

УДК 520.8.056

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИЁМНИКИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ, АЭРОСТАТНЫХ И НАЗЕМНЫХ СУБТЕРАГЕРЦОВЫХ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ

Ю. Ю. Балега¹, А. М. Барышев², Г. М. Бубнов^{3,4}, В. Ф. Вдовин^{3,4,5}, С. Н. Вдовичев⁴,
А. А. Гунбина^{3,4,6*}, П. Н. Дмитриев⁶, В. К. Дубрович⁷, И. И. Зинченко^{3,8},
В. П. Кошелев^{5,6}, С. А. Лемзяков^{9,10}, Д. В. Нагирная⁶, К. И. Рудаков^{2,6},
А. В. Смирнов⁵, М. А. Тарасов⁶, Л. В. Филиппенко⁶, В. Б. Хайкин^{7,11}, А. В. Худченко^{5,6},
А. М. Чекушкин⁶, В. С. Эдельман⁹, Р. А. Юсупов⁶, Г. В. Якопов¹

¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, п. Нижний Архыз, Россия

² Астрономический институт Университета Гронингена, г. Гронинген, Нидерланды

³ Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород;

⁴ Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород;

⁵ Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, г. Москва;

⁶ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва;

⁷ Санкт-Петербургский филиал САО РАН, г. Санкт-Петербург;

⁸ Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород;

⁹ Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, г. Москва;

¹⁰ Московский физико-технический институт, г. Москва;

¹¹ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет им. Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

В статье дан обзор как собственных оригинальных результатов разработки сверхпроводниковых приёмников для субтерагерцовой астрономии, так и основных лидирующих концепций мирового приборостроения в этой сфере. Проведённый анализ актуальных астрономических задач, исследований микроволнового астроклимата и задел в создании аппаратуры для субтерагерцовых радиоастрономических наблюдений обосновывают необходимость и возможность реализации в России крупного инфраструктурного проекта создания субтерагерцового инструмента, а также активизации реализации осуществляющихся в настоящее время проектов «Миллиметрон» и «Суффа». Представлены следующие результаты:

1) разработаны и апробированы сверхпроводниковые когерентные приёмники и широкополосные детекторы субтерагерцового диапазона частот для космических, аэростатных и наземных радиотелескопов;

2) созданы, изготовлены и исследованы сверхчувствительные приёмные системы на основе туннельных структур сверхпроводник—изолятор—сверхпроводник и сверхпроводник—изолятор—нормальный металл—изолятор—сверхпроводник (СИНИС);

3) реализован приёмник на основе СИНИС-детекторов с микроволновой системой считывания для таких структур;

4) разработаны методы изготовления высококачественных туннельных структур Nb/AlO_x/Nb и Nb/AlN/NbN на основе плёнок ниобия с плотностью тока до 30 кА/см². В диапазоне от 200 до 950 ГГц созданы и испытаны приёмники с шумовой температурой, которая лишь в 2÷5 раз превышает квантовый предел.

ВВЕДЕНИЕ

Миллиметровая и субмиллиметровая астрономия в настоящее время во многом определяют передний край астрофизических исследований. Среди наиболее ярких достижений последнего

* aleksandragunbina@mail.ru

времени надо отметить получение изображения «тени» сверхмассивной чёрной дыры в галактике M87 [1]. Эта работа была выполнена совместными усилиями обсерваторий ряда стран мира благодаря объединению миллиметровых радиотелескопов в единую сеть под названием «Телескоп горизонта событий» [2]. Большое количество новых важных результатов было получено и в таких областях, как исследования ранней Вселенной и далёких галактик, изучения процессов образования звёзд и планет, изучение объектов Солнечной системы и прочее.

Радиоастрономия и разработка аппаратуры для радиоастрономических исследований все 75 лет развития радиофизического факультета ННГУ им. Н. И. Лобачевского были ключевыми и, несомненно, успешными направлениями деятельности его коллектива. Эти работы выполнялись на самом высоком мировом уровне и на основе широкой российской и международной коллаборации [3–12]. Работы, начатые в дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн, следуя мировым тенденциям, продвигались в миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны. Исследования и разработки в диапазоне частот от 100 до 1 000 ГГц в последние годы не только дают обширный материал для астрофизиков, но и диктуют новые вызовы разработчикам аппаратуры этого диапазона.

Существенное атмосферное поглощение волн рассматриваемого диапазона вынуждает детально изучать условия их распространения в местах расположения телескопов и размещать обсерватории в высокогорье, на самолётах, воздушных шарах и даже на космических аппаратах [13–17].

В статье представлена астрофизическая мотивация развития субтерагерцовой астрономии и дан обзор некоторых оригинальных результатов разработок необходимой для неё аппаратуры, осуществлённых её авторами. Уже в 60-х годах А. Г. Кисляковым [18] было показано, что только глубокое криогенное охлаждение аппаратуры позволит достичь уровней чувствительности, требуемых для решения стоящих астрономических задач. В ИРЭ им. В. А. Котельникова АН СССР в те же годы были заложены основы сверхпроводниковой приёмной аппаратуры, впоследствии развивавшиеся в тесном сотрудничестве с представителями нижегородской радиофизической школы [19–21].

Разработка сверхчувствительных приёмных устройств субтерагерцового диапазона сегодня является одним из наиболее успешно развиваемых направлений сверхпроводниковой электроники. Активно используются как когерентные приёмники со смесителями на основе туннельных переходов сверхпроводник—изолятор—сверхпроводник (СИС), так и некогерентные широкополосные детекторы, использующие различные эффекты в сверхпроводниковых тонкоплёночных структурах. СИС-смесители являются наилучшими входными устройствами для когерентных приёмников на частотах от 0,1 до 1,2 ТГц, их шумовая температура ограничена лишь квантовыми эффектами. Работа СИС-смесителей в квантовом режиме была теоретически проанализирована в фундаментальной работе [22], в которой были выведены все основные соотношения для смесителя на основе эффекта туннелирования квазичастиц под воздействием фотонов и предсказана возможность работы такого смесителя с усилением. В работе [23] обоснована методика определения шумовой температуры СИС-смесителя в квантовом режиме с учётом принципа неопределённости Гейзенберга и показано, что шумовая температура СИС-смесителя в двухполосном режиме теоретически ограничена только квантовым значением $hf/(2k_B)$ (здесь h — постоянная Планка, f — частота принимаемого излучения, k_B — постоянная Больцмана). Именно поэтому гетеродинные СИС-приёмники используются в большинстве как наземных, так и космических радиотелескопов [24–32].

Уже в конце прошлого века были разработаны исключительно чувствительные смесители диапазона в окрестности 250 ГГц (их шумовая температура составляла 10–15 К) [25, 33], однако для получения предельно низких шумовых температур требовалась механическая настройка волноводного замыкателя, что ограничивало их широкое применение. В дальнейшем были со-

зданы СИС-смесители, которые обеспечивают низкие шумовые температуры в широкой входной полосе без механических настроек. В качестве примера можно привести приёмники высокочастотного диапазона самого большого многоэлементного радиоастрономического интерферометра современности — Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), [28–31, 34, 35], который включает в себя в 10 частотных диапазонов, лежащих от 35 до 950 ГГц. Все высокочастотные диапазоны оборудованы СИС-смесителями: В3 (84÷116 ГГц), В4 (125÷163 ГГц), В5 (163÷211 ГГц), В6 (211÷275 ГГц), В7 (275÷373 ГГц), В8 (385÷500 ГГц), В9 (602÷720 ГГц) и В10 (787÷950 ГГц). Шумовая температура приёмника диапазона В6 с разделением полос составляет 40÷60 К (в однополосном режиме; полоса промежуточной частоты 4÷12 ГГц) [28], двухполосная шумовая температура приёмника диапазона В9 растёт от 60 до 120 К при изменении частоты гетеродина от 610 до 710 ГГц (полоса промежуточной частоты 4÷12 ГГц) [29].

Отметим также, что гетеродинный приёмник Heterodyne Instrument for the Far Infrared в составе космической обсерватории «Гершель» [32] включал в себя 5 СИС-приёмников диапазонов 480÷640, 640÷800, 800÷960, 960÷1 120 и 1 120÷1 250 ГГц; двухполосная шумовая температура приёмников составляла от 50 до 1 000 К соответственно. СИС-приёмники будут активно использоваться в проекте Роскосмоса «Миллиметрон» [37] для проведения исследований астрономических объектов как со сверхвысокой чувствительностью в режиме одиночного телескопа, так и с беспрецедентно высоким угловым разрешением в режиме наземно-космического интерферометра.

Активное развитие технологии СИС-приёмников продолжается и по сей день, его ключевые направления связаны с созданием матричных приёмников [37, 38], с расширением приёмного диапазона практически до октавы [39], а также с расширением промежуточной полосы приёмника [40] и реализацией режима разделения полос на высоких частотах [41, 42].

В качестве широкополосного прямого детектора авторы исследуют чувствительные элементы на основе структур сверхпроводник—изолятор—нормальный металл—изолятор—сверхпроводник (СИНИС). В широком смысле термин «СИНИС-структуры» включает в себя множество устройств [43–45]: от термометров [46–48] и электронных охладителей [49–52] до различных детекторов — андреевский болометр [53–55], болометр на холодных электронах [56–57], СИНИС-болометры [58, 59], СИНИС-детекторы [60, 61] и СИНИС-детекторы с подвешенным поглотителем и высокой квантовой эффективностью [62, 63].

Идея андреевского приёмника активно развивалась в 90-х годах и на тот момент являлась одной из наиболее перспективных концепций для астрономических исследований. Однако в работе [55] было показано, что измеренная на постоянном токе мощность, эквивалентная шуму, составляет $5 \cdot 10^{-18}$ Вт/Гц^{1/2} и значительно ухудшается (до 10^{-14} Вт/Гц^{1/2}) при облучении сигналом с частотой 300 ГГц, а вольтваттная чувствительность падает до 10^6 В/Вт. Такое ухудшение основных характеристик приёмника при облучении внешним сигналом объясняется тем, что на частоте выше энергетической щели сверхпроводника (т. е. более 70 ГГц для алюминия) контакты сверхпроводник—нормальный металл становятся «прозрачными» для излучения. В итоге андреевские контакты были заменены на ёмкостные (переходы сверхпроводник—изолятор—нормальный металл) и появился детектор типа СИНИС. В настоящее время существует перспектива дальнейшего развития андреевского детектора путём замены алюминиевых берегов на берега из нитрида ниобия, что позволит расширить диапазон работы такого детектора до 1 ТГц.

Следующие 20 лет шло активное развитие идеологии детекторов на основе СИНИС-структур: в работах [60, 61] продемонстрированы различные режимы работы таких детекторов и, в отличие от [56], оценка характеристик уже идёт не на основе уравнения теплового баланса, не учитывающего квантовый характер поглощения, а на основе кинетического уравнения и интегралов столкновений. В работе [64] экспериментально подтверждено, что эффект электронного охлаждения не

даёт ожидаемого повышения чувствительности детектора. Исследованы различные конструктивные особенности таких структур [65] и установлено, что для нормальной работы необходимо формировать сверхпроводящие электроды большого объёма для разбавления горячих квазичастиц, чтобы избежать перегрева сверхпроводника. Высокая квантовая эффективность (15 электронов на квант излучения 350 ГГц) может быть достигнута путём создания «подвешенного» (оторванного от подложки) поглотителя [63]. На сегодняшний день достигнуты следующие характеристики: широкий динамический диапазон (30 дБ), что необходимо для работы в условиях высокой фоновой нагрузки (десятки пиковатт); вольт-ваттная чувствительность вплоть до 10^9 В/Вт, мощность, эквивалентная шуму, не более 10^{-16} Вт/Гц^{1/2} и может быть снижена путём модернизации системы считывания. Такие характеристики отвечают требованиям для использования на наземных высокогорных и баллонных телескопах, но в настоящее время ещё не представлено практической реализации СИНИС-детекторов на обсерваториях. В рамках работ, проводимых авторами данной статьи, предполагается впервые внедрить СИНИС-детекторы для исследований на обсерватории БТА [66, 67].

1. АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ СУБТЕРАГЕРЦОВОЙ АСТРОНОМИИ, ПРОБЛЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ И АППАРАТУРЫ

Субтерагерцовая астрономия на сегодня имеет один из самых обширных перечней научных задач, которые включают в себя наблюдения различных астрономических объектов в сочетании с развитием теоретических моделей; эти модели необходимы как для планирования экспериментов, так и для интерпретации их результатов (см. например, [68, 69]). Многие из них связаны с изучением так называемой холодной Вселенной. В основном это плотные межзвёздные газопылевые облака, как в нашей Галактике, так и в далёких объектах. Интересны они прежде всего тем, что в них происходит процесс звёздообразования, многие аспекты которого до сих пор не вполне понятны. Субтерагерцовый диапазон чрезвычайно насыщен спектральными линиями, отвечающими в основном переходам между вращательными уровнями молекул с относительно низкой энергией возбуждения. Наряду с изучением холодной Вселенной, субтерагерцовая астрономия вносит неоценимый вклад и в исследования объектов, характеризующихся чрезвычайно высоким энерговыделением, таких как активные ядра галактик, которые, судя по всему, представляют собой аккрецирующие сверхмассивные чёрные дыры. Именно в этом диапазоне удаётся реализовать требуемое сверхвысокое угловое разрешение, а также снизить влияние эффектов рассеяния волн вдоль луча зрения. Большие надежды здесь возлагаются на проект «Миллиметрон» [69].

Очень важным для астрофизики является вопрос об образовании первых звёзд и галактик. Здесь возникает проблема исследования «тёмных веков» Вселенной — промежутка времени между эпохой рекомбинации и рождением первых звёзд. Пока нет никакой наблюдательной информации об этом периоде. Как представляется, единственный способ получить такую информацию — поиск искажений в спектре микроволнового реликтового фона (Cosmic Microwave Background, СМВ), создаваемых простыми молекулами, которые, согласно имеющимся моделям, уже должны присутствовать во Вселенной в это время [70]. Правда, ожидаемые искажения чрезвычайно малы. Одной из наиболее перспективных молекул является ион HeH^+ [71–73], который только недавно был надёжно зарегистрирован в космосе [74]. Поиск линии $J = 1 - 0$ иона HeH^+ в спектре далёкого квазара при красном смещении $z = 6,42$ выявил деталь в спектре с отношением сигнал/шум около 3 [75], что не позволяет говорить о её достоверном обнаружении.

Спектр фона может быть искажён и по другим причинам — за счёт рассеяния фотонов на горячей плазме и вследствие энерговыделения в дорекомбинационную эпоху [76]. Эти искажения также чрезвычайно слабы.

Одна из важнейших задач в исследованиях Вселенной — поиск проявлений первичных гравитационных волн, которые возникают в инфляционных моделях в первые мгновения её жизни. Единственным наблюдательным проявлением этих волн, как сейчас представляется, является В-мода поляризации микроволнового фона [77]. Помимо первичных гравитационных волн, В-мода может возникать вследствие гравитационного линзирования и рассеяния на пыли в Галактике. Эта компонента измерена в ряде экспериментов [78]. Однако задача поиска излучения с такой поляризацией, обусловленной первичными гравитационными волнами, остаётся одной из важнейших.

Изучение ранней Вселенной требует рафинированных методов и идёт по нескольким направлениям. Одним из самых развитых в настоящее время является метод статистического описания спектра мощности первичных флуктуаций температуры космического микроволнового фона. Кроме того, используется метод исследования глобальных характеристик частотного спектра СМВ, несущих информацию о глобальном энерговыделении в эпоху $z < 100\,000$. Основным источником информации — спектральные искажения в области субтерагерцовых волн. Информацию о параметрах ранней Вселенной также можно получить, исследуя пространственное распределение галактик.

Несмотря на современные достижения в области создания инструментов для субтерагерцовой астрономии, некоторые направления исследований остаются совершенно не задействованными в эксперименте. В частности, речь идёт о поиске и изучении первичных мелкомасштабных спектрально-пространственных флуктуациях интенсивности СМВ, формирующихся в эпоху рекомбинации первичного гелия и водорода при красных смещениях примерно $6\,000 \div 1\,000$. На сегодняшний день по результатам последних исследований миссии «Planck» [79] имеется карта распределения яркости СМВ в виде пятен с различными амплитудами и пространственными масштабами. Они расположены в некотором интервале расстояний от нас. По своему внешнему виду и физическим основаниям эту область можно считать неким «третьим» небом — после «первого» неба (атмосферы Земли) и «второго» неба (области нахождения звёзд и галактик).

Для исследования частотного спектра отдельных пятен на этой карте наиболее очевидным и перспективным подходом является спектроскопия сравнительно высокого разрешения в сочетании с изучением отдельных флуктуаций — поиск и изучение спектрально-пространственных флуктуаций температуры СМВ. В области теории таких флуктуаций имеется уже достаточно большой задел [80–84] по различным аспектам физических процессов и их количественного расчёта. В частности, достаточно подробно описана картина пространственного и спектрального распределения внутри отдельного протообъекта [80–84]. Распределение яркости (интенсивности) по радиусу флуктуации для достаточно малых начальных размеров протообъектов имеет практически универсальный вид ввиду того, что оно формируется на стадии последнего рассеяния в эпоху рекомбинации водорода [85, 86]. До этого момента излучение протообъекта заперто вблизи него из-за большой оптической толщины по томсоновскому рассеянию на электронах.

Ещё одной важной особенностью этих флуктуаций является их суммирование вдоль луча зрения при блендировании. В случае континуального планковского спектра каждой отдельной флуктуации в силу одинаковой зависимости частоты фотонов и температуры от красного смещения z результат суммирования будет усредняться. Каждая флуктуация, лежащая на луче зрения, имеет свою систему спектральных деталей, отвечающих величине z этой флуктуации. При суммировании такие детали не будут налагаться друг на друга. Таким образом, может быть получена полная трёхмерная картина распределения протообъектов. Более детальный вид спектра отдельной флуктуации определяется взаимодействием излучения с атомами водорода и гелия в резонансных линиях лаймановской серии и люминесценцией. Первый механизм даёт эффект в виновской области СМВ и имеет вид характерных скачков [80, 81]. Второй механизм

даёт искажения в рэлей—джинсовском [82–84] крыле СМВ. Спектральные полосы определяются размерами начальной флуктуации и в нашем случае будут порядка нескольких процентов от центральной частоты. Амплитуда искажений задаётся начальной интенсивностью флуктуации и квантовой эффективностью перераспределения спектра.

Решение перечисленных задач требует разработки и изготовления спектральных гетеродинами, фильтровых и болометрических приёмников, предназначенных для работы в окнах прозрачности атмосферы в наземных инструментах, и без этих ограничений для космических и баллонных инструментов. В частности, для задач изучения ранней Вселенной желательно иметь спутник, подобный готовящимся в рамках миссий «Миллиметрон» [17, 36], JWST [87] и других, однако можно ограничиться и спутником на околоземной орбите ($500 \div 1\,000$ км высоты) со сравнительно небольшим телескопом (диаметр 1,5 м) с пространственным разрешением $4 \div 5$ минут дуги на пиксель матрицы и приёмной матрицей в диапазоне $0,5 \div 1,2$ ТГц. Матричный приёмник должен иметь спектральное разрешение $5 \div 10$ ГГц и максимальную возможную чувствительность. В принципе, подобный эксперимент можно проводить на приёмной системе наземного базирования, аналогичной описанной выше. В этом случае она должна быть расположена на максимальной возможной высоте в горах с хорошим астроклиматом (Тибет, Гималаи, Памир, Якутия).

Уход в космос и на борт иных летательных аппаратов: баллонов, самолётов, космических кораблей — для субтерагерцового диапазона предопределён большим атмосферным поглощением этих волн, которому посвящено много исследований и публикаций. Однако вопрос его изучения, именуемого в профессиональной среде исследованием астроклимата [88] в субтерагерцовом диапазоне, а также разработка специализированного оборудования и совершенствование методик являются сегодня весьма актуальными. Эти исследования также были начаты А. Г. Кисляковым с соавторами. Последние результаты, полученные авторами данного обзора, кратко представлены ниже. Ими показано, что основной фактор астроклимата в субтерагерцовом диапазоне — это интегральная прозрачность атмосферы (так называемая оптическая толщина), обусловленная поглощением волн этого диапазона в парах воды и кислороде [89]. Это несколько отличает понятия микроволнового и оптического астроклимата; в последнем роль кислорода незначительна.

Выбор частотного диапазона в проводимых исследованиях определяется рабочим диапазоном обсерватории и привязан к окнам прозрачности, т. е. к локальным минимумам спектра поглощения, в которых и предполагается или уже ведётся работа обсерватории. В ИПФ РАН и ЗАО НПП «Гиком» по заказу НГТУ им. Р. Е. Алексеева был разработан прибор «МИАП-2» (Микроволновый измеритель атмосферного поглощения двухканальный). Он позволяет измерять оптическую толщину методом атмосферных разрезов в окнах прозрачности в районах 2 и 3 мм в автоматическом режиме [90]. Методика и оборудование подвергаются непрерывной модернизации [91, 92]. Начиная с 2012 года проведено 11 экспедиций, в рамках которых исследована статистика интегральной прозрачности более 20 площадок, на которых возможно строительство радиотелескопа субтерагерцового диапазона [93].

С точки зрения астроклимата, диссипация волн субтерагерцового диапазона складывается из поглощения в парах воды, «сухого» поглощения, а также рассеяния и поглощения в облаках и тумане [90, формула (2)]. Сухое поглощение привязано к высоте местности и немного меняется с температурой, а поглощение в парах воды сильно зависит от метеорологических условий и локального климата местности, поэтому подвержено суточным и сезонным вариациям. Наиболее универсальной характеристикой астроклимата является интегральное влагосодержание (Precipitable Water Vapor, PWV), определяющее основную вариативную составляющую. Зная PWV и коэффициенты пересчёта PWV в оптическую толщину, можно оценить прозрачность атмосферы на любой частоте субтерагерцового диапазона с использованием апробированных мо-

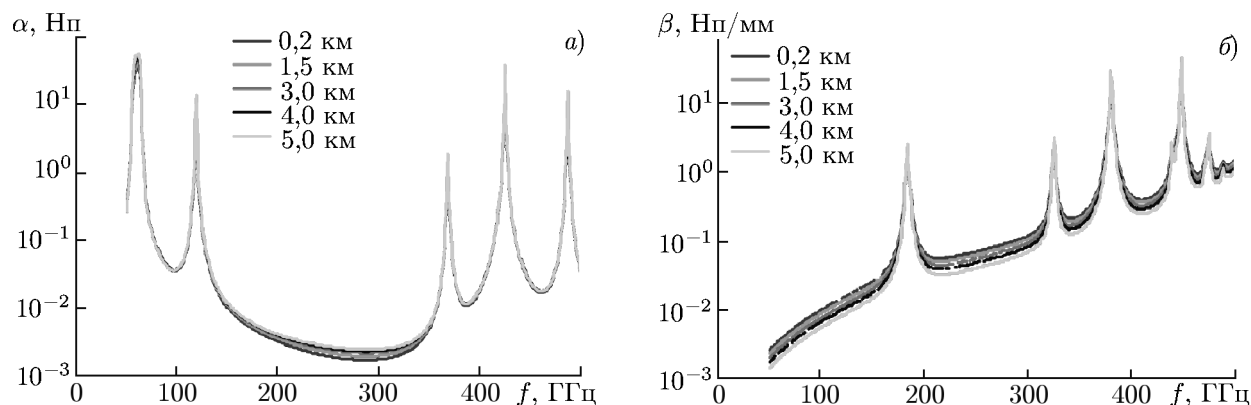


Рис. 1. Спектральные характеристики коэффициентов удельного поглощения в субтерагерцовом диапазоне с различной высоты: *a* — спектр коэффициента сухого поглощения, приведённого к уровню моря (α); *б* — спектр коэффициента удельного поглощения в парах воды (β)

делей поглощения, например MPM Liebe [94], HITRAN [94] или GEISA [96].

Спектры коэффициента сухого поглощения, приведённого к уровню моря (α), и коэффициента удельного поглощения в парах воды (β) показаны на рис. 1. В качестве примера для расчёта спектра по модели MPM Liebe взят характерный зимний профиль атмосферы в равнинной местности по данным метеозондирования. Вариации коэффициентов поглощения особенно видны в окнах прозрачности. Удалось выяснить, что в зимних условиях с малым PWV ($3 \div 5$ мм) оба коэффициента падают с высотой. Во влажных летних условиях ($PWV > 15$ мм) коэффициент α растёт, а β падает с высотой. Чем точнее сведения об этих коэффициентах, тем точнее можно рассчитывать оптическую толщину в нужных диапазонах частоты по PWV. В связи с этим имеется потребность в проведении детальных и прямых исследований на площадках предполагаемого строительства новых телескопов субтерагерцового диапазона, а также в дальнейшем развитии аппаратуры и методик, особенно дополнении имеющейся аппаратуры прямым измерителем атмосферного поглощения в окнах прозрачности в окрестностях 1,3 и 0,87 мм.

2. МАЛОШУМЯЩИЙ СИС-СМЕСИТЕЛЬ ДИАПАЗОНА 211÷275 ГГц ДЛЯ РАДИОАСТРОНОМИИ

Команда авторов с 80-х годов успешно занимается созданием сверхпроводниковых приёмников миллиметрового диапазона длин волн и получила первый опыт успешной эксплуатации своего СИС-приёмника на частоте 0,1 ТГц на радиотелескопе РТ-25 × 2 в Зимёнках. Эти работы были выполнены по инициативе А. Г. Кислякова [97]. Успешное сотрудничество с нижегородской радиофизической школой не прекращалось и в последующие годы. Сейчас оно направлено на развитие аппаратуры для строящегося телескопа «Суффа» [72].

Для успешной реализации уже начатых радиоастрономических проектов, таких как «Суффа» и программа Роскосмоса «Миллиметрон», требуются смесители с шумовой температурой менее 50 К в частотном диапазоне 211÷275 ГГц. Для решения этой задачи была разработана топология смесительного элемента, проведены моделирование и оптимизация его характеристик, изготовлены экспериментальные структуры Nb/AlO_x/Nb (площадь порядка 1 мкм²) с малыми токами утечки (отношение сопротивлений ниже и выше энергетической щели более 30 при температуре жидкого гелия, что близко к предельно возможному значению и требуется для получения предельно низких шумовых температур). Для достижения низкой шумовой температуры также

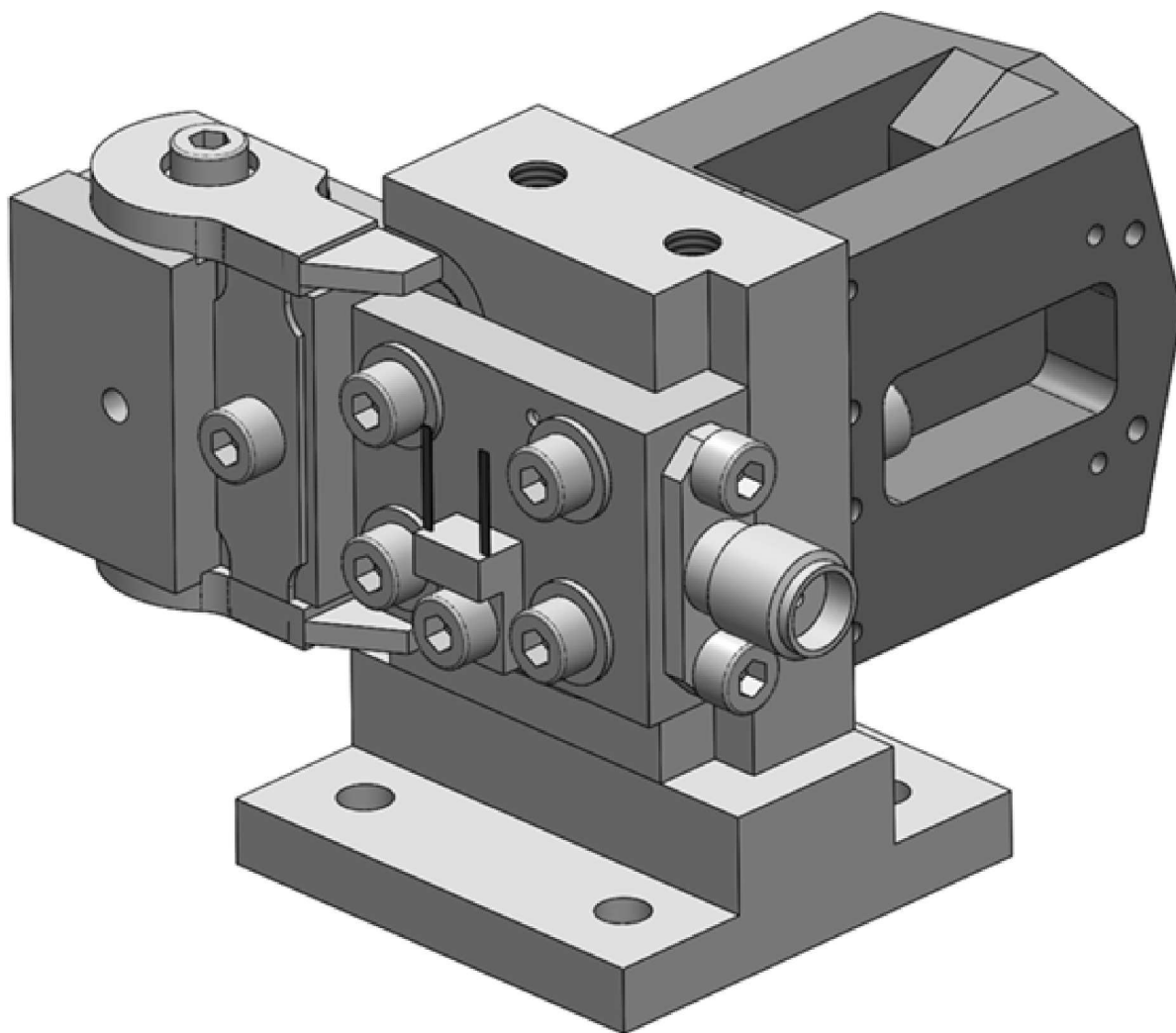


Рис. 2. Трёхмерная модель смесительного блока диапазона 211÷275 ГГц (на переднем плане видна съёмная плата блока смесителя с СИС-переходом; справа расположен выход сигнала промежуточной частоты)

необходимо компенсировать значительную ёмкость СИС-перехода ($C \approx 0,085$ пФ/мкм²). В результате импеданс структуры снижается до единиц Ом и требуется согласовать итоговый импеданс СИС-перехода на высокой частоте с импедансом волновода (который составляет величину порядка 400 Ом), что было реализовано путём использования планарной структуры, состоящей из отрезков копланарных и микрополосковых линий Nb/SiO₂/Nb [99]. Приёмный элемент изготавливался на кварцевой подложке с толщиной 125 мкм, для предотвращения утечки высокочастотного сигнала в конструкции смесительного элемента использовались заграждающие фильтры [99]. Приёмный элемент располагался перпендикулярно плоскости распространения волны в прямоугольном волноводе с сечением 500 × 1 000 мкм, он находился на расстоянии 230 мкм от замыкателя в конце волновода. Смесительный волноводный блок состоял из центральной части с волноводом, блока замыкателя, блока задания магнитного поля и входного рупора (см. рис. 2).

Вольт-амперная характеристика СИС-смесительного элемента Nb/AlO_x/Nb с площадью 1 мкм², измеренная в режиме задания напряжения, представлена на рис. 3а штрихпунктирной линией; критический ток СИС-перехода подавлен магнитным полем. Сплошной линией показана

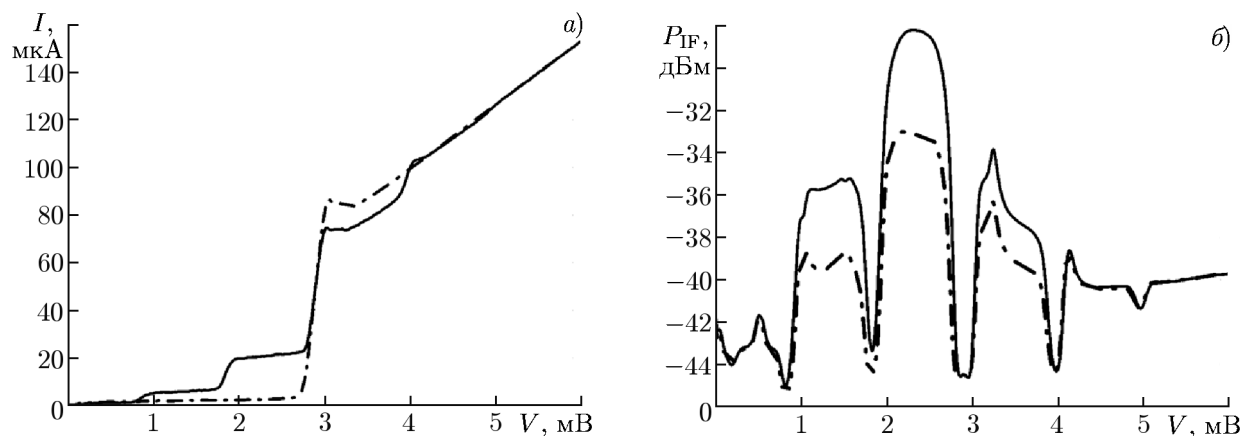


Рис. 3. Экспериментальные характеристики СИС-смесителя: (а) вольт-амперная характеристика смесительного элемента; штрихпунктирной кривой показана автономная характеристика, сплошной линией — при воздействии гетеродина на частоте 240 ГГц с оптимальной мощностью; (б) зависимости мощности выходного сигнала P_{IF} СИС-приёмника от напряжения смещения, измеренные для частоты гетеродина 240 ГГц на промежуточной частоте 6,5 ГГц при холодной (78 К) и тёплой (295 К) нагрузках на входе (штрихпунктирная и сплошная линии соответственно)

вольт-амперная характеристика при воздействии гетеродина с частотой 240 ГГц и мощностью, оптимальной для работы СИС-смесителя. Отчётливо видны квазичастичные ступени тока [100, 22], размер которых по напряжению определяется частотой гетеродина. Шумовая температура смесителя в двухполосном режиме находилась стандартным методом измерения Y -фактора; в качестве «горячей» нагрузки использовался поглотитель при 295 К, а в качестве «холодной» нагрузки — поглотитель, охлаждённый до 78 К жидким азотом. На рис. 3б показаны зависимости мощности выходного сигнала СИС-приёмника от напряжения смещения для двух нагрузок, измеренные при частоте гетеродина 240 ГГц. Поскольку отклики на рис. 3б представлены в децибелах, величина Y -фактора может быть определена путём вычитания этих двух зависимостей. Видно, что значения Y -фактора в лучших точках достигают величины 5 дБ, что соответствует шумовой температуре приёмника 24 К. В работе [73] была измерена зависимость двухполосной шумовой температуры СИС-приёмника от частоты гетеродина. Значения шумовой температуры были получены без корректировок на потери в разделителе луча и входном окне криостата, они лишь в два раза превышают величину hf/k_B в диапазоне от 240 до 265 ГГц и удовлетворяют техническим требованиям к приёмнику диапазона 211÷275 ГГц для приёмного комплекса космического радиотелескопа «Миллиметрон».

3. ИНТЕГРАЛЬНЫЙ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ ПРИЁМНИК ДИАПАЗОНА 450÷650 ГГц

При когерентном приёме сигналов одним из важнейших элементов является гетеродин; его диапазон перестройки, спектральные характеристики и диапазон согласования со смесителем влияют на характеристики устройства в целом. В ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН была предложена и апробирована концепция сверхпроводникового интегрального приёмника [101, 102], которая основана на принципиально новом подходе — интеграции сверхпроводникового генератора гетеродина с квантовым смесителем на квазичастичной нелинейности туннельных СИС-переходов и сверхпроводниковой антенной в одной микросхеме. Последняя изготавливается на кремниевой подложке с толщиной 0,5 мм методами современной микроэлектроники и содержит сверхпро-

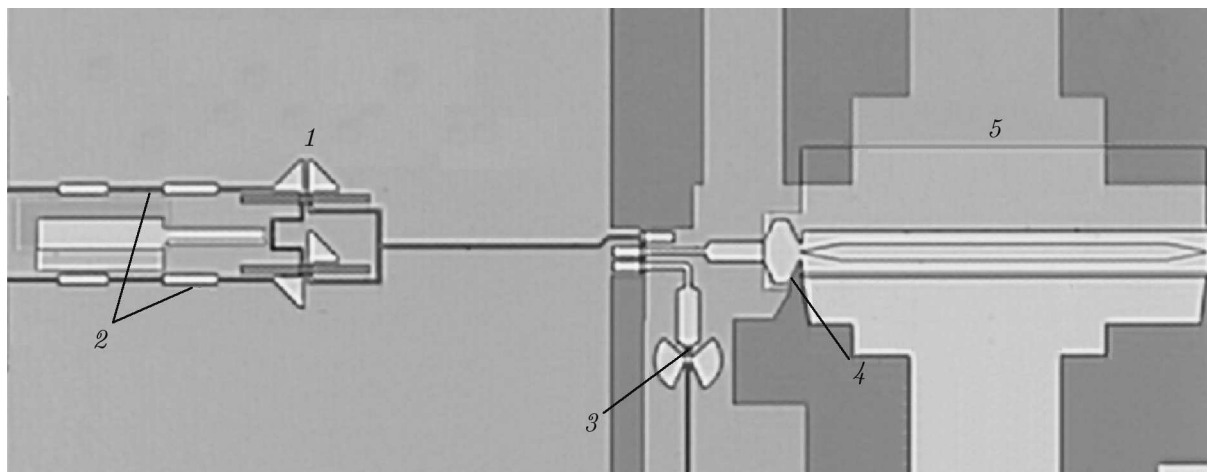


Рис. 4. Фотография центральной части микросхемы интегрального приёмника с двойной щелевой антенной (показана область с размером $1,2 \times 0,5$ мм): 1 — двойная щелевая антенна с СИС-смесителем (площадь перехода $0,8 \text{ мкм}^2$), 2 — режекторный фильтр промежуточной частоты, 3 — гармонический СИС-смеситель с площадью 1 мкм^2 , 4 — трансформатор импеданса, 5 — гетеродин (размер перехода $400 \times 16 \text{ мкм}$)

водниковый смеситель, иммерсионную линзовую дипольную или щелевую антенну, сверхпроводниковый гетеродин и дополнительный смеситель для системы фазовой автоподстройки частоты гетеродина. Размер схемы с контактными площадками составляет 4×4 мм. Сверхпроводниковые интегральные генераторы гетеродина на основе распределённых джозефсоновских переходов позволяют реализовать уникальное сочетание массогабаритных и частотных характеристик и до сих пор не имеют аналогов.

На рис. 4 представлена фотография центральной части микросхемы приёмника с двойной щелевой антенной, разработанной для исследования атмосферы Земли с борта высотного аэростата (международный проект TELIS) [103–107]. Излучение сверхпроводникового генератора гетеродина через согласующую схему (трансформатор импеданса) передаётся в микрополосковую линию с импедансом около 20 Ом, а затем при помощи делителя мощности (который также разделяет смесители и генератор по постоянному току смещения) распределяется между двумя СИС-смесителями. Спектральная характеристика сверхпроводникового генератора гетеродина имеет лоренцевскую форму, типичная полуширина которой составляет от сотен килогерц до десятков мегагерц в зависимости от его конструкции и выбора рабочей точки. Применение генераторов с широкой автономной линией в качестве гетеродина в приёмниках с высоким спектральным разрешением требует использования широкополосной системы автоподстройки частоты гетеродина. Для формирования сигнала промежуточной частоты системы фазовой автоподстройки частоты (400 МГц) в схему приёмника добавлен гармонический СИС-смеситель. Полоса этой системы составляет величину порядка 15 МГц, что позволяет при ширине автономной линии сверхпроводникового генератора гетеродина до 5 МГц обеспечить спектральное качество (отношение мощности в спектральном пике этого генератора с фазовой автоподстройкой частоты к его полной мощности) выше 50 %. На рис. 5 показаны спектральные характеристики стабилизированного сверхпроводникового генератора гетеродина, измеренные относительно опорного синтезатора.

Было проведено 4 успешных запуска спектрометра TELIS на борту высотного аэростата совместно со спектрометром MIPAS-B. Инструмент продемонстрировал возможность работы в экстремальных условиях (температура -90°C) и позволил собрать большое количество научной информации, подтверждающей высокое спектральное разрешение и чувствительность прибора.

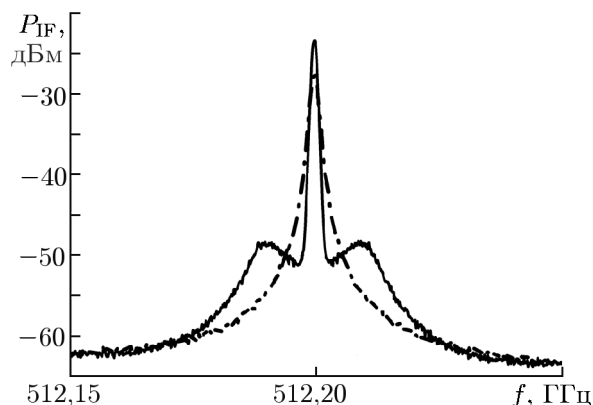


Рис. 5. Спектральные характеристики (мощность сигнала P_{IF} промежуточной частоты) сверхпроводникового генератора гетеродина на частоте 512,2 ГГц, измеренные относительно опорного синтезатора (полоса 100 МГц, разрешение спектроанализатора 1 МГц). Штрихпунктирной линией показан спектр излучения, измеренный в режиме частотной стабилизации (ширина автономной линии 1,5 МГц); сплошной линией — спектр, измеренный в режиме фазовой автоподстройки частоты (спектральное качество 93,5 %)

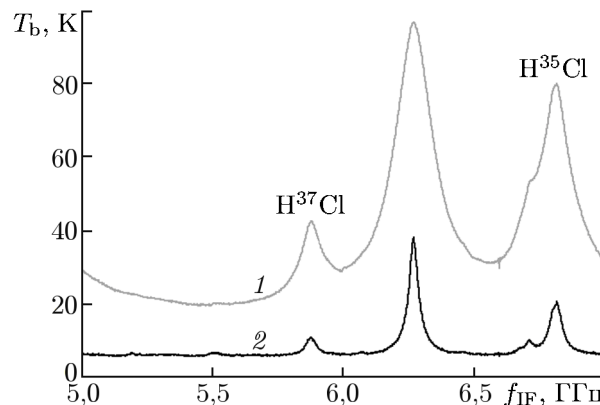


Рис. 6. Спектры двух изотопов HCl и озона (T_b — яркостная температура, f_{IF} — промежуточная частота), измеренные с помощью сверхпроводникового интегрального приёмника с борта высотного аэростата (проект TELIS); частота гетеродина 619,1 ГГц. Инструмент находился на высоте 38 км, измерения выполнены при двух направлениях оси телескопа: по касательной на высоте 25 км (кривая 1) и поднятой вверх на 6° относительно горизонта (2)

Было записано несколько сотен лимбовых сканов; зарегистрированы спектры газовых составляющих атмосферы Земли. В ходе полёта на высотном аэростате получены спектры соединений хлора, брома и других примесей, ответственных за разрушение озонового слоя в атмосфере Земли; в течение полёта измерялись суточные вариации различных компонентов атмосферы. Исследованы дневные циклы концентрации монооксида хлора, образующейся в процессе каталитического разложения озона под воздействием хлорфторуглеродов. В диапазоне высот 12÷36 км были получены также спектры изотопов различных веществ, в том числе воды и соляной кислоты HCl (см. рис. 6) [105–107]. Были оценены концентрации наблюдаемых газов, они составили 0,5 и 1,5 части на миллиард по объёму (parts per billion by volume, ppbv) для линий $H^{37}Cl$ и $H^{35}Cl$ соответственно. Впервые в терагерцовом диапазоне были зарегистрированы спектры BrO, интенсивность сигнала в этом случае отвечала всего лишь 0,3 К [105–107], что соответствует предельно малой концентрации в несколько частей на триллион по объёму (pptv). Созданный на основе полётного инструмента интегральный спектрометр был успешно использован в лаборатории для спектроскопии газов и исследования излучения из вновь создаваемых сверхпроводниковых генераторов субтерагерцового диапазона [108, 109].

4. СИС-СМЕСИТЕЛЬ ДЛЯ ДИАПАЗОНА 800÷950 ГГц

В субтерагерцовом диапазоне поглощение атмосферы сильно возрастает с увеличением частоты, что обусловлено в основном наличием водяного пара. Даже в таком уникальном месте, как плато Чакантор в Чили, расположенном в пустыне на высоте 5 км, где установлены передовые терагерцовые радиотелескопы ALMA [110] и APEX [86], прозрачность атмосферы в зените на частотах 800÷950 ГГц крайне редко превышает 0,6 даже в лучшее время суток. Ввиду этого отношение сигнал/шум при наблюдении астрономических объектов подвержено сильному влиянию шумов атмосферы. Использование приёмников с разделёнными полосами позволяет уменьшить

вклад атмосферных шумов в два раза по сравнению с двухполосными приёмниками. Именно уменьшение шумов тёплой оптики и атмосферы в 2 раза стало ключевым аргументом для установки на интерферометр ALMA приёмников с разделением полос на частотах до 500 ГГц. Для более высокочастотных диапазонов всё ещё используются двухполосные приёмники, т. к. в момент конструирования интерферометра технологии не были достаточно развиты, чтобы сделать приёмники с разделением полос.

Недавно в рамках международного сотрудничества с нашим участием впервые был успешно продемонстрирован волноводный СИС-смеситель с разделением полос для диапазона 800÷950 ГГц [42]. Однополосная шумовая температура составляет от 450 до 900 К, а эффективность разделения полос превышает 15 дБ для 95 % диапазона. СИС-смесители для данного приёмника были изготовлены на основе туннельных переходов Nb/AlN/NbN с высокой плотностью тока, до 30 кА/см². Для обеспечения низких потерь детектируемого терагерцового сигнала нижний электрод подводящей микрополосковой линии был сформирован из плёнки NbTiN, имеющей высокую критическую температуру, более 14 К, и, как следствие, крайне малое сопротивление, до частот порядка одного терагерца. Толщина этого слоя составляет около 300 нм. Поверх него был напылён слой изолятора SiO₂ с толщиной 250 нм, а сверху уже осаждена плёнка Al с толщиной порядка 500 нм, из которой сформирован верхний электрод микрополосковой линии. Туннельный СИС-переход был размещён поверх нижнего электрода микрополоска так, что слои Nb и NbTiN находились в контакте, при этом верхний слой перехода из NbN соприкасался с алюминиевым верхним электродом. Ключевые детали технологических процессов изготовления описанных структур, а также подробности электромагнитного дизайна приведены в статьях [31, 112]. Созданные СИС-переходы имеют следующие параметры: целевое напряжение $V_g = 3,1$ мВ при температуре 4,2 К; площадь отдельного туннельного перехода около $S = 0,5$ мкм²; нормальное сопротивление сдвоенного перехода $R_n = 7$ Ом; качество туннельного перехода, определяемое подщелевым током утечки, $Q = 25$ (рассчитывается как отношение подщелевого сопротивления R_j и нормального сопротивления R_n).

Для обеспечения широкополосного отклика приёмника был выбран так называемый твин-дизайн [113], а именно микросхема с двумя СИС-переходами, которые расположены близко друг к другу на конце микрополосковой линии. Отличительной особенностью СИС-смесителей, представленных в этой статье, по сравнению с описанными ранее в работах [31] и [112], является малое изменение в настроенной структуре, которое сдвигает оптимум согласования вверх по частоте примерно на 100 ГГц. Это заметно улучшает согласование смесителя с внешним сигналом на верхних частотах требуемого диапазона и обеспечивает более равномерную шумовую температуру в интервале 800÷950 ГГц.

На рис. 7 показаны измерения шумовой температуры двух СИС-смесителей в двухполосном режиме. По оси абсцисс откладывается соответствующая частота опорного генератора. Каждая точка на графике отражает результат усреднения по промежуточной частоте в диапазоне 4÷12 ГГц. Шумовая температура измерена стандартным методом Y-фактора, описанным выше, с использованием поглотителя с температурами 300 и 78 К. Следует отметить, что на графике приведена шумовая температура, скорректированная на вклад шумов от разделителя пучка, который используется для введения сигнала опорного генератора и имеет температуру 300 К. Данный разделитель представляет собой майларовую плёнку с толщиной 12 мкм, которая имеет прозрачность, изменяющуюся от 0,89 на 800 ГГц до 0,85 на 950 ГГц. Из приведённых данных видно, что шумовая температура СИС-смесителей варьируется в диапазоне от 210 до 350 К.

Рисунок 8 демонстрирует зависимость шумовой температуры от промежуточной частоты смесителя, при этом опорный генератор излучает на частоте 837 ГГц. Из графика видно, что шумовая температура опускается до 200 К и достаточно равномерно распределена в приведённом

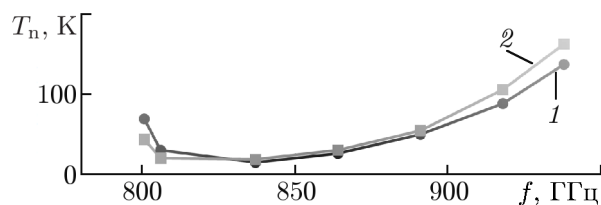


Рис. 7. Зависимость шумовой температуры T_n от частоты опорного генератора для двух СИС-смесителей (отмечены номерами 1 и 2). Данные скорректированы на вклад шумов от разделителя пучка, используемого для ввода сигнала опорного генератора и находящегося при комнатной температуре

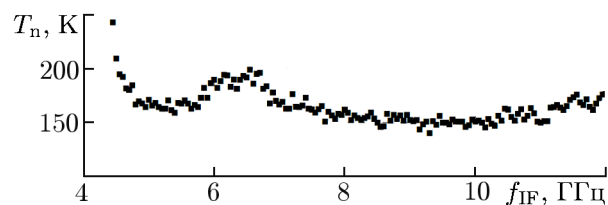


Рис. 8. Зависимость шумовой температуры от промежуточной частоты для смесителя 1 (см. рис. 7). Данные скорректированы на вклад шумов от разделителя пучка. Измерение соответствует частоте опорного генератора 837 ГГц

диапазоне. Пик на 4,2 ГГц является артефактом и связан с резонансом в усилителе промежуточной частоты. Далее, при измерениях характеристик приёмника с разделением полос, этот дефект был устранён [42].

5. НЕКОГЕРЕНТНЫЕ КРИОГЕННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Наряду с когерентными приёмниками, обеспечивающими высокоэффективные астрономические спектральные наблюдения в субтерагерцовом диапазоне, как было отмечено в разделе 1, большой интерес представляют сверхвысокочувствительные наблюдения без сохранения информации о фазе, или некогерентный приём. В настоящее время одной из самых перспективных его концепций является детектор на кинетической индуктивности. Ещё в 1973 году было показано [114], что глубокое (ниже температуры жидкого гелия) криогенное охлаждение подобных детекторов, построенных на нелинейной сверхпроводниковой индуктивности, а не на нелинейном сопротивлении и ёмкости, априори имеющих некое конечное и отличное от нуля шумящее собственное сопротивление, способно обеспечить минимальные шумы подобного детектора. Активное развитие детекторов на кинетической индуктивности различными исследовательскими группами началось в 2000-х годах (см., например, [115–117]), а на сегодня эта идея блестяще развита [118, 119] в мировой практике. Не так давно на борту баллонной обсерватории «Олимп» [120] при участии представителей нижегородской радиофизической школы успешно опробован приёмник на четыре полосы субтерагерцового диапазона, построенный на детекторах с кинетическими индуктивностями. Другой перспективный тип прямых приёмников — болометр на краю сверхпроводящего перехода [121], принцип работы которого основан на резком переходе сверхпроводящей плёнки в резистивное состояние при облучении внешним сигналом. В качестве примера применения таких болометров в обсерваториях можно привести такие крупные проекты, как SCUBA-2 [122], BICEP2, Keck и Spider CMB Polarimeters [123] или готовящуюся миссию LiteBIRD [124]. Есть и немало других конкурентных идеологий построения сверхпроводниковых детекторов субтерагерцовых волн, например болометры на горячих электронах [125] и детекторы с СИНИС-структурой [126]. В частности, болометры на горячих электронах субтерагерцового и терагерцового диапазонов, созданные отечественной командой Московского педагогического государственного университета, успешно использовались в наземных и космических обсерваториях [125]. Развитием СИНИС-концепции активно занимаются авторы данной работы, при этом именно на такой структуре проектируется субтерагерцовый приёмник для оптического телескопа БТА.

СИНИС-детекторы, которые также в некоторых режимах называют болометрами, представляют перспективный тип некогерентных приёмников субтерагерцового диапазона. Развитие та-

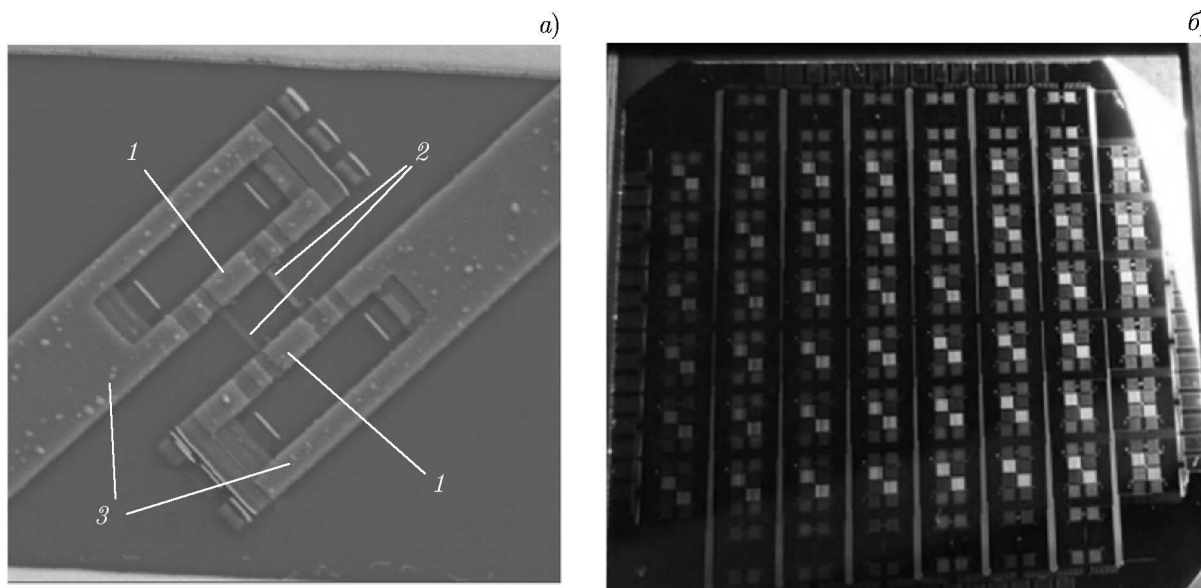


Рис. 9. СИНИС-детектор (*а*; 1 — нормальный металл—изолятор—сверхпроводник, 2 — абсорбер, 3 — сверхпроводящий электрод) и многопиксельная структура на основе таких детекторов (*б*)

ких детекторов идёт по двум направлениям. Первое состоит в создании матриц антенн для приёма в одном пикселе приходящего излучения с большой мощностью. Второе — это создание многопиксельных приёмников с высокочастотным считыванием для обеспечения частотного разделения каналов (мультиплексирования), снижения тепловой нагрузки криостата и вклада шумов системы считывания. Одиночный СИНИС-детектор и общий вид многопиксельной структуры на основе матриц таких детекторов приведены на рис. 9.

5.1. Матрица электрически малых антенн диапазона 200÷400 ГГц

Традиционно для расширения динамического диапазона и приёма в одном пикселе большой мощности применяют матрицы антенн, где мощность приходящего излучения распределяется между детекторами. Классический пример — это матрица планарных полуволновых антенн, соединённых последовательно или параллельно (в зависимости от считывающей аппаратуры) с периодом порядка длины волны [127–129]. Матрица из 10×10 антенн будет занимать площадь порядка 100 квадратов длины волны. При этом полоса пропускания будет достаточно узкой и определяться полосой одиночной антенны. Радикальным шагом для расширения полосы приёма и уменьшения занимаемой площади стало применение матриц электрически малых антенн [130, 131]. Такая конструкция приближается по своим параметрам к распределённому абсорберу. Разработаны образцы с метаматериалами для диапазона 200÷400 ГГц с внешним диаметром кольцевой антенны 56 мкм и периодом 70 мкм. Площадь матрицы из 10×10 элементов составляет 700×700 мкм. В каждую планарную антенну с размером меньше $1/10$ длины волны интегрировано два детектора на основе СИНИС-структуры. Таким образом, на площади $0,49 \text{ мм}^2$ расположено 200 детекторов, т. е. при одинаковой мощности насыщения на один детектор для матрицы метаматериалов мощность на единицу площади будет в 46 раз больше, чем в случае матрицы полуволновых колечек с диаметром 300 мкм и периодом 475 мкм. При этом пиксели матрицы изображения можно расположить существенно ближе друг к другу и разместить в фокальной плоскости в 46 раз больше пикселей.

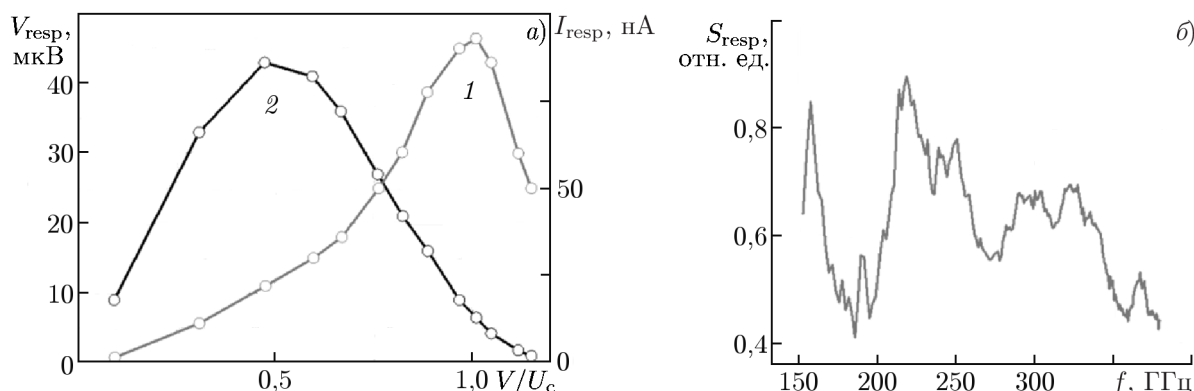


Рис. 10. Результаты экспериментальных измерений характеристик матрицы электрически малых антенн: (а) отклик по току (1) и напряжению (2) для матрицы параллельных колец в виде метаматериала при температуре 100 мК и мощности излучения 3,7 пВт (по горизонтальной оси отложено приведённое напряжение); (б) спектральный отклик

Для матрицы колец в виде метаматериалов, соединённых последовательно, отклики по напряжению составили $2,8 \cdot 10^9$ В/Вт для 30 фВт и $3,5 \cdot 10^8$ В/Вт для 2 пВт (см. рис. 10а). При измерении спектрального отклика в качестве источника использовали лампу обратной волны. Сигнал от неё, проходя через окна криостата, поступает на исследуемый образец. Спектральный отклик (см. рис. 10б) метаматериала оказывается достаточно широким и более равномерным по сравнению с матрицей стандартных кольцевых антенн, а наблюдающиеся спектральные неоднородности соответствуют потерям и отражениям в квазиоптическом тракте, включающем окна и фильтры на трёх температурных ступенях криостата. Подробная методика измерения спектрального отклика различных матриц на основе СИНИС-детекторов представлена в работе [132].

5.2. СИНИС-болومتر диапазона 90 ГГц с микроволновым считыванием

Применяемые в настоящее время криогенные детекторы с системами считывания на охлаждаемых и неохлаждаемых полевых транзисторах с собственными шумами на уровне 10 нВ/Гц^{1/2} не имеют перспектив применения в современных многопиксельных приёмных системах радиоастрономических обсерваторий. В настоящее время приёмники могут содержать до полумиллиона датчиков, как CMB Stage IV [133]. Если для такого массива датчиков установить отдельные усилители с массой 1 г на каждый канал, то масса блока усилителей составит 500 кг, при этом в криостат нужно будет завести миллион проводов. Для большого числа каналов требуется существенно более широкий диапазон частот, в несколько гигагерц. Для микроволновых детекторов на кинетической индуктивности созданы и успешно используются системы считывания с частотным разделением каналов. В качестве примера сверхвысокочастотной системы считывания и мультиплексирования можно привести описанную в статье [134], где одновременно считывается 5 000 пикселей, находящихся при температуре 250 мК.

Для применения на высокогорном телескопе БТА была разработана интегральная приёмная структура (см. рис. 11) [135], включающая СИНИС-детектор, двойную щелевую антенну на частоту сигнала 90 ГГц, сверхпроводящий копланарный резонатор, соединённый через копланарный ответвитель с копланарной линией считывания на каналы 2,0; 3,2; 4,2 и 6,0 ГГц (см. рис. 12). Выбор центральной частоты 90 ГГц обусловлен тем, что первой испытательной площадкой для разработанных структур предполагается наземный телескоп БТА [66], а прозрачность атмосферы на частотах выше 100 ГГц в этом случае значительно хуже. Полученные результаты будут

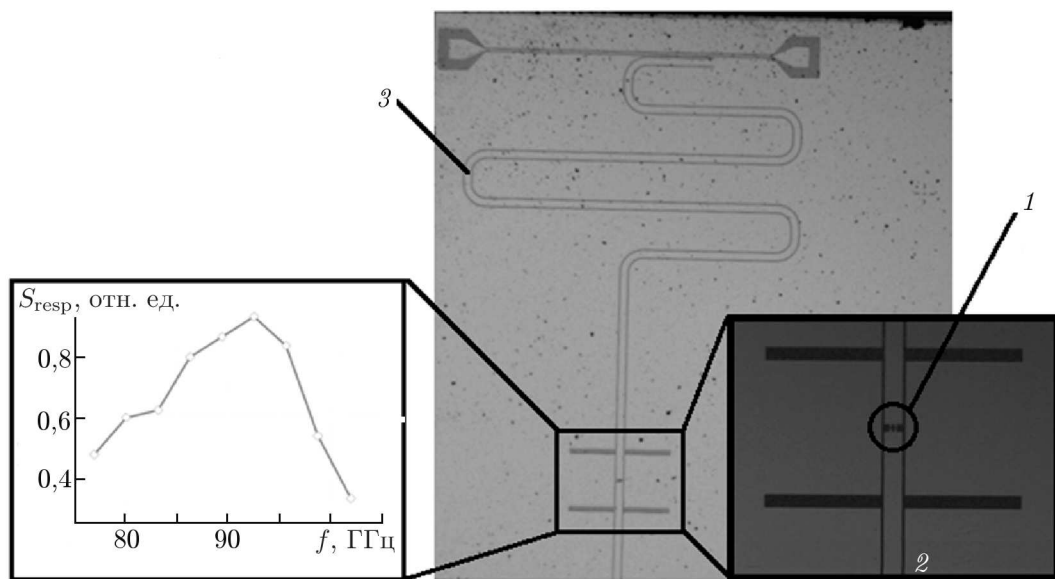


Рис. 11. СИНИС-детектор 1, интегрированный в двойную щелевую антенну 2 частотного диапазона в окрестности 90 ГГц с микроволновым считыванием [92] (3 — четверть-волновый резонатор)

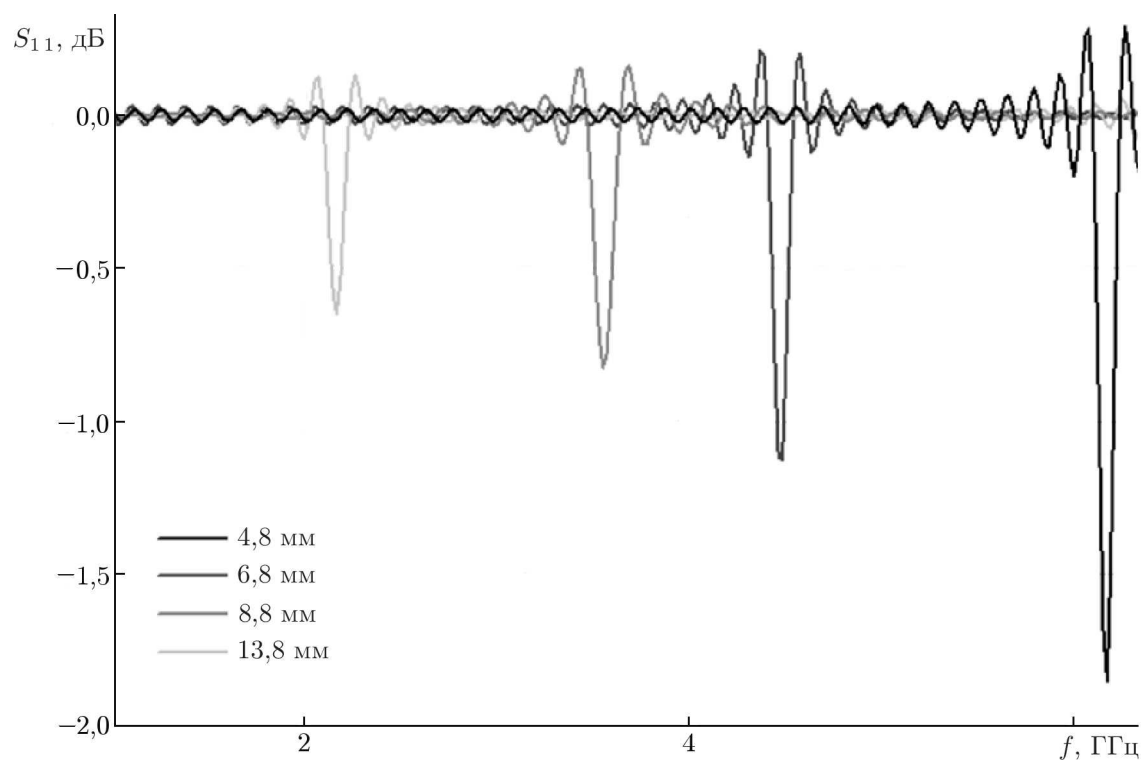


Рис. 12. Рассчитанные S_{11} -параметры для структур с различной длиной копланарного резонатора (сопротивление нагрузки 50 кОм)

использованы для разработки прототипа приёмной системы для строящегося телескопа на плато Суффа [136] и в перспективе для отечественной космической обсерватории «Миллиметрон» [137].

Резонатор был изготовлен из слоя сверхпроводящей плёнки NbN с толщиной 50 нм и расчётной кинетической индуктивностью 4 пГн на квадрат. Это позволяет значительно уменьшить

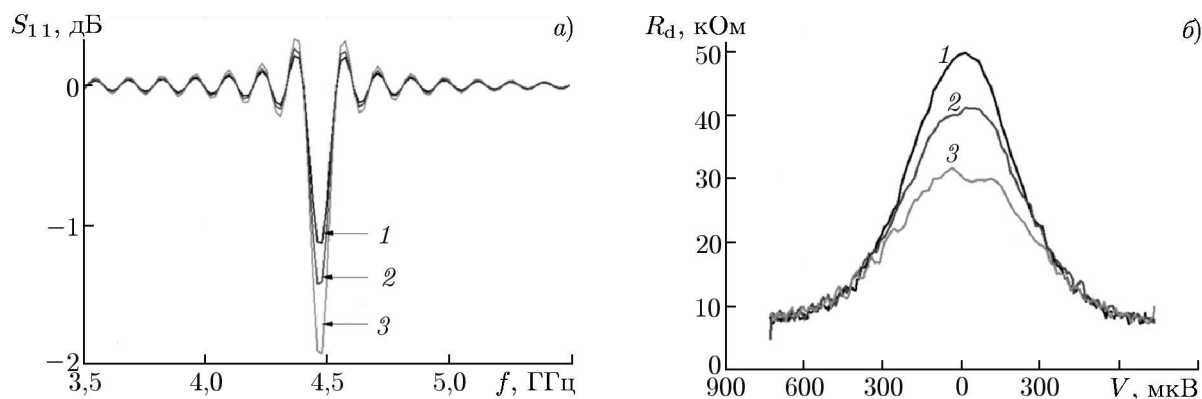


Рис. 13. (а) Рассчитанные S_{11} -параметры для структур с длиной копланарного резонатора 6,8 мм при различном сопротивлении нагрузки: 50 кОм (кривая 1), 40 кОм (2), 30 кОм (3). (б) Дифференциальное сопротивление R_d при трёх значениях мощности сигнала, соответствующих температуре источника 3 К (кривая 1), 6 К (2) и 9 К (3), в зависимости от напряжения смещения

геометрическую длину резонатора. Болметры были сформированы во втором слое с помощью двухслойной резистивной маски с последующим напылением под углами сверхпроводящих электродов из алюминия. Нормальный металл представляет собой алюминий с толщиной 14 нм, сверхпроводимость которого подавлена лежащей ниже плёнкой железа с толщиной 1,2 нм, барьер был сформирован во время окисления этого слоя Fe/Al.

Измерения проводились в модифицированном криостате фирмы Oxford Instruments Heliox AC-V при температуре 300 мК. Был измерен спектральный отклик исследуемого образца с использованием перестраиваемого по частоте источника на основе лампы обратной волны в диапазоне 75÷100 ГГц (рис. 11, слева). Мощность излучения нормировалась на сигнал опорного канала с пироэлектрическим приёмником.

Мы также измерили отклик образца на излучение чёрного тела при температурах 3, 6 и 9 К в погружном криостате растворения при температуре 100 мК [138]. Максимум дифференциального сопротивления при нулевом постоянном смещении изменяется от 50 до 30 кОм, экспериментально измеренные значения дифференциального сопротивления при трёх уровнях мощности излучения приведены на рис. 13. Для копланарной линии с сопротивлением 50 Ом такая нагрузка соответствует добротностям 1000 и 300 для темновых и облучаемых случаев соответственно. Изменение импеданса с 30 до 50 кОм легко регистрируется по вариации добротности (рассчитанные параметры S_{11} приведены на рис. 13а) и позволяет проводить считывание с частотным разделением каналов.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние десятилетия происходит бурное развитие субтерагерцовой астрономии, получены неизвестные ранее уникальные данные о Вселенной, ставящие новые и новые задачи, строятся телескопы субтерагерцовых волн и создаются приёмные системы для этих исследований. Команда авторов этой публикации, работающая в тесной коллаборации с мировым сообществом астрономов и инженеров, в последние годы также достигла весомых результатов в этой области, которые представлены в данной статье. Разработан, изготовлен и исследован СИС-смеситель диапазона 211÷275 ГГц; экспериментально измеренная шумовая температура приёмника (без корректировок на потери в разделителе луча и входном окне криостата) лишь в 2 раза превышает квантовый предел hf/k_B . Разрабатываемые приёмники могут быть использованы для оборудования

ряда наземных радиотелескопов («Суффа», ALMA), а также для космической программы «Миллиметрон». Создана и апробирована концепция сверхпроводникового интегрального приёмника с генератором гетеродина на основе распределённого джозефсоновского перехода. Спектрометр диапазона 450÷650 ГГц был успешно использован для мониторинга атмосферы Земли. Изготовлены и исследованы СИС-смесители диапазона 800÷950 ГГц, имеющие шумовую температуру от 210 до 350 К; на их основе впервые на столь высокой частоте создан приёмник с волноводным разделением полос. Разработаны и исследованы СИНИС-детекторы в диапазоне от 90 до 400 ГГц с вольт-ваттной чувствительностью, достигающей 10^9 В/Вт, и мощностью, эквивалентной шуму, менее, чем 10^{-16} Вт/Гц^{1/2}.

Прогресс в представленных разработках мог бы быть много большим, если бы в России имелись телескопы субтерагерцовых волн. В этой связи можно лишь упомянуть, что самый край низкочастотной части этого диапазона захватывают радиотелескопы РТ-22 Крымской астрофизической лаборатории и РАТАН-600 (но их эффективность не очень высока), а также имеются представленные выше экзотические планы использования в субтерагерцовом диапазоне оптического телескоп БТА. Реально же в России в диапазоне до субмиллиметровых волн работала лишь одна из двух 7-метровых антенн МТГУ им. Н. Э. Баумана под Дмитровом, но астроклимат Подмоскovie фактически не даёт шансов наблюдать космические объекты на субтерагерцовых волнах, а размер зеркала, ограниченный 7 м, не сулит прорывных результатов. Нет сомнений, что бесспорный толчок представленным выше разработкам даст давно ожидаемый выход на этап практической реализации двух давних отечественных проектов «Суффа» и «Миллиметрон», которые уже сегодня являются главными мотиваторами для команды авторов статьи.

Также чрезвычайно целесообразным представляется организация в России крупного комплексного инфраструктурного проекта «Субтерагерцовая астрономия», инициатором которого на сегодня является Российская академия наук, а основными участниками — САО РАН, уже имеющая в своем составе два инструмента (БТА и РАТАН-600), где можно начинать отработку аппаратуры и методик субтерагерцовых наблюдений, и квалифицированный персонал; АКЦ ФИАН, уже ведущий два базовых проекта развития субтерагерцовой астрономии («Миллиметрон» и «Суффа»), при участии ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, ИПФ РАН и других вузов и НИИ, уже имеющих, подобно представителям нижегородской радиофизической школы, солидный задел, который можно использовать в проекте. В результате реализации подобного проекта удалось бы не только решить часть из обозначенных в статье научных задач, но и построить первый в России субтерагерцовый телескоп, создать и развить отечественную базу субтерагерцового приборостроения, имеющего самые обширные перспективы и вне области астрономии.

Работа посвящена памяти недавно ушедшего от нас учителя и замечательного учёного, одного из пионеров освоения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов в астрономии и астрономическом приборостроении, заслуженного профессора радиофизического факультета ННГУ им. Н. И. Лобачевского А. Г. Кислякова.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН (проект 0030–2019–0003) и ИПФ РАН (проект 0035–2019–0005). Исследование СИС-приёмников выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект 19–19–00618). Развитие элементов технологии терагерцовых детекторов, а также создание отдельных устройств и элементов экспериментального инструментария для исследования созданных структур выполнялись при поддержке гранта Российского научного фонда (проект 19–19–00499). Изготовление разрабатываемых структур выполнялось на базе технологического участка ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН с использованием уникальной научной установки 352529. Частично отработка технологии и изготовление образцов было выполнено на базе Шведского консорциума микро- и нанотехноло-

гий (Myfab) при поддержке гранта Vetenskapsrådet (проект 2016–05256) и фонда Knut and Alice Wallenberg Foundation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Event Horizon Telescope Collaboration // *Astrophys. J. Lett.* 2019. V. 875, No. 1. Art. no. L1. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0ec7>
2. The Event Horizon Telescope Collaboration // *Astrophys. J. Lett.* 2019. V. 875, No. 1. Art. no. L2. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0c96>
3. Кисляков А. Г. // *Успехи физ. наук.* 1970. Т. 101, № 4. С. 607–653. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0101.197008b.0607>
4. Кисляков А. Г. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1961. Т. 4, № 3. С. 433–443.
5. Кисляков А. Г., Кузьмин А. Д., Саломонович А. Е. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1961. Т. 4, № 3. С. 573–574.
6. Кисляков А. Г., Наумов А. И. // *Астроном. журн.* 1967. Т. 44. С. 1324–1326.
7. Кисляков А. Г. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1958. Т. 1, № 4. С. 81–89.
8. Дрягин Ю. А., Федосеев Л. И. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1969. Т. 12, № 6. С. 813–818.
9. Ефанов В. А., Кисляков А. Г., Моисеев И. Г., Наумов А. И. // *Астроном. журн.* 1969. Т. 46, № 1. С. 147–151.
10. Кисляков А. Г., Чернышёв В. И., Лебский Ю. В., и др. // *Астроном. журн.* 1971. Т. 48, № 1. С. 39–45.
11. Белянцев А. М., Генкин В. Н. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1969. Т. 12, № 5. С. 763–766.
12. Кисляков А. Г., Лебский Ю. В., Наумов А. И. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1968. Т. 11, № 11. С. 1791–1797.
13. <http://lmtgtm.org>
14. <https://pole.uchicago.edu>
15. <http://olimpo.roma1.infn.it>
16. <https://www.cosmos.esa.int/web/planck>
17. <http://millimetron.ru/index.php/en/>
18. Введение в радиоастрономию. Ч. 2. Техника радиоастрономии : Учебник для вузов / А. Г. Кисляков, В. А. Разин, Н. М. Цейтлин. Н. Новгород : ННГУ, 1996. С. 23.
19. Зинченко И. И., Барышев А. М., Вдовин В. Ф. // *Письма в Астроном. журн.* 1997. Т. 23, № 2. С. 145–148.
20. Вдовин В. Ф., Елисеев А. И., Зинченко И. И. и др. // *Радиотехника и электроника.* 2005. Т. 50, № 9. С. 1207–1211.
21. Vdovin V., Bolshakov O., Kalunki J., et al. // *The X Finnish-Russian Radio Astronomy Symposium.* 1–5 September, 2008, Orilampi, Finland. 1 p. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.557.7590&rep=rep1&type=pdf>
22. Tucker J. R., Feldman M. J. // *Rev. Mod. Phys.* 1985. V. 57, No. 4. P. 1055–1113. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.57.1055>
23. Kerr A. R. // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 1999. V. 47, No. 3. P. 325–329. <https://doi.org/10.1109/22.750234>
24. Kooi J. W., Chan M., Phillips T. G., et al. // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 1992. V. 40, No. 5. P. 812–815. <https://doi.org/10.1109/22.137383>
25. Karpov A., Blondell J., Voss M., Gundlach K. H. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1995. V. 5, No. 2. P. 3304–3307. <https://doi.org/10.1109/77.403298>

26. Jackson B. D., de Lange G., Zijlstra T., et al. // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2006. V. 54, No. 2. P. 547–558. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.862717>
27. Karpov A., Miller D., Rice F., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2007. V. 17, No. 2. P. 343–346. <https://doi.org/10.1109/TASC.2007.898277>
28. Kerr A. R., Pan S.-K., Claude S. M. X., et al. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2014. V. 4, No. 2. P. 201–212. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2014.2302537>
29. Baryshev A. M., Hesper R., Mena F. P., et al. // Astron. Astrophys. 2015. V. 577. Art. no. A129. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425529>
30. Uzawa Y., Fujii Y., Gonzalez A., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2014. V. 25, No. 3. Art. no. 2401005. <https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2386211>
31. Khudchenko A., Baryshev A. M., Rudakov K., et al. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2016. V. 6, No. 1. P. 127–132. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2015.2504783>
32. de Graauw Th., Helmich F. P., Phillips T. G., et al. // Astron. Astrophys. 2010. V. 518. Art. no. L6. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201014698>
33. Karpov A., Blondel J. A. K., Gundlach K. H., Billion-Pierron D. // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 1997. V. 18. P. 301–317. <https://doi.org/10.1007/BF02677922>
34. <https://www.almaobservatory.org/en/audience/science/>
35. <https://www.almaobservatory.org/en/about-alma-at-first-glance/how-alma-works/technologies/receivers/>
36. Смирнов А. В., Барышев А. М., де Бернардис П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 8–9. С. 617–630.
37. Groppi C. E., Kawamura J. H. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2011. V. 1, No. 1. P. 85–96. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2011.2159555>
38. Goldsmith P. F. // URSI Radio Sci. Bull. 2017. V. 2017. No. 362. P. 53–73. <https://doi.org/10.23919/URSIRSB.2017.8267373>
39. Kojima T., Kroug M., Gonzalez A., et al. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2018. V. 8, No. 6. P. 638–646. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2018.2873487>
40. Kojima T., Kiuchi H., Uemizu K., et al. // Astron. Astrophys. 2020. V. 640. Art. no. L9. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038713>
41. Hesper R., Khudchenko A., Baryshev A. M., et al. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2017. V. 7, No. 6. P. 686–693. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2017.2758270>
42. Khudchenko A., Hesper R., Baryshev A. M., et al. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2019. V. 9, No. 6. P. 532–539. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2019.2939003>
43. Giazotto F., Heikkilä T. T., Luukanen A., et al. // Rev. Mod. Phys. 2006. V. 78, No. 1. P. 217–274. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.78.217>
44. Ullom J. N. // AIP Conf. Proc. 2002. V. 605. P. 135–140. <https://doi.org/10.1063/1.1457613>
45. Tarasov M., Edelman V. // Functional Nanostructures and Metamaterials for Superconducting Spintronics. NanoScience and Technology / ed. by Sidorenko A. Cham : Springer, 2018. P. 91–116. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90481-8_5
46. Feshchenko A. V., Casparis L., Khaymovich I. M., et al. // Phys. Rev. Appl. 2015. V. 4, No. 3. Art. no. 034001. <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.4.034001>
47. Pekola J. // J. Low Temperature Phys. 2004. V. 135, No. 5–6. P. 723–744. <https://doi.org/10.1023/b:jolt.0000029516.18146.42>
48. Isosaari E., Holmqvist T., Meschke M., et al. // The European Phys. J. Special Topics. 2009. V. 172, No. 1. P. 323–332. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2009-01057-y>
49. Pekola J. P., Manninen A. J., Leivo M. M., et al. // Phys. B. 2000. V. 280, No. 1–4. P. 485–490. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(99\)01842-6](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(99)01842-6)

50. Nguyen H. Q., Aref T., Kauppila V. J., et. al. // New J. Phys. 2013. V. 15, No. 8. Art. no. 085013. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/15/8/085013>
51. Clark A. M., Miller N. A., Williams A., et. al. // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86, No. 17. Art. no. 173508. <https://doi.org/10.1063/1.1914966>
52. O'Neil G. C. Improving NIS Tunnel Junction Refrigerators: Modeling, Materials, and Traps : A thesis for the degree of Doctor of Physics. Boulder : University of Colorado, 2011. 145 p.
53. Nahum M., Martinis J. M. / Appl. Phys. Lett. 1993. V. 63, No. 22. P. 3075–3077. <https://doi.org/10.1063/1.110237>
54. Nahum M., Richards P. L., Mears C. A. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1993. V. 3, No. 1. P. 2124–2127. <https://doi.org/10.1109/77.233921>
55. Выставкин А., Шуваев Д., Кузьмин Л., Тарасов М. // Журн. exper. теор. физ. 1999. Т. 115. № 3. С. 1085–1092.
56. Kuzmin L., Devyatov I., Golubev D., // Proc. SPIE. 1998. V. 3465. P. 193–199. <https://doi.org/10.1117/12.331165>
57. Brien T. L. R., Ade P. A. R., Barry P. S., et al. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105, No. 4. Art. no. 043509. <https://doi.org/10.1063/1.4892069>
58. Schmidt D. R., Duncan W. D., Irwin K. D., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2006. V. 559, No. 2. P. 516–518. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.12.043>
59. Schmidt D. R., Lehnert K. W., Clark A. M., et al. // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86, No. 5. Art. no. 053505. <https://doi.org/10.1063/1.1855411>
60. Девятков И. А., Крутицкий П. А., Куприянов М. Ю. // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 84, № 2. С. 61–66.
61. Девятков И. А., Куприянов М. Ю. // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 80, № 10. С. 752–757.
62. Tarasov M., Edelman V., Mahashabde S., et. al. // Appl. Phys. Lett. 2017. V. 110, No. 24. Art. no. 242601. <https://doi.org/10.1063/1.4986463>
63. Yusupov R. A., Gunbina A. A., Chekushkin A. M. et. al. // Phys. Solid State. 2020. V. 62, No. 9. P. 1567–1570. <https://doi.org/10.1134/S106378342009036X>
64. Гунбина А. А., Лемзяков С. А., Тарасов М. А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2020. Т. 111, № 10. С. 641–645. <https://doi.org/10.31857/S1234567820100018>
65. Чекушкин А. М., Тарасов М. А., Юсупов Р. А. и др. // Труды МФТИ. 2018. Т. 10, № 2. С. 64–71.
66. <http://w0.sao.ru/hq/sekbta/>
67. Yakorov G., Tarasov M., Gunbina A., et al. // EPJ Web Conf. 2018. V. 195. Art. no. 05014 <https://doi.org/10.1051/epjconf/201819505014>
68. Зинченко И. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 8–9. С. 641–659.
69. Кардашёв Н. С., Новиков И. Д., Лукаш В. Н. и др. // Успехи физ. наук. 2014. Т. 184, № 12. С. 1319–1352. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0184.201412c.1319>
70. Дубрович В. К. // Письма в Астроном. журн. 1977. Т. 3. С. 243–245.
71. Dubrovich V. K., Lipovka A. A. // Astron. Astrophys. 1995. V. 296. P. 307–309.
72. Dubrovich V. K. // Astron. Astrophys. 1997. V. 324, No. 1. P. 27–31.
73. Galli D., Palla F. // Annu. Rev. Astron. Astrophys. 2013. V. 51. P. 163–206. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082812-141029>
74. Güsten R., Wiesemeyer H., Neufeld D., et al. // Nature. 2019. V. 568, No. 7752. P. 357–359. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1090-x>
75. Zinchenko I., Dubrovich V., Henkel C. // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2011. V. 415, No. 1. P. L78–L80. <https://doi.org/10.1111/j.1745-3933.2011.01083.x>
76. Новиков И. Д., Лихачёв С. Ф., Щекинов Ю. А. и др. // Успехи физ. наук. (принята в печать).

- <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.12.038898>
77. Kamionkowski M., Kovetz E. D. // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 2016. С. 54. P. 227–269. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081915-023433>
78. Ade P. A. R., Aguilar M., et al. // *Astrophys. J.* 2017. V. 848, No. 2. P. 121–136. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa8e9f/>
79. <https://www.cosmos.esa.int/web/planck>
80. Дубрович В. К., Грачёв С. И. // *Письма в Астроном. журн.* 2015. Т. 41, № 10. С. 583–594. <https://doi.org/10.7868/S0320010815100022>
81. Дубрович В. К., Грачёв С. И. // *Письма в Астроном. журн.* 2016. Т. 42, № 11. С. 785–792. <https://doi.org/10.7868/S0320010816110024>
82. Дубрович В. К., Грачёв С. И., Романюк В. Г. // *Письма в Астроном. журн.* 2009. Т. 35, № 11. С. 803–810.
83. Дубрович В. К., Грачёв С. И. // *Письма в Астроном. журн.* 2018. Т. 44, № 4. С. 241–247. <https://doi.org/10.7868/S0320010818040010>
84. Dubrovich V., Grachev S., Zaliutdinov T. // *Astron. Astrophys.* 2018. V. 619. Art. no. A29. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833554>
85. Дубрович В. К. // *Письма в Астроном. журн.* 2003. Т. 29, № 1. С. 9–12.
86. Грачёв С. И., Дубрович В. К. // *Письма в Астроном. журн.* 2011. Т. 37, № 5. С. 323–332.
87. <https://www.jwst.nasa.gov/>
88. Щеглов П. В. Проблемы оптической астрономии. М. : Наука, 1980. 272 с.
89. Кисляков А. Г., Станкевич К. С. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1967. Т. 0, № 9. С. 1 244–1 265.
90. Носов В. И., Большаков О. С., Бубнов Г. М. и др. // *Приборы и техника эксперимента.* 2016. Т. 1, № 3. С. 49–56. <https://doi.org/10.7868/S0032816216020117>
91. Bubnov G. M., Vdovin V. F., Bukov V. Yu., et al. // 32nd URSI GASS. 19–26 August 2017, Montreal. Art. no. 8105000. <https://doi.org/10.23919/URSIGASS.2017.8105000>
92. Программа для ЭВМ 2019664403 РФ. Программа для обработки данных о прозрачности атмосферы в миллиметровом диапазоне длин волн : № 2019663109 : заявл. 15.10.2019 : опубли. 06.11.2019 / Бубнов Г. М., Землянуха П. М.
93. Bubnov G. M., Grigorev V. F., Vdovin V. F., et al. // 30th Int. Symp. Space THz Technol. (IS-STT2019). 15–17 April 2019, Gothenburg, Sweden. P. 143–148.
94. Liebe H. J., Rosenkranz P. W., Hufford G. A. // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 1992. V. 48, No. 5–6. P. 629–643. [https://doi.org/10.1016/0022-4073\(92\)90127-P](https://doi.org/10.1016/0022-4073(92)90127-P)
95. Rothman L. S., Gordon I. E., Babikov Y., et al. // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2013. V. 130. P. 4–50. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.07.002>
96. Jacquinet-Husson N., Crepeau L., Armante R., et al. // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2011. V. 112, No. 15. P. 2 395–2 445. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2011.06.004>
97. Шитов С. В., Вдовин В. Ф., Зинченко И. И. и др. Испытания радиометра с СИС-смесителем на радиотелескопе РТ-25*2 : препринт № 309. Нижний Новгород : ИПФ РАН, 1992. 19 с.
98. Artemenko Y. N., Balega Y. Yu., Baryshev A. M., et al. // ISSTT2019. 15–17 April 2019, Gothenburg, Sweden. P. 196–201.
99. Рудаков К. И., Дмитриев П. Н., Барышев А. М. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2019. Т. 62, № 7–8. С. 613–622.
100. Tucker J. R. // *IEEE J. Quantum Electron.* 1979. V. 15, No. 11. P. 1 234–1 258. <https://doi.org/10.1109/JQE.1979.1069931>
101. Koshelets V. P., Shitov S. V. // *Supercond. Sci. Technol.* 2000. V. 13, No. 5. P. R53–R59. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/13/5/201>
102. Кошелев В. П., Дмитриев П. Н., Ермаков А. Б. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2005. Т. 48,

- № 10–11. С. 947–954.
103. Кошелец В. П., Филиппенко Л. В., Борисов В. Б. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 10–11. С. 935–940.
104. de Lange G., Birk M., Boersma D., et al. // Supercond. Sci. Technol. 2010. V. 23, No. 4. Art. no. 045016. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/23/4/045016>
105. de Lange A., Birk M., de Lange G., et al. // Atmos. Meas. Tech. 2012. V. 5. P. 487–500. <https://doi.org/10.5194/amt-5-487-2012>
106. Koshelets V. P., Dmitriev P. N., Faley M. I., et al. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2015. V. 5, No. 4. P. 687–694. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2015.2443500>
107. Dmitriev P. N., Filippenko L. V., Koshelets V. P. // Josephson Junctions. History, Devices, and Applications/ ed. by E. L. Wolf, G. B. Arnold, M. A. Gurvitch, J. F. Zasadzinski. Singapore : Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., 2017. P. 185–244.
108. Li M., Yuan J., Kinev N., et al. // Phys. Rev. B. 2012. V. 86. Art. no. 060505. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.060505>
109. Кинев Н. В., Филиппенко Л. В., Ли М. Ю. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 8–9. С. 647–656.
110. Wootten A., Thompson A. R. // Proc. IEEE. 2009. V. 97, No. 8. P. 1463–1471. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2020572>
111. Gusten R., Booth R. S., Cesarsky C., et al. // Proc. SPIE. 2006. V. 6267. Art. no. 626714. <https://doi.org/10.1117/12.670798>
112. Рудаков К. И., Кошелец В. П., Барышев А. М. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 8–9. С. 793–797.
113. Belitsky V. Y., Jacobsson S. W., Filippenko L. V., Kollberg E. L. // Microw. Opt. Technol. Lett. 1995. V. 10, No. 2. P. 74–78. <https://doi.org/10.1002/mop.4650100203>
114. Белянцев А. М., Клишин Е. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 3. С. 479–481.
115. Day P. K., LeDuc H. G., Mazin B. A., et al. // Nature. 2003. V. 425. P. 817–821. <https://doi.org/10.1038/nature02037>
116. Sergeev A. V., Mitin V. V., Karasik B. S. // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 80, No. 5. P. 817–819. <https://doi.org/10.1063/1.1445462>
117. Doyle S., Mauskopf P., Naylor J., et al. // J. Low Temperature Phys. 2008. V. 151. P. 530–536. <https://doi.org/10.1007/s10909-007-9685-2>
118. Vissers M. R., Austermann J. E., Malnou M., et al. // Appl. Phys. Lett. 2020. V. 116, No. 3. Art. no. 032601. <https://doi.org/10.1063/1.5138122>
119. Wandui A., Bock J., Frez C., et al. // J. Appl. Phys. 2020. V. 128. Art. no. 044508. <https://doi.org/10.1063/5.0002413>
120. Paiella A., Ade P. A. R., Battistelli E. S., et al. // J. Low Temp. Phys. 2020. V. 199. P. 491–501. <https://doi.org/10.1007/s10909-020-02372-y>
121. Day P., LeDuc H. G., Dowell C. D., et al. // J. Low Temp. Phys. 2008. V. 151. P. 477–482. <https://doi.org/10.1007/s10909-007-9676-3>
122. Holland W. S., Bintley D., Chapin E. L., et al. // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2013. V. 430, No. 4. P. 2513–2533. <https://doi.org/10.1093/mnras/sts612>
123. Bonetti J. A., Turner A. D., Kenyon M., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011. V. 21, No. 3. P. 219–222. <https://doi.org/10.1109/TASC.2010.2093858>
124. Jaehnig G. C., Arnold K., Austermann J., et al. // J. Low Temperature Phys. 2020. V. 199. P. 646–653. <https://doi.org/10.1007/s10909-020-02425-2>
125. Semenov A. D., Gol'tsman G. N., Sobolewski R. // Supercond. Sci. Technol. 2002. V. 15, No. 4. P. R1–R16. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/15/4/201>

126. Yakopov G., Tarasov M., Gunbina A., et al. // EPJ Web Conf. 2018. V.195. Art. no. 05014. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201819505014>
127. Tarasov M. A., Gunbina A. A., Mahashabde S., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2020. V. 30, No. 3. Art. no. 2300106. <https://doi.org/10.1109/TASC.2019.2941857>
128. Mahashabde S., Sobolev A., Bengtsson A., et al. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2015. V. 5, No. 1. P. 145–152. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2014.2362010>
129. Mahashabde S., Sobolev A., Tarasov M. A., Kuzmin L. S. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2015. V. 5, No. 1. P. 37–43. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2014.2377247>
130. Tarasov M., Sobolev A., Gunbina A., et al. // J. Appl. Phys. 2019. V. THZ2019, No. 1. Art. no. 174501. <https://doi.org/10.1063/1.5054160@jap.2019.THZ2019.issue-1>
131. Патент 2684897 РФ, МПК G01J 5/02 (2006.01) Широкополосный детектор терагерцового излучения № 2018124492. / Тарасов М. А., Соболев А. С., Чекушкин А. М., Юсупов Р. А., Гунбина А. А. : Заявл. 04.07.2018 : опубл. 16.04.2019; заявитель ИРЭ РАН. 12 с.
132. Гунбина А. А., Тарасов М. А., Лемзяков С. А. и др. // Физика твёрдого тела. 2020. Т. 62, № 9. С. 1440–1446. <https://doi.org/10.21883/FTT.2020.09.49767.35H>
133. Abitbol M., Ahmed Z., Barron D., et al. <https://arxiv.org/abs/1706.02464>
134. Ferrari L., Yurduseven O., Llombart N., et al. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2017. V. 8, No. 1. P. 127–139. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2017.2764378>
135. Тарасов М. А., Махашабде С., Гунбина А. А. и др. // Физика твёрдого тела. 2020. Т. 62, № 9. С. 1415–1419.
136. <http://www.ipme.ru/ipme/labs/RT-70/source/start.html>
137. <http://www.asc.rssi.ru/millimetron/millim.html>
138. Эдельман В. С. // Приборы и техника эксперимента. 2009. Т. 52, № 2. P. 159–165.

Поступила в редакцию 9 июня 2020 г.; принята в печать 31 июля 2020 г.

SUPERCONDUCTOR RECEIVERS FOR SPACE, BALLOON AND GROUND-BASED SUBTERAHERTZ RADIO TELESCOPES

*Yu. Yu. Balega, A. M. Baryshev, G. M. Bubnov, V. F. Vdovin, S. N. Vdovichev, A. A. Gunbina,
P. N. Dmitriev, V. K. Dubrovich, I. I. Zinchenko, V. P. Koshelets, S. A. Lemzyakov, D. V. Nagirnaya,
K. I. Rudakov, A. V. Smirnov, M. A. Tarasov, L. V. Filippenko, V. B. Haikin, A. V. Khudchenko,
A. M. Chekushkin, V. S. Edelman, R. A. Yusupov, and G. V. Yakopov*

An overview of our own original scientific results of the development of superconductor receivers for subterahertz astronomy and the main leading concepts of the global instrumentation are given. The analysis of current astronomical problems, the results of microwave astroclimate research, and the development of equipment for subterahertz radio astronomy studies justify the need and feasibility of a major infrastructure project in Russia to create a subterahertz telescope, as well as to enhance the implementation of the ongoing Millimetron and Suffa projects. The following results are discussed: i) superconductor coherent receivers and broadband subterahertz detectors for space, balloon, and ground-based radio telescopes have been developed and tested; ii) ultrasensitive receiving systems based on tunnel structures such as superconductor–insulator–superconductor (SIS) and superconductor–insulator–normal metal–insulator–superconductor (SINIS) have been created, fabricated, and examined; iii) a receiving array based on SINIS detectors and microwave readout system for such structures has been implemented; iv) methods for manufacturing high-quality tunnel structures Nb/AIO_x/Nb and Nb/AlN/NbN based on niobium films with a current density of up to 30 kA/cm²

have been developed. Receivers operated at 200 to 950 GHz and having a noise temperature only a factor of 2 to 5 higher than the quantum limit have been created and tested.