками излучения накачки и оптической осью кристалла составил около 11 градусов. Радиусы поперечных сечений накачивающих пучков на поверхности кристалла GaSe были равны около 290 мкм. Сгенерированное терагерцовое излучение совмещалось с детектором с помощью тефлоновой линзы диаметром 50 мм. Мы использовали набор кремниевых фильтров и черный полиэтилен для фильтрации излучения накачки лазера.

Временная развертка импульсов терагерцового излучения была получена с помощью изготовленной детекторной системы и цифрового осциллографа, верхняя частота входной полосы которого составляла 350 МГц (полоса частот

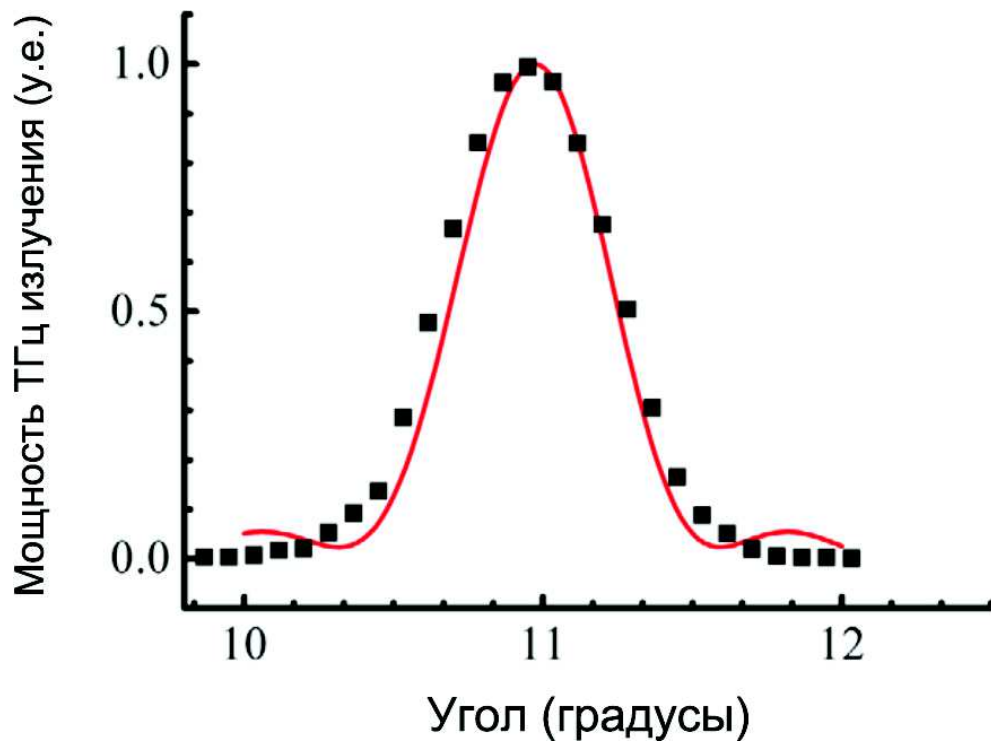


Рис. 4.4. Зависимость мощности сгенерированных импульсов терагерцового излучения от угла между оптической осью  $Z$  кристалла GaSe толщиной 5 мм и коллинеарными пучкам излучения накачки (так называемая кривая фазового синхронизма). Экспериментальные данные представлены точками, соответствующие расчеты - сплошной красной линией.

используемых нами усилителей ограничивалась сверху частотой 200 МГц). Временные развертки импульсов накачки на длинах волн 1,047 мкм и 1,053 мкм были получены с помощью того же осциллографа и быстрых фотодиодов. Результаты представлены на Рис. 4.3. Использование нашего быстрого детектора позволило представить импульсы без искажения их формы. Из Рис. 4.3 видно, что длительность сгенерированных терагерцовых импульсов составила около 12 нс.

Использование быстрого детектора в описанном эксперименте позволило существенно увеличить отношение сигнал-шум. Детекторы с большой постоянной времени, такие как ячейка Голея, способны регистрировать лишь среднее значение мощности сгенерированного терагерцового излучения, в то время как детекторы с малой постоянной времени, такие как нащ болометр на эффекте электронного разогрева, способны зарегистрировать пиковое значение мощно-

сти, увеличивая тем самым отношение сигнал-шум. За счет этого удалось с высокой точностью измерить зависимость мощности сгенерированных импульсов терагерцового излучения от угла между оптической осью Z кристалла GaSe и коллинеарными пучками излучения накачки (так называемая кривая фазового синхронизма). Результаты представлены на Рис. 4.4.

С помощью ячейки Голея и синхронного усилителя была определена средняя мощность сгенерированного терагерцового излучения, максимальное значение которой составило 52 нВт. С учетом длительности импульса в 12 нс расчетное значение пиковое мощности составляет около 0,7 мВт. С учетом того, что максимальная пиковая мощность каждого пучка накачки составляла 8 кВт, эффективность преобразования равна  $0,9 \cdot 10^{-7}$ .

### **4.3. Исследование коэффициента отражения роговицы и склеры в субтерагерцовом диапазоне**

Как уже говорилось во Введении к настоящей диссертационной работе, адекватный контроль степени гидратации роговицы и склеры очень важен для ранней диагностики различных офтальмопатологий, связанных с инвалидизирующими нарушениями рефракции (дистрофии роговицы, кератоконуса, прогрессирующей миопии и др.). Использование терагерцового излучения для этих целей представляется весьма перспективным, поскольку вода эффективно поглощает терагерцовое излучение и обладает высокой диэлектрической проницаемостью в этом диапазоне, что определяет высокое значение коэффициента отражения. Эти обстоятельства открывают возможности для использования систем сканирования в отражённом терагерцовом излучении от поверхности материалов, в том числе биологических тканей, для обнаружения малейших изменений концентрации содержащейся в них воды.

В рамках диссертационной работы было проведено экспериментальное исследование зависимости коэффициента отражения роговицы и склеры в субте-

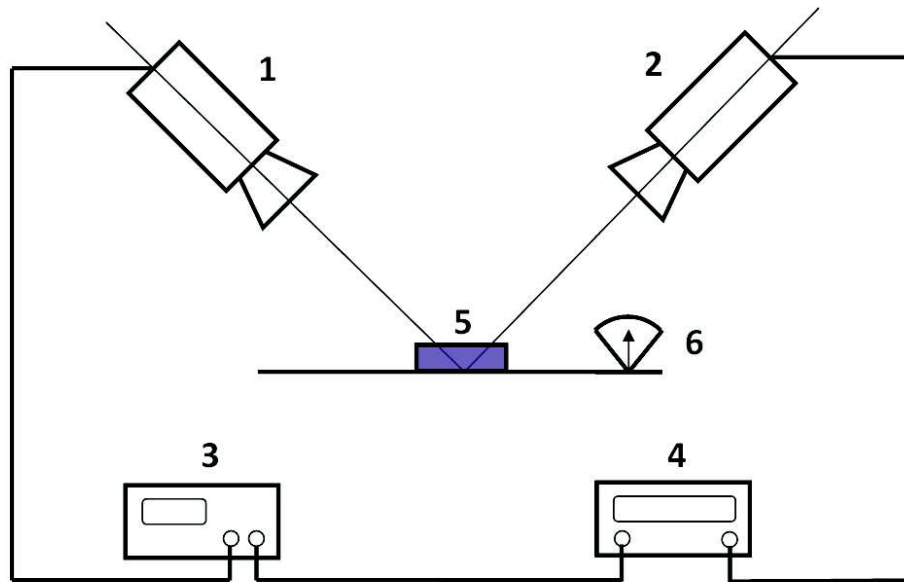


Рис. 4.5. Блок-схема экспериментальной установки по исследованию зависимости коэффициента отражения роговицы и склеры в субтерагерцовом диапазоне от процентного содержания воды по массе: 1 – лавинно-пролетный диод (ЛПД), 2 – детектор на основе диода с барьером Шоттки, 3 – источник питания и модуляции ЛПД, 4 – фазочувствительный детектор, 5 – исследуемый образец, 6 – электронные весы.

рагерцовом диапазоне от процентного содержания воды по массе [25]. Блок-схема экспериментальной установки представлена на Рис. 4.5.

В качестве источника излучения использовался лавинно-пролётный диод с частотой излучения порядка 95 ГГц, излучение которого с помощью специального рупора направлялось на исследуемый образец, размещенный в чашке Петри. Генерируемое излучение амплитудно-модулировалось источником питания на частоте 16.6 кГц. Отраженный сигнал фиксировался с помощью детектора на основе диода с барьером Шоттки, электрический сигнал с которого подавался на фазочувствительный детектор, опорный сигнал на который подавался с выхода синхронизации источника питания лавинно-пролётного диода. Для согласования отраженного от материала сигнала с детектором использовался второй рупор.

Чашка Петри с исследуемым образцом устанавливалась на весы с точностью измерения массы  $10^{-4}$  г. Таким образом обеспечивалась возможность из-

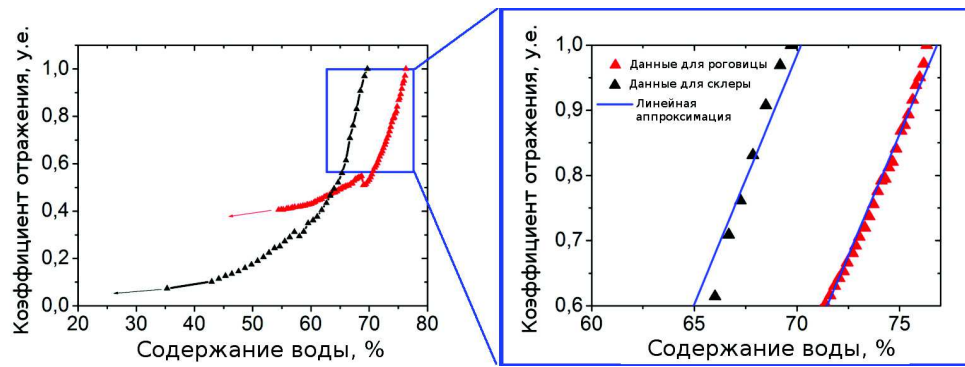


Рис. 4.6. Зависимость коэффициента отражения роговицы (красные треугольники) и склеры (чёрные квадраты) от процентного содержания воды по массе.

мерения зависимости отраженного сигнала от содержания воды в материала в процессе его высушивания. Измерения проводились до тех пор, пока изменялся сигнал, и сохранялась исходная форма роговицы и склеры.

На обратную сторону чашки Петри наклеивался поглощающий материал Eccosorb с целью уменьшения паразитного отражения излучения от металлической поверхности весов, используемых в эксперименте. Однако, полностью избавиться от этого паразитного отраженного излучения не удалось. В эксперименте оно составляло порядка 30% от общей мощности, фиксируемой детектором. Следует также отметить, что некоторая часть отраженного от материала излучения не доходила до детектора из-за неидеального согласования и рассеивания. По этой причине на Рис. 4.6 с графиком, изображающим полученные экспериментальные результаты, величина отраженного сигнала выражена в относительных единицах.

Как видно из Рис. 4.6, уменьшение процентного содержания воды в роговице на 1% приводит к уверенно регистрируемому уменьшению отраженного сигнала на 13%, что хорошо согласуется с результатами, представленными в работе [30]. Подтверждается также линейная зависимость коэффициента отражения от процентного содержания воды по массе в области слабого высушивания роговицы. При более сильном высушивании форма кривой меняется, что, вероятно, связано с деформацией самой роговицы, вызванной потерей воды.

Полученный результат представляется обнадеживающим с точки зрения



возможности разработки практического устройства для неинвазивного анализа и контроля степени гидратации роговицы и склеры. При этом в качестве детектора в таком устройстве может быть использован исследуемый в настоящей работе чувствительный болометр на эффекте электронного разогрева. Изменение содержания воды в роговице и склере на ранних стадиях течения заболеваний глаза может быть на уровне, доступном для регистрации лишь чувствительным сверхпроводниковым детектором. Этот вопрос является предметом дальнейших важнейших фундаментальных исследований.

#### **4.4. Выводы к главе**

В Главе 4 рассказано о практическом применении исследуемой в диссертационной работе терагерцовой детекторной системы на основе сверхпроводникового болометра на эффекте электронного разогрева. Продемонстрирована возможность детектирования импульсного терагерцового излучения, сгенерированного в нелинейной оптической среде методом оптического выпрямления и методом генерации на разностной частоте. Данное применение имеет важное значение, поскольку может быть использовано в медицине, а также индустрии систем безопасности, где в настоящее время наблюдается острая нехватка стабильных и удобных в использовании источников и приёмников импульсного терагерцового излучения.

## Заключение

В диссертационной работе представлены результаты исследования прямого детектора на основе сверхпроводникового болометра на эффекте электронного разогрева, работающего при температуре 9,0 К. Показано, что для корректной оценки вольт-ваттной чувствительности детектора необходим учет неоднородности разогрева чувствительного элемента болометра вдоль его длины под действием тока смещения и падающей мощности. Разработана модель, учитывающая данный эффект. Рассчитанное с помощью данной модели значение вольт-ваттной чувствительности болометра в рабочей точке вблизи критической температуры соответствует данным эксперимента. На частоте излучения 2,5 ТГц измеренное значение эквивалентной мощности шума детекторной системы составило  $2,0 \times 10^{-13} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-0,5}$ . Данное значение было подтверждено в дополнительном прямом измерении с использованием импульсного лазер с длиной волны излучения 1,55 мкм и длительностью импульса менее 50 пс. Измеренное в этом эксперименте значение энергетического разрешения детекторной системы составило 1,6 аДж. Поскольку механизм отклика болометра частотно независим, измеренное в данном эксперименте значение энергетического разрешения соответствует также ТГц диапазону. В рамках диссертационной работы продемонстрировано практическое применение исследуемого болометра для детектирования коротких импульсов терагерцового излучения, сгенерированных в нелинейной оптической среде методом оптического выпрямления и методом генерации на разностной частоте.

Дальнейшая работа будет направлена на исследование других сверхпроводников в качестве материалов для болометров. В частности, перспективным кажется использование TiN, время релаксации в котором меняется от 5,5 нс до 88 нс при изменении критической температуры пленки от 4,2 К до 1,7 К [105]. Планируется изготовление образцов детекторов на основе этого материала и измерение их энергетического разрешения. При этом за счет большего значения

постоянной времени будет получен существенный выигрыш в чувствительности, что, по оценочным расчетам, позволит регистрировать одиночные фотоны ближнего инфракрасного диапазона. Данные однофотонные детекторы будут выгодно отличаться от стандартных сверхпроводниковых однофотонных детекторов (*англ.* superconducting single photon detector – SSPD) [106], разработкой и исследованием которых занимается отдельная научная группа Учебно-научного радиофизического центра, а также многие другие ведущие научные лаборатории, поскольку последние работают фактически лишь в режиме счёта фотонов, тогда как планируемые детекторы будут обладать помимо этого энергетическим разрешением.

Кроме того закономерным продолжением исследований, проводимых в рамках настоящей диссертационной работы, является объединение детекторов в матрицу, состоящую из большого количества болометров [107]. Данное направление исследований кажется очень перспективным, поскольку в настоящее время чувствительность одиночных терагерцовых болометров, используемых в различных приложениях, достигла значений, которые близки к своему фундаментальному пределу. Однако, для таких важных приложений, как радиоастрономия, активно осваивающая в настоящий момент терагерцовую область спектра электромагнитного излучения [46], требуются все более чувствительные приемники. Единственным способом получения еще больших значений чувствительности является объединение этих болометров в матрицу, содержащую большое количество элементов [108]. Вместе с тем переход от однопиксельных приемников к матричным сопряжен с рядом трудностей, связанных с организацией системы считывания. Перспективным в этом направлении кажется исследование метода переменного высокочастотного смещения элементов матрицы для мультиплексирования в частотной области [103].

В завершение хотелось бы выразить глубокую признательность своему научному руководителю профессору Гольцману Григорию Наумовичу за внимательное и грамотное руководство, ценные советы и замечания на протяжении

всей работы; Финкелю Матвею Ильичу за помощь и участие в работе; руководителю технологического сектора Воронову Борису Моисеевичу и сотрудникам сектора, в особенности, Кауровой Наталье Сергеевне, за изготовление детекторов, а также всему коллективу сотрудников и аспирантов Учебно-научного радиофизического центра МПГУ.

## Список авторских публикаций

A1. 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.

A2. 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.

A3. 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.

A4. Тучак, А. Н., Гольцман, Г. Н., Китаева, Г. Х., Пенин, А. Н., Селиверстов, С. В., 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.

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 Koromyslov 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. T. 11. №. 1. C. 015004.

A6. 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.

A7. 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.

А8. 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.

## Список сокращений и условных обозначений

ВАХ	—	вольт-амперная характеристика
ИК	—	инфракрасный диапазон длин волн
ТГц	—	терагерцовый частотный диапазон
субТГц	—	субтерагерцовый частотный диапазон
ММ	—	миллиметровый диапазон длин волн
НЕВ	—	hot-electron bolometer (болومتر на горячих электронах)
$\omega_{LO}$	—	циклическая частота излучения гетеродина
$\omega_{RF}$	—	циклическая частота сигнального излучения
$\varphi_{RF}$	—	фаза сигнального излучения относительно излучения гетеродина
$E_{LO}$	—	амплитудное значение напряженности поля излучения гетеродина
$E_{RF}$	—	амплитудное значение напряженности поля сигнального излучения
$V_S(t)$	—	временная зависимость напряжения на болометре
$\omega_{IF}$	—	промежуточная циклическая частота сигнала со смесителя
$C$	—	теплоемкость чувствительного элемента болометра
$G$	—	коэффициент теплопроводности термической развязки между чувствительным элементом болометра и тепловой ванной
$\tau_0$	—	внутренняя постоянная времени болометра
NEP	—	noise-equivalent power (эквивалентная мощность шума)
$NEP_{Rx}$	—	эквивалентная мощность шума детекторной системы
$V_{noise}$	—	среднее квадратическое значение напряжения шума, сгенерированного компонентами детекторной системы
$B_d$	—	полоса частот, в которой происходит измерение сигнала с болометром (частотная полоса прибора, регистрирующего сигнал с болометра)
$S_{Rx}$	—	вольт-ваттная чувствительность детекторной системы
$V_{out}$	—	напряжение сигнала с болометра
$P_{inc}$	—	мощность падающего излучения
$\delta E$	—	энергетическое разрешение детекторной системы

TES	— transition edge sensor (детектор на границе перехода)
ДБШ	— диоды с барьерами Шоттки
KID	— kinetic-inductance detector (детектор на кинетической индуктивности)
$\tau_{ee}$	— время электрон-электронного взаимодействия
$\tau_{eph}$	— время электрон-фононного взаимодействия
Au	— золото
Nb	— ниобий
NbN	— нитрид ниобия
Cr	— хром
Ti	— титан
Ar	— аргон
N <sub>2</sub>	— газообразный азот
TiN	— нитрид титана
Si	— кремний
SiO <sub>2</sub>	— оксид кремния
NbTiN	— нитрид ниобий титан
MgO	— оксид магния
NbZr	— ниобий-цирконий
LiF	— литий-фтор
$\lambda$	— длина волны излучения
$V$	— скорость осаждения пленки на поверхность подложки
$H$	— толщина пленки
$\tau$	— время осаждения пленки
$T_c$	— критическая температура сверхпроводника (температура перехода в сверхпроводящее состояние)
NS	— контакт сверхпроводника с нормальным металлом
$D$	— коэффициент диффузии носителей заряда



$\tau_{th}$	— время термализации электронной подсистемы в ультратонкой пленке сверхпроводника
$L$	— длина чувствительного элемента болометра
$S$	— вольт-ваттная чувствительность детектора
$I$	— сила тока смещения болометра
$R_d$	— дифференциального сопротивление болометра в рабочей точке вольт-амперной характеристике
$R$	— сопротивление болометра по постоянному току в рабочей точке вольт-амперной характеристике
$Z_L$	— динамическое нагрузочное сопротивление на болометре
$\xi$	— коэффициент теплопроводности материала, из которого изготовлен чувствительный элемент болометра
$p_{dc}$	— тепловая мощность тока на единицу длины чувствительного элемента болометра
$c$	— теплоемкость материала, из которого изготовлен чувствительный элемент болометра, на единицу его длины
$p_{ep}$	— тепловой поток между электронной и фононной подсистемами болометра
$p_{es}$	— тепловой поток между фононной подсистемой болометра и подложкой
$p_{rf}$	— мощность падающего излучения на единицу длины чувствительного элемента болометра
$R_L$	— нагрузочное сопротивление болометре
HDPE	— high-density polyethylene (полиэтилен высокой плотности)
$NEP_J$	— эквивалентная мощность теплового (джонсоновского) шума
$NEP_{th}$	— эквивалентная мощность шума термодинамически из флуктуаций
$NEP_{amp}$	— эквивалентная мощность шума усилителя
$T_N$	— шумовая температура усилителя
$NEP_\gamma$	— эквивалентная мощность дробового шума фотонов

- PPLN — periodically poled lithium niobate (периодически поляризованный ниобат лития)
- Nd:YAG — алюмо-иттриевый гранат, легированный ионами неодима
- Nd:YLF — фторид иттрия-лития, легированный неодимом

## Список литературы

1. М.Гершензон, Г.Гольцман, И.Гогидзе и др. Смеситель миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн на основе разогрева электронов в резистивном состоянии сверхпроводниковых пленок // СФХТ. 1990. Т. 3, № NIO (часть 1). С. 2143–2160.
2. Semenov G. N., A. D. and Gol'tsman, Sobolewski R. Hot-electron effect in superconductors and its applications for radiation sensors // Superconductor Science and Technology. 2002. Vol. 15, no. 4. P. R1.
3. Энциклопедия физики и техники. Москва, 1989.
4. Shklovskij V. A. Hot electrons in metals at low temperatures // Journal of Low Temperature Physics. 1980. Vol. 41, no. 3-4. P. 375–396.
5. Ridley B. K. Hot electrons in semiconductors // Science Progress (1933-). 1986. P. 425–459.
6. Е.М.Гершензон, М.Е.Гершензон, Г.Н.Гольцман и др. Разогрев квазичастиц в сверхпроводящей пленке, находящейся в резистивном состоянии // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1981. Т. 34, № 5. С. 281–285.
7. Gershenson E. M., Gershenson M. E., Goltsman G. N. et al. Nonselective effect of electromagnetic radiation on a superconducting film in the resistive state // JETP Lett. 1982. Vol. 36, no. 7.
8. Gershenson E. M., Gershenson M. E., Goltsman G. N. et al. Heating of electrons in a superconductor in the resistive state by electromagnetic radiation // Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1984. Vol. 86. P. 758–773.
9. Gershenson E. M., Goltsman G. N., Elant'ev A. I. et al. Intense electromagnetic radiation heating of superconductor electrons in resistive state // Fiz. Nizk. Temp. 1988.
10. Gershenson E. M., Goltsman G. G., Gousev Y. P. et al. Electromagnetic radiation mixer based on electron heating in resistive state of superconductive Nb

- and YBaCuO films // *Magnetics, IEEE Transactions on.* 1991. Vol. 27, no. 2. P. 1317–1320.
11. Wellstood F. C., Urbina C., Clarke J. Hot-electron effects in metals // *Physical Review B.* 1994. Vol. 49, no. 9. P. 5942.
  12. Karasik B. S., Il'in K. S., Pechen E. V., Krasnosvobodtsev S. I. Diffusion cooling mechanism in a hot-electron NbC microbolometer mixer // *Applied physics letters.* 1996. Vol. 68, no. 16. P. 2285–2287.
  13. Skalare A., McGrath W. R., Bumble B. et al. Large bandwidth and low noise in a diffusion-cooled hot-electron bolometer mixer // *Applied physics letters.* 1996. Vol. 68, no. 11. P. 1558–1560.
  14. Floet D. W., Baselmans J. A., Gao J. R., Klapwijk T. M. Resistive behaviour of Nb diffusion-cooled hot electron bolometers. Vol. 1 of Ninth International Symposium on Space Terahertz Technology. 1998. — March. P. 63.
  15. Wyss R. A., Karasik B. S., McGrath W. R. et al. Noise and bandwidth measurements of diffusion-cooled Nb hot-electron bolometer mixers at frequencies above the superconductive energy gap. *Proc. of the 10th Int. Symp. On Space THz Technology.* 1999. — March.
  16. Ryabchun S., Tong C. Y. E., Blundell R., Goltsman G. Stabilization scheme for hot-electron bolometer receivers using microwave radiation // *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on.* 2009. Vol. 19, no. 1. P. 14–19.
  17. 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.
  18. Filipovic D. F., Gearhart S. S., Rebeiz G. M. Double-slot antennas on extended hemispherical and elliptical silicon dielectric lenses // *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on.* 1993. Vol. 41, no. 10. P. 1738–1749.
  19. Semenov A. D., Richter H., Hubers H. W. et al. Terahertz performance of integrated lens antennas with a hot-electron bolometer // *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on.* 2007. Vol. 55, no. 2. P. 239–247.

20. Linfield E. Terahertz applications: a source of fresh hope // *Nature Photonics*. 2007. Vol. 1, no. 5. P. 257–258.
21. Siegel P. H. Terahertz technology in biology and medicine // *Microwave Symposium Digest*. 2004. Vol. 3. P. 1575–1578.
22. Upadhyaya P. C., Nguyen K. L., Shen Y. C. et al. Characterization of Crystalline Phase-Transformations in Theophylline by Time-Domain Terahertz Spectroscopy // *Spectroscopy letters*. 2006. Vol. 39, no. 3. P. 215–224.
23. Woodward R. M., Cole B. E., Wallace V. P. et al. Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer and skin tissue // *Physics in medicine and biology*. 2002. Vol. 47, no. 21. P. 3853.
24. В.А.Анфертьев, С.В.Селиверстов, В.Л.Вакс и др. Широкодиапазонный спектрометр высокого разрешения ТГц частотного диапазона // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2014. Т. 1, № 3. С. 126–131.
25. 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.
26. Singh R. S., Tewari P., Bourges J. L. et al. Terahertz sensing of corneal hydration. 2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology. 2010. — August.
27. Dougherty J. P., Jubic G. D., Kiser Jr W. L. Terahertz imaging of burned tissue. *Integrated Optoelectronic Devices*. International Society for Optics and Photonics, 2007. P. 64720N–64720N.
28. Wallace V. P., Fitzgerald A. J., Shankar S. et al. Terahertz pulsed imaging of basal cell carcinoma ex vivo and in vivo // *British Journal of Dermatology*. 2004. Vol. 151, no. 2. P. 424–432.
29. *Sensing with Terahertz Radiation* // Ed. by D. Mittleman. Springer, 2013. Vol. 85.
30. Bennett D. B., Taylor Z. D., Tewari P. et al. Terahertz sensing in corneal

- tissues // Journal of biomedical optics. 2011. Vol. 16, no. 5. P. 057003–057003.
31. Taylor Z. D., Garritano J., Sung S. et al. THz and mm-wave sensing of corneal tissue water content: In vivo sensing and imaging results // IEEE transactions on terahertz science and technology. 2015. Vol. 5, no. 2. P. 184–196.
  32. Б.Н.Морозов, Ю.М.Айвазян. Эффект оптического выпрямления и его применения (обзор) // Квантовая электроника. 1980. Т. 7, № 1. С. 5–33.
  33. В.В.Слабко. Нелинейно-оптические преобразования частот // Соросовский образовательный журнал. 1999. Т. 5. С. 105–111.
  34. Grischkowsky D., Keiding S., Exter M. V., Fattinger C. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors // JOSA B. 1990. Vol. 7, no. 10. P. 2006–2015.
  35. Karasik B. S., Cantor R. Demonstration of high optical sensitivity in far-infrared hot-electron bolometer // Applied Physics Letters. 2011. Vol. 98, no. 19.
  36. 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. Vol. 80, no. 5. P. 817–819.
  37. Semenov A., Cojocari O., Hubers H. W. et al. Application of zero-bias quasi-optical Schottky-diode detectors for monitoring short-pulse and weak terahertz radiation // IEEE Electron Device Letters. 2010. Vol. 31, no. 7. P. 674–676.
  38. Tydexoptics.com. Golay Cells. URL: [http://www.tydexoptics.com/en/products/thz\\_optics/golay\\_cell/](http://www.tydexoptics.com/en/products/thz_optics/golay_cell/) (дата обращения: 2015-08-02).
  39. 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.
  40. Luukanen A., Pekola J. P. A superconducting antenna-coupled hot-spot microbolometer // Applied Physics Letters. 2003. Vol. 82, no. 22. P. 3970–3972.
  41. Santavicca D. F., Reese M. O., True A. B. et al. Antenna-coupled niobium bolometers for terahertz spectroscopy // Applied Superconductivity, IEEE

- Transactions on. 2007. Vol. 17, no. 2. P. 412–415.
42. Wei J., Olaya D., Karasik B. S. et al. Ultrasensitive hot-electron nanobolometers for terahertz astrophysics // *Nature Nanotechnology*. 2008. Vol. 3, no. 8. P. 496–500.
  43. Beyer A. D., Kenyon M. E., Echternach P. M. et al. Characterization of an ultra-sensitive transition-edge sensor for space-borne far-IR/sub-mm spectroscopy // *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*. 2011. Vol. 21, no. 3. P. 199–202.
  44. Н.С.Кардашев, И.Д.Новиков, В.Н.Лукаш и др. Обзор научных задач для обсерватории Миллиметрон // *Успехи физических наук*. 2014. Т. 184, № 12. С. 1319–1352.
  45. А.Е.Саломонович. Внеатмосферная субмиллиметровая астрономия // *Успехи физических наук*. 1969. Т. 99, № 11. С. 418–438.
  46. Blain A. W., Smail I., Ivison R. J. et al. Submillimeter galaxies // *Physics Reports*. 2002. Vol. 369, no. 2. P. 111–176.
  47. Siegel P. H. Terahertz technology // *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*. 2002. Vol. 50, no. 3. P. 910–928.
  48. Pilbratt G. L., Riedinger J. R., Passvogel T. et al. Herschel Space Observatory-An ESA facility for far-infrared and submillimetre astronomy // *Astronomy and Astrophysics*. 2010. Vol. 518. P. L1.
  49. Mather J. C., Cheng E. S., Eplee Jr R. E. et al. A preliminary measurement of the cosmic microwave background spectrum by the Cosmic Background Explorer (COBE) satellite // *The Astrophysical Journal*. 1990. Vol. 354. P. L37–L40.
  50. Wild W., Kardashev N. S., Likhachev S. F. et al. Millimetron? a large Russian-European submillimeter space observatory // *Experimental Astronomy*. 2009. Vol. 23, no. 1. P. 221–244.
  51. Becklin E. E., Gehrz R. D., Roellig T. L. Stratospheric observatory for infrared astronomy (SOFIA) // *SPIE Optical Engineering+ Applications. International*

- Society for Optics and Photonics. 2012. P. 85110B–85110B–15.
52. Angeluts A. A., Bezotosnyi V. V., Seliverstov S. V. et al. Compact 1.64 THz source based on a dual-wavelength diode end-pumped Nd: YLF laser with a nearly semiconfocal cavity // *Laser Physics Letters*. 2014. Vol. 11, no. 1. P. 015004.
  53. Tretyakov I. V., Finkel M. I., Seliverstov S. V. et al. Hot-electron bolometer mixers with in situ contacts // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2014. Vol. 56, no. 8-9. P. 591–598.
  54. А.Н.Тучак, С.В.Селиверстов, Г.Х.Китаева и др. Генерация терагерцовых импульсов наносекундной длительности методом оптического выпрямления // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2012. Т. 96, № 2. С. 97–101.
  55. 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.
  56. Seliverstov S. V., Rusova A. A., Kaurova N. S. et al. Attojoule energy resolution of direct detector based on hot electron bolometer // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 741, no. 1. P. 012165.
  57. Burke P., Schoelkopf R., Prober D. et al. Mixing and noise in diffusion and phonon cooled superconducting hot-electron bolometers // *Journal of applied physics*. 1999. Vol. 85, no. 3. P. 1644–1653.
  58. Semenov A., Gol'tsman G., Korneev A. Quantum detection by current carrying superconducting film // *Physica C: Superconductivity*. 2001. Vol. 351, no. 4. P. 349–356.
  59. Nahum M., Martinis J. M. Ultrasensitive hot-electron microbolometer // *Applied physics letters*. 1993. Vol. 63, no. 33. P. 3075–3077.
  60. Floet D. W., Miedema E., Klapwijk T. M., Gao J. R. Hotspot mixing: A framework for heterodyne mixing in superconducting hot-electron bolometers // *Applied physics letters*. 1999. Vol. 74, no. 3. P. 433–435.



61. Il'in K. S., Milostnaya I. I., Verevkin A. A. et al. Ultimate quantum efficiency of a superconducting hot-electron photodetector // Applied physics letters. 1998. Vol. 73, no. 26. P. 3938–3940.
62. Cherednichenko S., Khosropanah P., Kollberg E. et al. Terahertz superconducting hot-electron bolometer mixers // Physica C: Superconductivity. 2002. Vol. 372. P. 407–415.
63. Kaganov M. I., Lifshitz I. M., Tanatarov L. V. Relaxation between electrons and the crystalline lattice // Soviet Physics JETP-USSR. 1957. Vol. 4, no. 2. P. 173–178.
64. Perrin N., Vanneste C. Response of superconducting films to a periodic optical irradiation // Physical Review B. 1983. Vol. 28, no. 9. P. 5150.
65. Nebosis R. S., Semenov A. D., Gousev Y. P., Renk K. F. Rigorous analysis of a superconducting hot-electron bolometer mixer. Theory and comparison with experiment. Proceedings of the 7th International Symposium on Space THz. Tech, University of Virginia, Charlottesville, USA. 1996. — March.
66. Skocpol W. J., Beasley M. R., Tinkham M. Self-heating hotspots in superconducting thin-film microbridges // Journal of Applied Physics. 1974. Vol. 45, no. 9. P. 4054–4066.
67. Karasik B. S., Elantiev A. I. Noise temperature limit of a superconducting hot-electron bolometer mixer // Applied Physics Letters. 1996. Vol. 68, no. 6. P. 853–855.
68. Semenov A. D., Hьbbers H. W., Richter H. et al. Superconducting hot-electron bolometer mixer for terahertz heterodyne receivers // Applied Superconductivity, IEEE Transactions on. 2003. Vol. 13, no. 2. P. 168–171.
69. Tong C. E., Meledin D., Loudkov D. et al. A 1.5 THz hot-electron bolometer mixer operated by a planar diode based local oscillator // IEEE International Microwave Symposium Digest. 2003. Vol. 1. P. 751–754.
70. Cherednichenko S., Drakinskiy V., Baubert J. et al. Gain bandwidth of NbN hot-electron bolometer terahertz mixers on 1.5  $\mu\text{m}$  Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> mem-

- branes // Journal of applied physics. 2007. Vol. 101, no. 12. P. 4508.
71. Karasik B. S., Gaidis M. C., McGrath W. R. et al. A low-noise 2.5 THz superconductive Nb hot-electron mixer // Applied Superconductivity, IEEE Transactions on. 1997. Vol. 7, no. 2. P. 3580–3583.
  72. Zhang W., Khosropanah P., Gao J. R. et al. Quantum noise in a terahertz hot electron bolometer mixer // Applied Physics Letters. 2010. Vol. 96, no. 11. P. 111113.
  73. Zhang W., Khosropanah P., Gao J. R. et al. Noise temperature and beam pattern of an NbN hot electron bolometer mixer at 5.25 THz // Journal of Applied Physics. 2010. Vol. 108, no. 9. P. 093102.
  74. Baselmans J. J., Hajenius M., Gao J. R. et al. Doubling of sensitivity and bandwidth in phonon cooled hot electron bolometer mixers // Applied physics letters. 2004. Vol. 84, no. 11. P. 1958–1960.
  75. Ю.Б.Вахтомин. Гетеродинное преобразование частоты субмиллиметрового излучения в сверхпроводящих пленках NbN и двумерном электронном газе гетероструктур AlGaAs/GaAs: Кандидатская диссертация / Московский педагогический государственный университет. 2005.
  76. М.И.Финкель. Терагерцовые смесители на эффекте электронного разогрева в ультратонких плёнках NbN и NbTiN: Кандидатская диссертация / Московский педагогический государственный университет. 2006.
  77. С.А.Рябчун. Широкополосные высокостабильные терагерцовые смесители на горячих электронах из тонких сверхпроводящих пленок NbN: Кандидатская диссертация / Московский педагогический государственный университет. 2009.
  78. А.В.Смирнов. Исследование полосы преобразования терагерцовых смесителей на эффекте электронного разогрева в NbZr, NbN и в одиночном гетеропереходе AlGaAs/GaAs: Кандидатская диссертация / Московский педагогический государственный университет. 2009.
  79. SOFIA Science Center. URL: <https://www.sofia.usra.edu/> (дата обращения)

- ния: 2015-10-24).
80. Malo I., Gallego J. D., Diez C. et al. Improved multi-octave 3 dB IF hybrid for radio astronomy cryogenic receivers // The Proc. 20th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 2009. P. 300–307.
  81. Tretyakov I., Ryabchun S., Finkel M. et al. Low noise and wide bandwidth of NbN hot-electron bolometer mixers // Applied Physics Letters. 2011. Vol. 98, no. 3. P. 033507.
  82. Morozov D., Mauskopf P. D., Ade P. et al. Ultrasensitive TES bolometers for space-based FIR astronomy // Applied Superconductivity, IEEE Transactions on. 2011. Vol. 21, no. 3. P. 188–191.
  83. Rice J. P., Grossman E. N., Rudman D. A. Antenna-coupled high-Tc air-bridge microbolometer on silicon // Applied physics letters. 1994. Vol. 65, no. 6. P. 773–775.
  84. Swann S. Magnetron sputtering // Physics in technology. 1988. Vol. 19, no. 2. P. 67.
  85. Thin film growth through sputtering technique and its applications // Ed. by E. Alfonso, G. Cubillos, J. Olaya. Open Access Publisher. INTECH, 2012.
  86. Electron-beam technology in microelectronic fabrication // Ed. by G. Brewer. Elsevier, 2012.
  87. Ryabchun S. A., Tretyakov I. V., Finkel M. I. et al. Fabrication and characterisation of NbN HEB mixers with in situ gold contacts. 19th International Symposium on Space Terahertz Technology. 2008. — April.
  88. Balanis C. A. Antenna theory: analysis and design, 3rd edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2005. ISBN: 978-0-471-66782-7.
  89. Meissner H. Superconductivity of contacts with interposed barriers // Physical Review. 1960. Vol. 117, no. 3. P. 672.
  90. DeGennes P. G. Boundary effects in superconductors // Reviews of Modern Physics. 1964. Vol. 36, no. 1. P. 225.
  91. В.В.Шмидт. Введение в физику сверхпроводников. Москва: МЦНМО,

2000. ISBN: 5-900916-68-5.
92. Reese M. O. Superconducting hot electron bolometers for terahertz sensing: Ph.D. thesis / Yale University. 2006.
  93. Chockalingam S. P., Chand M., Jesudasan J. et al. Superconducting properties and Hall effect of epitaxial NbN thin films // *Physical Review B*. 2008. Vol. 77, no. 21. P. 214503.
  94. Burke P. J. High frequency electron dynamics in thin film superconductors and applications to fast, sensitive THz detectors.
  95. М.Тинкхам. Введение в сверхпроводимость. Москва: Атомиздат, 1989.
  96. Tong C. Y. E., Trifonov A., Shurakov A. et al. A Microwave-Operated Hot-Electron-Bolometric Power Detector for Terahertz Radiation // *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*. 2015. Vol. 25, no. 3. P. 1–4.
  97. Hajenius M., Baselmans J. J. A., Gao J. R. et al. Low noise NbN superconducting hot electron bolometer mixers at 1.9 and 2.5 THz // *Superconductor Science and Technology*. 2004. Vol. 17, no. 5. P. S224.
  98. Mather J. C. Bolometer noise: nonequilibrium theory // *Applied Optics*. 1982. Vol. 21, no. 6. P. 1125–1129.
  99. Maslennikov S. N. RF heating efficiency of the terahertz superconducting hot-electron bolometer // *arXiv preprint*. 2014. P. arXiv:1404.5276.
  100. Barends R., Hajenius M., Gao J. R., Klapwijk T. M. Current-induced vortex unbinding in bolometer mixers // *Applied Physics Letters*. 2005. Vol. 87, no. 26. P. 263506.
  101. Galeazzi M. Fundamental noise processes in tes devices // *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*. 2011. Vol. 21, no. 3. P. 267–271.
  102. Richards P. Bolometers for infrared and millimeter waves // *Journal of Applied Physics*. 1994. Vol. 76, no. 1. P. 1–24.
  103. Yoon J., Clarke J., Gildemeister J. M. et al. AC voltage-biased superconducting bolometer for a frequency-domain SQUID multiplexer // *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*. 2001. Vol. 11, no. 1. P. 562–565.

104. С.Н.Масленников. Смесители на эффекте электронного разогрева для терагерцового и инфракрасного диапазонов: Кандидатская диссертация / Московский педагогический государственный университет. 2007.
105. Kardakova A., Finkel M., Morozov D. et al. The electron-phonon relaxation time in thin superconducting titanium nitride films // Applied Physics Letters. 2013. Vol. 103, no. 25. P. 252602.
106. Sobolewski R., Goltsman G. N., Semenov A. D. et al. Superconducting single photon detector // Patent US 6812464. 2004.
107. С.В.Селиверстов, И.В.Третьяков, Г.Н.Гольцман и др. Матрица сверхпроводящих детекторов субмиллиметрового и дальнего инфракрасного излучения // Патент №2515416. 2014.
108. Poglitsch A., Waelkens C., Geis N. et al. The photodetector array camera and spectrometer (PACS) on the Herschel space observatory // Astronomy and astrophysics. 2010. Vol. 518. P. L2.