

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Меренков Алексей Владимирович

Сверхпроводящий *RF TES* детектор на основе пленки гафния при температурах 50-500 мК

Специальность 1.3.8. – физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Шитов Сергей Витальевич

Москва – 2023

Общая характеристика работы

Современное общество проявляет растущий интерес к истории и эволюции Вселенной. Подавляющая часть фотонов, испущенных с момента Большого Взрыва, находится в суб-миллиметровом и миллиметровом диапазонах [1]. Данное явление носит название реликтового излучения (*CMB – Cosmic Microwave Background*), которое было предсказано в 1948 году Гамовым [2, 3], Альфером и Германом [4]. Однако наработки ученых не вызывали серьезного интереса у коллег, поэтому их предсказание было вновь открыто в начале 1960-х годов независимо Зельдовичем и Дикке [5, 6]. Экспериментально излучение было совершенно случайно открыто в 1964 году Пензиасом и Уилсоном [7], которые проводили исследования для спутниковой связи по заказу лаборатории Белла. Они обнаружили избыточный шум, который не мог быть связан ни с одним известным источником. Дикке, Пиблс и Уилкинсон связали экспериментальные данные с предсказанным ранее излучением [6]. В 60-ых годах в ряде теоретических работ было предсказано, что температура реликтового излучения в зависимости от направления не является изотропной [8-12]. Попытки же экспериментального измерения его анизотропии долгое время оставались безуспешными. В начале 70-ых годов в США и СССР появились идеи об исследовании реликтового излучения с помощью космического телескопа, оказавшиеся в итоге чрезвычайно плодотворными. В 1983 году стартовал эксперимент под названием РЕЛИКТ-1, на основании которого советские ученые предоставили доказательства о наличии анизотропии излучения [13]. Однако, радиометр был одночастотным, а отношение сигнал/шум составляло порядка трех, что вызвало некоторое недоверие со стороны международного научного сообщества. Позднее наличие анизотропии реликтового излучения было достоверно подтверждено их американскими коллегами на основании экспериментов, проведенных на космическом спутнике *COBE* (*Cosmic Background Explorer*) с использованием шести дифференциальных радиометров *DMR* (*Differential Microwave Radiometers*), функционирующих на трех различных частотах [14]. Многочастотность эксперимента позволила группе *COBE* отделить анизотропию реликтового излучения от анизотропии радиоизлучения. Кроме того, ими с рекордной точностью был снят спектр реликтового излучения, имеющий почти идеальный спектр черного тела с температурой $2,725 \pm 0,002$ К и максимальной яркостью на частоте примерно 150 ГГц [15]. Результатам, полученным с помощью *COBE*, не хватило точности для определения космологических параметров, однако, факт обнаружения флуктуаций температуры реликтового излучения указало путь дальнейшим исследованиям. Была проведена серия новых, более точных измерений с использованием радиометров,

установленных на баллонах, и наземных радиоинтерферометров [16-22]. В ходе эксперимента на радиоинтерферометре *DASI* была детектирована поляризация реликтового излучения, так называемая, *E*-мода [23], являющейся одной из компонент поляризации реликтового излучения. Вторая мода носит название *B*-моды. Предполагается, что существует две ее разновидности: первая, излученная вследствие расширения Вселенной непосредственно после Большого взрыва, и вторая, претерпевшая преломление в гравитационных линзах. Данные о второй разновидности *B*-моды были получены на телескопе антарктической станции на Южном полюсе при помощи спутника *Herschel* [24]. С целью обнаружения первой разновидности *B*-моды планируются как космические миссии *LiteBIRD* [25, 26] японского космического агентства, так и наземные эксперименты *QUBIC* [27, 28], *Simons Observatory* [29, 30].

Актуальность работы. Ключевым элементом экспериментального исследования реликтового излучения является детектор, способный отделить полезный с точки зрения исследователя сигнал от остальных, являющихся шумом. В набор детекторов практически любой космической миссии включены широкополосные детекторы, используемые в качестве спектрометров низкого частотного разрешения. Полоса спектрального анализа таких детекторов определяется, как правило, перестраиваемыми фильтрами, определяющими полосу входного сигнала. Такие детекторы измеряют только амплитуду принимаемого сигнала и делятся на два класса: прямые и болометрические детекторы. Первый тип детекторов основан на чувствительности материала к взаимодействию его носителей заряда с фотонами. Самыми простыми примерами таких детекторов являются фоторезисторы. Болометрические же детекторы, основанные на разогреве потоком фотонов абсорбера, изменение температуры которого измеряется термометром. Преимуществом некогерентных детекторов является способность обнаруживать самые слабые сигналы. Таким образом, развитие некогерентных детекторов, в частности, монолитных болометров с высоким быстродействием и чувствительностью является важной задачей в области развития субмиллиметровых сенсоров.

Целью диссертационной работы является разработка, исследование и анализ работы детектора терагерцового диапазона частот на основе активной высокочастотной компоненты нелинейного импеданса сверхпроводящего пленочного мостика с эффектом электронного газа с высокочастотным считыванием вблизи его критической температуры при сверхнизких температурах ниже 1 К. Перед автором исследования были поставлены следующие задачи:

1. Теоретическое обоснование возможности наблюдения сверхпроводящего перехода пленки сверхпроводника под действием высокочастотного тока; поиск материала для микромостика, теоретические и экспериментальные оценки его параметров.
2. Разработки и оптимизация электродинамической модели и практической топологии *RF TES* детектора со считывающий резонатором в области частот нелинейного импеданса выбранного материала; оптимизация согласования микромостика с планарной линзовой антенной в диапазоне частот сигнала (550-750 ГГц).
3. Разработка экспериментальной установки и исследование свойств *RF TES* детектора под воздействием высокочастотной зондирующей (инвазивной) мощности на частоте резонатора считывания; оценка теплопроводности мостика и сравнение с моделью горячего электронного газа.
4. Разработка и исследование источника термодинамического шума для получения оптического отклика детектора; разработка метода определения чувствительности *RF TES* детектора при использовании такого источника.
5. Сравнение экспериментальных данных и теоретических предсказаний по оптической чувствительности *RF TES* детектора, исходя из его физических параметров и применимости модели горячего электронного газа.
6. Экспериментальное измерение быстродействия *RF TES* детектора.

Научная новизна

1. Впервые предложен способ измерения теплопроводности мостика с нелинейным температурно-зависимым импедансом методом постоянной добротности резонатора.
2. Впервые проведен теоретический анализ условий устойчивости сверхпроводящего перехода пленки $R(T)$ под действием СВЧ тока.
3. Впервые предложен и обоснован метод анализа вносимых потерь в высокодобротный резонатор методом парциальных нагрузок; метод позволяет получать заданную добротность при произвольных сопротивлениях мостика.
4. Впервые предложен метод измерения быстродействия болометрического детектора с резонатором путем воздействия на него модулированного сигнала на частоте вне полосы считывания, например, вблизи второй гармоники резонатора.

Практическая значимость

1. Использование метода постоянной добротности резонатора позволяет определить теплопроводность термочувствительного элемента без использования интегрированного термометра, что актуально для широкого круга теплофизических задач за пределами данного исследования.
2. Использование разных режимов электротермической обратной связи позволяет оптимизировать динамический диапазон детектора, меняя мощность насыщения; режим с устойчивой положительной связью и высоким коэффициентом преобразования оптимален для приема слабых сигналов с длительным временем накопления; режим с отрицательной связью обеспечивает более высокую мощность насыщения с улучшенным быстродействием.
3. Демонстрация *RF TES* детектора с полосой входного сигнала 550-750 ГГц, чувствительностью $3 \cdot 10^{-17}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ и быстродействием ~ 3 мкс при температуре 400 мК открывает перспективы пользования такого детектора в комбинации с криостатом сорбционного типа в невесомости на борту космических аппаратов, что означает новые возможности для фундаментальных радиоастрономических исследований.

Методы исследования, используемые в работе:

1. Методы электродинамического моделирования с использованием *NI AWR Design Environment*, расчеты в пакете *MathCAD* и среде разработки *Jupiter Notebook* на основе языка программирования *Python*.
2. Технологические методы изготовления тонкопленочных планарных структур, которые включают в себя: установку магнетронного распыления для напыления тонких металлических пленок, безмасочный литограф *Heidelberg μ PG 501* с источником *LED* излучения (длина волны 390 нм), установку плазмохимического травления *SI 591 Compact* фирмы *Sentech Instruments*, а также профилометр *KLA – Tencor P – 7* и оптические микроскопы фирмы *Leica* для аттестации изготовленных структур.
3. Измерительные методы на основе криостата растворения замкнутого цикла *Triton DR – 200* фирмы *Oxford Instruments*, источника постоянного и переменного токов модели 6221 и нано-вольтметра модели 2181 фирмы *Keithley*, векторного анализатора цепей N5242B серии *PNA – X* фирмы *Keysight Technologies*, анализатора спектра *N9010A* фирмы *Keysight Technologies*, синхронного усилителя *SR830* фирмы

Stanford Research Systems, аналоговых генераторов сигналов *E8257D PSG* фирмы *Keysight Technologies* и *APSIN26G* фирмы *AnaPico*, а также ВЧ цепей с охлаждаемыми и комнатными усилителями, аттенюаторами, смесителями, делителями мощности различных производителей и цепей постоянного тока с фильтрами низких частот.

4. Методы автоматического сбора и обработки экспериментальных результатов, включая пакет программ *Origin*, систему сбора данных *IRTECON*, а также программы для автоматизации процессов измерений на основе языка программирования *Python* в среде разработки *Jupyter Notebook*.

Положения, выносимые на защиту:

1. Впервые предложена концепция *RFTES* детектора с СВЧ считыванием импеданса электронного газа.
2. Впервые разработана практическая конструкция *RFTES* детектора терагерцового диапазона 550-750 ГГц с частотой считывания 1.5 ГГц.
3. Впервые измерена оптическая чувствительность *RFTES* детектора с электронным газом с применением чернотельного источника.
4. Впервые измерено быстродействие *RFTES* детектора с электронным газом.

Личный вклад. Автором была спроектирована топология терагерцовой антенны, нагруженной мостиком с сопротивлением порядка десятков Ом, с частотно-заграждающими фильтрами, а также построена электродинамическая модель *RFTES* детектора с резонансной частотой 1.5 ГГц. Автор лично провел численный расчет сверхпроводящих переходов пленок гафния на СВЧ на основании теории Маттиса-Бардина. Автором проведены исследования резонаторов под воздействием СВЧ сигнала в широком температурном диапазоне, а также эксперименты по измерению чувствительности и быстродействия детектора. Автоматизация экспериментов на языке программирования *Python* была проведена автором лично. Также автор был задействован в наладке экспериментального оборудования и активно участвовал в подготовке публикаций.

Вклад соавторов. Основные положения и результаты по теме диссертации были опубликованы в соавторстве с научным руководителем С. В. Шитовым, проводившим общее руководство, постановку целей и задач исследования. Электродинамическая модель *RFTES* детектора была разработана совместно с руководителем. Экспериментальные образцы, печатные платы и источник термодинамического излучения в виде резистивной

пленки на сапфировой подложке были изготовлены В. И. Чичковым и Т. М. Ким. Отладка экспериментальных установок проходила с непосредственным участием С. В. Калинкина и Л. С. Соломатова. Первые экспериментальные результаты данной работы были получены с использованием программы автоматического управления экспериментом *IRTECON*, разработанной А. Б. Ермаковым.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 статьях, индексируемых в *Scopus* и *Web of Science*, и 3 работах, опубликованных в сборниках трудов международных конференций.

Апробация результатов. Основные результаты исследования были представлены на семи международных конференциях:

1. Merenkov A. V., Chichkov V. I., Ermakov A. B., Ustinov A. V., Shitov S. V. Superconducting RFTES Detector at Milli-Kelvin Temperatures, 16th International Superconductive Electronic Conference, Italy, 2017.
2. Меренков А. В., Шитов С. В., Чичков В. И., Ермаков А. Б., Ким Т. М., Устинов А. В. Сверхпроводящий RFTES детектор на основе пленки гафния при температурах 50-300 миллиКельвин, «Пятая Микроволновая неделя», ИРЭ РАН, Москва, 2017.
3. Merenkov A. V., Chichkov V. I., Ustinov A. V., Shitov S. V. Analysis of microwave-readable RFTES bolometer. 13th Workshop on Low Temperature Electronics, Italy, 2018.
4. Merenkov A. V., Chichkov V. I., Ermakov A. E., Ustinov A. V., Shitov S. V. Hafnium MEGA Array Detector. 14th European Conference on Applied Superconductivity, Glasgow, Scotland, 2019.
5. Меренков А. В., Ким Т. М., Чичков В. И., Калинкин С. В., Шитов С. В. Оптические измерения MEGA болометра диапазона 600–700 ГГц при температуре 400mK XXVI Международный симпозиум «Наноп физика и нанoeлектроника», Нижний Новгород, 2022.
6. Меренков А. В., Шитов С. В., Ким Т. М., Чичков В. И., Устинов А. В. Исследование MEGA болометра диапазона 600–700 ГГц с чернотельным излучателем, XXVI Международный симпозиум «Наноп физика и нанoeлектроника», Нижний Новгород, 2022.
7. Меренков АВ., Ким Т. М., Ермаков А.Б., Соломатов Л.С., Чичков В.И., Шитов С.В. Измерение параметров сверхпроводящего болометра с СВЧ-считыванием XXVII Международный симпозиум «Наноп физика и нанoeлектроника», Нижний Новгород, 2023.

8. Shitov S. V., Kuzmin A. A., Merker M., Chichkov V. I., Merenkov A. V., Ermakov A. B., Ustinov A. V., Siegel M. Progress in development of the superconducting bolometer with microwave bias and readout, Applied Superconductivity Conference, Colorado, USA, 2016.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 103 страницах, состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 100 наименований. Работа проиллюстрирована 43 рисунками и 3 таблицами.

Содержание работы

Во введении работы проведена общая характеристика диссертации: обосновывается актуальность исследования, описываются научная новизна и методы исследования.

Первая глава содержит литературный обзор детекторов на основе сверхпроводников. Кратко освещена история открытия сверхпроводимости, разобраны различные явления в сверхпроводниках, имеющие отношение к работе сверхпроводящих детекторов: модель электронного газа в сверхпроводящих пленках и поверхностный импеданс. В главе также рассмотрены существующие сверхпроводящие детекторы, такие как болометр на краю сверхпроводящего перехода (*TES* [31] и его неравновесная вариация *HEB* [32]) и детектор на кинетической индуктивности (*MKID*) [33]. Обсуждаются ключевые особенности функционирования детекторов.

Во второй главе обсуждаются концепция сверхпроводящего болометра на краю сверхпроводящего перехода с высокочастотным считыванием *RF TES* (*Radio Frequency Transition Edge Sensor*), принципы его работы.

В первом разделе главы приводятся проблемы, которые не удастся обойти при разработке *RF TES* детектора:

1. Импеданс *TES/HEDD* составляет единицы Ом, поэтому такой довольно высокоомный нелинейный резистор не может быть включен в резонатор с высокой добротностью, как это реализовано в случае *MKID* детектора.
2. Энергия сверхпроводящей щели вблизи сверхпроводящего перехода стремится к нулю, поэтому нелинейный отклик мостика на микроволновое воздействие может попросту исчезнуть, что означает отсутствие отклика резонатора.
3. Если нелинейный СВЧ отклик возможен, то возможна ли работа такого детектора в режиме с чисто резистивной нелинейностью, аналогичной в детекторе на краю сверхпроводящего перехода, *TES*, работающим на постоянном токе?

Второй раздел главы посвящен методу включения высокоомной нагрузки в высокодобротный резонатор. Режим высокой добротности обычно реализуется при малых сопротивлениях цепи, под которой подразумевается *последовательное* включение индуктора и сопротивления потерь. Так, например, добротность $Q \approx 10^4$ может быть достигнута для $R_{ВЛ} = 0,001$ Ом (см. рис. 1 слева).

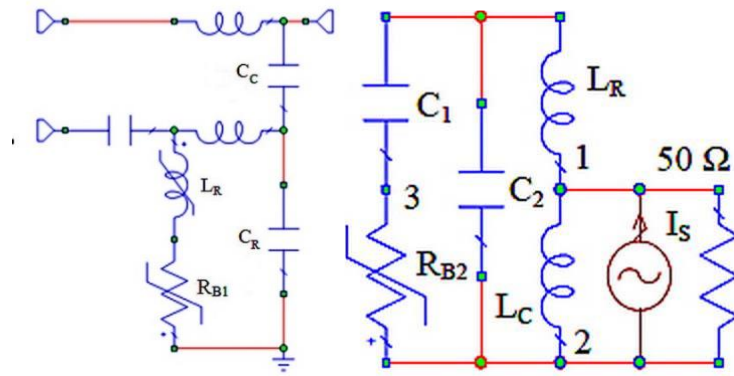


Рис. 1. Слева - эквивалентная схема четвертьволнового высокодобротного резонатора; L_R и C_R – индуктивность и емкость резонатора соответственно, C_C – емкость связи. Справа - схема частичного включения высокоомной нагрузки в четвертьволновой резонатор. L_C - индуктивность связи.

Однако, высокодобротный контур может быть реализован и в случае высокоомной нагрузки путем частичного включения, эквивалентная схема которого представлена на рис. 1 справа.

Ток через резонатор в данном случае распределяется между двумя ветвями в пропорции

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \approx \frac{C_2}{C_R} \quad (1).$$

Условие равной добротности можно записать:

$$R_{B2} \approx R_{B1} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^2 \quad (2),$$

а добротность находится из:

$$Q = \frac{1}{R_{B2}} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{L_R}{C_1}} \quad (3).$$

В третьем разделе главы обсуждаются критерии выбора материала для чувствительного материала детектора. С одной стороны, для улучшения NEP необходим материал с меньшей критической температурой. С другой стороны, уменьшение целевой

энергии ограничивает частоту считывания, так как приводит к ухудшению крутизны температурного отклика dR/dT . Анализ сверхпроводящих материалов привел к широко используемым в сверхпроводящей электронике титану (Ti) и гафнию (Hf) [34]. В итоге, в качестве материала для чувствительного элемента был выбран гафний. Были исследованы тонкие пленки гафния различной толщины; их критические температуры лежали в диапазоне 0.32-0.45 К. Пример представлен на рис 2.

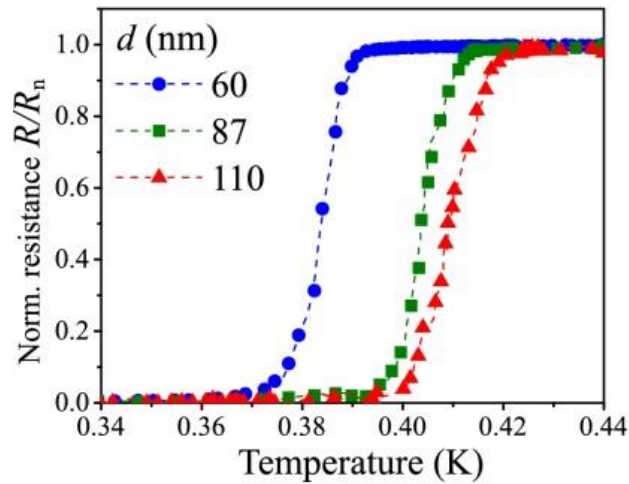


Рис. 2. Нормированные зависимости сопротивления пленок гафния различной толщины от температуры.

В четвертом разделе главы произведена оценка некоторых свойств гафния с использованием экспериментальных данных из третьего раздела. По теории Маттиса-Бардина [35] была получена зависимость активного импеданса от температуры, представленная на рис. 3.

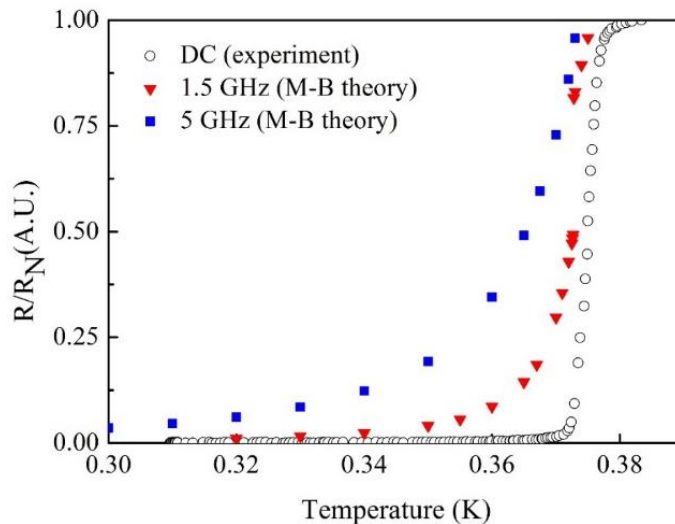


Рис. 3. Рассчитанная зависимость активной части импеданса от температуры для частот 1.5 и 5 ГГц.

Данный расчет производился в локальном случае в пределе тонкой пленки, в случае которого поверхностный импеданс выражается:

$$\frac{Z}{R_N} = \frac{R}{R_N} + i \frac{X}{R_N} = \frac{\sigma_1 \sigma_n}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} + i \frac{\sigma_2 \sigma_n}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (4),$$

где R_N – сопротивление пленки в нормальном состоянии,

Z , R и X – импеданс, а также активная и реактивная части импеданса ниже критической температуры сверхпроводящего перехода пленки.

Отношения $\frac{\sigma_1}{\sigma_n}$ и $\frac{\sigma_2}{\sigma_n}$ выражаются [35]:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_1}{\sigma_n} = & \frac{2}{\hbar\omega} \int_{\Delta(T)}^{\infty} (f(u) - f(u + \hbar\omega)) g(u) du + \\ & + \frac{1}{\hbar\omega} \int_{\Delta(T) - \hbar\omega}^{-\Delta(T)} (1 - 2f(u + \hbar\omega)) g(u) du \end{aligned} \quad (5),$$

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_n} = \frac{1}{\hbar\omega} \int_{\Delta(T) - \hbar\omega, -\Delta(T)}^{\Delta(T)} \frac{(1 - 2f(u + \hbar\omega))(u^2 + \Delta(T)^2 + \hbar\omega u) du}{\sqrt{\Delta(T)^2 - u^2} \cdot \sqrt{((u + \hbar\omega)^2 - \Delta(T)^2)}} \quad (6),$$

где $f(u)$ – распределение Ферми-Дирака,

$$g(u) = \frac{u^2 + \Delta(T)^2 + \hbar\omega u}{\sqrt{u^2 - \Delta(T)^2} \cdot \sqrt{(u + \hbar\omega)^2 - \Delta(T)^2}}.$$

В первом уравнении второй член суммы появляется только в случае $\hbar\omega > 2\Delta(T)$. При этом же условии во втором интеграле нижнем пределом является $-\Delta(T)$ вместо $\Delta(T) - \hbar\omega$.

Оценив температурную крутизну кривой $\frac{dR}{dT}$ на частоте 1,5 ГГц как достаточную, выбрали указанную частоту в качестве резонансной *RF TES* детектора.

Пятый раздел главы кратко описанию методики изготовления экспериментальных чипов, представленных на рис. 4. Ниобиевые и гафниевые пленки напылялись на кремниевую подложку 500 мкм с использованием магнетронного распыления на постоянном токе. Чипы изготавливались с использованием лазерного литографа с практическим разрешением 2 мкм и стандартного *lift-off* процесса.

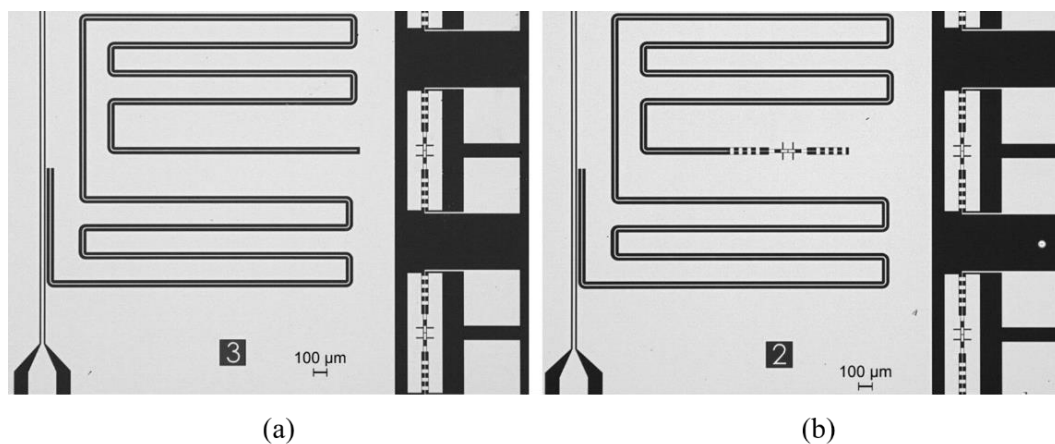


Рис. 4. Фотография экспериментальных чипов с резонаторами, рассчитанными на частоту 1,5 ГГц: (а) свернутый резонатор без неоднородности; (б) полностью структурированный образец.

На рис. 5 представлена фотография микромостика из гафния, интегрированного одновременно в двухщелевую антенну и копланарную линию.

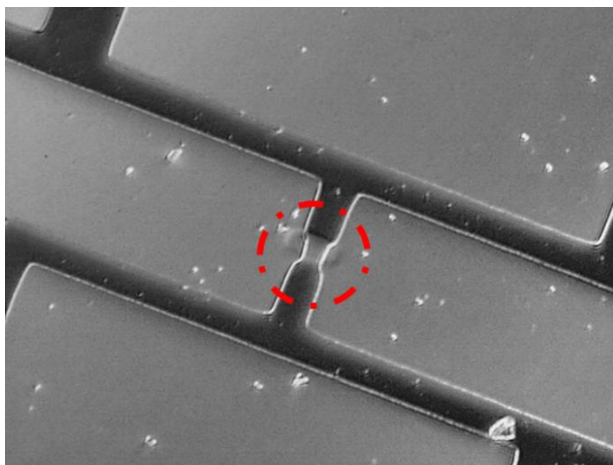


Рис. 5. Гафниевый мостик (выделен красным) размером $2.5 \text{ мкм} \times 2.5 \text{ мкм}$.

В третьей главе рассматривается электромагнитное моделирование болометра, в том числе с использованием программы *NI AWR Microwave Office*.

В первом разделе обсуждается выбор планарной антенны для приема терагерцового сигнала и предварительному расчету ее импеданса. В соответствии с требованиями подходящим кандидатом оказалась двухщелевая антенна. Антенна характеризуется линейной поляризацией, симметричной диаграммой направленности (при определенных параметрах) и, в сочетании с иммерсионной линзой, позволяет получать

высокоэффективные оптические характеристики. Расчеты проводились на основании публикаций [36-38]. Импеданс антенны в районе резонансной частоты составил 30 Ом.

Второй раздел посвящен описанию конструирования антенны с согласующим трансформатором и частотно-заграждающими фильтрами, предотвращающие утечки терагерцового сигнала. Импеданс мостика был принят равным сопротивлению мостика в нормальном состоянии R_N , характерное значение которого лежит в интервале 20-50 Ом. Основываясь на указанных данных, был подобран трансформатор с параметрами линии $w_{trans} = 18$ мкм, $l_{trans} = 38$ мкм и $s_{trans} = 4$ мкм, а также набор чередующихся четвертьволновых отрезков с низким и высоким импедансом. Разработанная электромагнитная структура антенны представлена на рис. 6.

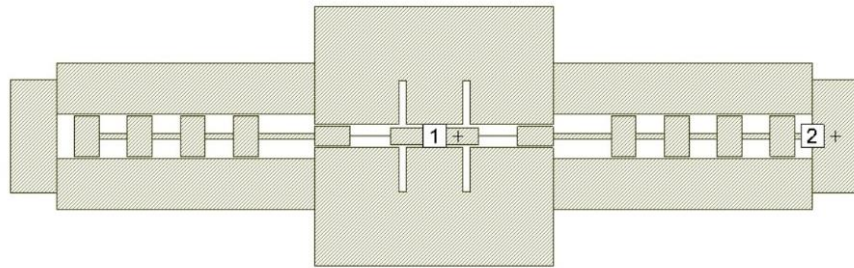


Рис. 6. Электромагнитная структура принимающей антенны с частотно-заграждающими фильтрами. Порт 1 – порт, на месте которого располагается мостик из гафния порт присоединения антенны к резонатору, порт 2 – порт присоединения антенны к резонатору.

С помощью данной электромагнитной структуры были проведены оценки согласования антенны и мостика: для значений в интервале 10-50 Ом коэффициент передачи сигнала от антенны к мостику превышает 80%. Также проведен анализ качества спроектированных фильтров. Коэффициент передачи частотно-заграждающих фильтров в диапазоне частот не превышает -30 дБ. Полоса приема антенны оценена сверху и лежит в диапазоне частот 550-750 ГГц.

В третьем разделе приведены результаты расчета резонансного контура, который настраивался на частоту 1.5 ГГц, предложенную по результатам исследований, описанных в главе 2. Система считывания вариаций импеданса мостика имеет общие черты с системой детектора на кинетической индуктивности. Однако, имеются существенные отличия. Чувствительным элементом MKID является некоторая часть резонатора, импеданс которой крайне мал. Расчет, сделанный в главе 2, дает оценку импеданса MKID порядка милли-Ом. Приемная антенна MKID интегрируется именно вблизи закороченной части резонатора.

Открытый конец резонатора обеспечивает слабую емкостную связь со считывающей линией. В случае RFTES детектора чувствительным элементом является микромостик с сопротивлением порядка единиц или десятком Ом. В главе 2 было показано, что для достижения высокой добротности должно выполняться соотношение $C_1/C_2 \gg 1$. Это означает, что мостик RFTES с антенной должен быть интегрирован в резонатор там, где импеданс в точке разрыва имеет значение близкое к сопротивлению рабочей точки мостика ~ 1 Ом. Для поиска точки включения была использована программа AWR. Значения импеданса включения для разных значений емкости C_2 в зависимости от числа секций частотно-заграждающих фильтров приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Активный импеданс в точке включения мостика на частоте резонанса f_0 в зависимости от числа элементов частотно-заграждающего фильтра терагерцовых частот антенны, $N_{section}$.

$N_{section}$	0	1	2	3	4
R , Ом	48.4	15.9	10.4	6.5	1.5
C_2 , пФ	0.03	0.048	0.063	0.079	0.092

Была выбрана точка включения, равная 1.5 Ом, что означает использование фильтра с 4-мя секциями. Таким образом, мы сталкиваемся с необходимостью интегрировать мостик вблизи открытого конца резонатора, а связь используемого четвертьволнового резонатора со считывающей линией должна быть не электрической (емкостной), а магнитной (индуктивной). Возбуждение резонатора магнитным полем обеспечивалось с помощью элемента связи на основе индуктивно-связанных копланарных линий, как показано на рис. 7.

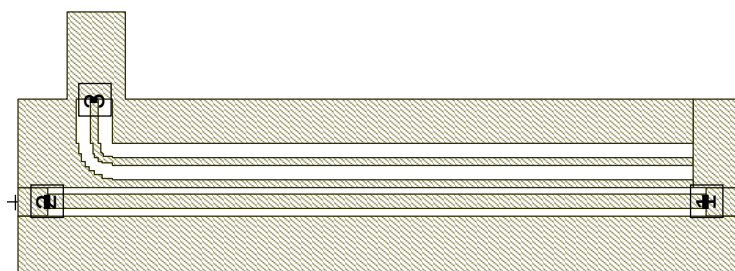


Рис. 7. Топология области магнитной (индуктивной) связи проходной линии возбуждения (порты 1 и 2) с резонатором (порт 3) в среде электромагнитного моделирования AWR.

В данной конструкции используется элемент связи шириной 2 мкм и длиной 820 мкм.

Итогом конструирования стала топология детектора (см. рис. 8), на основе которой с помощью технологических процессов, описанных в четвертом разделе главы 2, был изготовлен чип, изображенный на рис. 4.

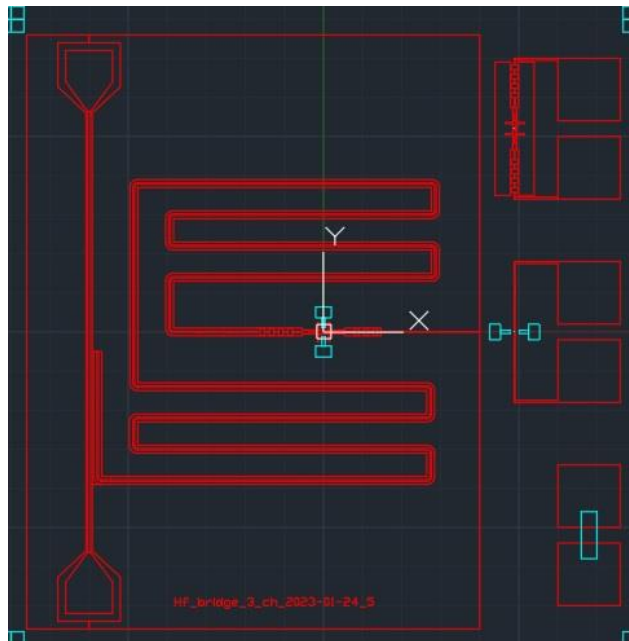


Рис. 8. Топология чипа, выполненная в среде AutoCAD.

Четвертая Глава содержит описание деталей экспериментальных установок, используемых в данном исследовании, и их характеристик.

В первом разделе приводится описание криостата растворения замкнутого цикла *Triton DR-200* компании *Oxford Instruments*.

Во втором разделе описывается общая схема экспериментальной установки для проведения экспериментов, представленная на рис. 9. Исследуемый чип монтируется в держатель 1 с линзой 2, который устанавливается на ступень растворения криостата с регулируемой температурой. Источник термодинамического шума 4 с резистивной пленкой 5, устанавливается на *Still plate* криостата, имеющей температуру 1 К. Его нагрев обеспечивается источником тока 15. Нагрев термодинамического источника фиксируется полупроводниковым термометром 6 с помощью термоконтроллера 16.

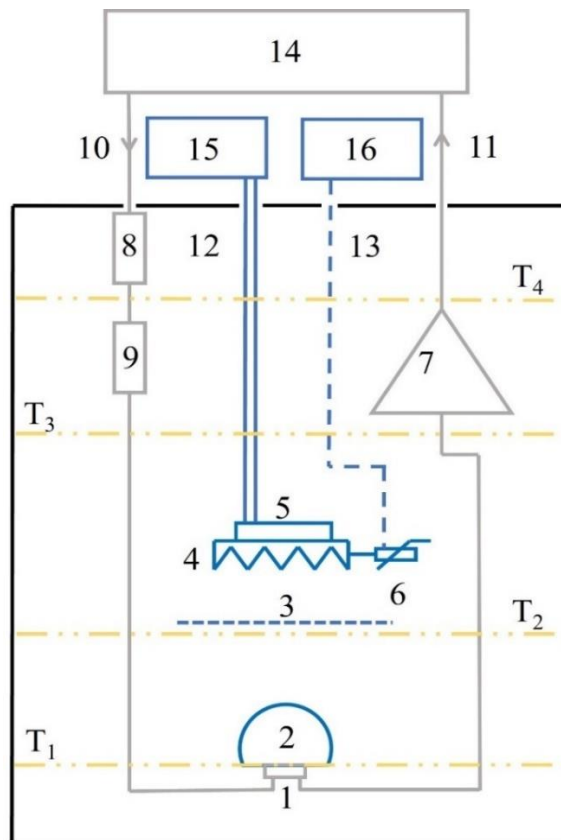


Рис. 9. Криостат и его температурные ступени изображены схематично. 3 – ИК-фильтр (опция, 7 – малощумящий усилитель с вентилем на входе, 8,9 – холодные аттенюаторы, 10, 11 – входные и выходные СВЧ-линии передачи анализатора цепей, 12 – линия для подогрева термодинамического излучателя, 13 – линия измерения температуры черного тела.

Векторный анализатор цепей 14 регистрировал коэффициент пропускания цепи S_{21} , в которую последовательно включен измеряемый чип, установленный в держатель с СВЧ разъемами. Отметим, что в экспериментах могла быть использовала лишь часть описанной установки.

В третьем разделе детально описывается элементы оптического тракта экспериментальной установки: конструкции широкополосного термодинамического излучателя, детекторного блока, включающего в себя печатную плату, иммерсионную линзу с просветляющим покрытием. На рис. 10 приведена фотография излучателя, расположенного на расстоянии 10 мм от детекторного блока с чипом, установленных в криостат.

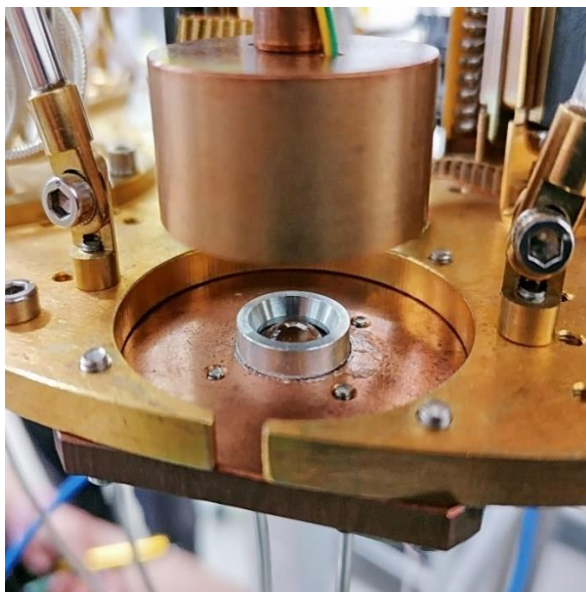


Рис. 10. Интегрированная с держателем чипа иммерсионная линза, установленная в криостат над широкополосным излучателем.

В четвертом разделе изложены результаты времен нагрева и релаксации термодинамического излучателя, описанного в третьем разделе. Как видно из рис. 11, используемый в исследовании излучатель имел постоянные времена нагрева и релаксации ~ 1 с. В экспериментальных исследованиях время ожидания установления температуры составило 60 с. Изменение температуры при нагревании и охлаждении описывались экспоненциальными выражениями.

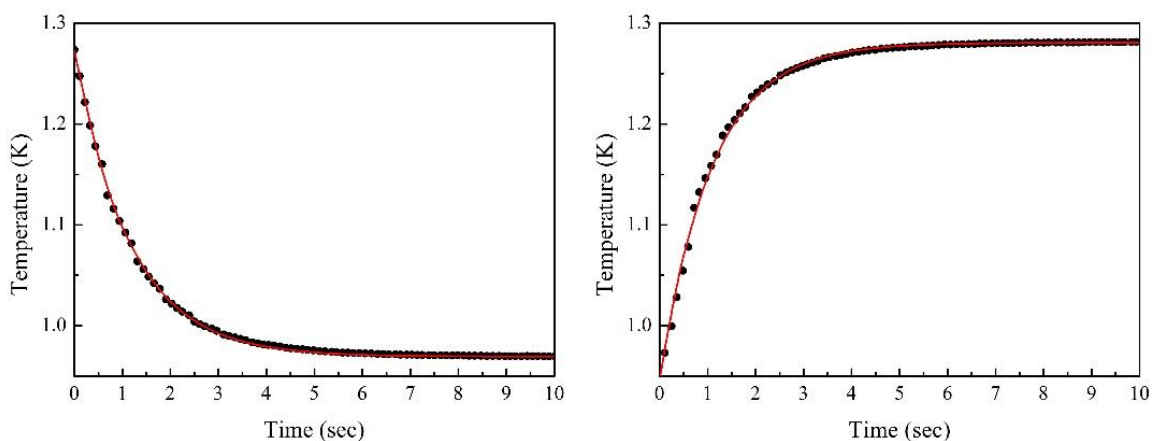


Рис. 11. Экспериментальные данные нагрева и охлаждения источника излучения и их аппроксимации.

В пятом разделе проведена оценка мощности излучения, которое разогревает микромостик из гафния. Поскольку принимающая антенна является линейно

поляризованной, то максимальная принятая мощность не может превышать половину полного излучения, рассчитанного по формуле Планка:

$$P(T) = 0.5 \int_{f_1}^{f_2} A(f) \cdot B(f) \cdot \frac{h \cdot f}{\exp\left(\frac{h \cdot f}{k \cdot T}\right) - 1} df \quad (7),$$

где $A(f)$ – оптическая эффективность антенны, включающая согласование с антенны с микромостиком и отражение на поверхности сапфировой линзы,

$B(f)$ – коэффициент черноты поглотителя (термодинамического излучателя),

T – физическая температура чернотельного поглотителя.

В разделе описываются подходы к оценке параметров A и B . Согласно расчетам, мостик принимает не более 43% излученной мощности чернотельного излучателя. В используемом диапазоне температур планковского спектра ИК фильтр на апертуре излучателя не актуален, так как тепловая нагрузка на детекторный блок мала и лежит в интервале от 0.47 до 47 пВт для диапазона температур излучателя 1-10 К соответственно.

В шестом разделе описана экспериментальная установка по измерению быстродействия *RFTES* детектора (см. рис. 12). Ключевой идеей эксперимента является использование дополнительного модулированного сигнала, меняющего глубину резонанса, с несущей частотой, соответствующей резонансной частоте второй моды резонатора. Мониторинг амплитудных вариаций можно проводить с помощью постоянного сигнала на основной частоте резонатора (1.5 ГГц).

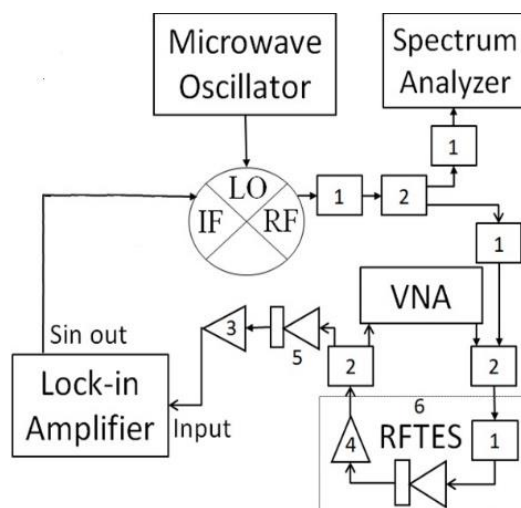


Рис. 12. Схема экспериментальной установки: 1 – развязывающие аттенюаторы 3-6 dB, 2 – сумматоры и делители мощности, 3 – малошумящий усилитель низкой частоты,

4 – охлаждаемый малошумящий усилитель СВЧ, 5 – демодулятор, 6 – криостат растворения *DR-200 Triton*. Рисунок выполнен Л.С. Соломатовым и С.В. Шитовым.

Модулированный сигнал формировался с помощью балансного смесителя. Модулированный сигнал с выхода *RF* через делитель мощности подавался на анализатор сигналов для контроля спектра и мощности, поступающей на детектор. Вторая половина модулированного сигнала ~ 4.2 ГГц суммировалась с фиксированной мощностью смещения на частоте ~ 1.5 ГГц, поступающей от векторного анализатора цепей. Полученный сигнал подавался внутрь криостата на исследуемый детектор по общему коаксиальному кабелю. С выхода детектора сигнал попадал на охлаждаемый усилитель и затем делился поровну между анализатором цепей и демодулятором; амплитуда демодулированного сигнала регистрировалась ФД на удвоенной частоте. Важно, что несущая частота 4.2 ГГц модулированного сигнала не входит в рабочую полосу усилителя.

Пятая Глава посвящена экспериментальным результатам исследования *RFES* детектора на микроволновой зондирующий сигнал частотой 1,5 ГГц, широкополосное термодинамическое излучение, а также измерения быстродействия детектора.

В первой разделе показано, что эталонные резонаторы разной конструкции имеют резонансный провал около номинальной частоты 1,5 ГГц с ошибкой 2-3% (см. рис. 13). Образцы измерялись в криостате Triton-1.5 К при температуре 4 К

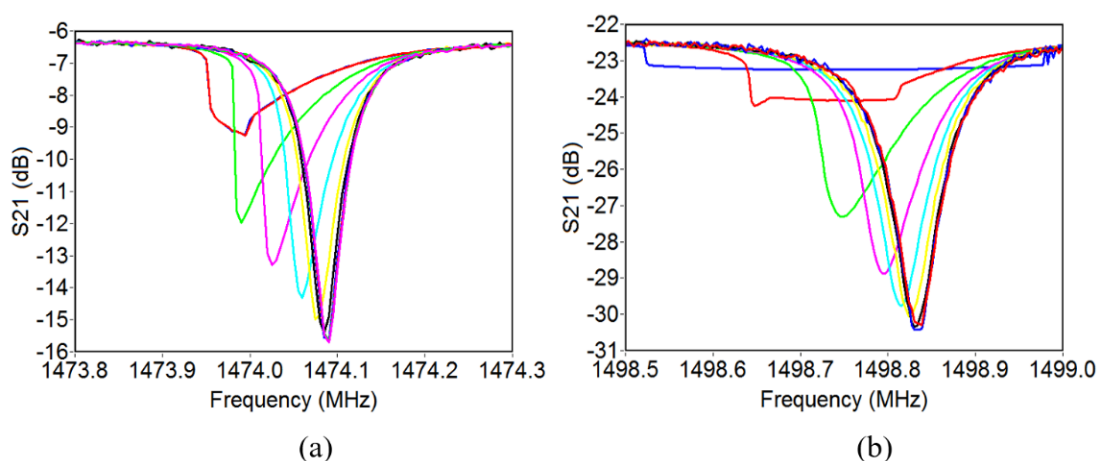


Рис.13. Экспериментальные данные о коэффициенте передачи чипов, где (a) соответствует чипу с рис. 4 (a) и (b) - с рис. 4 (b).

Также был испытан болометр с чувствительным элементом в диапазоне температур 50–300 мК при разных мощностях накачки. Пример влияния вариаций накачки при постоянной температуре криостата представлен на рис. 14.

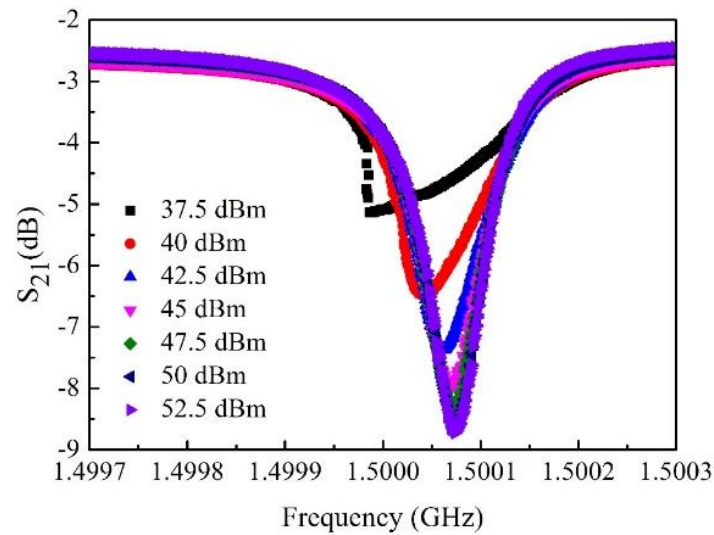


Рис. 14. Резонансные кривые при разных уровнях накачки для детектора с чувствительным элементом.

Видно, что АЧХ данного образца существенно отличается от резонаторов с рис. 13. Наблюдается доминирование не частотного, а резистивного отклика АЧХ на микроволновую накачку.

Также в первом разделе представлены результаты оценки теплопроводности пленки гафния. При разных температурах криостата поддержание постоянной добротности осуществлялась подбором соответствующей мощности накачки. На рис. 15 представлен результат измерений.

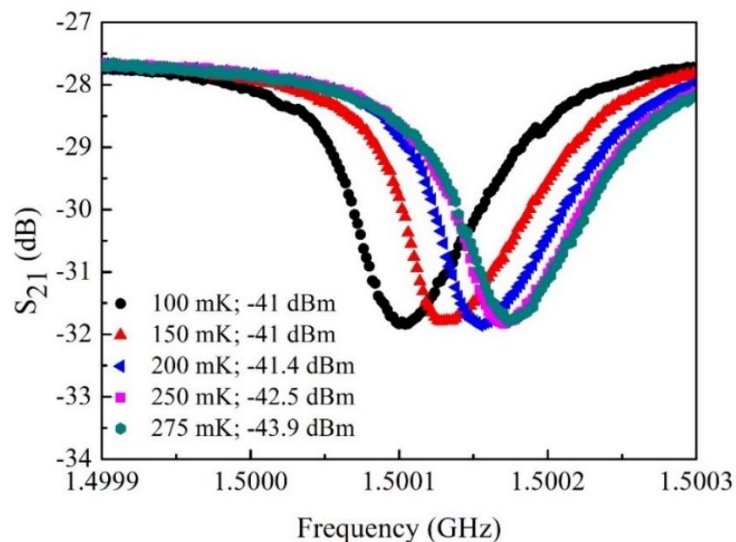


Рис. 15. Экспериментальная реализация режима постоянной добротности при различных уровнях накачки и температуры криостата.

Согласно публикации [34] теплопроводность пленок гафния может быть аппроксимирована как

$$P = \Sigma \cdot V \cdot (T_e^n - T_{ph}^n) \quad (7).$$

Варьируя параметр материала Σ , было найдено наилучшее соответствие экспериментальным точкам как показано на рис. 16 при $n=6$ и $\Sigma = (13.5 \pm 2) \times 10^8$ Вт / (м³К⁶).

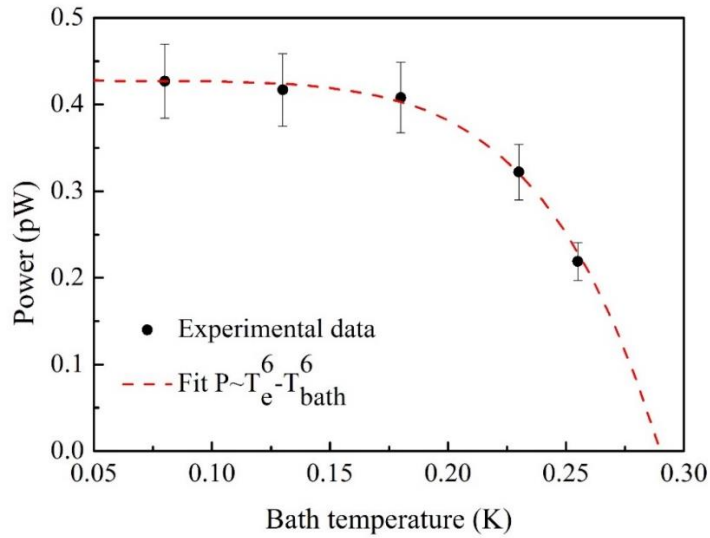


Рис. 16. Экспериментальные данные, полученные из рис. 11, и их аппроксимация выражением (7).

Таким образом, можно оценить теплопроводность мостика из гафния на основании формулы:

$$G = 6 \cdot \Sigma \cdot V \cdot T_e^5 \quad (8).$$

Например, в случае длины и ширины мостика 2.5 мкм × 2.5 мкм при температурах $T_e=300-400$ мК и толщинах мостика 50-80 нм теплопроводность по порядку величины составит $10^{-11}-10^{-12}$ Вт/К.

Во втором разделе обсуждаются результаты измерения чувствительности *RFTES* детектора, проведенные при температурах 380-440 мК и при различных уровнях сигнала накачки. На рис. 17 представлены данные оптического отклика, полученные при температуре 400 мК и мощности накачки на входе чипа $P_{bias} \approx 5$ пВт.

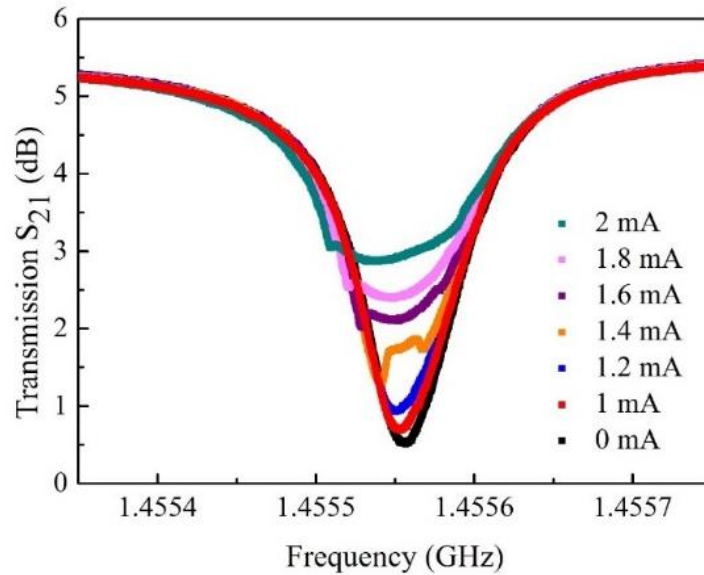


Рис. 17. Иллюстрация оптического отклика в виде скана по частоте S_{21} для нескольких значений тока нагрева термодинамического излучателя.

На рисунке 18 представлен отклик детектора на оптический сигнал в виде отдельных точек в окрестности центральной частоты резонатора.

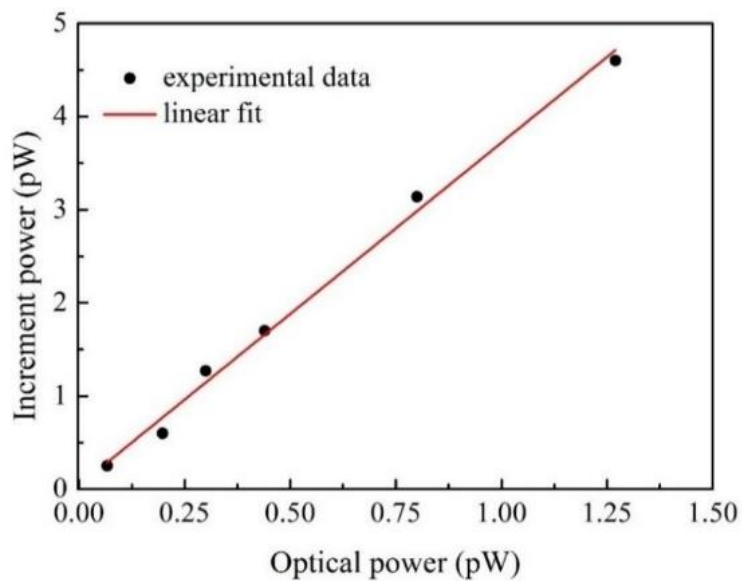


Рис. 18. Зависимость приращения мощности смещения на выходе детектора от рассчитанной мощности от чернотельного излучателя на входе детектора (точки) и ее линейный тренд (красная сплошная линия).

Линейная аппроксимация экспериментальных данных коэффициент преобразования ≈ 3.6 .

Дискретная выборка, измеренная на выходе детектора, преобразовывалась в спектральную плотность флуктуаций с помощью быстрого преобразования Фурье. Результат преобразования представлен на рис. 19.

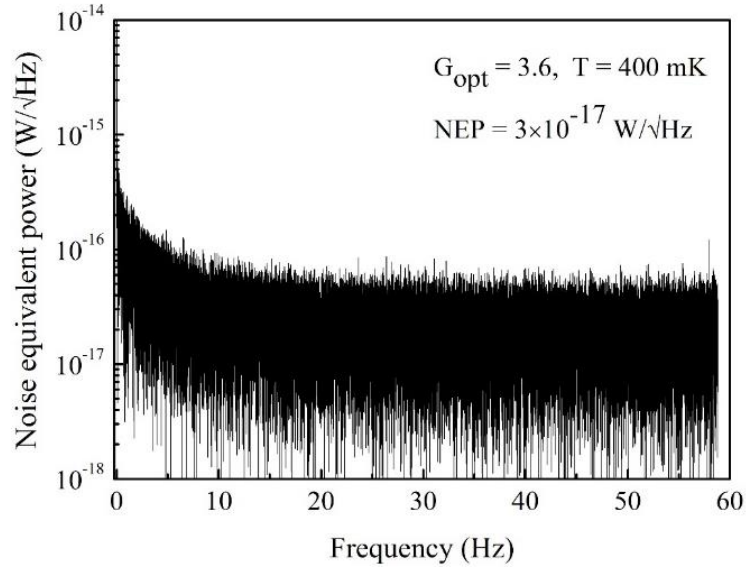


Рис. 19. Спектральная плотность шума, приведенная ко входу детектора.

Согласно рисунку, спектральная плотность собственного шума болометрической приемной системы, включающей буферный полупроводниковый усилитель, имеет плато $(3 \pm 1) \cdot 10^{-17}$ Вт/Гц и границу фликкер-шума ~ 5 Гц.

Теоретическое сравнение измеренной и теоретической NEP было выполнено на основе учета вкладов различных источников шума по формуле:

$$NEP_{tot}^2 = NEP_{ph}^2 + NEP_{amp}^2 + NEP_{Johnson}^2 + NEP_{photon}^2 \quad (9).$$

Усилитель с шумовой температурой $T_{amp} \approx 20$ К дает при $P_{bias} \approx 5 \cdot 10^{-12}$ Вт мощность, эквивалентную шуму

$$NEP_{amp} = \sqrt{\frac{kT_{amp}P_{bias}}{2}} \frac{1}{Gain} \approx 0.6 \cdot 10^{-17} \text{ Вт}/\sqrt{\text{Гц}} \quad (10).$$

Вклад тепловых шумов характеризуется фоновым шумом, который может быть оценен по формуле:

$$NEP_{ph} = 4kT^2 G_{e-ph} \quad (11).$$

При значении $G_{e-ph} \approx 10^{-11}$ Вт/К $NEP_{phonon} \approx 0.9 \cdot 10^{-17}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Фотонным шумом можно пренебречь, так как слабый поток терагерцовых фононов, определяемый температурой *Still plate* (~ 1 К), в полосе антенны дает порядок $\sim 10^{-23}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Поскольку физическая температура мостика много ниже шумовой температуры усилителя, то вкладом шума Джонсона мостика также можно пренебречь. Полученное значение по формуле (9) NEP_{tot} дает теоретический предел чувствительности для экспериментального образца $\sim 1.5 \cdot 10^{-17}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$.

В третьем разделе представлены результаты измерения быстродействия *RF TES* детектора. Измерения быстродействия проводились при фиксированной температуре криостата, равной 400 мК. Фиксированный уровень сигнала, который генерировал векторный анализатор цепей на фиксированной частоте, составлял -44 дБм. Измеренная с помощью разработанной экспериментальной установки (см. рис. 12) зависимость амплитуды демодулированного сигнала от частоты модуляции сигнала на второй гармонике резонатора представлена на рис. 20.

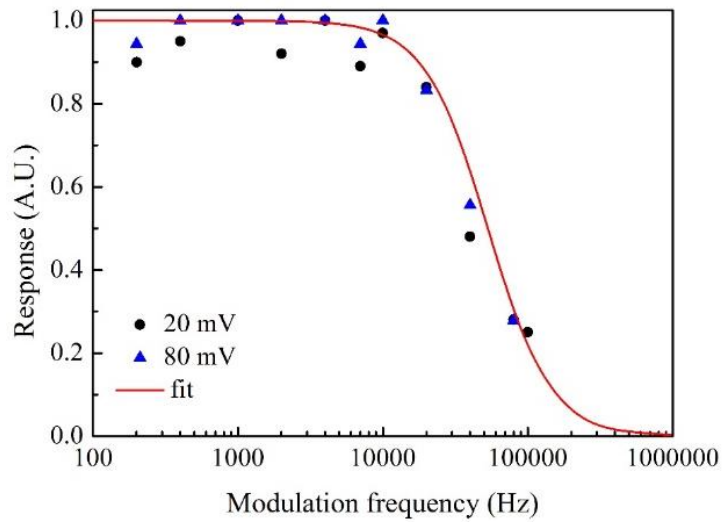


Рис 20. Экспериментальные данные нормированной амплитуды отклика от частоты модуляции (точки) и их аппроксимация с использованием формулы 12.

Частота модуляции варьировалась в диапазоне от 100 Гц до 100 кГц. Как видно из рисунка 42, на частотах модуляции ниже 16 кГц отклик не зависит от частоты модуляции. Вблизи частоты 20 кГц отклик уменьшается вдвое, что позволяет оценить время реакции болометра ~ 3 мкс с использованием формулы:

$$V_{out}(f_m) = \frac{V_{out}(0)}{[1 + (2\pi f_m \tau)^2]^a} \quad (12).$$

Наилучшая аппроксимация экспериментальной кривой получена при $a = 1$; значение ~ 3 мкс близко к времени реакции самого резонатора, определяемая его полосой ~ 50 кГц.

Также было проведено исследование динамического диапазона детектора; его результаты представлены на рис. 21. Измерение производилось при фиксированной частоте модуляции ~ 10 кГц. Была получена почти линейная зависимость амплитуды отклика от напряжения (глубины модуляции): диапазон выходных напряжений фазового детектора составил 4–800 мВ.

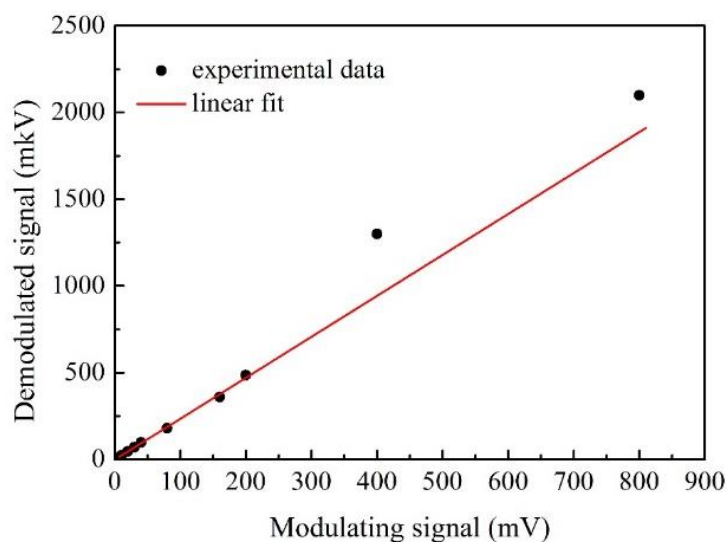


Рис 21. Зависимость амплитуды демодуляции на входе фазового детектора от напряжения модулятора.

Небольшое отклонение на зависимости, вероятно, связано с возникновением паразитных гармоник при воздействии на смеситель сигнала генератора фазового детектора.

В заключении сформулированы основные научные результаты работы:

1. Выбор материала для сенсора *RF TES* детектора связан с реализацией в нем теплообмена, связанного с моделью электронного газа; исследование показало, перспективность использования пленки гафния в диапазоне температур 200-400 мК.
2. Разработка электродинамической модели и топологии детекторов с микроволновым считыванием (с высокодобротными резонаторами) на предварительном (концептуальном) этапе упрощается с использованием метода парциальных включений.

3. Поддержание устойчивого режима термометра в области его сверхпроводящего перехода в случае *RF TES* детектора связано с крутизной характеристики dR/dT , с мощностью накачки и с импедансом точки включения мостика в резонатор; существуют условия стабильности при положительной электротермической связи.
4. Определение теплопроводности микромостика при сверхнизких температурах методом постоянной добротности эквивалентен поддержанию постоянной температуры электронной подсистемы, которая равна температуре криостата в режиме предельно малой накачки.
5. Определение оптической чувствительности *RF TES* детектора при температуре 400 мК проводилось с помощью термодинамического источника на основе резистивной пленки в диапазоне температур 2-10 К; чувствительность детектора составила $3 \cdot 10^{-17}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$, что с точностью до ошибки измерений соответствует предсказанию модели электронного газа.
6. Определение быстродействия *RF TES* детектора характеризует детектор как систему близкую к оптимальной; измеренное быстродействие составило ~ 3 мкс, что лежит вблизи времени релаксации резонатора.

Список публикаций

1. Merenkov A. V., Chichkov V. I., Ermakov A. B., Ustinov A. V., & Shitov S. V. Superconducting RF TES Detector at Milli-Kelvin Temperatures // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2018. – vol. 28. – №. 7. – pp. 1-5.
2. Merenkov A. V., Shitov S. V., Chichkov V. I., Ermakov A. B., Kim T. M., Ustinov A. V. A superconducting resonator with a hafnium microbridge at temperatures of 50–350 mK // *Technical Physics Letters*. – 2018. – vol. 44. – pp. 581-584.
3. Merenkov A. V., Chichkov V. I., Ustinov A. V., Shitov S. V. Analysis of microwave-readable RF TES bolometer // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing – 2019. – vol. 1182. – №. 1. – p. 012009.
4. Меренков А. В., Ким Т. М., Чичков В. И., Калинин С. В., Шитов С. В. Сверхпроводящий болометрический детектор с высокочастотным считыванием при температуре 400 мК // *Физика твердого тела*. – 2022. – Т. 64. – №. 10. – С. 1404.
5. Shitov S. V., Kuzmin A. A., Merker M., Chichkov V. I., Merenkov A. V., Ermakov A. B., Ustinov A. V., Siegel M. Progress in development of the superconducting bolometer with

microwave bias and readout // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2017.
– vol. 27. – №. 4. – pp. 1-5.

Список использованных источников

1. P.H. Siegel Terahertz technology // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50 (3), pp. 910-928, 2002.
2. G. Gamow The Origin of Elements and the Separation of Galaxies // *Physical Review*, vol. 74 (4), pp. 505–506, 1948.
3. G. Gamow The evolution of the universe // *Nature*, vol. 162 (4122), pp. 680–682, 1948.
4. R.A. Alpher, R.C. Herman Evolution of the Universe // *Nature*, vol. 162 (162), pp. 774–775, 1948.
5. Ya.B. Zeldovich The equation of state at ultrahigh densities and its relativistic limitations // *Soviet Phys.—J.E.T.P.*, vol. 14, p. 1143, 1962.
6. R.H. Dicke, P. J. E. Peebles, P.G. Roll, D.T. Wilkinson Cosmic Black-Body Radiation // *The Astrophysical Journal*, vol. 142, p. 414, 1965.
7. A.A. Penzias and R.W. Wilson. A measurement of excess antenna temperature at 4080mc/s // *ApJ*, 142, pp., 419–421, 1965.
8. R.K. Sachs, A.M. Wolfe Perturbations of a Cosmological Model and Angular Variations of the Microwave Background // *The Astrophysical Journal*, vol. 147, p. 73, 1967.
9. J. Silk Cosmic Black-body radiation and galaxy formation // *The Astrophysical Journal*, vol. 151, p. 459, 1967.
10. E.R. Harrison Fluctuations at the threshold of classical cosmology // *Physical Review D*, vol. 1, p. 2726, 1970.
11. P.J.E. Peebles, J.T. Yu Primeval Adiabatic Perturbation in an Expanding Universe // *The Astrophysical Journal*, vol. 162, pp. 815–836, 1970.
12. Ya.B. Zeldovich A hypothesis, unifying the structure and the entropy of the Universe // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 160, p. 1P, 1972.
13. I.A. Strukov, A.A. Brukhanov, D.P. Skulachev and M.V. Sazhin The Relikt-1 experiment — new results // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 258, pp. 37—40, 1992.
14. E.M. Wright, G.F. Smoot, C.L. Bennet and P.M. Lubin Angular power spectrum of the microwave background anisotropy seen by the COBE Different Microwave Radiometer // *The Astrophysical Journal*, vol. 436, p. 443, 1994.

15. D.J. Fixsen, E.S. Cheng, D.A. Gottingham and etc. Cosmic microwave background dipole spectrum measured by the *COBE FIRAS* instrument // *The Astrophysical Journal*, vol. 420, pp. 445-449, 1994.
16. B.P. Crill, P.A.R. Ade, D.R. Artusa and etc. BOOMERanG: A Balloon-borne Millimeter Wave Telescope and Total Power Receiver for Mapping Anisotropy in the Cosmic Microwave Background // *Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 148, pp. 527–541, 2003.
17. R. Stompor, S. Hanany, M.E. Abroe, J. Borrill, P.G. Ferreira, A.H. Jaffe, B. Johnson, A.T. Lee, B. Rabii, P.L. Richards, G. Smoot, C. Winant, J.H.P. Wu The *MAXIMA* experiment: latest results and consistency tests // *Comptes Rendus Physique*, vol. 4, pp. 841-852, 2003.
18. E. M. Leitch, C. Pryke, N. W. Halverson and etc. Experiment design and first season observations with the Degree Angular Scale Interferometer // *The Astrophysical Journal*, vol. 568, p. 28, 2002.
19. K. Grainge, P. Carreira, K. Cleary and etc. The *CMB* power spectrum out to $\ell=1400$ measured by the VSA // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 341, p. L23, 2003.
20. D. N. Spergel, L. Verde, H. V. Peiris and etc. First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (*WMAP*) Observations: Determination of Cosmological Parameters // *The Astrophysical Journal*, vol. 148 (1), pp. 175-194, 2003.
21. N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown and etc. Planck 2015 results XXII. A map of the thermal Sunyaev-Zeldovich effect // *Astronomy & Astrophysics*, vol. 594, A22, pp. 1-24, 2016.
22. A. Benoit, P. Ade, A. Amblard and etc. Cosmological constraints from *Archeops* // *Astronomy and Astrophysics*, vol. 399, pp. L25-L30, 2003.
23. E. M. Leitch, J. M. Kovac, C. Pryke and etc. Measurement of polarization with Degree Angular Scale Interferometer // *Nature*, vol. 420, p. 763, 2002.
24. A. Manzotti, K.T. Story, W.L.K. Wu and etc. *CMB* Polarization *B*-mode Delensing with *SPTpol* and *Herschel* // *The Astrophysical Journal*, vol. 846, No. 1, p. 45, 2017.
25. M. Hazumi et al., *LiteBIRD*: A small satellite for the study of b-mode polarization and inflation from cosmic background radiation detection // *Proc. SPIE*, vol. 8442, pp. 1-19, 2012.
26. A. Suzuki, P.A.R. Ade, Y. Akiba, et al. The *LiteBIRD* Satellite Mission: Sub-Kelvin Instrument // *Journal of Low Temperature Physics*, vol. 193, pp. 1048–1056, 2018.

27. L. Mele, et. al. The *QUBIC* instrument for *CMB* polarization measurements // *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1548, p. 012016, 2020.
28. S. Marnieros, et. al. *TES* bolometer array for the *QUBIC B-mode CMB* experiment // *Journal of Low Temperature Physics*, vol. 199, pp. 955-961, 2020.
29. P. Ade, et al. The Simons Observatory: Science goals and forecasts // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, vol. 2, 056, 2019.
30. N. Zhu, et al. *The Astrophysical Journal Supplement Series* // 256:23 (20pp), 2021.
31. K.D. Irwin and G.C. Hilton Transition edge sensors // *Topics in Applied Physics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, vol. 99, pp. 63-149, 2005.
32. B.S. Karasik, R. Cantor Demonstration of high optical sensibility in far-infrared hot-electron bolometer // *Applied Physics Letters*, vol. 98, p. 193503, 2011.
33. B.A. Mazin Microwave Kinetic Inductance Detectors // Ph.D. thesis, California Institute of Technology, Pasadena, CA, 2004.
34. M. E. Gershenson, D. Gong, T. Sato, B. S. Karasik, A. V. Sergeev Millisecond electron–phonon relaxation in ultrathin disordered metal films at millikelvin temperatures // *Applied Physics Letters*, vol. 79, 2049, 2001.
35. D. C. Mattis and J. Bardeen Theory of the Anomalous Skin Effect in Normal and Superconducting Metals // *Phys. Rev.*, vol. 111, no. 2, pp. 412–417, 1958.
36. Eleftheriades and G.B. Rebeiz Self and mutual admittance of slot antennas on a dielectric half-space // *International journal of infrared and millimeter waves*, vol. 14, No. 10, 1993.
37. J. Zmuidzinas and H.G. LeDuc Quasi-optical slot antenna SIS mixer // *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, vol. 40, No. 9, 1992.
38. M. Kominami, D.M. Pozar, D.H. Schaubert Dipole and slot elements and arrays on semi-infinite substrates // *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. ap-33, No. 6, 1985.