

На правах рукописи
УДК 538.945



Лемзяков Сергей Анатольевич

**Взаимодействие СИНИС-структур с субмиллиметровым
излучением**

Специальность 01.04.09 —
«Физика низких температур»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2020

Работа выполнена в Институте физических проблем им. П.Л. Капицы РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник
Эдельман Валериан Самсонович

Официальные оппоненты: **Шитов Сергей Витальевич**,
доктор физико-математических наук,
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ведущий научный сотрудник

Кардакова Анна Игоревна,
кандидат физико-математических наук,
Московский институт электроники и математики
им. А.Н. Тихонова,
научный сотрудник

Ведущая организация: Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН

Защита состоится 15 февраля 2021 года в 15:30 на заседании диссертационного совета Д 002.103.01 при Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН по адресу: 119334, Москва, ул. Косыгина 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физических проблем РАН.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 119334, Москва, ул. Косыгина 2, ученому секретарю диссертационного совета Д 002.103. 0 1.

Автореферат разослан _____ 2020 года.
Телефон для справок: 84991373248.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.103.01,
канд. физ.-мат. наук



Юдин Алексей Николаевич

Общая характеристика работы.

Актуальность работы. Длинноволновое инфракрасное излучение, включая терагерцовый диапазон частот, играет важную роль в астрономических исследованиях. Около 98% всех фотонов во Вселенной относится именно к этому спектральному диапазону. Реликтовое излучение, которое также лежит этом диапазоне, содержит важную информацию об истории и структуре Вселенной. Поэтому низкотемпературные приемники инфракрасного и терагерцового излучения находят широкое применение в современной радиоастрономии. В современных терагерцовых приемниках в роли чувствительного элемента во многих случаях выступают низкотемпературные сверхпроводящие детекторы. Такие детекторы могут выступать как в роли смесителей в приемниках гетеродинного типа, так и в роли измерителей поглощенной мощности в болометрах, квантовых и фотонных приемниках. На сегодняшний день на практике используется несколько видов сверхпроводящих приемников последнего типа, например, болометры на сверхпроводящем переходе (TES, transition edge sensor), болометры на кинетической индуктивности (KID), примером фотонного детектора сверхпроводящие туннельные приемники на джозефсоновских переходах (STJ).

К сверхпроводящим детекторам предъявляются высокие требования связанные с условиями работы наземных и космических телескопов. На земле из-за присутствия в атмосфере паров воды, поглощающих терагерцовое излучение, наблюдения возможны лишь в относительно узких интервалах рабочих частот, определяемых окнами прозрачности. Кроме того, из-за неизбежного наличия атмосферных шумов приемники, работающие в наземных телескопах, должны сохранять высокую чувствительность при значительном уровне фоновой засветки. Для проведения вне атмосферных исследований приемники терагерцового излучения должны обладать высокой чувствительностью и крайне низким уровнем собственных шумов, современные требования к ним по мощности эквивалентной шуму (МЭШ) составляют 10^{-19} — 10^{-20} Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$, что на сегодняшний день лежит за пределами возможностей используемых на практике детекторов. Противоречивые

требования к приемникам, используемым в космосе, также возникают из-за сильно отличающихся интенсивностей от различных космических источников излучения.

Перспективным типом низкотемпературных приемников субмиллиметрового диапазона являются приемники на основе туннельных структур сверхпроводник (С) – изолятор (И) – нормальный металл (Н) – изолятор (И) – сверхпроводник (С), СИНИС-приемники. Они обладают высокой чувствительностью и быстродействием. Чувствительными элементами в таких приемниках являются туннельные переходы сверхпроводник — изолятор — нормальный металл (СИН-переходы), в которых излучение поглощается в объеме нормального металла. Приемная структура, для лучшего согласования с излучением, встраивается в планарные антенны различных конструкций (щелевые, логопериодические, кольцевые и т. д.). Важными с точки зрения практического применения являются матричные структуры, состоящие из многих СИНИС-переходов. Они позволяют существенно повысить динамический диапазон приемника.

Цель исследования состоит в поиске перспективных конструкций низкотемпературных приемников субмиллиметрового диапазона и изучении их свойств и характеристик. Для этого в работе решались задачи по экспериментальному определению откликов болометров на базе СИНИС-структур, измерению их быстродействия и оценки спектральных характеристик при интегрировании их в плоскостные антенны. Для решения последней задачи изготовлены и изучены болометры на основе промышленных рутений-оксидных резисторов как широкополосных опорных датчиков сравнения.

Научная новизна. В работе разработана оригинальная методика формирования тестовых сигналов импульсного субмиллиметрового излучения с крутым фронтом на основе импульсного нагрева тепловых излучателей с малой теплоемкостью и с использованием ЛПД генераторов гармонического сигнала.

Впервые экспериментально оценены времена отклика на уровне микросекунд на внешнее излучение приемников на основе СИНИС-структур нескольких конструкций: с подвесными нормальными мостиками, многоэлементных матриц

кольцевых антенн с СИНИС болометрами, параллельных матриц антенн метаматериалов.

Изучены отклики по напряжению на структурах и тепловые отклики на внешнее излучение приемников на основе СИНИС структур нескольких конструкций: с подвесными нормальными мостиками, много элементных матриц кольцевых антенн с СИНИС болометрами, последовательных и параллельных матриц антенн метаматериалов.

Уточнена роль электронного охлаждения в формировании отклика на излучение. Показано, что охлаждение всей структуры до температур порядка 0,1 – 0,15 К значительно эффективнее с точки зрения чувствительности приема, чем электронное охлаждения до такой же температуры.

Изучены чувствительность к излучению и быстродействие болометров на основе чип-резисторов в диапазоне температур 0,1 — 0,3 К.

С использованием генераторов на лампах обратной волны (ЛОВ) в диапазоне 200 – 380 ГГц и болометров на основе рутений – оксидных чип-резисторов как элементов сравнения, расположенных вблизи изучаемых СИНИС многоэлементных приемных структур, была измерена полоса приема последних.

Практическая значимость. Проведенные исследования быстродействия болометров на основе СИНИС-структур демонстрируют малое время срабатывания (около единиц микросекунд) таких приемников на внешнее излучение, что является крайне важным для практического их использования в радиоастрономии. Полученные результаты подтверждают правильность оценок постоянных времени срабатывания приемников на основе СИНИС-структур, выполненных на основании оценок времен электрон-фононной релаксации в нормальном металле.

Показана необходимость глубокого охлаждения СИНИС приемников для достижения предельной чувствительности.

Подтверждена широкополосность многоэлементных СИНИС приемников, ранее обоснованная теоретически и оцененная по характеристикам ЛОВ при комнатной температуре без учета дисперсии СВЧ тракта.

Практическую ценность имеют результаты исследования болометров, изготовленных из толстопленочных рутений-оксидных резисторов. Была продемонстрирована возможность их использования в качестве простого и дешевого инструмента при определении характеристик низкотемпературных волноводных трактов и источников субмиллиметрового излучения.

Методика исследования основана на экспериментальном изучении свойств приемников излучения при температурах 80 — 500 мК с помощью измерения их вольтамперных характеристик при разных уровнях внешнего излучения и измерения временных зависимостей отклика приемников по напряжению. Для получения низких температур применялись криостат растворения оригинальной конструкции В.С. Эдельмана и приспособленный под особенности проводимых измерений криостат откачки гелия-3 производства фирмы Oxford Instruments. В качестве источников излучения в диапазоне частот 110 — 400 ГГц применялись тепловые источники излучения, лавинно-пролетные диоды и лампа обратной волны.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. На основании измерений вольтамперных характеристик болометров различных конструкций на основе структур сверхпроводник – изолятор – нормальный металл – изолятор – сверхпроводник в диапазоне температур 100 — 300 мК проведен анализ зависимости электронной температуры нормального металла от внешнего излучения, получены температурные отклики приемников. Показано что величина отклика приемной структуры зависит не только от электронной температуры нормального металла в рабочей точке, но и от фононной температуры. Скомпенсировать за счет электронного охлаждения уменьшение чувствительности СИНИС-приемника с ростом температуры нельзя.

2. Экспериментально динамическим методом измерена постоянная времени срабатывания приемника на основе СИНИС-структуры на внешнее излучение: при электронной температуре нормального металла 0,17 К она составляет $1,8 \pm 0,5$ микросекунд, что согласуется с теоретическими оценками на основе величины электрон-фононного взаимодействия в нормальном металле.

3. При температуре 0,3 К в полосе 200 — 380 ГГц измеренные вариации спектрального отклика последовательных матриц метаматериала лежат в пределах ± 3 дБ, что подтверждает полученные из расчета свидетельства о широкополосности приемников такого типа.

4. Были предложены, изготовлены и изучены болометрические приемники излучения новой конструкции на базе толстопленочных промышленных чип-резисторов. Измерены характеристики рутений-оксидных болометров в диапазоне частот 200 – 380 ГГц при температурах 0,1 — 0,3 К. Чувствительность таких приемников составила несколько пиковатт, постоянная времени 0.1 — 2 с. Показана возможность их использования для анализа их полосы приема СИНИС-приемников.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные положения и результаты работы опубликованы в статьях в научных журналах [A1—A10], вошедших в Перечень изданий, рекомендованных ВАК, большинство из которых входят в международные реферативные базы данных научных публикаций Web of Science и Scopus. По материалам работы представлялись доклады на научных конференциях: 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), Гётеборг, Швеция, 2017 год; международная конференция “XXXVIII Совещание по физике низких температур”, Шепси, Россия, 2018 год; конференция МФТИ в 2016, 2017 и 2018 годах, Москва; XXIV симпозиум «Наноп физика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 2020.

Личный вклад. Работы были выполнены Лемзяковым С.А. в соавторстве с научным руководителем Эдельманом В.С., ИФП им. П.Л. Капицы РАН и с сотрудниками лаборатории сверхпроводниковой электроники ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН Тарасовым М.А., Юсуповым Р.А., Чекушкиным А.М. и с сотрудницей ИПФ РАН Гунбиной А.А. Изучаемые в работе приемники на основе СИНИС-структур были изготовлены сотрудниками ИРЭ РАН и ИПФ РАН. Автор лично участвовал в наладке приборов и проведении низкотемпературных измерений на базе криостата откачки гелия-3 и микрокриостата растворения. Также автором была проведена модернизация криостата откачки гелия-3 и написана программа управления измерениями быстродействия приемников. Описанные в третьей главе

диссертации рутений-оксидные приемники изготавливались и исследовались лично автором. Также лично автором проводился расчет электронных температур нормального металла в изучаемых СИНИС-структурах и моделирование тепловых процессов в чернотельном излучателе. Автор участвовал в обработке результатов, подготовке публикаций и докладов.

Глава 1. Физические свойства СИНИС-структур.

В первой главе описываются основные физические свойства изучаемых в работе СИНИС-структур: протекание одночастичного туннельного тока через структуру; эффект электронного охлаждения; протекание двухчастичного подцелевого тока и электрон-фононное взаимодействие в нормальном металле. Кроме того, обсуждаются низкотемпературные сверхпроводящие приемники излучения и, в частности, приемники на основе СИНИС-структур, изучению которых посвящена основная часть работы.

Одночастичный туннельный ток I , протекающий через структуру сверхпроводник (С) — изолятор (И) — нормальный металл (Н) (СИН-структура) описывается следующей формулой туннельной теории [1]:

$$I = \frac{1}{eR_n} \int_{-\infty}^{+\infty} N_S(E) [n_N(E - eV) - n_N(E)] dE,$$

здесь N_S — плотность состояний в сверхпроводнике, n_N — функция распределения электронов в нормальном металле, R_n — нормальное сопротивление перехода, V — напряжение на переходе. Функция распределения электронов в металле зависит от электронной температуры T_e , и принимает фермиевский вид для равновесного распределения. Поэтому одночастичный туннельный ток через структуру зависит от T_e и экспоненциально падает с уменьшением T_e . Высокая чувствительность туннельного тока к изменению электронной температуры нормального металла при его нагреве падающим излучением лежит в основе применения NIS-переходов в качестве приемников излучения. В качестве приемников обычно используют

симметричные СИНИС-структуры, в которых нагревающаяся излучением полоска нормального металла отделена от сверхпроводника двумя NIS-переходами.

Протекание одночастичного туннельного тока в СИН-структуре сопровождается переносом тепла из нормального металла в сверхпроводник. Поток тепла возникает из-за того, что в протекании тока участвуют только те электроны нормального металла (или дырки, в зависимости от направления протекающего тока), энергия которых превышает величину $\Delta - eV$. Из-за этого носители заряда с большей энергией («горячие») переходят из металла в сверхпроводник, а с меньшей энергией («холодные») остаются в металле. В результате возникает поток тепла, направленный из нормального металла в сверхпроводник. Это явление называется электронным охлаждением (electron cooling) и представляет собой частный случай эффекта Пельтье для контакта нормальный металл — изолятор — сверхпроводник [2]. Это явление наблюдается и в приемных СИНИС-структурах. В частности, оно приводит к тому, что T_e зависит от напряжения на структуре и форма вольт-амперной характеристики при этом заметно отличается от зависимости, заданной формулой одночастичного тока для постоянной электронной температуры T_e .

Кроме тока одночастичного туннелирования в СИН-структурах возможно протекание подщелевого тока. Наличие дополнительного тока через переход проявляется при низких температурах и малых напряжениях на переходе, когда ток одночастичного туннелирования мал. Протекание подщелевого тока в СИН-структуре обеспечивается двухчастичным туннелированием за счет эффекта андреевского отражения [3], поэтому часто подщелевой ток (subgap current) называют андреевским током (Andreev current). Подщелевой ток ограничивает чувствительность приемников на основе СИНИС-структур при низких температурах. Для описания вклада андреевского тока в экспериментально измеренный общий туннельный ток наилучшим образом подходит теория Хеккинга – Назарова [4], учитывающая интерференцию куперовских пар в объемах нормального металла и сверхпроводника.

Одним из ключевых факторов, влияющих на работу рефрижераторов и приемников излучения на основе СИН-структур является механизм релаксации

тепла от электронной подсистемы в нормальном металле. Основным процессом отвода тепла от электронной подсистемы в нормальном металле является взаимодействие с фононами. С уменьшением температуры поток тепла от электронов к фононам значительно падает и при низких температурах именно электрон-фононное взаимодействие ограничивает теплоотвод от электронов в нормальном металле. Приемники, в которых излучение поглощается электронной подсистемой, отделенной по теплу от фононов, принято называть болометрами на горячих электронах (hot electron bolometer, НЕВ) [5].

Приемники на основе СИНИС-структур относятся к большому классу сверхпроводниковых низкотемпературных детекторов, которые используются для детектирования электромагнитного излучения в широком диапазоне частот от рентгеновского излучения до субмиллиметрового и применяются на практике в таких областях как радиоастрономия, рентгеновский анализ, физика элементарных частиц, в оптике и линиях передачи информации. К таким приемникам относятся, например, используемые в составе многоэлементных матриц в детекторах субмиллиметрового излучения в радиоастрономии) болометры на краю сверхпроводящего перехода (TES) [6] и детекторы на кинетической индуктивности (KID) [7]. Они обладают высокой чувствительностью и низким уровнем собственных шумов, мощность эквивалентная шуму (МЭШ) таких приемников достигает до $3 \cdot 10^{-19}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ [6, 7]. Однако они обладают не большим быстродействием (для TES болометров собственное быстродействие не превышает единиц миллисекунд) и динамическим диапазоном. В отличии от них, приемники на основе СИНИС-структур при высокой чувствительности (до 10^9 В/Вт) и потенциально низком уровне собственных шумов (по оценка до 10^{-18} Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ при температуре 100 мК [8]) обладают на порядки большим быстродействием, вплоть до единиц микросекунд, и, динамическим диапазоном более 30 дБ.

Глава 2. Методика и аппаратура измерений.

Описываемые эксперименты имели своей целью, в первую очередь, выяснение физических процессов, протекающих в приемных СИНИС-структурах при их

облучении субмиллиметровым излучением при разных температурах в диапазоне 0,07 — 0,5 К. Для этого измерялись зависимости отклика на излучение при разных температурах приемника в зависимости от мощности излучения, его спектра и времени нарастания сигнала.

Описываемые в работе СИНИС-структуры проектировались и изготавливались коллегами из ИРЭ РАН и ИПФ РАН. Исследовались оригинальные образцы с разной конструкцией приемников, с разными геометриями, параметрами и материалами СИНИС-структур. Так, изучались одиночные СИНИС-структуры с подвешенным абсорбером из медной полоски толщиной 30 нм и размерами 4×1 мкм², интегрированные в планарную логопериодическую антенну. В качестве сверхпроводника в этих структурах использовался алюминий толщиной 100 нм, туннельный барьер изготавливался из оксида алюминия. Площадь одиночного СИН-перехода в такой структуре составляет 2×1 мкм². Также изучались параллельные и последовательные матрицы антенн метаматериала, принцип работы которых заключается в том, что в роли согласующей антенны выступает распределенная структура состоящая из большого количества малых планарных кольцевых антенн с интегрированными СИНИС-структурами (рисунок 1). В результате полные размеры структуры сопоставимы с длиной волны принимаемого излучения (для приведенной на рисунке 1(а) последовательной матрицы из 10×10 элементов полная площадь составляет 0,38 мм²), как и для обычных планарных антенн, но при этом в качестве чувствительного элемента выступает целая матрица переходов. В роли нормального металла в таких структурах выступает алюминий толщиной 14 нм на подавляющем сверхпроводимостью подслое железа толщиной 1,2 нм; в роли сверхпроводника – также алюминий толщиной 80 нм; туннельные переходы изготовлены из оксида алюминия. Сопротивление одного перехода в нормальном состоянии составляет 1,15 кОм.

Хотя эти структуры и изготавливались в сравнительно неплохо оборудованных специализированных центрах, все это были экспериментальные образцы с выходом годных устройств на уровне десятка — двух десятков процентов, причем большая часть брака выявлялась только при низких

температурах. Это диктовало определенные требования к установкам — возможность одновременного охлаждения нескольких чипов с расположенными на них как приемными, так и с вспомогательными структурами, например, многоэлементными СИНИС-термометрами, тестовыми СИНИС-структурами и пр.; по возможности достаточно оперативного глубокого охлаждения и проведения большого числа измерений за короткое время, поскольку не всегда образцы выдерживают термоциклирование и если не выходят из строя, то несколько изменяют параметры.

Основа исследований — измерение вольт-амперных характеристик при различных условиях, которое проводилось в режиме задания постоянного тока через структуру. При этом сопротивление СИНИС-структур в зависимости от их параметров, температуры, мощности облучения, меняются в широких, до

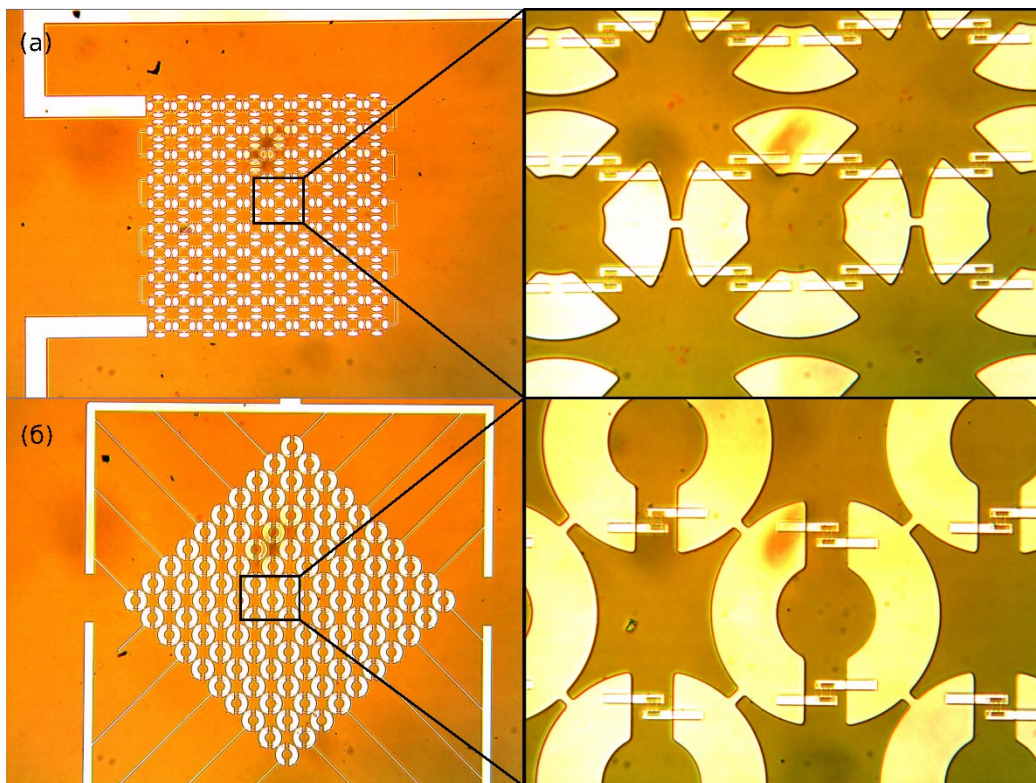


Рисунок 1 — Верхняя часть (а) — фотография последовательной матрицы метаматериала 10×10 (MsM) и увеличенное изображение нескольких элементов матрицы; нижняя часть (б) — фотография параллельной матрицы метаматериала 10×10 (MpM) и увеличенное изображение нескольких элементов матрицы. Изображения сделаны с помощью оптического микроскопа. Из работы [A4].

«холодного» эксперимента непредсказуемых, пределах от десятков ом до сотен мегом. Исходя из этого для регистрации напряжения использовались инструментальные усилители на полевых микросхемах, работающие при комнатной температуре. Очевидно, что они не могут быть всегда согласованы с источниками напряжения без использования дополнительных устройств, например, трансформаторов напряжения, параметры которых могут быть подобраны только после проведения цикла измерений индивидуально для каждого приемника. Поэтому на текущей стадии исследования это не делалось, как не применялись и охлаждаемые усилители, возможный выход из строя которых привел бы к срыву работы. Высокое сопротивление образцов делает бессмысленным использование промышленных компонентов для блокирования попадания паразитных излучений из комнаты на исследуемые приемники, работающие только при согласованных нагрузках порядка 50 Ом, а использование защитных емкостей при сопротивлениях в десятки и сотни мегом не только делают невозможным измерение малых, порядка микросекунд, времен отклика, но и требуют неоправданно продолжительного, исчисляемого десятками минут и более, времени регистрации каждой вольт-амперной характеристики. Исходя из этого, приводимые далее оценки достигнутых предельных значений МЭШ исследовавшихся приемных структур из-за отсутствия согласования с усилителем и возможного перегрева паразитными сигналами заведомо занижены. Но их уточнение интересно скорее с технической, а не фундаментальной точки зрения, и это перспектива дальнейших исследований.

Во всех изучаемых структурах в качестве сверхпроводника используется алюминий. Его температура перехода для массивного образца составляет 1,18 К. Для достижения наибольшей чувствительности температура приемной структуры должна быть на порядок ниже. Поэтому для получения низких температур использовались погружной криостат растворения, позволяющий получить температуры до 70 мК, и криостат откачки гелия-3 производства Oxford Instruments на базе импульсной трубы, позволяющий получить температуру до 0,3 К. Для основных измерений использовался криостат растворения, так как изучаемые в работе приемные структуры демонстрируют свою максимальную чувствительность

при температуре 0,1 — 0,2 К. Однако, погружной криостат растворения требует для своей работы наличия жидкого гелия. Для его экономии при проверке работоспособности и качества новых образцов использовался криостат откачки гелия-3 на базе импульсной трубы. В обоих криостатах предусмотрена возможность одновременной установки нескольких образцов: в криостате растворения до трех, а в криостате откачки гелия-3 до четырех штук. Это позволяло экономить ресурсы и время на проведение низкотемпературных измерений.

В качестве источников излучения в диапазоне 110 – 400 ГГц использовались тепловые источники излучения, лавинно-пролетные диоды (ЛПД) и лампы обратной волны (ЛОВ).

Тепловые излучатели были изготовлены из сапфировой пластины толщиной 0,34 мм покрытой слоем нихрома с сопротивлением примерно 200 Ом/квадрат. Тепловые излучатели использовались в криостате растворения; в отсутствие тока через нихромовую пленку их температура составляла 0,45 – 0,5 К. При пропускании электрического тока через пленку она разогревается и начинает излучать. Рабочая температура излучателя в зависимости от мощности нагрева пленки может достигать нескольких десятков кельвин, однако обычно в экспериментах она редко превышала 12 – 15 К. Достоинствами тепловых излучателей является относительная простота их устройства и возможность оценки поглощаемой приемником мощности на основе теории излучения нагретых тел и простых геометрических соображений. Кроме того, такие источники размещаются непосредственно внутри криостата и не требуют организации специальных трактов излучения (систем окон в экранах или волноводов). Это позволяет избежать усложнения конструкции криостата и паразитного теплопритока к низкотемпературной части прибора из-за комнатного теплового излучения. Такие источники излучают в широкой полосе частот, поэтому для работы на одной выделенной частоте внешнего излучения (в нашем случае 345 ГГц) необходимо использовать полосовые фильтры. Тепловые излучатели также использовались и для определения быстродействия приемников излучения. С их помощью можно создавать импульсы излучения с коротким фронтом

длительностью порядка микросекунды, быстро нагревая излучатель. Однако, при этом нельзя получить быстрый спад излучения.

Лавинно-пролетный диод – компактный источник, позволяющий получить излучение на фиксированной частоте около 115 ГГц с выходной мощностью порядка милливатта. Для того, чтобы получить излучение на частоте около 350 ГГц, соответствующей одному из атмосферных окон пропускания субмиллиметрового излучения, использовался утроитель частоты, который, однако, существенно уменьшает выходную мощность излучения. Для изучения быстродействия приемных структур питание ЛПД модулировалось прямоугольными импульсами с нарастанием и спадом в доли микросекунды. Это позволяло получать короткие импульсы излучения с крутым фронтом и спадом.

В отличие от лавинно-пролетного диода лампа обратной волны это перестраиваемый источник излучения, поэтому с её помощью проводились измерения частотных характеристик приемных структур. При этом главную сложность представляет крайне изрезанная амплитудно-частотная характеристика ЛОВ, из-за чего требуется независимое измерение мощности излучения. Такие измерения проводились с помощью приемников излучения на базе рутений-оксидных резисторов [A1], описанию которых посвящена четвертая глава.

Глава 3. Результаты измерений характеристик СИНИС-структур.

Третья глава посвящена описанию результатов измерений чувствительности [A2 – A4, A7, A10] и быстродействия [A5, A6] приемных СИНИС-структур и результатов исследования влияния эффекта электронного охлаждения на их работу [A8].

Чувствительность по напряжению и току приемных структур определялась на основе разностей измеренных вольт-амперных характеристик при наличии и отсутствии излучения. Такой метод удобен при измерении сравнительно больших откликов по напряжению, однако, он плохо применим для малых откликов вблизи щели из-за неизбежного наличия дрейфов напряжения между измерениями вольт-амперных характеристик. В этом случае отклик определялся с помощью усреднения

сигналов в ходе облучения приемника серией миллисекундных импульсов. Максимум отклика по напряжению наблюдается при приведенном напряжении в $0,5 - 0,65\Delta/e$, максимум отклика по току находится при напряжениях, близких величине щели. Для одиночной структуры с подвешенным абсорбером, интегрированной в логопериодическую антенну, максимальная чувствительность по напряжению составляет $2 \cdot 10^8$ В/Вт, токовая чувствительность около 10^4 А/Вт при температуре порядка 100 мК. Для последовательных матриц метаматериала чувствительность по напряжению составляет около 10^9 В/Вт, при этом динамический диапазон превышает 30 дБ.

Чувствительность приемных СИНИС-структур растет с понижением температуры. На основании этого в некоторых работах (например, [9]) было высказана идея о том, что для повышения чувствительности вместо затратного охлаждения приемной структуры как целого можно использовать эффект электронного охлаждения. Предполагалось, что используя сравнительно простые криостаты на основе откачки гелия-3 охладив приемную структуру до температуры порядка 0,3 К добиться наибольшей ее чувствительности (которая наблюдается при температурах 0,1 – 0,2 К, получаемых с помощью более сложных криостатов растворения) получится с помощью электронного охлаждения нормального металла структуры измерительным током.

Для того что бы это проверить, на основе измеренных вольт-амперных характеристик последовательной матрицы метаматериала для температур держателя в 0,1 К и 0,32 К и двух уровней внешнего излучения (с выключенным тепловым источником и нагретым до температуры в 7 К) рассчитывались электронные температуры T_e . Для этого из измеренных вольт-амперных характеристик предварительно вычитался андреевский ток, рассчитанный на основе соотношений теории Хеккинга – Назарова. Далее, для каждого измеренного на структуре напряжения подбиралась величина T_e таким образом, чтобы рассчитанная по формуле величина одночастичного тока наилучшим образом совпадала с измеренной. Таким образом, получалась зависимость расчетной электронной температуры нормального металла от напряжения на переходе $T_e(V)$.

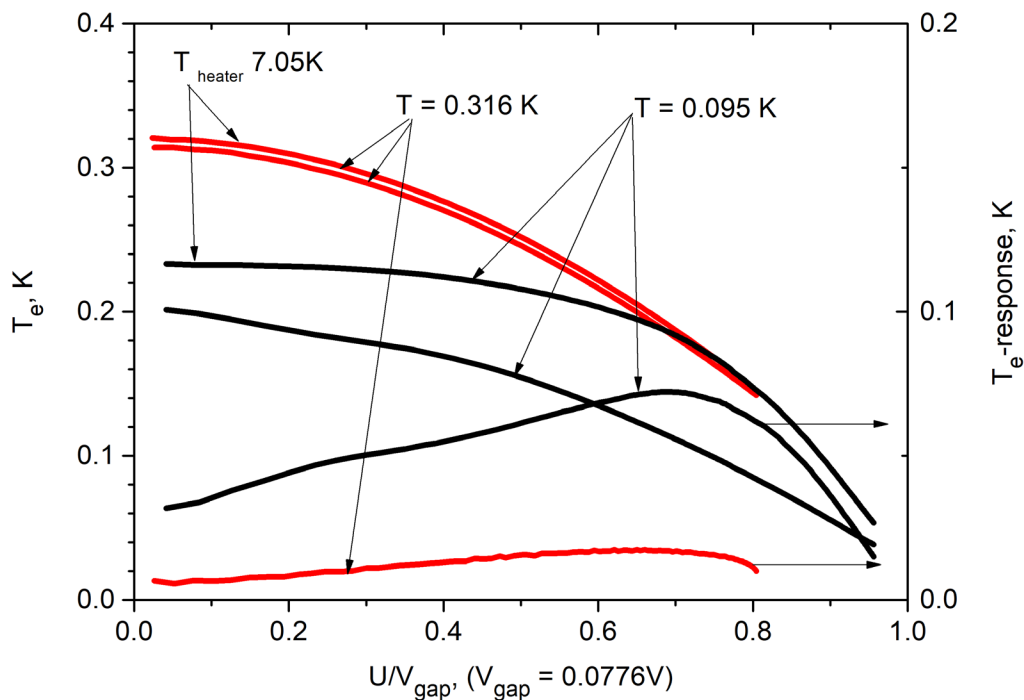


Рисунок 2 - Расчетные зависимости от приведенного напряжения T_e и $(T_e - T)$ при двух температурах $T = 0,095$ и $T = 3,16$ К при холодном излучателе и нагретом до $7,05 \pm 0,1$ К. Из работы [А8].

Результаты расчета электронной температуры нормального металла для последовательной мета структуры приведены на рисунках 2, 3. Полученные зависимости $T_e(V)$ демонстрируют наличие эффекта электронного охлаждения. С ростом напряжения на структуре величина электронной температуры уменьшается. Минимум электронной температуры достигается при напряжениях около $0,95\Delta/e$, а при больших напряжениях она начинает резко расти. Однако, к результатам расчета электронной температуры при напряжениях больших $0,9\Delta/e$ следует относиться крайне осторожно. При таких напряжениях расчетная величина электронной температуры крайне чувствительна к выбору величины Δ . Кроме того, начинает сказываться разброс характеристик отдельных элементов матрицы, из-за чего форма вольт-амперной характеристики искажается. Поэтому невозможно достоверно судить о наименьшей достигнутой в эксперименте электронной температуре и соответствующий участок зависимости на рисунке не показан.

На основе представленных результатов также можно сделать вывод о наличии существенного перегрева электронов в нормальном металле относительно подложки при температурах около 0,1 К. При малых напряжениях на структуре роль эффектов, связанных с протеканием электрического тока пренебрежимо мала, однако при этом электронная температура достигает 0,23 К и существенно отличается от температуры подложки в 0,1 К. Наличие такого перегрева, судя по всему, связано с влиянием паразитного излучения и наводками. При более высокой температуре такого перегрева не наблюдается, и электронная температура при малых напряжениях на структуре совпадает с температурой держателя. Этот факт косвенно говорит о существенной зависимости чувствительности от температуры подложки.

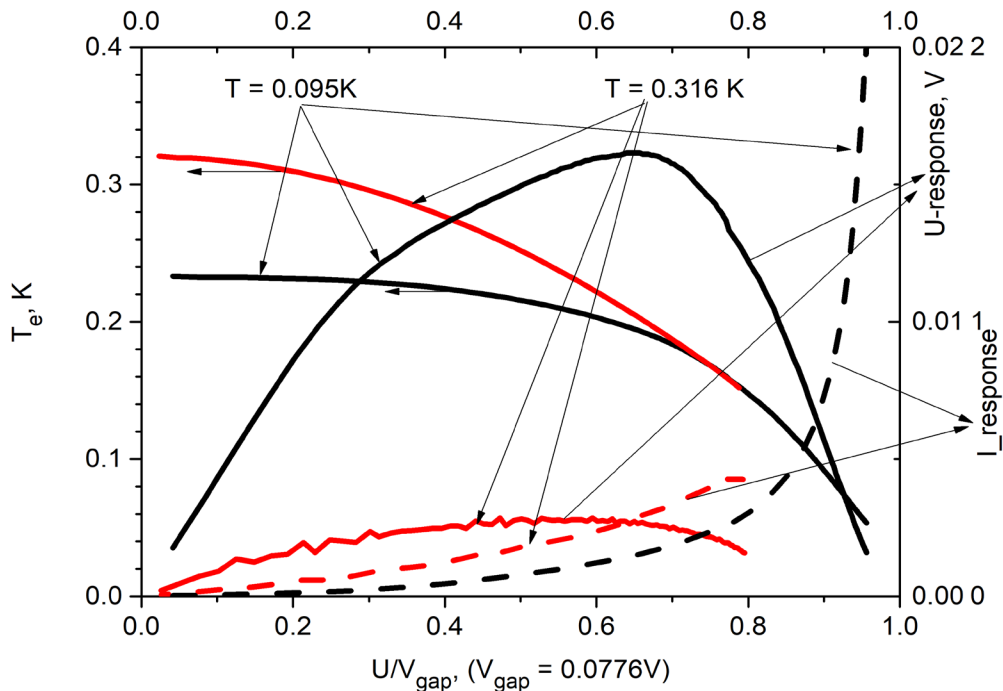


Рисунок 3 - Зависимость от приведенного напряжения на приемнике электронной температуры нормальных элементов (шкала слева) и откликов по напряжению и току (шкалы справа) при температурах 0,095 и 0,316 К при облучении от нагретого до $7,05 \pm 0,1$ К источника. Из работы [А8].

На рисунке 2 также представлены зависимости изменения электронной температуры на внешнее излучение (нижние кривые, относящиеся к правой шкале). На них хорошо прослеживается наличие максимума при напряжении равном $0,7 - 0,75 \Delta/e$. Максимальные величины отклика составляют 75 мК и 15 мК для

температур подложки 0,1 К и 0,32 К соответственно. То есть вызванная облучением добавка температуры при 0,095 К выше, чем при 0,316 К примерно в 5 раз.

На основе вольтамперных характеристик структуры, измеренных при разных уровнях внешнего излучения, можно получить отклик по напряжению при постоянном токе через структуру. При этом, удобно представить отклик по напряжению в виде зависимости от напряжения на структуре без излучения, рисунок 3. Максимум отклика по напряжению несколько сдвинут относительно максимума отклика по температуре и наблюдается при приведенном напряжении в $0,65\Delta/e$, когда электронные температуры практически равны. При этом при температуре подложки 0,095 К максимальный отклик в 5,3 раза больше, чем при 0,316 К. Этот результат явным образом говорит о том, что чувствительность приемной СИНИС-структуры зависит не только от электронной температуры металла, но и от температуры подложки и скомпенсировать меньшую чувствительность при более высокой температуре за счет электронного охлаждения нельзя.

СИНИС-приемники, имеющие малые (порядка $0,1 - 1 \text{ мкм}^3$) объемы абсорбера из нормального металла, как ожидается, должны иметь малые времена отклика на изменение уровня излучения. Знание постоянной времени приемных СИНИС-структур важно как для лучшего понимания физических процессов в туннельных структурах, так и для их технических применений. На основании оценки величины электрон-фононного взаимодействия ожидаемое время отклика СИНИС-приемников составляет около $0,1 - 1 \text{ мкс}$, что является одним из важных достоинств приемников данного типа. При этом важно отметить, что проводившиеся ранее экспериментальные работы по оценке времени срабатывания СИНИС-структур были посвящены откликам на изменение рабочего тока или напряжения на структуре, а не на падающее на структуру терагерцовое излучение.

Измерения быстродействия приемников проводилось с помощью тепловых источников излучения с малой теплоемкостью и лавинно-пролетного диода. Для получения импульсов излучения с коротким фронтом на тепловой излучатель подавались микросекундные импульсы нагревающего тока; у лавинно-пролетного

диода микросекундными импульсами модулировалось питание. В обоих случаях измерения проводились по схожей схеме. На приемную структуру подавался опорный ток смещения I_{bias} , отклик по напряжению с выхода предусилителя, синхронизованный с импульсами излучения записывался с помощью цифрового осциллографа. Для увеличения отношения сигнал/шум измерения проводились циклами по 100 – 1000 импульсов, итоговый отклик получался путем усреднения сигнала по всем измерениям. Для уменьшения вклада в итоговый результат дифференциальных наводок половина измерений проводилась при одном знаке рабочего тока приемника, а другая половина при противоположном. При обработке результатов измерения учитывалась форма импульса падающего на структуру излучения, запаздывание сигнала на входе предусилителя, связанное с наличием собственной емкости у измерительных проводов (равной 80 – 100 пФ) и собственное время срабатывания предусилителя, составляющее, согласно тестовым измерениям 0,2 – 0,3 мкс.

В результате, для одиночной СИНИС структуры с подвешенным абсорбером, интегрированной в логопериодическую антенну, при электронной температуре абсорбера в 0,17 К получена постоянная времени нарастания сигнала $\tau_{SINIS} = 1,8 \pm 0,5$ мкс (рисунок 4). Для последовательной матрицы метаматериала при температуре 0,3 К постоянная времени заведомо не превышает 0,3 мкс.

Глава 4. Приемники излучения на основе рутений-оксидных резисторов.

Четвертая глава посвящена низкотемпературным болометрам, изготавливаемым из толсто пленочных рутений-оксидных [10, A1] чип резисторов, описываются их свойства и примеры применения на практике.

Толсто пленочные рутений-оксидные резисторы широко используются в качестве простых, дешевых и надежных термометров для диапазона температур 50 мК — 10 К. Сопротивление таких резисторов экспоненциально растет с понижением температуры, что и позволяет их использовать в качестве низкотемпературных термометров. Вместе с тем, при понижении температуры они становятся крайне чувствительны как к нагреву внешним излучением, так и к перегреву собственным

измерительным током. Именно эта особенность лежит в основе их использования в качестве болометров.

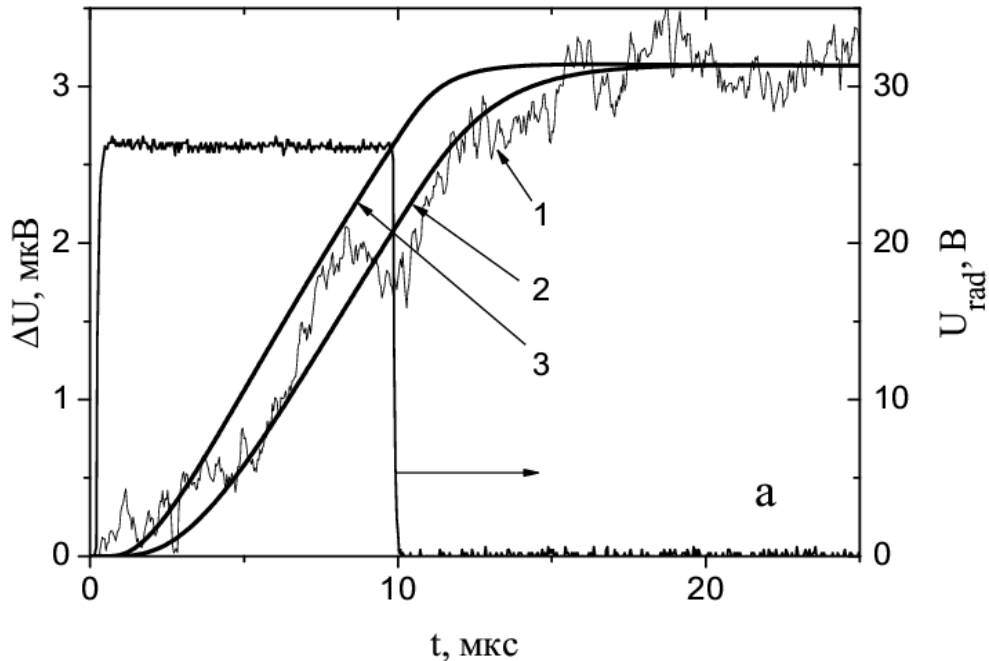


Рисунок 4 - Кривая 1 — отклик болометра при подаче на излучатель импульсов $U_{\text{rad}} = 26 \text{ В}$, 10 мкс , кривая 2 — расчет отклика с учетом зависимостей $P_{\text{rad}}(t)$ и времени регистрации $\tau = 1,8 \text{ мкс}$ при $\tau_{\text{SINIS}} = 0$; кривая 3 — расчет с временем отклика болометра $\tau_{\text{SINIS}} = 1,8 \text{ мкс}$. Из работы [А6].

Описываемые в работе приемники изготавливались из резисторов размером $6.4 \times 3.2 \times 0.55 \text{ мм}$. На тыльную сторону резисторов наносился поглощающая пленка из нихрома для лучшего согласования с внешним излучением. С некоторых из них подложка из алюминий-оксидной керамики с тыльной стороны предварительно сошлифовывалась толщины $0,1 \text{ мм}$, это позволяло уменьшить теплоемкость резисторов и, тем самым увеличить их быстродействие, а также снизить влияние интерференции излучения в подложке на коэффициент поглощения приемника. После напыления резистор подвешивался на четырех тонких (50 мкм) проволочках из NiTi в мельхиоре длиной около 5 мм . Эти же проволочки использовались в качестве токоподводов. Подобная конструкция необходима для того, чтобы уменьшить теплоотвод от резистора и, тем самым увеличить его чувствительность.

Используя подобную конструкцию, можно определить поглощенную мощность, сравнивая изменение сопротивления резистора под воздействием падающего излучения и из-за нагрева измерительным током. Для этого, на основе предварительно измеренных в широких пределах вольт-амперных характеристик подвешенного резистора строилась зависимость его сопротивления от мощности нагрева измерительным током. По этой зависимости, измерив изменение сопротивления резистора при его облучении, можно оценить величину поглощенной им мощности.

Исследованные болометры при рабочей температуре 0,3 К показали чувствительность на уровне $5 \cdot 10^{12}$ Ом/Вт, динамический диапазон более 20 дБ и постоянную времени около 0,1 — 2 с в зависимости от толщины подложки.

Рутений-оксидные болометры использовались при анализе распределения интенсивности излучения в криостате. Необходимость подобного рода измерений продиктована спецификой рабочего диапазона частот 150 – 400 ГГц, связанной с тем, что длина волны излучения порядка миллиметров сопоставима с геометрическими размерами элементов тракта и образцов. Поэтому существенное влияние на интенсивность излучения, попадающего на образец, оказывают различные трудно учитываемые переотражения и интерференции. В проведенных экспериментах для криостата гелия-3 было показано, что интенсивность падающего излучения на приемники, расположенные на соседних позициях, может отличаться почти в полтора раза.

Также рутений-оксидные приемники использовались в экспериментах по измерению частотной селективности матриц метаматериала [A9]. Они применялись в качестве опорных приемников излучения для того, чтобы учесть сильно изрезанную амплитудно-частотную характеристику лампы обратной волны, которая служила перестраиваемым источником излучения в этих экспериментах. Применимость рутений-оксидных приемников в подобных экспериментах связана со слабой, в пределах 5 – 10%, зависимостью их коэффициента поглощения от частоты. В результате было показано, что матрицы метаматериала в диапазоне частот 160 – 400 ГГц не обладают явной избирательностью по частоте.

Заключение.

1. Измерены вольт-ваттные и ампер-ваттные чувствительности приемных СИНИС-структур различных конструкций: одиночной СИНИС-структуры с подвешенным абсорбером; последовательных и параллельных матриц планарных кольцевых полуволновых антенн; последовательных и параллельных матриц электрически малых антенн (мета материалов). Максимальные значения измеренных чувствительностей составляют $1,3 \cdot 10^9$ В/Вт и $2,4 \cdot 10^4$ А/Вт соответственно. Что, с учетом относительно высокого уровня собственных шумов и наводок в используемой измерительной схеме, дает мощность эквивалентную шуму 10^{-17} Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Для последовательной метаструктуры чувствительность к изменению температуры излучения составляет 100 мК/ $\sqrt{\text{Гц}}$ для температуры излучения 2,7 К, что делает возможным исследование анизотропии реликтового излучения с помощью таких приемников.

2. Проведены низкотемпературные измерения времени отклика на внешнее излучение для приемника на основе структур сверхпроводник – изолятор нормальный металл – изолятор сверхпроводник. Измерялась скорость отклика приемной структуры на излучение с коротким фронтом от теплового излучателя. В результате получена оценка постоянной времени срабатывания СИНИС-приемников: при электронной температуре нормального металла абсорбера 0,17 К она составляет $1,8 \pm 0,5$ микросекунд, что согласуется с теоретическими оценками на основании электрон-фононного взаимодействия.

3. На основании измерений вольтамперных характеристик болометров на основе структур сверхпроводник – изолятор – нормальный металл – изолятор – сверхпроводник для температур 100 и 300 мК проведен анализ зависимости электронной температуры нормального металла от внешнего излучения, получены температурные отклики болометров. Для исследованных структур наблюдалось электронное охлаждение в нормальном металле с ростом напряжения до величин, близких к величине щели. Показано что уменьшение электронной температуры на структуре за счет электронного охлаждения не может скомпенсировать меньшую чувствительность приемной СИНИС-структуры при более высокой температуре.

4. На основании измерений спектрального отклика последовательных матриц кольцевых антенн и электрически малых антенн (метаматериала) при температуре 0,3 К была показана слабая селективность таких приемников: в диапазоне частот 200 — 380 ГГц наблюдаемые вариации отклика не превышают ± 3 дБ.
5. Продемонстрирована возможность использования болометров на базе толсто пленочных рутений-оксидных резисторов в качестве простого и дешевого инструмента при определении характеристик низкотемпературных волноводных трактов и проверке частотной селективности низкотемпературных болометров. Измерены характеристики рутений-оксидных болометров в диапазоне частот 200 — 380 ГГц при температурах 0,1 — 0,3 К. Чувствительность таких приемников составляет несколько пиковатт, динамический диапазон более 20 дБ и постоянная времени около 0,1 — 2 с.

Список публикаций аспиранта

- [A1] *Лемзяков С.А., Эдельман В.С.* Использование RuO₂-резисторов как широкополосных низкотемпературных приемников излучения //Приборы и техника эксперимента. – 2016. – №. 4. – С. 146-151.
Версия статьи на английском языке: *Lemzyakov S.A., Edelman V.S.* The use of RuO₂ resistors as broadband low-temperature radiation sensors //Instruments and Experimental Techniques. – 2016. – Т. 59. – №. 4. – С. 621-626.
- [A2] *Tarasov M., Edelman V., Mahashabde S., Fominsky M., Lemzyakov S., Chekushkin A., Yusupov R., Winkler D., Yurgens A.* Electrical and optical properties of a bolometer with a suspended absorber and tunneling-current thermometers //Applied Physics Letters. – 2017. – Т. 110. – №. 24. – С. 242601.
- [A3] *Tarasov M., Edelman V., Mahashabde S., Fominsky M., Lemzyakov S., Chekushkin A., Yusupov R., Winkler D., Yurgens A.* SINIS bolometer with a suspended absorber //Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Т. 969. – С. 012088.

- [A4] *Tarasov M., Sobolev A., Gunbina A., Yakopov G., Chekushkin A., Yusupov R., Lemzyakov S., Vdovin V., Edelman V.* Annular antenna array metamaterial with SINIS bolometers //Journal of Applied Physics. – 2019. – Т. 125. – №. 17. – С. 174501.
- [A5] *Lemzyakov S., Tarasov M., Mahashabde S., Yusupov R., Kuzmin L., Edelman V.* Experimental study of a SINIS detector response time at 350 GHz signal frequency //Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Т. 969. – С. 012081.
- [A6] *Лемзяков С.А., Тарасов М.А., Эдельман В.С.* Исследование быстродействия СИНИС-болометра на частоте 350 ГГц //Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2018. – Т.153. – №. 6. – С. 992.
Версия статьи на английском языке: *Lemzyakov S.A., Tarasov M.A., Edelman V.S.* Investigation of the Speed of a SINIS Bolometer at a Frequency of 350 GHz //Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2018. – Т. 126. – №. 6. – С. 825-832.
- [A7] *Tarasov M., Gunbina A., Mansfeld M., Yakopov G., Chekushkin A., Yusupov R., Lemzyakov S., Edelman V., Vdovin V.* Arrays of annular cryogenic antennas with SINIS bolometers and cryogenic receivers for SubTHz observatories //EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2018. – Т. 195. – С. 05010.
- [A8] *Гунбина А. А., Лемзяков С. А., Тарасов М. А., Эдельман В. С., Юсупов Р. А.* Отклик на субмиллиметровое излучение СИНИС приемника с электронным охлаждением //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2020. – Т. 111. – №. 10. – С. 641-645.
- [A9] *Гунбина А.А., Тарасов М.А., Лемзяков С.А., Чекушкин А.М., Юсупов Р.А., Нагирная Д.В., Мансфельд М.А., Вдовин В.Ф., Винклер Д., Калабухов А.С., Махашабде С., Эдельман В.С.* Спектральный отклик матриц полуволновых и электрически малых антенн с СИНИС-болометрами //Физика твердого тела. – 2020. – Т. 62. – №. 9.
- [A10] *Юсупов Р.А., Гунбина А.А., Чекушкин А.М., Нагирная Д.В., Лемзяков С.А., Эдельман В.С., Тарасов М.А.* Квантовый отклик болометра на основе

структуры СИНИС с подвешенным абсорбер //Физика твердого тела. – 2020. – Т. 62. – №. 9.

Список литературы

- [1] Giaever I., Megerle K. Study of superconductors by electron tunneling //Physical Review. – 1961. – Т. 122. – №. 4. – С. 1101.
- [2] Nahum M., Eiles T. M., Martinis J. M. Electronic microrefrigerator based on a normal-insulator-superconductor tunnel junction //Applied Physics Letters. – 1994. – Т. 65. – №. 24. – С. 3123-3125.
- [3] Андреев А. Ф. Теплопроводность сверхпроводника в промежуточном состоянии //ЖЭТФ. – 1964. – Т. 46. – С. 1823.
- [4] Hekking F. W. J., Nazarov Y. V. Subgap conductivity of a superconductor–normal-metal tunnel interface //Physical Review B. – 1994. – Т. 49. – №. 10. – С. 6847.
- [5] Giazotto F. et al. Opportunities for mesoscopies in thermometry and refrigeration: Physics and applications //Reviews of Modern Physics. – 2006. – Т. 78. – №. 1. – С. 217.
- [6] Karasik B. S., Sergeev A. V., Prober D. E. Nanobolometers for THz photon detection //IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2011. – Т. 1. – №. 1. – С. 97-111.
- [7] Baselmans J. J. A. et al. A kilo-pixel imaging system for future space based far-infrared observatories using microwave kinetic inductance detectors //Astronomy & Astrophysics. – 2017. – Т. 601. – С. A89.
- [8] Golubev D., Kuzmin L. Nonequilibrium theory of a hot-electron bolometer with normal metal-insulator-superconductor tunnel junction //Journal of Applied Physics. – 2001. – Т. 89. – №. 11. – С. 6464-6472.
- [9] Kuzmin L. S., Devyatov I. A., Golubev D. Cold-electron bolometer with electronic microrefrigeration and general noise analysis //Millimeter and Submillimeter Waves Iv. – International Society for Optics and Photonics, 1998. – Т. 3465. – С. 193-199.
- [10] Žak D. et al. Implementation of RuO₂-glass based thick film resistors in cryogenic thermometry //Measurement Science and Technology. – 2005. – Т. 17. – №. 1. – С. 22.