

К 55-ЛЕТИЮ ИНСТИТУТА СПЕКТРОСКОПИИ РАН (ИСАН)

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Сверхпроводниковые приёмные устройства терагерцового диапазона

Л.В. Филиппенко, А.М. Чекушкин, М.Ю. Фоминский, А.Б. Ермаков, Н.В. Кинев, К.И. Рудаков, А.В. Худченко, А.М. Барышев, В.П. Кошелец, С.А. Никитов

Существует целый ряд практических приложений, где устройства на основе сверхпроводниковой электроники, обладая уникальным набором параметров, заметно превосходят по своим характеристикам приборы на основе традиционных технологий; в некоторых областях им нет альтернативы. Одним из наиболее успешно развиваемых направлений является разработка сверхчувствительных приёмных устройств терагерцового (ТГц) диапазона; их рабочая частота достигла 1 ТГц, а шумовая температура ограничена только квантовым пределом либо фотонными шумами.

Ключевые слова: радиоастрономия, высококачественные туннельные переходы на основе ниобия, малошумящие СИС-приёмники, смесители ТГц-диапазона с квантовой чувствительностью

PACS numbers: 07.57. – c, 85.25. – j, 95.55. – n

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.07.039726>

Содержание

1. Введение (1207).
2. Туннельные СИС-переходы (1208).
 - 2.1. Туннельные переходы Nb–AlO_x–Nb.
 - 2.2. Туннельные переходы Nb–AlN–NbN.
 - 2.3. Электронно-лучевая литография.
 - 2.4. Структуры NbTiN/Nb–AlN–NbN/Al.
3. СИС-приёмники для радиоастрономии (1211).
 - 3.1. СИС-смеситель диапазона 210–275 ГГц.
 - 3.2. СИС-смеситель диапазона 700–950 ГГц.
4. Интегральные приёмные структуры (1213).
 - 4.1. Сверхпроводниковый генератор гетеродина.
 - 4.2. Сверхпроводниковый интегральный приёмник.
 - 4.3. Проект TELIS.
 - 4.4. Лабораторные приложения сверхпроводникового интегрального приёмника.

5. Заключение (1219).
- Список литературы (1220).

1. Введение

Уникальные характеристики сверхпроводниковых элементов позволяют создавать на их основе сверхчувствительные приёмные системы в чрезвычайно широком частотном диапазоне [1–3]: магнитометры на основе сверхпроводниковых квантовых интерферометров (СКВИДов) [4–6] могут измерять сверхмалые магнитные поля с частотами начиная от долей герца, а детекторы на основе сверхпроводящих туннельных переходов (Superconducting Tunnel Junction, STJ) дают возможность регистрации рентгеновского излучения с энергией в несколько кэВ, а также гамма-лучей с энергией в десятки кэВ [7, 8]. При этом чувствительность СКВИДов позволяет измерять поля на уровне 10⁻⁶ кванта магнитного потока Φ₀ и создавать магнитоэнцефалографы для исследования мозга [4, 5]; с помощью сверхпроводниковых однофотонных детекторов (Superconducting Simple-Photon Detector, SSPD) [9–11] возможно регистрировать одиночные фотоны с длиной волны менее 10 мкм, а энергетическое разрешение STJ составляет единицы эВ.

Кроме того, на основе джозефсоновских элементов возможно создание целого ряда устройств не только для приёма сигналов, но и для дальнейшей обработки получаемой информации. Это и сверхпроводниковые параметрические усилители с шумовой температурой существенно ниже физической [12–14], и системы обработки информации на основе одноквантовых цифровых устройств (Rapid Single Flux Quantum, RSFQ) [15, 16]. Отметим, что первые RSFQ-схемы были изготовлены и исследованы в Институте радиотехники и элект-

Л.В. Филиппенко^(1,a), А.М. Чекушкин^(1,b), М.Ю. Фоминский^(1,c), А.Б. Ермаков^(1,d), Н.В. Кинев^(1,e), К.И. Рудаков^(1,2,f), А.В. Худченко^(1,2,g), А.М. Барышев^(3,h), В.П. Кошелец^(1,2,i), С.А. Никитов^(1,j)

⁽¹⁾ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ул. Моховая 11, корп. 7, 125009 Москва, Российская Федерация

⁽²⁾ Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, ул. Профсоюзная 84/32, 117810 Москва, Российская Федерация

⁽³⁾ Kapteyn Astronomical Institute, University of Groningen, P.O. Box 72, 9700 AB Groningen, The Netherlands

E-mail: ^(a) lyudmila@hitech.cplire.ru, ^(b) chekushkin@hitech.cplire.ru, ^(c) demiurge@hitech.cplire.ru, ^(d) ermakov@hitech.cplire.ru, ^(e) nickolay@hitech.cplire.ru, ^(f) rudakov@asc.rssi.ru, ^(g) khudchenko@asc.rssi.ru, ^(h) a.m.baryshev@gmail.com, ⁽ⁱ⁾ valery@hitech.cplire.ru, ^(j) nikitov@cplire.ru

Статья поступила 9 марта 2024 г., после доработки 17 мая 2024 г.

роники (ИРЭ) им. В.А. Котельникова РАН ещё в 1986 г. [17], а вскоре была изготовлена и протестирована схема 8-битного сверхпроводникового аналого-цифрового преобразователя (АЦП) [18]; исследования однокубитных цифровых устройств затем были успешно продолжены во многих лабораториях мира. В настоящее время широким фронтом ведутся работы по разработке интерфейсных сверхпроводниковых схем быстрой однокубитной логики для связи с квантовыми битами (кубитами) и управления сверхпроводниковыми квантовыми системами при сверхнизких температурах [19, 20].

Разработка сверхчувствительных приёмников терагерцового (ТГц) диапазона является одним из наиболее интенсивно и успешно развиваемых направлений сверхпроводниковой электроники, где потенциал сверхпроводниковых систем реализовался в полной мере [21–25]. Это объясняется как чрезвычайно высокой нелинейностью сверхпроводниковых элементов, так и их предельно низкими собственными шумами, обусловленными квантовой природой элементов и криогенной рабочей температурой, что позволяет создавать приёмные системы ТГц-диапазона с уникальными параметрами, недостижимыми для устройств, основанных на других принципах. Поскольку время накопления для приёма сверхслабых сигналов и обнаружения сверхмалых концентраций веществ пропорционально квадрату шумовой температуры используемого устройства, приёмники на основе сверхпроводниковых переходов позволяют значительно сократить время наблюдения. В настоящее время сверхпроводниковые приёмники используются в качестве штатных устройств на большинстве как наземных, так и космических радиотелескопов по всему миру, призванных решать фундаментальные вопросы происхождения Вселенной. Многие приложения требуют спектрального разрешения $\Delta f/f$ лучше 10^{-6} ; такого разрешения можно достичь только с помощью гетеродинных приёмных систем. Гетеродинный смеситель преобразует входящий слабый входной сигнал на более низкую промежуточную частоту (ПЧ) без потери фазы; спектр сигнала ПЧ такой же, как и входной, но сдвинут вниз по частоте на частоту гетеродина.

Смесители на основе туннельных переходов сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС) [21, 22, 26, 27] являются наиболее чувствительными входными устройствами в гетеродинных приёмниках на частотах f от 0,1 до 1,2 ТГц. Для работы СИС-смесителя используется сильная нелинейность туннельного тока на вольт-амперной характеристике (ВАХ) СИС-перехода; эта нелинейность возникает в результате процесса туннелирования квазичастиц между двумя сверхпроводниками, разделёнными очень тонким оксидным изолирующим слоем. Для вычисления туннельного тока под действием сигнала гетеродина используется квантово-механическая модель [21, 26]; такой процесс называется стимулированным туннелированием под действием фотонов. В результате данного процесса на ВАХ СИС возникают квазичастичные ступени тока. По своей природе СИС-смесители могут обеспечивать преобразование с усилением. Важными преимуществами СИС-смесителей являются низкие требования к мощности гетеродина и очень низкий собственный шум [21, 22, 26, 27]. Шумовая температура смесителя в двухполосном режиме (Double Side Band, DSB) ограничена квантовой величиной $hf/(2k_B)$ [28], где h и k_B — постоянные Планка и

Больцмана соответственно. Именно поэтому СИС-смесители уже успешно используются как для космических миссий, так и для наземных радиотелескопов [23, 24, 29].

2. Туннельные СИС-переходы

Туннельные СИС-переходы являются основными элементами большинства устройств и схем сверхпроводниковой электроники. Для получения туннельных структур, результаты применения которых изложены в настоящей статье, использовалось оборудование, входящее в состав Уникальной научной установки (УНУ) "Криоинтеграл" — "Технологический и измерительный комплекс для изготовления сверхпроводниковых наносистем на основе новых материалов" [30], созданный в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Этот комплекс является уникальным и, согласно опубликованным данным, единственным в РФ, где возможно изготовление высококачественных туннельных переходов на основе ниобия. На протяжении последних лет была разработана технология изготовления туннельных переходов Nb–AlO_x–Nb с высокой плотностью тока и малой утечкой [31–33]. На их основе была создана технология изготовления многослойных микросхем с числом элементов до 1000; проведена оптимизация технологии с целью повышения степени интеграции и процента выхода работающих схем.

Разработан целый ряд новых технологических процессов и методик изготовления сверхпроводниковых туннельных переходов с рекордными параметрами. Развита технология изготовления высококачественных туннельных переходов использовалась при проведении целого ряда фундаментальных физических исследований и экспериментов. В частности, с помощью этой технологии изготовлены кольцевые туннельные переходы, выдерживающие более 10000 термоциклирований, которые были использованы при исследовании спонтанного нарушения симметрии путём образования флаксонов при быстром переходе через критическую температуру туннельной структуры (Zurek–Kibble Mechanism) [34]. На базе данной технологии разработаны и успешно реализованы сверхчувствительные СКВИД-магнетометры [6, 35] и элементы метаматериалов на основе сверхпроводящих квантовых интерферометров; созданы и измерены метаматериалы с настраиваемой отрицательной магнитной проницаемостью [36, 37].

2.1. Туннельные переходы Nb–AlO_x–Nb

Для реализации предельных характеристик приёмных систем необходимы туннельные СИС-переходы с чрезвычайно низким током утечки ниже щелевого напряжения V_g и минимальным размытием энергетической щели δV_g . Это особенно важно для низкочастотных устройств ($f < 300$ ГГц), поскольку δV_g должно быть много меньше размера квазичастичной ступени hf/e , а ток утечки при напряжении смещения около $V_g - hf/2e$ (в середине такой ступени) определяет шум смесителя. Хорошо отработанная технология изготовления туннельных переходов Nb–AlO_x–Nb основана на том, что очень тонкий слой Al толщиной 5–7 нм может полностью покрывать базовый Nb-электрод, эффективно планаризируя столбчатую микроструктуру плёнки Nb. Данный слой Al впоследствии окисляется, а затем на окисленный слой осаждается верхний электрод из Nb, формируя так называемую трёхслойную структуру [38, 39].

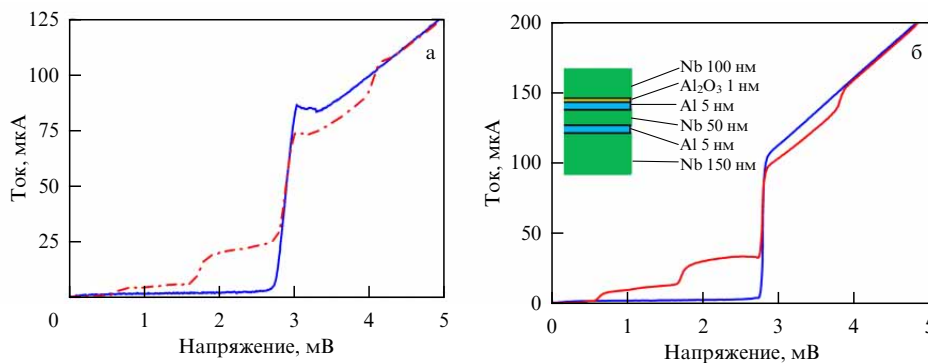


Рис. 1. Экспериментальные вольт-амперные характеристики смесительных элементов: (а) СИС-переход Nb–AlO_x–Nb, изготовленный по традиционной технологии; (б) СИС-переход Nb/Al/Nb–AlO_x–Nb с дополнительной прослойкой Al. Сплошной кривой показаны автономные ВАХ, штрихпунктирной линией представлены ВАХ при воздействии гетеродина на частоте 262 ГГц при оптимальной мощности.

Из-за эффекта близости и наличия нормального слоя алюминия вблизи туннельного барьера на ВАХ переходов Nb–AlO_x–Nb при напряжениях немного выше V_g возникает хорошо выраженная коленообразная особенность (рис. 1а). Точная форма ВАХ туннельного перехода Nb/Al–AlO_x/Nb ($S - S'/I/S$) зависит от плотности состояний квазичастиц в S' -слое (Al). Эта плотность состояний дляислоёв Nb/Al была рассчитана с использованием модели микроскопического эффекта близости [40]. Модель предполагает малую длину свободного пробега электронов (грязные предельные условия) как в материалах S (Nb), так и в материалах S' (Al). Экспериментально зависимость данного эффекта от параметров туннельной структуры была исследована в [41]. Наличие коленообразной особенности на ВАХ приводит к особенностям на квазичастичных ступенях (рис. 1а), что в свою очередь приводит к неустойчивости и нелинейности работы смесителя на некоторых частотах.

Для получения ВАХ без колена толщина слоя Al должна быть минимальной ($d_{Al} < 3$ нм). Настолько тонкий алюминий не может покрыть сплошным слоем поверхность нижнего электрода, образованного толстой плёнкой Nb толщиной 200 нм, имеющей столбчатую структуру [42, 43]. Тонкий Nb электрод ($d_{Nb} < 50$ нм) имеет более гладкую поверхность и полностью смачивается Al вплоть до толщин $d_{Al} = 3$ нм; при этом R_j/R_n (параметр качества, определяемый как отношение подщелевого сопротивления к нормальному) остаётся около 40 для всех использованных толщин алюминия [41]. СИС-переходы с тонким нижним электродом имеют почти идеальную ВАХ, но мало пригодны для высокочастотных применений, так как $d_{Nb} < \lambda_{Nb} = 90$ нм (глубина проникновения магнитного поля), что существенно увеличивает индуктивность сверхвысокочастотных (СВЧ) элементов. Чтобы преодолеть данную проблему и реализовать переходы без колена при толстом нижнем электроде, были предложены структуры с дополнительной прослойкой Al в нижнем Nb электроде [41]. Тогда параметр порядка в тонкой Nb–Al двухслойке становится пространственно-однородным и плотность состояний близка к предсказываемой теорией Бардина–Купера–Шриффера (БКШ) (Bardeen–Cooper–Schrieffer, BCS). Таким образом, в структуре Nb/Al_{add}/Nb_{add}–Al/AlO_x–Nb колено исчезает и ВАХ становится близкой к идеальной. Полученные результаты демонстрируют возможность "управлять" видом ВАХ туннельных переходов путём

выбора толщины слоёв в композитном нижнем электроде. Вольт-амперная характеристика смесительного элемента Nb/Al/Nb–AlO_x–Nb (площадью около 1 мкм²) с дополнительным слоем Al в нижнем электроде, измеренная в режиме задания напряжения, представлена на рис. 1б; критический ток СИС-перехода подавляется магнитным полем [33]. Нормальное сопротивление СИС-перехода $R_n = 22$ Ом; показатель качества, характеризующий отношение подщелевого сопротивления к нормальному R_j/R_n , достигает 40; значение энергетической щели $V_g = 2,8$ мВ, а размытие щелевой особенности δV_g составляет примерно 0,1 мВ. Именно такие характеристики необходимы для создания приёмных систем с квантовым уровнем шума.

2.2. Туннельные переходы Nb–AlN–NbN

Переходы с высокой плотностью туннельного тока позволяют повысить рабочую частоту СИС-приёмников и расширить их полосу. Однако существует предел повышения прозрачности барьера для СИС-переходов на основе окиси алюминия. Данный предел составляет величину порядка 10–15 кА см⁻², при дальнейшем увеличении плотности тока наступает резкое ухудшение качества переходов. Для того чтобы преодолеть это ограничение, была разработана технология изготовления туннельных СИС-переходов Nb–Al/AlN–Nb с экстремально высокой прозрачностью туннельного барьера путём нитридации поверхности Al в плазменном RF-разряде. Такие СИС-переходы демонстрируют достаточно хорошее соотношение $R_j/R_n > 10$ при очень высоких плотностях тока до 100 кА см⁻² [44, 45].

Дальнейшее улучшение параметров туннельных структур было достигнуто в результате разработки технологии изготовления схем на основе трёхслойных структур Nb–AlN–NbN, где в качестве верхнего электрода вместо ниобия используется нитрид ниобия [46, 47]. Применение таких структур позволяет не только увеличить плотность туннельного тока, но и существенно увеличить суммарное щелевое напряжение перехода V_g с 2,8 до 3,7 мВ, что значительно увеличивает потенциал работы структур на высоких частотах (более 700 ГГц), когда размер фотонной ступени hf/e превышает V_g . Кроме того, при высоких плотностях тока для переходов Nb–AlN–NbN параметр качества, определяемый отношением подщелевого сопротивления к нормальному, R_j/R_n , оказывается заметно выше, чем для чисто

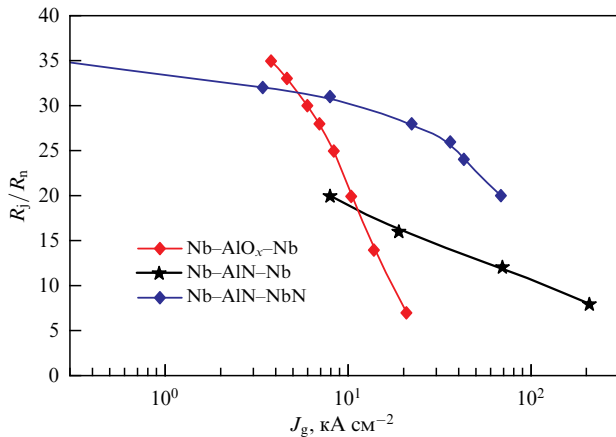


Рис. 2. Зависимость параметра качества R_j/R_n от плотности туннельного тока СИС-переходов различных типов [47].

ниобиевых переходов [33, 46, 47] (рис. 2). Величина R_j/R_n достигает 20 при плотности туннельного тока 70 кА см^{-2} , что свидетельствует о высоком качестве туннельного барьера, полученного методом нитридации тонкой плёнки алюминия в высокочастотном плазменном разряде (рис. 3а) [46, 47]. Все эти достижения позволили повысить рабочую частоту СИС-приёмников, расширить их полосу и создать ряд сверхчувствительных приёмных устройств диапазона 100–1000 ГГц. Однако для обеспечения хорошего согласования между переходами с такой высокой плотностью тока и антенной необходимы субмикронные СИС-переходы.

2.3. Электронно-лучевая литография

Электронно-лучевая литография (ЭЛЛ) является одним из наиболее перспективных методов производства наноструктур в научно-исследовательских целях, поскольку позволяет оперативно изменять дизайн отдельных элементов и микросхемы в целом и добиться высокой воспроизводимости результатов в субмикронной области размеров туннельных переходов [48]. Субмикронные СИС-переходы могут быть изготовлены прямой литографией — непосредственным экспонированием поверхности образца с помощью ЭЛЛ. Преимуществами электронной литографии являются высокое разрешение и возможность мобильного изменения экспонируемых структур простой модификацией компьютерной про-

граммы. Совмещение рисунка топологии на соседних полях в пределах одного технологического слоя обеспечивается прецизионной измерительной системой на основе лазерного интерферометра. Дизайн топологии микроструктур должен разрабатываться таким образом, чтобы элементы схемы с критическими размерами не попадали на границы полей. Для электронной экспозиции использовался литограф Raith e_LiNE с максимальным размером поля обработки электронно-оптической системы $1000 \times 1000 \text{ мкм}$ [49, 50].

В качестве маски для формирования структур под осаждение металла используются электронные резисты [48]. Для позитивных резистов экспонирование электронным пучком вызывает уменьшение его молекулярного веса при разрыве связей между молекулами, увеличивая их растворимость. Для негативных — облучение стимулирует образование поперечных связей в молекулах полимера. В результате рассеяния электронного пучка в резисте устанавливается распределение молекулярных масс с их нарастанием от оси пучка к краю, порождающее соответствующий контраст γ , являющийся откликом резиста на электронный пучок и определяемый искажениями, вносимыми резистом и подложкой. Проявитель фактически выявляет распределение интенсивности пучка и искажения, вносимые неравномерностью интенсивности пучка и рассеянным (прямо и обратно) излучением в резисте.

Для создания воспроизводимой и надёжной технологии изготовления туннельных структур высокого качества, обладающих хорошей воспроизводимостью, с малым разбросом параметров по подложке, была разработана и отлажена технология изготовления туннельных структур субмикронных размеров Nb–AlN–NbN с помощью методов прямой ЭЛЛ и последующим плазмохимическим травлением. СИС-переход формируется путём травления трёхслойной структуры Nb–AlN–NbN через маску в плёнке резиста, сформированной при помощи электронной литографии [51].

2.4. Структуры NbTiN/Nb–AlN–NbN/Al

Рабочая частота СИС-приёмников на основе плёнок ниобия ограничена частотой энергетической щели Nb (приблизительно 700 ГГц). Решение данной проблемы было найдено в создании и использовании устройств с микрополосковыми линиями на основе соединений Nb с более высокими значениями частоты энергетической

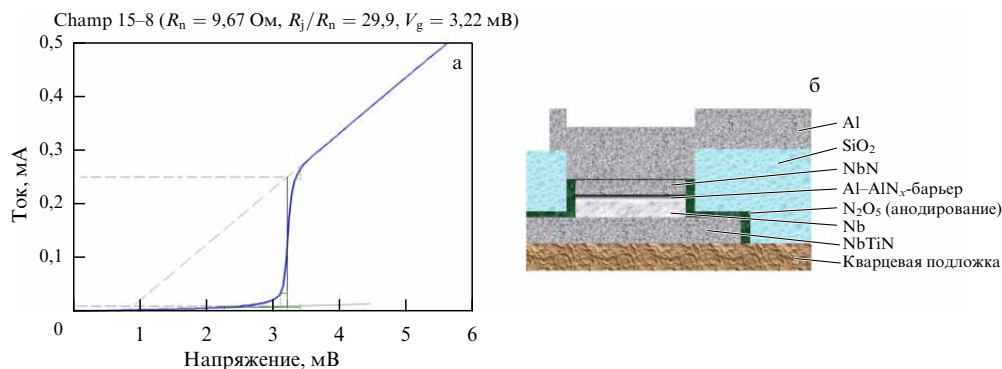


Рис. 3. (а) ВАХ двоянного смесителя Nb–AlN–NbN, изготовленного на кварцевой подложке (площадь каждого СИС-перехода $S = 0,37 \text{ мкм}^2$, $V_g = 3,22 \text{ мВ}$, $R_n S = 7 \text{ Ом мкм}^2$, плотность туннельного тока $J_g = 34 \text{ кА см}^{-2}$); критический ток подавлен магнитным полем. (б) Разрез приёмной структуры на основе туннельного перехода Nb–AlN–NbN с высокой критической плотностью тока, встроенного в микрополосковую линию, состоящую из нижнего электрода из NbTiN и верхнего электрода из Al.

щели, в частности используется NbTiN; верхний электрод линии обычно изготавливают из нормального металла при этих температурах (как правило, Al) во избежание перегрева СИС-перехода [52–54]. Мы разработали СИС-смеситель на основе туннельных переходов Nb–AlN–NbN с высокой критической плотностью тока, встроенных в микрополосковую линию, состоящую из нижнего электрода из NbTiN толщиной 320 нм (заземляющая плоскость) и верхнего электрода из Al толщиной 500 нм [55]. Микрополосковые электроды разделены изолирующим слоем SiO₂ толщиной 250 нм. СИС-переход расположен на плёнке NbTiN, а верхний слой NbN контактирует с верхним Al-электродом (см. разрез на рис. 3б).

3. СИС-приёмники для радиоастрономии

Разработка сверхчувствительных приёмных устройств ТГц диапазона является, пожалуй, самым известным (и наиболее успешным) направлением развития сверхпроводниковой электроники. На основе сверхпроводниковых структур созданы приёмные системы для самого большого радиоастрономического проекта современности — многоэлементного интерферометра Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) [23] и космической программы Herschel Space Observatory [24]. Актуальность данного направления недавно была подтверждена публикацией первого в истории "изображения" сверхмассивной чёрной дыры в центре галактики M 87 [56, 57]. Это событие вызвало широкий резонанс в научном мире, сравнимый с открытием гравитационных волн. Чёрные дыры чрезвычайно компактны, поэтому для их наблюдения необходимо иметь предельно высокое угловое разрешение. В настоящее время исследования ведутся в рамках наземных проектов Event Horizon Telescope (ЕНТ) [58]; создаются новые точки для интерферометрии со сверхдлинной базой, в том числе в Аргентине (Large Latin American Millimeter Array, LLAMA) [59], в Намибии (Africa Millimetre Telescope, AMT) [60] и проводятся активные исследования по созданию субмиллиметровой обсерватории в Российской Федерации. Предельно высокое угловое разрешение будет реализовано в проекте российского космического агентства "Миллиметр" по созданию радиоинтерферометра космос–Земля с базой в 1,5 млн км [61, 62].

Космическая обсерватория "Миллиметр" имеет уникальный научный потенциал для исследования Вселенной также и в режиме одиночного телескопа, так как измерения не будут ограничены поглощением атмосферы в терагерцовом диапазоне частот. Для оснащения этих телескопов научными приборами мирового класса требуются сверхпроводниковые структуры с уникальным набором параметров, удовлетворяющим потребностям космических и наземных миссий. Применение современных методов нанoeлектроники позволяет реализовывать сверхпроводниковые интегральные структуры и приёмные устройства на их основе для работы в терагерцовой спектральной области с предельной (квантовой) чувствительностью. В данном разделе описаны приёмные системы двух частотных диапазонов для космической обсерватории "Миллиметр"; в частности, приёмные СИС-элементы диапазона 210–275 ГГц с двухполосной шумовой температурой менее 20 К, что

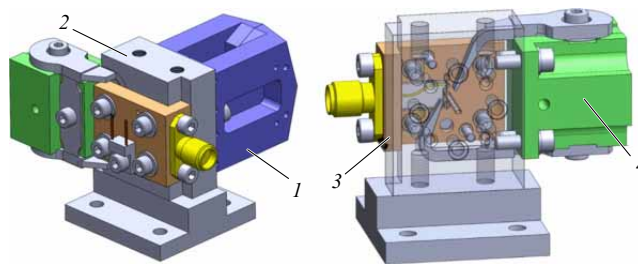


Рис. 4. 3D-модель блока смесителя для диапазона частот 210–275 ГГц: 1 — входной рупор, 2 — центральная часть с волноводом, 3 — задняя часть с микросхемой смесителя, 4 — магнитный блок для подавления эффекта Джозефсона [33].

лишь в 1,5 раза превышает квантовый предел hf/k_B и ниже лучших известных к настоящему времени результатов. Также представлены результаты исследования приёмных элементов с рабочей частотой до 950 ГГц.

3.1. СИС-смеситель диапазона 210–275 ГГц

При проектировании блока смесителя для диапазона частот 210–275 ГГц была использована модульная конструкция; этот подход был разработан и апробирован при создании приёмников 9-го диапазона для радиоинтерферометра ALMA [63]. Блок смесителя (рис. 4) [33] состоит из нескольких отдельных элементов: входного рупора (1), центральной части с волноводом (2), сменного блока задней части с замыкателем (3), в котором установлен чип смесительного элемента, и блока с двумя магнитными штырями для подавления джозефсоновского тока СИС-перехода (4). Приёмный чип (шириной 150 мкм) расположен в прямоугольном волноводе размером 1000 × 500 мкм на расстоянии 230 мкм от задней части волновода, ортогонально направлению распространения (рис. 5а, б) [33]. СИС-переход Nb–AlO_x–Nb помещён в планарную настроечную структуру Nb/SiO₂/Nb, изготовленную на кварцевой подложке толщиной 125 мкм. Для предотвращения утечки высокочастотного входного сигнала через заполненный диэлектриком волновод, который образует кварцевая подложка в металлическом канале, использовались блокирующие фильтры нижних частот (рис. 5б).

Для достижения предельных характеристик смесителя туннельный СИС-переход должен быть хорошо согласован с сопротивлением входного волновода на

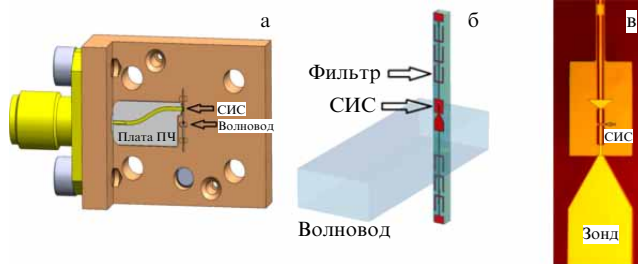


Рис. 5. Детали смесителя диапазона 210–275 ГГц: (а) 3D-модель блока замыкателя с платой для согласования по ПЧ. Стрелками на рисунке указаны смесительный СИС-переход и волновод; (б) 3D-модель СИС-смесительного элемента на основе двухстороннего чипа, размещённого внутри волноводного канала. Входной рупор расположен на передней стороне блока волноводного смесителя; (в) фотография центральной части СИС-смесительного элемента [33].

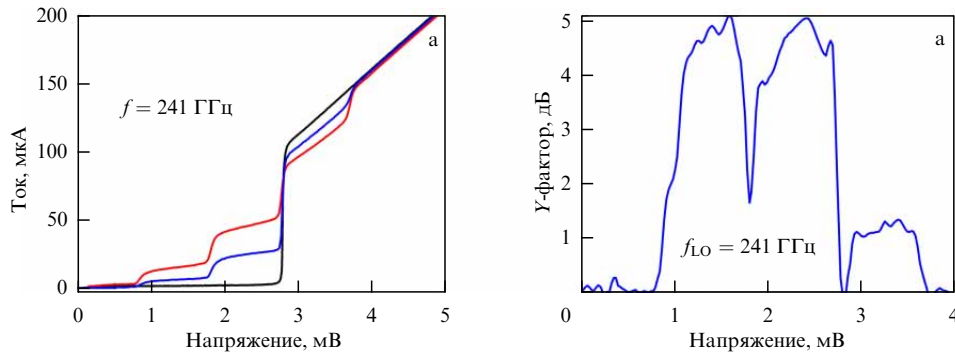


Рис. 6. (а) ВАХ СИС-смесителя с накачкой на частоте 241 ГГц для двух значений мощности [33]. (б) Зависимость отклика (Y -фактора) от напряжения на СИС-смесителе [33].

высоких частотах и с сопротивлением усилителя 50 Ом во всей полосе промежуточных частот. Для согласования волноводного импеданса примерно 400 Ом и высокочастотного импеданса SIS использовались волноводный зонд и настроечная структура. Комбинация копланарной (CoPlanar Waveguide, CPW) и микрополосковой (MicroStrip Line, MSL) линий использовалась для настройки собственной ёмкости туннельного СИС-перехода и обеспечения согласования результирующего импеданса СИС-структуры с волноводом на высоких частотах (рис. 5в). Такой подход позволил сделать настроечные структуры более компактными. Поскольку длины волн в линиях настройки в диапазоне ПЧ значительно превышают размеры структуры, микрополосковые линии настройки добавляют некоторую ёмкость к импедансу образца на ПЧ. Для согласования выходного импеданса смесителя с усилителем предусмотрена возможность размещения согласующей структуры. В работе [33] мы использовали печатную плату с линией сопротивлением 50 Ом без каких-либо дополнительных настроечных элементов (рис. 4а).

Для оценки частотного диапазона согласования СИС-смесителя использовался метод фурье-спектрометра Майкельсона (Fourier Transform Spectrometer, FTS). Широкополосный источник излучения субтерагерцового диапазона (чёрное тело, нагретое до 1500 К) был согласован с FTS, в котором в качестве детектора использовался СИС-смеситель. Напряжение на смесителе выбиралось чуть ниже щелевого; отклик на постоянном токе измерялся в зависимости от положения подвижного зеркала. Эти данные с помощью преобразования Фурье позволяют получить характеристику согласования смесителя с излучением в диапазоне от частоты. Экспериментальные данные демонстрируют хорошее согласование смесителя в диапазоне от 210 до 280 ГГц, в полном соответствии с результатами численного моделирования.

При подаче мощности гетеродина частотой f на ВАХ СИС-смесителя возникают квазичастичные ступени, обусловленные туннелированием квазичастиц под действием излучения (рис. 6а); размер этих ступеней отсчитывается от щелевого напряжения и равен hf/e . Рабочая точка смесителя выбирается на середине такой ступени; эффект Джозефсона приводит к появлению дополнительных шумов особенностей на ВАХ, поэтому его подавляют магнитным полем. Шумовая температура смесителя в двухполосном режиме определялась стандартным методом измерения Y -фактора; при этом измеряются отклики на ПЧ при двух различных температу-

рах нагрузки на входе приёмника. В качестве "горячей" нагрузки использовался поглотитель комнатной температуры (295 К), а в качестве "холодной" нагрузки — поглотитель, охлаждаемый жидким азотом (78 К). Y -фактор определялся путём вычитания откликов по ПЧ, измеренных в дБ для горячей и холодной нагрузок. На рисунке 6б показана зависимость Y -фактора приёмника от напряжения смещения, измеренная для гетеродина 241 ГГц при ПЧ 6,5 ГГц (полоса пропускания фильтра ПЧ 60 МГц). Значение Y -фактора в лучшей точке составляет 5 дБ, что соответствует шумовой температуре приёмника около 22 К. Значения шумовой температуры T_n (рис. 7 [33, 64]) получены без каких-либо поправок на потери в делителе луча и окне криостата; они лишь вдвое превышали значение hf/k_B в диапазоне частот от 240 до 275 ГГц; полученные значения соответствуют техническим требованиям к приёмнику диапазона 210–275 ГГц космического радиотелескопа "Миллиметрон".

Подробное обсуждение вкладов отдельных компонентов в итоговую шумовую температуру СИС-смесителя приведено в работе [64]; оценки вкладов можно суммировать следующим образом [33]: а) майларовый разделитель пучка толщиной 6 мкм даёт вклад в температуру смесителя 0,6 К; б) входное окно приёмника — 0,5 К; в) тракт ПЧ (представляющий собой комбинацию криогенного изолятора Ramtech 4–12 ГГц и криогенного усилителя) — 6 К. Отметим, что квантовый предел для СИС-смесителя в двухполосном режиме (DSB) соста-

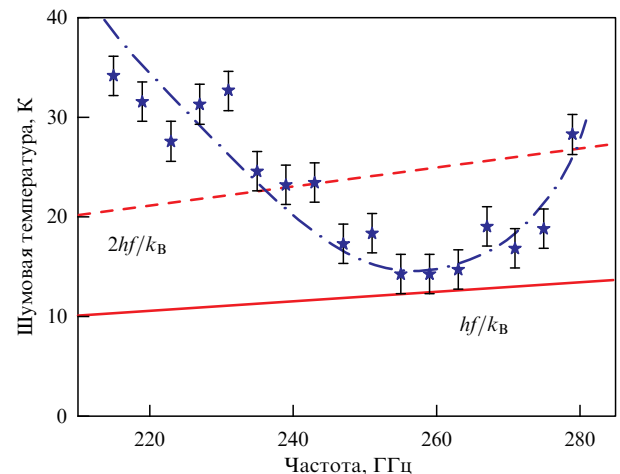


Рис. 7. Шумовая температура смесителя в двухполосном режиме (DSB) [33].

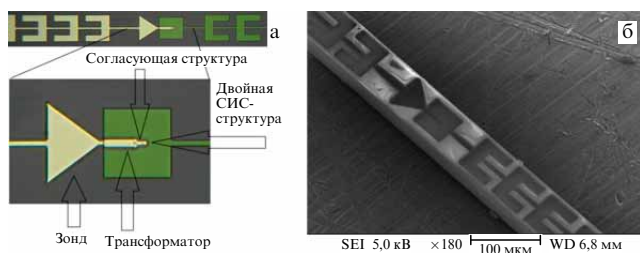


Рис. 8. Схема (а) и СЭМ-фотография (б) высокочастотного СИС-смесителя для проекта СНАМР+. Центральная часть чипа (включая двойной СИС-переход, трансформатор и зонд) увеличена [33].

влияет $hf/2k_B$ [28], что соответствует 5,8 К на частоте 250 ГГц. Стабильность приёмника оценивалась [33] путём записи зависимости выходного сигнала приёмника от времени в тех же рабочих условиях, что и при измерении шумовой температуры; для ограничения полосы пропускания сигнала использовался полосовой фильтр 60 МГц. Измеренное на частоте гетеродина 241 ГГц время дисперсии Аллана достигало 10 с [64], оно обусловлено стабильностью всех компонентов приёмника и является достаточным для проведения радиоастрономических измерений как на наземных радиотелескопах, так и на борту космической обсерватории.

3.2. СИС-смеситель диапазона 700–950 ГГц

Для создания широкополосного приёмника диапазона частот 790–950 ГГц для СНАМР+ мы использовали сдвоенные (twin) СИС-переходы [65, 66] (каждый площадью 0,5 мкм² (рис. 8)), связанные волноводным зондом с электрической компонентой поля прямоугольного волновода размером 300 × 75 мкм. Для СИС-смесителя [67, 68] были использованы туннельные переходы Nb–AlN–NbN с высокой плотностью тока, включённые в микрополосковую линию NbTiN–Al [55]. Микрополосковые электроды (нижний электрод из NbTiN толщиной 320 нм и верхний электрод из Al толщиной 500 нм) были разделены изолятором SiO₂ толщиной 250 нм.

Поскольку сопротивление туннельного перехода R_n экспоненциально снижается с уменьшением толщины барьера, а ёмкость C растёт линейно, для СИС-переходов с барьером AlN, позволяющих достигать большой плотности туннельного тока, реализуется более высокое значение $1/R_n C$, что обеспечивает более широкую полосу приёма. Схема "сдвоенного" смесителя была реализована при использовании двух СИС-переходов, расположенных на расстоянии 6,5 мкм друг от друга и встроенных в микрополосковую линию шириной 4,5 мкм. Приёмная структура подключалась к антенне с помощью трансформатора импеданса размерами 7 × 27 мкм [64], предназначенного для согласования переходов с высокой плотностью тока с волноводным зондом (см. рис. 8).

Использование СИС-переходов с барьером AlN позволяет получать хорошее качество туннельных структур (отношение сопротивлений под щелью к нормальному более 20) для высокой плотности туннельного тока вплоть до 30 кА см⁻². В результате был реализован не только широкий рабочий диапазон приёмника (от 675 до 950 ГГц), но шумовая температура, не превышающая в лучших точках величину $3hf/k_B$ (рис. 9а). На рисунке представлена шумовая температура в двухполосном ре-

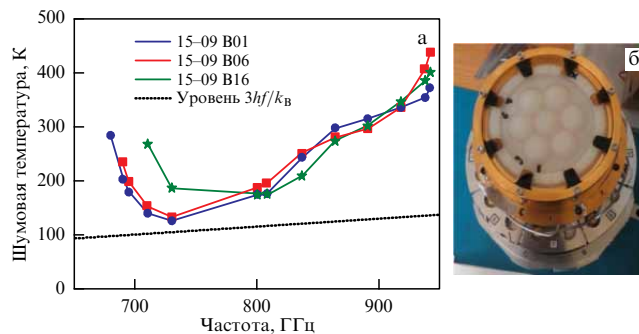


Рис. 9. (а) Шумовая температура в двухполосном режиме (DSB) для трёх СИС-смесителей в зависимости от частоты. Пунктирная линия показывает шумовую температуру, соответствующую $3hf/k_B$ [33]. (б) Фотография 7-пиксельной матрицы СИС-смесителей для высокочастотного (790–950 ГГц) приёмника СНАМР+ на радиотелескопе APEX с линзовой системой в верхней части корпуса картриджа [33].

жиме (DSB) для трёх СИС-смесителей в зависимости от частоты. Шумовая температура была скорректирована с учётом потерь во входном окне и делителе луча.

Разработанные приёмные структуры были использованы для модернизации высокочастотных приёмников 7-пиксельной матрицы для прибора СНАМР+, установленного на телескопе APEX (Atacama Pathfinder Experiment), диапазон входных частот 790–950 ГГц, диапазон ПЧ 4–12 ГГц (рис. 9б). Использование структур Nb–AlN–NbN, включённых в линию NbTiN/Al [54, 64, 68, 69], позволило повысить чувствительность высокочастотного диапазона СНАМР+ в 1,3–1,5 раза [69]. В случае хороших погодных условий, при прозрачности атмосферы около 50 % [70], скорость картографирования радиоастрономических источников улучшится примерно на 40 %. Разработанные СИС-смесители могут быть использованы также для китайской обсерватории на Куполе А (Антарктика), для бразильского телескопа LLAMA, расположенного в Андах, а также для космической обсерватории "Миллиметрон" (в режиме одиночного телескопа).

4. Интегральные приёмные структуры

На основе сверхпроводниковых туннельных переходов можно создавать целый ряд элементов и устройств, работающих в ТГц-диапазоне и имеющих широкий функционал. Это не только сверхчувствительные приёмные элементы, описанные в предыдущем разделе, но и сверхпроводниковые генераторы гетеродина (СГГ) ТГц-диапазона [47, 71–73], а также гармонические смесители для измерения спектра СГГ и синхронизации его с опорным синтезатором для реализации режима фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [73, 74] и криогенные фазовые детекторы [75, 76]. Более того, развитая технология изготовления сверхпроводниковых интегральных схем [31, 32, 47] позволяет объединить все перечисленные элементы на одной подложке и реализовать полностью сверхпроводниковый интегральный приёмник (СИП) ТГц-диапазона [47, 72, 77]. В данном разделе будут описаны основные элементы СИП и приведены примеры его успешного применения как на борту высотного аэростата для исследования атмосферы Земли [47, 72, 78, 79], так и в лаборатории для измерения излучения новых генераторов ТГц-диапазона [80], спектров по-

глошения газов [81] и исследования субТГц-излучения человеческого тела в условиях физиологического стресса [82].

4.1. Сверхпроводниковый генератор гетеродина

Исследования возможности использования джозефсоновских переходов для генерации высокочастотного электромагнитного излучения начались вскоре после открытия эффекта Джозефсона [83–85]. Одним из наиболее изученных является распределённый джозефсоновский переход (РДП) длиной много больше, чем глубина проникновения магнитного поля в переход. РДП представляет собой длинный туннельный СИС-переход, в котором приложенное магнитное поле и ток смещения создают однонаправленный поток джозефсоновских вихрей [2, 3, 47, 72, 86–89], каждый из них содержит один квант магнитного потока $\Phi_0 = h/2e \approx 2 \times 10^{-15}$ Вб. В англоязычной литературе такие генераторы на основе потока джозефсоновских вихрей называются "flux-flow oscillator" (FFO). Для создания постоянного магнитного поля, приложенного к РДП, используется внешний соленоид или встроенная линия управления полем, через которую пропускается I_{CL} . При выходе джозефсоновского вихря из перехода генерируется одноквантовый импульс напряжения, причём частота излучения связана с напряжением на переходе V_{DC} фундаментальными соотношением Джозефсона $f = (2\pi/\Phi_0)V_{DC}$ с коэффициентом около 483,6 ГГц мВ⁻¹. Скорость и плотность потока джозефсоновских вихрей и, следовательно, мощность и частота излучаемого сигнала могут регулироваться независимо одновременным заданием тока смещения и магнитного поля.

Для исследования РДП были созданы интегральные схемы, содержащие согласованный с РДП широкополосный детектор на основе СИС-перехода [71–74]. Типичный набор вольт-амперных характеристик РДП, измеренных при различных магнитных полях, показан на рис. 10. Одновременно с регистрацией ВАХ РДП измеряется накачка СИС-детектора, уровень которой представлен цветом. Критерием уровня накачки является изменение туннельного тока I_p при напряжениях чуть ниже щелевого (рис. 11) вследствие стимулированного туннелирования квазичастиц. Значение I_p обычно нормируется на скачок тока на щелевом напряжении I_g ; оптимальным для работы СИС-смесителя является

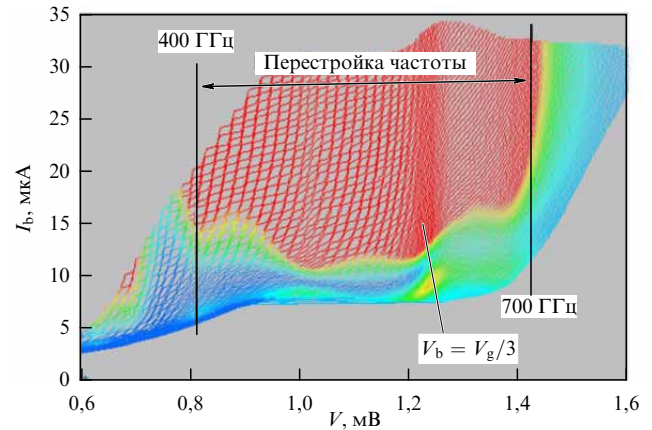


Рис. 10. Набор ВАХ РДП, измеренных при различных магнитных полях. Цветом обозначен уровень накачки СИС-детектора в данной рабочей точке [72].

значение $I_p/I_g = 0,25$. Из рисунка 10 видно, что I_p/I_g больше 0,25 реализуется для напряжений РДП от 0,82 до 1,45 мВ, что соответствует диапазону частот 400–700 ГГц. Набор ВАХ СИС-детектора, измеренных при различных значениях частоты и выходной мощности РДП, показан на рис. 11. Следует отметить, что рабочий диапазон накачки СИС-перехода ограничен структурой согласующего тракта (его топологией и материалами), а не самим РДП.

На ВАХ РДП (см. рис. 10) можно выделить несколько областей с различными режимами работы сверхпроводникового генератора. При малых магнитных полях расстояние между вихрями велико, и они слабо взаимодействуют; с ростом приложенного магнитного поля ВАХ смещается линейно в сторону более высоких напряжений. При этом происходит генерация мощного широкополосного "шумового" сигнала [90]. При повышении магнитного поля происходит переход в режим резонансного потока джозефсоновских вихрей; на ВАХ проявляется набор чётко выраженных ступеней Фиске, вызванных влиянием отражённой электромагнитной волны на вход вихрей в переход.

Резонансный режим реализуется до "граничного" напряжения V_b , при котором ступени Фиске исчезают. Граничное напряжение V_b равно трети щелевого напря-

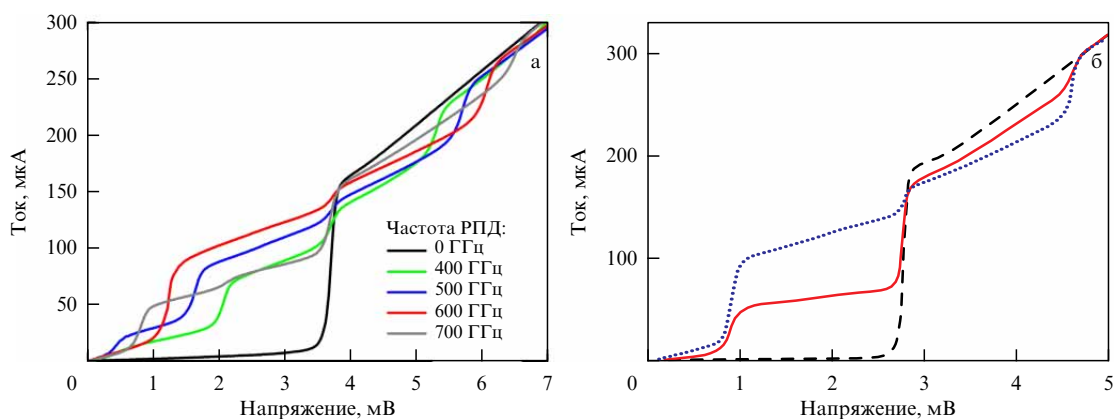


Рис. 11. (а) Набор ВАХ СИС-детектора в отсутствие сигнала РДП (чёрная кривая) и при накачке сигналом РДП на разных частотах (цветные кривые) [46, 72]. (б) ВАХ СИС-детектора с накачкой сигналом РДП на частоте 470 ГГц при двух уровнях мощности [72].

жения и составляет около 0,95 мВ для РДП на основе СИС-переходов Nb–AlO_x–Nb и 1,2 мВ для РДП на основе Nb–AlN–NbN. Такая трансформация режима работы РДП объясняется эффектом самовоздействия джозефсоновского излучения, генерируемого в переходе, на сам переход [91–93], что приводит к стимулированным туннелированиям квазичастиц под действием джозефсоновского излучения РДП. Эффект проявляется в резком увеличении квазичастичного тока (следовательно, увеличении затухания) при значениях напряжения самонакачки $V_{SC} = V_g/(2n + 1)$, что даёт $V_g/3$ для $n = 1$, его величина растёт с плотностью тока РДП. Данный эффект хорошо объясняет не только наличие скачков тока на ВАХ при "граничном" напряжении, но также резкое сглаживание ступеней Фиске (исчезновение резонансного режима) при напряжениях выше $V_g/3$, вызванного увеличением внутреннего затухания в длинном переходе [93]. Геометрические резонансы (ступени Фиске) могут существовать только при низком нормированном затухании, $\alpha l < 1$, где $l = L/\lambda_J$ — длина перехода, нормированная на джозефсоновскую длину λ_J .

Начиная с самой первой экспериментальной реализации РДП его теоретическое описание было ограничено феноменологическим уравнением синус-Гордона. Данная модель может качественно описать топологические возбуждения в джозефсоновских контактах, но она не способна установить количественную связь между туннельными токами и электромагнитным излучением. Микроскопическая модель работы РДП была развита в работах [94–96], в которых стало возможным рассчитать процессы в переходе с учётом энергетической щели сверхпроводников. Такой подход, основанный на теории микроскопического квантового туннелирования, описывает существенные особенности реальных систем как в симметричных структурах Nb–AlO_x–Nb, так и в асимметричных переходах Nb–AlN–NbN; это было подтверждено сравнением рассчитанных вольт-амперных характеристик с экспериментальными результатами [94, 95].

Для измерения спектров излучения СГГ была разработана сверхпроводниковая интегральная схема, содержащая РДП, СИС-смеситель и элементы для их согласования по высокой частоте (250–750 ГГц). Выходной сигнал РДП подаётся на гармонический смеситель (ГС), представляющий собой СИС-смеситель площадью около 1 мкм², работающий в режиме смещения сигнала РДП с n -й гармоникой внешнего источника СВЧ (синтезатора) частоты f_S около 20 ГГц. Чтобы сигнал синтезатора не достигал РДП, в тракте между РДП и ГС предусмотрен фильтр высоких частот с нижней границей пропускания около 200 ГГц. Выходной сигнал ГС на промежуточной частоте $f_{ПЧ} = \pm(f_{РДП} - n f_S)$ усиливается каскадом усилителей: сначала криогенным усилителем СВЧ с шумовой температурой около 5 К и коэффициентом усиления порядка 30 дБ, затем усилителем при комнатной температуре с коэффициентом усиления порядка 60 дБ. Часть сигнала ПЧ через направленный ответвитель направляется на анализатор спектра, который синхронизирован по фазе с синтезатором; это позволяет с высокой точностью измерить ширину линии генерации РДП в частотном диапазоне от 250 до 750 ГГц [71–74]. Были проведены детальные исследования зависимости ширины линии генерации СГГ от его геометрии и параметров, оптимизированы конструкция и топология РДП. Такие разработки позволили реализовать непрерывную пере-

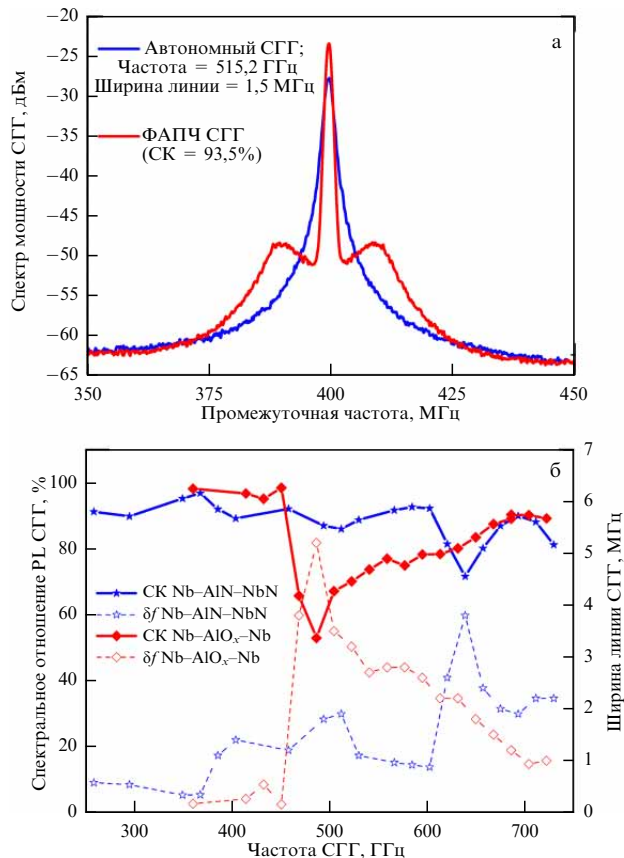


Рис. 12. (а) Спектры СГГ на частоте 515,2 ГГц (синяя кривая — частотная стабилизация, красная кривая — фазовая стабилизация СГГ). Ширина линии 1,5 МГц; отношение сигнал/шум SNR = 36 дБ; спектральное качество СК = 93,5 %. Измерения проводились с полосой разрешения 1 МГц в диапазоне ± 50 МГц от несущей [72]. (б) Зависимость от частоты ширины линии оптимизированного СГГ и спектрального качества СГГ в режиме ФАПЧ. Представлены данные для двух типов СГГ на основе РДП: Nb–AlO_x–Nb (ромбики) и Nb–AlN–NbN (звёздочки) [47].

стройку частоты сверхпроводникового генератора во всём рабочем диапазоне при ширине линии излучения для оптимизированных конструкций РДП менее 10 МГц (рис. 12).

Разработанная интегральная схема может быть использована не только для измерения спектра СГГ, но и для стабилизации его частоты с помощью системы фазовой автоподстройки частоты [71–74]. В системе ФАПЧ сигнал ПЧ сравнивается в частотно-фазовом дискриминаторе с опорным сигналом 400 МГц, синхронизированным по фазе с синтезатором 20 ГГц. Выходной сигнал, пропорциональный разности фаз, возвращается через регулятор полосы пропускания (с максимальной полосой пропускания около 20 МГц) и подаётся на РДП через "холодный" резистор 50 Ом, установленный на плате смещения интегральной микросхемы. Чтобы выполнить точное измерение ширины линии РДП в автономном режиме, спектры ПЧ усредняются до 100 раз при использовании частотной стабилизации с достаточно узкой полосой пропускания сигнала (< 10 кГц). Узкополосная обратная связь устраняет низкочастотные дрейф и помехи, не влияя на ширину и форму линии, которая определяется нелинейной суперпозицией теплового и дробового шума [71–74]. В случае если эффективная

ширина спектра флуктуаций больше самосогласованной ширины линии излучения, спектр РДП в автономном режиме имеет лоренцеву форму (рис. 12а, синяя кривая). ФАПЧ может значительно сузить ширину линии РДП в случае, когда автономная ширина линии Δf_A , измеренная на уровне -3 дБ, меньше, чем полоса регулирования ФАПЧ. На рисунке 12а приведён спектр мощности РДП в режиме фазовой синхронизации при полосе разрешения анализатора спектра 1 МГц. Ширина линии РДП в режиме ФАПЧ может быть уменьшена существенно ниже значения, определяемого дробовым шумом и тепловыми флуктуациями туннельного перехода в автономном режиме, и при измерении относительно опорного синтезатора ограничена только разрешением спектроанализатора. Следствием фазовой синхронизации является появление вертикального участка ($R_d^B = 0$) на ВАХ РДП при напряжении, соответствующей частоте, на которой РДП синхронизирован; размер этой области по току составляет единицы мкА, он определяется полосой регулирования системы ФАПЧ и дифференциальным сопротивлением РДП в рабочей точке.

Для обеспечения стабильности фазовой синхронизации СГГ требуется обеспечить достаточно высокое значение спектрального качества (СК). Этот параметр определяется как отношение мощности на несущей частоте к общей мощности, излучённой генератором. Измеренные в диапазоне 250–750 ГГц значения ширины автономной линии составили от 0,5 до 7 МГц, что позволяет синхронизовать соответственно от 95 % до 35 % излучённой мощности СГГ (рис. 12б).

Для эффективной синхронизации сверхпроводникового генератора гетеродина в составе интегрального спектрометра субТГц диапазона предложена и апробирована концепция криогенной системы фазовой автоподстройки частоты, ключевым элементом которой является новый элемент сверхпроводниковой электроники — криогенный фазовый детектор [75, 76]. Исследованы квазичастичный и джозефсоновский режимы работы КГФД на основе СИС-перехода; показано, что джозефсоновский режим является более предпочтительным при использовании КГФД в составе системы ФАПЧ. За счёт компактности и малых задержек петли достигнута ширина полосы синхронизации системы около 70 МГц. Реализованная система ФАПЧ позволяет синхронизировать более 90 % мощности излучения генератора с шириной линии 12 МГц, что в семь раз больше, чем полупроводниковая система ФАПЧ.

Был разработан и исследован источник ТГц-излучения на основе РДП, излучающий сигнал в открытое пространство. РДП был интегрирован с передающей щелевой антенной на одной микросхеме [97–100], микросхема размещается на поверхности собирающей эллиптической линзы из кремния, так чтобы антенна находилась точно в фокусе линзы. С целью фазовой синхронизации РДП часть выходной мощности ответвляется на ГС (на основе СИС-смесителя площадью 1,4 мкм²) посредством дополнительной микрополосковой линии передачи, размещённой параллельно линии передачи к передающей антенне. Выходной сигнал ГС на промежуточной частоте 0–800 МГц, являющийся результатом свёртки сигнала РДП и n -й гармоники опорного синтезатора, поступает в петлю обратной связи с системой ФАПЧ, которая синхронизирует сигнал по фазе к опорному генератору 400 МГц. Было проведено измерение

выходной мощности такого источника в открытое пространство во всём рабочем диапазоне частот для разных конструкций генератора [101, 102]. Для некалиброванных измерений выходной мощности использован охлаждаемый до 4,2 К полупроводниковый болометр, расположенный в вакуумном заливном криостате. Результаты оценки мощности, излучённой в открытое пространство, показывают, что характерная мощность излучения РДП в открытое пространство составляет порядка 1 мкВт и значительно зависит от конструкции передающего тракта, а в пике мощность может достигать нескольких мкВт. Таким образом, была продемонстрирована успешная работа РДП в качестве внешнего терагерцового генератора для практических задач, где необходима широкая перестройка частоты и высокое качество спектральной линии, но при этом не требуется большая мощность сигнала.

4.2. Сверхпроводниковый интегральный приёмник

Успешная разработка и практическая реализация отдельных элементов приёмника ТГц-диапазона на основе СИС-смесителя позволили перейти к созданию полностью сверхпроводникового интегрального приёмника. В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН была предложена и апробирована концепция сверхпроводникового интегрального приёмника (СИП) [77, 103, 104], 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. На микросхеме СИП размещаются сверхпроводниковая планарная приёмная антенна, сверхпроводниковый генератор гетеродина, СИС-смеситель с двумя туннельными переходами площадью 0,8 мкм² каждый, а также гармонический СИС-смеситель, использующийся в системе фазовой автоподстройки частоты для стабилизации частоты СГГ. При подаче лишь постоянного питания от батарей микросхема такого приёмника работает как супергетеродинный приёмник в субмиллиметровом диапазоне волн, не требуя никакого громоздкого дополнительного СВЧ-оборудования. Микросхема изготавливается на кремниевой подложке толщиной 0,5 мм методами современной микроэлектроники и содержит иммерсионную линзовую дипольную или щелевую антенну для подачи сигнала на сверхпроводниковый СИС-смеситель. Размер схемы с контактными площадками составляет 4 × 4 мм. Интеграция сверхпроводниковых элементов в единое устройство позволила реализовать уникальное сочетание массогабаритных и частотных характеристик, до сих пор не имеющее аналогов в мире.

Принципиальная блок-схема приёмника для измерения спектрального распределения внешнего электромагнитного сигнала показана на рис. 13 [107], а фото микросхемы приёмника — на рис. 14 (общий вид и центральная часть) [108]. На фотографии центральной части (рис. 14б) видны СГГ на основе РДП размером 400 × 16 мкм², двойная дипольная антенна, СИС-смеситель с двумя переходами субмикронных размеров и ГС площадью примерно 1 мкм². 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

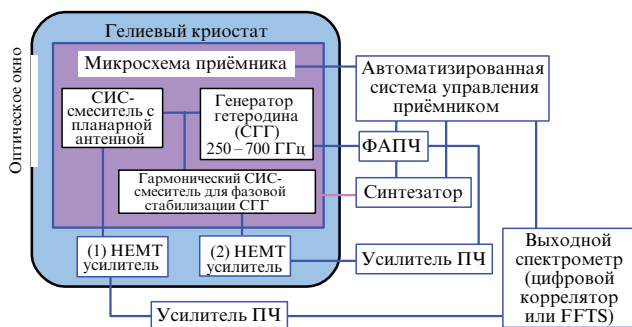


Рис. 13. Блок-схема сверхпроводящего интегрального приёмника [107].

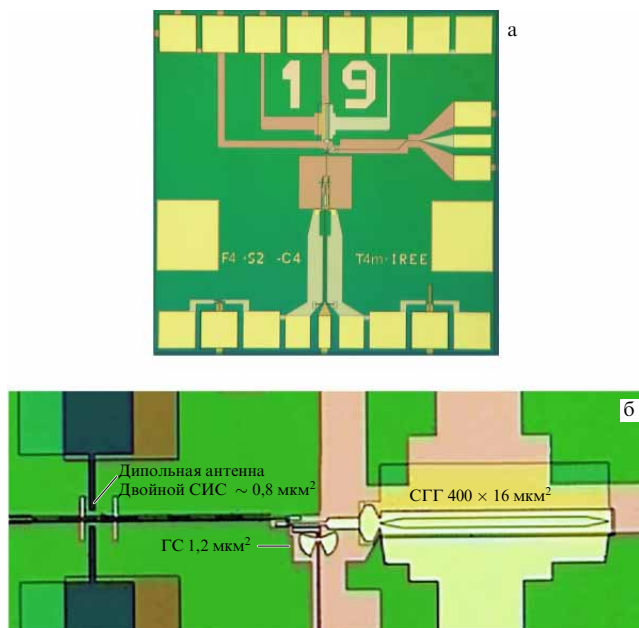


Рис. 14. (а) Фотография микросхемы сверхпроводящего интегрального приёмника с двойной шелевой антенной [108]. (б) Микрофотография центральной части СИП с двойной дипольной антенной [108].

и генератор по постоянному току смещения) распределяется между двумя СИС-смесителями.

Микросхема интегрального приёмника устанавливается на поверхности кремниевой линзы [108], закреплённой в специальном криогенном блоке, который обеспечивает охлаждение микросхемы вместе с окружающими её элементами и крепление платы с фильтрами. По этой плате передаются радиочастотные сигналы от микросхемы и задаются токи питания чипа. Поскольку СГГ крайне чувствителен к магнитному полю, необходимо экранирование микросхемы СИП. Криогенный блок представляет собой два концентрических цилиндра, обеспечивающих экранирование магнитного поля. Внешний цилиндр изготовлен из криопермаллоя, внутренний — из меди, покрытой слоем свинца толщиной 100 мкм, переходящим в сверхпроводящее состояние. Соединение контактов платы с контактами микросхемы осуществляется при помощи алюминиевых бондирующих проволок толщиной 25 мкм. Криогенный блок с платой и микросхемой приёмника помещается в вакуумном объёме

гелиевого криостата с оптическим окном; охлаждение микросхемы СИП осуществлялось через алюминиевые хладопроводы диаметром 2 мм, обеспечивая рабочую температуру порядка 4,2 К.

Шумовая температура интегрального приёмника определялась из отношения сигнала на выходе приёмника, измеренного в режиме переключения горячей и холодной нагрузок (Y-фактор). Лучшее значение температуры составляет менее 120 К на частотах около 500 и 610 ГГц, а в области 570 ГГц наблюдается широкий пик, частично связанный с наличием линии поглощения воды в атмосфере, а также со свойствами настроечной структуры, интегрированной со смесителем. Для спектральных измерений важно, чтобы шумовая температура приёмника была равномерна во всём диапазоне промежуточной частоты. Для этих целей были разработаны и включены в конструкцию микросхемы СИП-элементы, согласующие СИС-смеситель с трактом ПЧ в широкой полосе (рис. 14а). Непосредственно на самом чипе размещены отстрочные ёмкости, которые закорачивают на землю по переменному току отрезок копланарной линии, играющей роль отстраивающей индуктивности. Последнее, наряду с разделением копланарной линии на две секции, позволило увеличить ширину полосы ПЧ-тракта до 4 ГГц и добиться хорошей равномерности амплитудно-частотной характеристики тракта в диапазоне 4–8 ГГц. Частота генерации однозначно связана с напряжением на генераторе при помощи соотношения Джоузефсона. Линия генерации сверхпроводящего генератора гетеродина с высокой степенью точности имеет лоренцеву форму [109, 110] (см. предыдущий раздел). Для СГГ в составе интегрального приёмника в диапазоне частот 500–700 ГГц в режиме частотной стабилизации достигнута ширина линии от 9 до 2 МГц, что позволяет с помощью системы ФАПЧ в режиме фазовой синхронизации получить от 35 до 90 % мощности в центральном пике.

Для проведения практических исследований важно знать стабильность интегрального приёмника, которая определяет оптимальное время интегрирования и реально достижимое время измерения для одного интегрирования, а следовательно, необходимую частоту цикла калибровок. Стабильность полной системы СИП была определена путём измерения выходных шумовых флуктуаций приёмника в полосе 17 МГц [72]. Для двух ПЧ-каналов, используемых для определения дисперсии Аллана, время интеграции Аллана составляет около 14 с. Если для определения дисперсии Аллана берётся разность двух каналов (так называемый спектроскопический, или дифференциальный, режим), время интеграции Аллана равно 20 с. Это сравнимо со стабильностью, измеренной для лучших астрономических приёмников. Для проведения атмосферных измерений обычно используется время интегрирования порядка 1 с, что обусловлено параметрами автокоррелятора. Таким образом, стабильность СИП не накладывает ограничений на стратегию наблюдения.

4.3. Проект TELIS

Спектрометр на основе СИП для исследования газовых составляющих атмосферы Земли с борта высотного аэростата был успешно использован для выполнения международного проекта TERAHERTZ LIMB SOUNDER (TELIS) [47, 72, 78, 104–108]. Спектрометр использо-

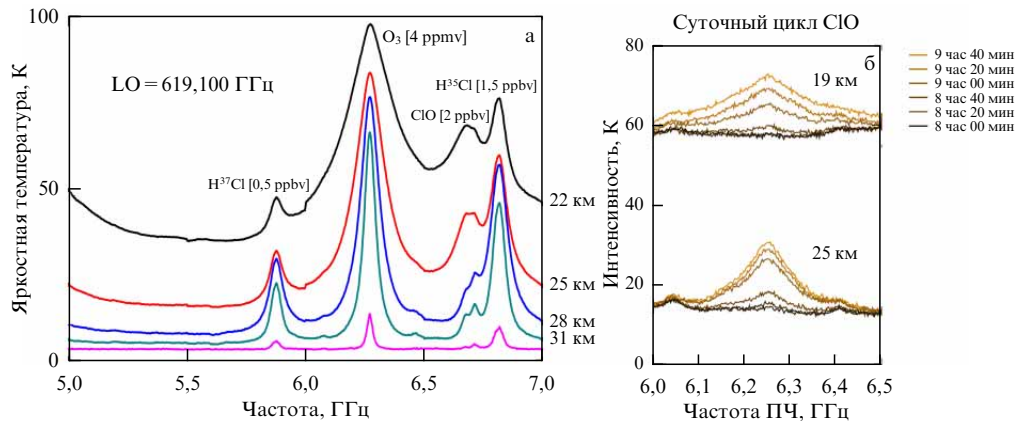


Рис. 15. (а) Спектры двух изотопов HCl, озона и ClO; частота гетеродина 619,1 ГГц. На графике представлены спектры для высоты касания луча 22–31 км и угла обзора 6°. Показаны соответствующие оценочные концентрации наблюдаемых газов [47]. (б) Спектры ClO, зарегистрированные с помощью СИП (частота СГГ = 507,3 ГГц) с высоты 34 км. Два набора спектров соответствуют высотам касания соответственно 25 и 19 км. Ясно видно увеличение ClO с течением времени после восхода солнца. Интенсивность принятого сигнала показана по оси ординат в кельвинах [72].

вался для исследования распределения в атмосфере различных соединений (таких как ClO, BrO, O₃, HCl, HOCl, H₂O и трёх её изотопов, NO₂, NO, N₂O, HNO₃, CH₃Cl, HCN и многих других). Прибор работает в режиме лимбового зондирования с борта высотного аэростата [47, 72, 78, 107, 108]. Было проведено три успешных научных запуска спектрометра TELIS на борту высотного аэростата совместно со спектрометром MIPAS-B. Инструмент продемонстрировал возможность работы в экстремальных условиях (высота до 40 км, температура минус 90 °C) и позволил собрать большое количество научной информации, подтверждающее высокое спектральное разрешение и чувствительность прибора. Было записано несколько сотен лимбовых сканов, зарегистрированы спектры газовых составляющих атмосферы Земли. Каждый полёт продолжался более 10 ч, измерения проводились в непрерывном режиме на восьми выбранных заранее частотах; с учётом широкой полосы ПЧ 4–8 ГГц это позволило измерить спектры многих десятков газовых составляющих атмосферы. В диапазоне высот 12–36 км были получены также спектры изотопов различных веществ, в том числе изотопов воды и соляной кислоты (HCl) (рис. 15а) [47, 111, 112]. Были оценены концентрации наблюдаемых газов, они составили 0,5 и 1,5 ppbv для линий H³⁷Cl и H³⁵Cl соответственно.

В ходе полёта на высотном аэростате зарегистрированы спектры соединений хлора, брома и других примесей, ответственных за разрушение озонового слоя в атмосфере Земли; в течение полёта измерялись суточные вариации различных компонентов атмосферы. Различные соединения хлора могут каталитически разрушать озоновый слой. Такое разрушение озона особенно велико весной в арктических районах, когда прекращаются так называемые полярные вихри. В результате радикал ClO в заметных концентрациях становится активным. Этот радикал имеет относительно малое время жизни, для его образования необходимо солнечное излучение, что приводит к ежедневным циклическим изменениям его концентрации. На рисунке 15б показаны линии ClO, которые были измерены во время восхода Солнца [72]. Видно, что концентрация ClO действительно увеличивается со вре-

менем. В разрушении озонового слоя бром ещё более активен, чем хлор, но он содержится в гораздо меньших концентрациях. Впервые в терагерцовом диапазоне были зарегистрированы спектры BrO, интенсивность сигнала в данном случае составила всего лишь 0,3 К [47, 72], что соответствует предельно малой концентрации в несколько pptv.

Для исследования таких сложных сверхпроводниковых структур, как СИП, и для управления его работой во время полёта была создана многофункциональная автоматизированная система IRTECON (Integrated Receiver TESt and CONtrol) [113]. Модульная организация данной системы позволяет легко её адаптировать для широкого круга исследовательских задач. Автоматизированная система включает в себя развитые библиотеки для управления измерительными приборами, визуализации экспериментальных данных и математические алгоритмы для обработки результатов. Задача управления СИП в полёте заключается в постоянном мониторинге его состояния, подстройке системы ФАПЧ при необходимости и восстановлении режимов работы системы после сбоев. Была разработана комплексная методика определения основных характеристик СИП, процедуры поиска и многомерных оптимизаций его рабочих режимов для каждой выбранной частоты, а также устойчивые алгоритмы восстановления рабочих параметров СИП как для резонансного режима (ступени Фиске), так и для режима вязкого течения вихрей. В общей сложности оптимизируется до десяти параметров управления СИП. Вся информация записывается в базу данных и используется для выставления рабочих режимов приёмника в реальных измерениях.

4.4. Лабораторные приложения сверхпроводникового интегрального приёмника

Созданный на основе полётного инструмента стационарный вариант сверхпроводникового интегрального приёмника был успешно использован в лаборатории для приёма излучения из криогенных генераторов нового поколения диапазона 400–700 ГГц и спектрального анализа газовой смеси [80, 81, 112, 114]. С помощью такого спектрометра в субТГц-диапазоне проведён цикл

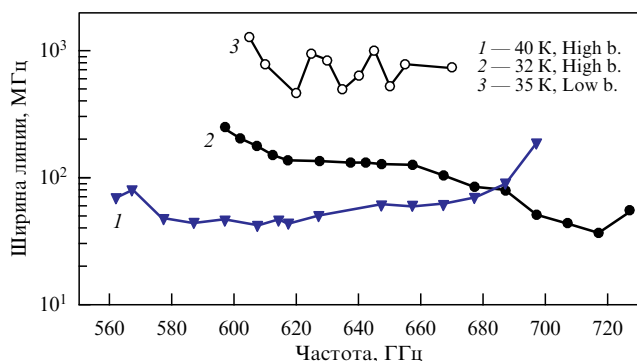


Рис. 16. Зависимость ширины линии излучения генератора от частоты при различных температурах в режиме малых и больших токов (low и high соответственно) [112].

исследований излучения из сверхпроводниковых генераторов на основе BSCCO мезаструктур. Генераторы на основе сверхпроводниковых высокотемпературных структур $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (BSCCO) последнее десятилетие широко исследуются во всём мире (как экспериментально, так и теоретически). Нами были впервые измерены спектры излучения генераторов на основе BSCCO мезаструктур при помощи сверхпроводникового интегрального приёмника [80]. Показано, что наилучшими спектральными характеристиками такой генератор обладает в режиме "больших токов" ("high-bias"). Типичные значения ширины линии BSCCO-генератора, измеренной в режиме "больших токов", составляли 10–100 МГц; форма спектральной линии с высокой степенью точности является лоренцевой. В режиме "малых токов" ("low-bias") структура излучает мощный широкополосный шум; ширина излучения составляет порядка 1 ГГц. В диапазоне от 450 до 740 ГГц измерены спектральные характеристики излучения высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) мезаструктур при температурах от 4,2 до 55 К (рис. 16) [112]. В дополнительных экспериментах получена минимальная ширина линии излучения 7 МГц и мощность 1–2 мкВт [112]. Результаты измерений показали, что сигнал BSCCO генератора может быть описан стандартной моделью фазо-диффузионного поля с экспоненциальной корреляционной функцией. Следует отметить, что эмиссионные характеристики осцилляторов BSCCO зависят от температуры в криостате T_b . Представленные здесь результаты были получены для T_b около 20 К, температуру контролировали с использованием специального нагревателя, установленного вблизи генератора. СИП находился в другом криостате, и его температура составляла 4,2 К.

Для более точного измерения ТГц-спектров поглощения аммиака и водяного пара с помощью мезаструктур был использован сверхпроводниковый интегральный приёмник с эффективным диапазоном перестройки частоты от 450 до 700 ГГц и частотным разрешением существенно меньше 100 кГц. В эксперименте ток смещения через BSCCO-генератор поддерживался постоянным, и он был настроен для генерации на частоте соответствующей газовой линии, а спектры промежуточной частоты измерялись с высокой точностью с помощью СИП. Измерения спектров газов проводились при $T_b = 4,2$ К, где ширина линии излучения излучателя со-

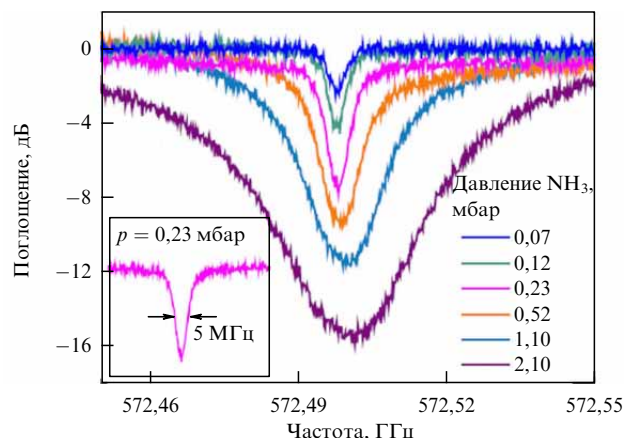


Рис. 17. Спектры поглощения аммиака (10%-ный водный раствор) при различных давлениях; измерения проводились с генератором терагерцового излучения на основе МДП в BSCCO и сверхпроводниковым интегральным приёмником (поглощение в пустой ячейке учтено). На вставке показан спектр поглощения паров аммиака при $p = 0,23$ мбар с шириной полосы поглощения 5 МГц [80].

ставляет 60 МГц при 572,5 ГГц (NH_3) и 57 МГц при 557 ГГц (H_2O). С помощью СИП [80, 114] были измерены с высоким разрешением спектры поглощения аммиака (рис. 17) и водяного пара в ТГц-диапазоне. Линии поглощения аммиака и воды сильно уширены при больших давлениях газа, ширина линии уменьшается с уменьшением давления. Для аммиака при $p = 0,23$ мбар наблюдается чёткое поглощение с шириной полосы поглощения около 5 МГц, как показано на вставке к рис. 17. При $p = 0,07$ мбар измеренная ширина линии составила 4 МГц (обусловлена доплеровским уширением). Наблюдаемые частоты вращательных уровней для аммиака (572,498 ГГц) и воды (556,936 ГГц) совпадают с литературными значениями.

С помощью СИП было исследовано излучение кожи человека на частотах 480 и 700 ГГц [82]. Показано, что излучение существенно отличается от ожидаемого сигнала чёрного тела, принимаемый сигнал от поверхности кожи модулируется уровнем психического стресса. Это открывает возможности для удалённого мониторинга состояния человека.

5. Заключение

Туннельные СИС-переходы являются основными элементами большинства устройств и схем низкотемпературной сверхпроводниковой электроники. В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН была разработана технология изготовления высококачественных туннельных переходов $\text{Nb} - \text{AlO}_x - \text{Nb}$ и многослойных микросхем с числом элементов до 100. Разработан целый ряд новых технологических процессов и методик изготовления сверхпроводниковых туннельных переходов с рекордными параметрами, выдерживающих более 10000 термоциклирований. Развитая технология изготовления высококачественных туннельных переходов использовалась при проведении целого ряда фундаментальных физических исследований и экспериментов. Разработаны и успешно реализованы одноквантовые цифровые устройства на основе сверхпроводниковых квантовых интерферометров, созданы метаматериалы с настраиваемой отрицательной магнитной проницаемостью.

Переходы с высокой плотностью тока J_c позволяют повысить рабочую частоту СИС-приёмников и расширить их полосу. Однако существует предел повышения прозрачности барьера для СИС-переходов на основе окиси алюминия. Величина данного предела составляет порядка $10-15 \text{ кА см}^{-2}$, при дальнейшем увеличении плотности тока наступает резкая деградация качества переходов. Для того чтобы преодолеть указанное ограничение, была разработана технология изготовления туннельных СИС-переходов Nb/Al–AlN/Nb с экстремально высокой прозрачностью туннельного барьера путём нитридации поверхности Al в плазменном RF-разряде с приемлемыми значениями R_f/R_n . Это позволило повысить рабочую частоту СИС-приёмников, расширить их полосу и создать ряд сверхчувствительных приёмных устройств диапазона 100–1000 ГГц.

Создан и исследован сверхпроводниковый генератор гетеродина на основе распределённых туннельных джозефсоновских переходов, оптимизирована его конструкция. Проведено исследование характеристик сверхпроводникового генератора гетеродина для двух типов исследованных туннельных структур Nb–AlO_x–Nb и Nb–AlN–NbN; экспериментально измерена зависимость ширины линии излучения от частоты. Впервые реализована непрерывная перестройка частоты сверхпроводникового генератора в диапазоне 250–750 ГГц и фазовая стабилизация частоты СГГ, получено спектральное качество более 70 % во всём частотном диапазоне перестройки СГГ. Экспериментально продемонстрирована возможность получения фазовых шумов порядка –90 дБс при отстройке от несущей частоты более 100 кГц. Для эффективной синхронизации сверхпроводникового генератора гетеродина в составе интегрального спектрометра субТГц-диапазона предложена и апробирована концепция криогенной системы фазовой автоподстройки частоты, за счёт компактности и малых задержек петли достигнута ширина полосы синхронизации системы около 70 МГц. Реализованная система ФАПЧ позволяет синхронизировать более 90 % мощности излучения генератора с шириной линии 12 МГц, т.е. в семь раз больше, чем полупроводниковая система ФАПЧ.

Разработана и апробирована концепция сверхпроводникового интегрального приёмника ТГц-диапазона. Основным элементом приёмника является интегральная микросхема, которая включает в себя СИС-смеситель с планарной сверхпроводниковой приёмной антенной, СГГ и гармонический смеситель для фазовой синхронизации частоты гетеродина. Для бортового интегрального приёмника реализован частотный диапазон 450–650 ГГц, шумовая температура менее 120 К (DSB), полоса ПЧ 4–8 ГГц, спектральное разрешение лучше 1 МГц. На полигоне "Esrangle" (Швеция) были проведены три успешных запуска бортового интегрального спектрометра. Инструмент продемонстрировал возможность работы в экстремальных условиях (температура –90 °С) и позволил собрать большое количество научной информации, подтверждающей высокое спектральное разрешение и чувствительность прибора на уровне нескольких частиц на миллиард (1ррt). В ходе полётов на высотном аэростате были измерены спектры различных газовых составляющих, в том числе ClO и BrO, ответственных за разрушение озонового слоя Земли, изучено их распределение в диапазоне высот 12–36 км во время восхода

солнца; измерены спектры изотопов различных веществ (H₂O, HCl и т.д.). Разработан и испытан лабораторный вариант интегрального спектрометра диапазона 400–700 ГГц для спектрального анализа газовой смеси. Высокое спектральное разрешение прибора и предельная чувствительность позволяют однозначно измерять сверхмалые концентрации вещества по их "запаху" и создавать приборы для неинвазивной медицинской диагностики и систем безопасности.

С помощью интегрального спектрометра, созданного в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, проведено комплексное исследование терагерцового генератора на основе монокристаллических ВТСП-структур Bi₂Sr₂CaCu₂O₈. Впервые в диапазоне 450–750 ГГц измерены спектральные характеристики с точностью лучше 0,5 МГц, в режиме "больших токов" смещения продемонстрирована лоренцева форма спектральной линии и высокая стабильность сигнала.

Таким образом, разработаны методы изготовления сверхпроводниковых туннельных наноструктур для проведения научных исследований и целого ряда практических приложений. На основе технологических исследований и разработок в области создания элементной базы сверхпроводниковой электроники был создан ряд приёмных устройств терагерцового диапазона с уникальными параметрами.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-538). Разработка СИС-смесителей диапазона 800–950 ГГц и технологии их изготовления выполнены за счёт гранта Российского научного фонда (РНФ) (№ 23-79-00019, <https://rscf.ru/project/23-79-00019/>). Изготовление и измерение СИС-смесителей диапазона 210–275 ГГц выполнено за счёт гранта РНФ (№ 23-79-00061, <https://rscf.ru/project/23-79-00061/>).

Список литературы

1. Tinkham M *Introduction to Superconductivity* (New York: McGraw-Hill, 1975); Пер. на русск. яз.: Тинкхам М *Введение в сверхпроводимость* (Пер. с англ. под ред. К. К. Лихарева) (М.: Атомиздат, 1980)
2. Barone A, Paternò G (Eds) *Physics and Applications of the Josephson Effect* (New York: Wiley, 1982) <https://doi.org/10.1002/352760278X>; Пер. на русск. яз.: Бароне А, Патерно Дж *Эффект Джозефсона: Физика и применения* (М.: Мир, 1984)
3. Likharev K K *Dynamics of Josephson Junctions and Circuits* 3rd ed. (New York: Gordon Breach Sci. Publ., 1996)
4. Clarke J, Braginski A I (Eds) *The SQUID Handbook Vol. 2 Applications of SQUIDs and SQUID Systems* (Hoboken: Wiley, 2006) <https://doi.org/10.1002/9783527609956>
5. Weinstock H (Ed.) *SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication, and Applications* (NATO ASI Series. Ser. E, Vol. 329) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1996)
6. Faley M I et al. *Sensors* **17** 2798 (2017)
7. Huber M et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **520** 234 (2004)
8. Козин М Г *Изв. РАН. Сер. физическая* **69** (1) 36 (2005)
9. Semenov A D, Gol'tsman G N, Korneev A A *Physica C* **351** 349 (2001)
10. Gol'tsman G N et al. *Appl. Phys. Lett.* **79** 705 (2001)
11. Pernice W H P et al. *Nat. Commun.* **3** 1325 (2012)
12. Macklin C et al. *Science* **350** 307 (2015)
13. White T C et al. *Appl. Phys. Lett.* **106** 242601 (2015)
14. Aumentado J *IEEE Microw. Mag.* **21** (8) 45 (2020)
15. Likharev K K, Mukhanov O A, Semenov V K "Resistive single flux quantum logic for the Josephson-junction digital technology," in *SQUID'85. Superconducting Quantum Interference Devices and their Applications. Proc. of the Third Intern. Conf. on Superconducting*

- Quantum Devices, Berlin, West, June 25–28, 1985* (Eds D Hahlbohm, H Lübbig) (Berlin: Walter de Gruyter, 1985) p. 1103, <https://doi.org/10.1515/9783110862393.1103>
16. Likharev K K, Semenov V K *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **1** (1) 3 (1991)
 17. Koshelets V et al. *IEEE Trans. Magn.* **23** 755 (1987)
 18. Filippenko L V et al. *IEEE Trans. Magn.* **27** 2464 (1991)
 19. Rey-de-Castro R C et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **11** 1014 (2001)
 20. Кленов Н В и др. *ФНТ* **43** 991 (2017); Klenov N V et al. *Low Temp. Phys.* **43** 789 (2017)
 21. Tucker J R, Feldman M J *Rev. Mod. Phys.* **57** 1055 (1985)
 22. Zmuidzinis J, Richards P L *Proc. IEEE* **92** 1597 (2004)
 23. ALMA Observatory, <https://www.almaobservatory.org/en/about-alma/>
 24. Herschel Space Observatory, <https://www.herschel.caltech.edu/>
 25. Wolf E L et al. (Eds) *Josephson Junctions. History, Devices, and Applications* (New York: Jenny Stanford Publ., 2017) <https://doi.org/10.1201/9781315364520>
 26. Tucker J *IEEE J. Quantum Electron.* **15** 1234 (1979)
 27. Richards P L et al. *Appl. Phys. Lett.* **34** 345 (1979)
 28. Kerr A R, Feldman M J, Pan S-K "Receive noise temperature, the quantum noise limit, and the role of the zero-point fluctuations," in *Proc. of the Eighth Intern. Symp. on Space Terahertz Technology, Cambridge, MA, USA, 25–27 March 1997* (Eds R Blundell, E Tong) (Cambridge, MA: Harvard Univ., 1997) p. 101
 29. De Graauw Th et al. *Astron. Astrophys.* **518** L6 (2010)
 30. ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН. Уникальная научная установка "Криоинтеграл" — "Технологический и измерительный комплекс для создания сверхпроводниковых наносистем на основе новых материалов," <https://nanolith.ru/unu.html>; <http://ckp-rf.ru/usu/352529/>
 31. Filippenko L V et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **11** 816 (2001)
 32. Dmitriev P N et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **13** 107 (2003)
 33. Rudakov K I et al. *Appl. Sci.* **11** 10087 (2021)
 34. Monaco R et al. *Phys. Rev. Lett.* **96** 180604 (2006)
 35. Костюрина Е А и др. *Радиотехника и электроника* **62** 1142 (2017); Kostyurina E A et al. *J. Commun. Technol. Electron.* **62** 1306 (2017)
 36. Butz S et al. *Opt. Express* **21** 22540 (2013)
 37. Jung P et al. *Nat. Commun.* **5** 3730 (2014)
 38. Rowell J M, Gurvitch M, Geerk J *Phys. Rev. B* **24** 2278 (1981)
 39. Gurvitch M, Washington M A, Huggins H A *Appl. Phys. Lett.* **42** 472 (1983)
 40. Golubov A A et al. *Phys. Rev. B* **51** 1073 (1995)
 41. Dmitriev P N et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9** 3970 (1999)
 42. Imamura T, Shiota T, Hasuo S *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **2** 1 (1992)
 43. Imamura T, Hasuo S *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **2** 84 (1992)
 44. Kleinsasser A W, Mallison W H, Miller R E *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5** 2318 (1995)
 45. Kawamura J et al. *Appl. Phys. Lett.* **76** 2119 (2000)
 46. Torgashin M Yu et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** 379 (2007)
 47. Dmitriev P N, Filippenko L V, Koshelets V P "Applications in superconducting SIS mixers and oscillators: Toward integrated receivers," in *Josephson Junctions. History, Devices, and Applications* (Eds E L Wolf et al.) (New York: Jenny Stanford Publ., 2017) pp. 185–244, Ch. 7
 48. Rai-Choudhury P (Ed.) *Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication Vol. 1 Microlithography* (Bellingham, WA: SPIE, 1997) <https://doi.org/10.1117/3.2265070>
 49. Nanoengineering EBL Tool: eLINE Plus|RAITH Group (2021), <https://www.raith.com/product/eline-plus/>
 50. Greve M M, Holst B J *Vac. Sci. Technol. B* **31** 043202 (2013)
 51. Fominsky M Yu et al. *Electronics* **10** 2944 (2021)
 52. Jackson B D et al. *J. Appl. Phys.* **97** 113904 (2005)
 53. Karpov A et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** 343 (2007)
 54. Uzawa Y et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25** 2401005 (2015) <https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2386211>
 55. Khudchenko A et al. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **6** 127 (2016)
 56. Event Horizon Telescope. Press Release (April 10, 2019): Astronomers Capture First Image of a Black Hole, <https://eventhorizontelescope.org/press-release-april-10-2019-astronomers-capture-first-image-black-hole>
 57. Akiyama K et al. *Astron. Astrophys.* **681** A79 (2024)
 58. The Event Horizon Telescope, <https://eventhorizontelescope.org/>
 59. LLAMA — Large Latin American Millimeter/submillimeter Array, <https://www.llamaobservatory.org/>
 60. Radboud University. Africa Millimetre Telescope — AMT, <https://www.ru.nl/en/research/research-projects/africa-millimetre-telescope>
 61. Millimetron. Millimetron Space Observatory. accessed on March 01, 2024, <https://millimetron.ru/index.php/en/>
 62. Новиков И Д и др. *УФН* **191** 404 (2021); Novikov I D et al. *Phys. Usp.* **64** 386 (2021)
 63. Baryshev A M et al. *Astron. Astrophys.* **577** A129 (2015)
 64. Rudakov K "Development of advanced superconductor–insulator–superconductor mixers for terahertz radio astronomy," Ph.D. Thesis (Groningen, The Netherlands: Univ. of Groningen, 2021) <https://doi.org/10.33612/diss.174103493>
 65. Zmuidzinis J et al. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **42** 698 (1994)
 66. Belitsky V Yu, Jacobsson S W, Filippenko L V, Kollberg E L *Microw. Opt. Technol. Lett.* **10** 74 (1995)
 67. Рудаков К И и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **62** 613 (2019); Rudakov K I et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **62** 547 (2019) <https://doi.org/10.1007/s11141-020-10001-7>
 68. Рудаков К И и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **59** 793 (2017); Rudakov K I et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **59** 711 (2017) <https://doi.org/10.1007/s11141-017-9739-5>
 69. Khudchenko A et al., in *Proc. of the 28th Intern. Symp. on Space Terahertz Technology ISSTT-2017, Cologne, Germany, 13–15 March, 2017*, pp. 87–90
 70. Otárola A et al. "Atmospheric transparency at Chajnantor: 1973–2003," ALMA Memos, ALMA Memo #512 (2005) accessed on 19 September 2021, <https://library.nrao.edu/alma.shtml>
 71. Koshelets V P et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **13** 1035 (2003)
 72. Koshelets V P et al. "Integrated submm wave receiver: development and applications," in *Fundamentals of Superconducting Nanoelectronics* (NanoScience and Technology, Ed. A Sidorenko) (Berlin: Springer, 2011) pp. 263–296, https://doi.org/10.1007/978-3-642-20158-5_10
 73. Koshelets V P et al. "Flux flow oscillators for sub-mm wave integrated receivers," was presented at *Applied Superconductivity Conf., ASC-98, Palm Desert Springs, CA, USA, 13–18 September 1998; IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9** 4133 (1999)
 74. Koshelets V P et al. *Rev. Sci. Instrum.* **71** 289 (2000)
 75. Khudchenko A V et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** 605 (2007)
 76. Kalashnikov K V, Khudchenko A V, Koshelets V P *Appl. Phys. Lett.* **103** 102601 (2013)
 77. Koshelets V P, Shitov S V *Supercond. Sci. Technol.* **13** R53 (2000)
 78. de Lange G et al. *Supercond. Sci. Technol.* **23** 045016 (2010)
 79. Kiselev O et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** 612 (2011)
 80. Li M et al. *Phys. Rev. B* **86** 060505 (2012)
 81. Sun H et al. *Phys. Rev. Appl.* **8** 054005 (2017)
 82. Baksheeva K A et al. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **11** 381 (2021)
 83. Varmazis C et al. *Appl. Phys. Lett.* **33** 357 (1978)
 84. Joergensen E et al. *Phys. Rev. Lett.* **49** 1093 (1982)
 85. Cirillo M, Lloyd F L *J. Appl. Phys.* **61** 2581 (1987)
 86. Nagatsuma T et al. *J. Appl. Phys.* **54** 3302 (1983)
 87. Nagatsuma T et al. *J. Appl. Phys.* **56** 3284 (1984)
 88. Nagatsuma T et al. *J. Appl. Phys.* **58** 441 (1985)
 89. Qin J, Enpuku K, Yoshida K *J. Appl. Phys.* **63** 1130 (1988)
 90. Ustinov A V, Kohlstedt H, Henne P *Phys. Rev. Lett.* **77** 3617 (1996)
 91. Werthamer N R *Phys. Rev.* **147** 255 (1966)
 92. Hasselberg L-E, Levinsen M T, Samuelsen M R *Phys. Rev. B* **9** 3757 (1974)
 93. Koshelets V P et al. *Phys. Rev. B* **56** 5572 (1997)
 94. Gulevich D R, Koshelets V P, Kusmartsev F V *Phys. Rev. B* **96** 024515 (2017)
 95. Gulevich D R, Filippenko L V, Koshelets V P *J. Low Temp. Phys.* **194** 312 (2019)
 96. Gulevich D R, Koshelets V P, Kusmartsev F V *Phys. Rev. B* **99** 060501 (2019)

97. Кинев Н В, Рудаков К И, Барышев А М, Кошелец В П *ФТТ* **60** 2132 (2018); Kinev N V, Rudakov K I, Baryshev A M, Koshelets V P *Phys. Solid State* **60** 2173 (2018)
98. Кинев Н В et al. *J. Appl. Phys.* **125** 151603 (2019)
99. Кинев Н В и др. *Радиотехника и электроника* **64** 970 (2019); Kinev N V et al. *J. Commun. Technol. Electron.* **64** 1081 (2019)
100. Кинев Н В и др. *ФТТ* **62** 1379 (2020); Kinev N V et al. *Phys. Solid State* **62** 1543 (2020)
101. Kinev N V et al. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **9** 557 (2019)
102. Kinev N V et al. *Sensors* **20** 7276 (2020)
103. Koshelets V P et al. *Appl. Phys. Lett.* **68** 1273 (1996)
104. Koshelets V P et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** 960 (2005)
105. Кошелец В П и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **48** 947 (2005); Koshelets V P et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **48** 844 (2005)
106. Кошелец В П и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **50** 935 (2007); Koshelets V P et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **50** 847 (2007)
107. Koshelets V P et al. *Proc. SPIE* **7854** 78540J (2010) <https://doi.org/10.1117/12.868916>
108. Дмитриев П Н и др. *Успехи современной радиоэлектроники* (5) 75 (2010) <https://www.elibrary.ru/ltixzt>
109. Koshelets V P et al. *Supercond. Sci. Technol.* **14** 1040 (2001)
110. Koshelets V P et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** 964 (2005)
111. de Lange A et al. *Atmos. Meas. Tech.* **5** 487 (2012)
112. Koshelets V P et al. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **5** 687 (2015)
113. Ermakov A B et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **11** 840 (2001)
114. Кинев Н В и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **56** 647 (2013); Kinev N V et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **56** 582 (2014)

Superconducting terahertz receivers

L.V. Filippenko^(1,a), A.M. Chekushkin^(1,b), M.Yu. Fominsky^(1,c), A.E. Ermakov^(1,d), N.V. Kinev^(1,e), K.I. Rudakov^(1,2,f), A.V. Khudchenko^(1,2,g), A.M. Baryshev^(3,h), V.P. Koshelets^(1,2,i), S.A. Nikitov^(1,j)

⁽¹⁾ Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences,

ul. Mokhovaya 11, korp. 7, 125009 Moscow, Russian Federation

⁽²⁾ Astro Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences,

ul. Profsoyuznaya 84/32, 117810 Moscow, Russian Federation

⁽³⁾ Kapteyn Astronomical Institute, University of Groningen, P.O. Box 72, 9700 AB Groningen, The Netherlands

E-mail: ^(a) lyudmila@hitech.cplire.ru, ^(b) chekushkin@hitech.cplire.ru, ^(c) demurge@hitech.cplire.ru, ^(d) ermakov@hitech.cplire.ru,

^(e) nickolay@hitech.cplire.ru, ^(f) rudakov@asc.rssi.ru, ^(g) khudchenko@asc.rssi.ru, ^(h) a.m.baryshev@gmail.com,

⁽ⁱ⁾ valery@hitech.cplire.ru, ^(j) nikitov@cplire.ru

In some practical applications, devices based on superconducting electronics, due to their unique set of parameters, are far superior to those based on conventional technologies, being in some cases the only viable option. One of the most advanced areas is the development of ultra-sensitive terahertz-range receivers: their operating frequency has reached 1 THz, and the noise temperature is only limited by quantum or photon noise.

Keywords: radio astronomy, niobium-based high-quality tunnel junctions, low-noise SIS receivers, THz-range quantum-limited mixers

PACS numbers: **07.57. – c**, **85.25. – j**, **95.55. – n**

Bibliography — 114 references

Received 9 March 2024, revised 17 May 2024

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **194** (11) 1207–1222 (2024)

Physics – Uspekhi **67** (11) (2024)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.07.039726>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2024.07.039726>