

УДК 520.8.056

## МАЛОШУМЯЩИЕ СИС-ПРИЁМНИКИ ДЛЯ НОВЫХ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ

*К. И. Рудаков<sup>1,2,3</sup>, П. Н. Дмитриев<sup>1</sup>, А. М. Барышев<sup>1</sup>, А. В. Худченко<sup>1,2</sup>,  
Р. Хеснер<sup>2</sup>, В. П. Кошелец<sup>1\*</sup>*

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Астрономический институт университета Гронингена, г. Гронинген, Нидерланды

<sup>3</sup> Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия

Разработан, изготовлен и протестирован волноводный смеситель диапазона 211–275 ГГц на основе туннельных структур сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник. Отработаны методы изготовления высококачественных туннельных структур на кварцевых подложках. Для расширения полосы приёмника были использованы туннельные переходы Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb и Nb/AlN/NbN с высокой плотностью тока до 20 кА/см<sup>2</sup>. Проведено моделирование зависимости характеристик приёмных элементов от частоты сигнала при полосе пропускания частот 4–12 ГГц. Измерения продемонстрировали хорошее совпадение входной полосы приёмных структур с результатами расчётов. Нескорректированная шумовая температура приёмника на частоте 265 ГГц составила 24 К, что лишь в 2 раза превышает квантовый предел. Разрабатываемые приёмники предназначены для ряда наземных вновь создаваемых радиотелескопов («Суффа», LLMA), а также для космической программы «Миллиметрон».

### ВВЕДЕНИЕ

Главным стимулом бурного развития сверхпроводниковой электроники в последние годы является возможность создания приборов с рекордными параметрами. Это объясняется как чрезвычайно высокой нелинейностью сверхпроводниковых элементов, так и их предельно низкими собственными шумами, обусловленными их природой и криогенной рабочей температурой. Одним из наиболее успешно развиваемых направлений является разработка сверхчувствительных приёмных устройств терагерцового диапазона. Смесители на основе туннельных переходов сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС), безусловно, являются наилучшими входными устройствами для когерентных приёмников на частотах от 0,1 до 1,2 ТГц, т.к. их шумовая температура ограничена только квантовым пределом. В настоящее время гетеродинные СИС-приёмники используются в качестве штатных устройств на большинстве как наземных, так и космических радиотелескопов во всём мире [1–10]. В частности, СИС-приёмники успешно работают во всех высокочастотных диапазонах самого большого радиоастрономического проекта современности — многоэлементного интерферометра ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array).

СИС-приёмники успешно использовались не только на Земле, но и на борту космических аппаратов. Например, в составе космической обсерватории «Гершель» совсем недавно успешно работал гетеродинный инструмент HIFI (Heterodyne Instrument for the Far Infrared) [11]. В настоящее время в стадии разработки находится несколько космических миссий, в том числе проект Российского космического агентства «Миллиметрон» [12]. Обсерватория «Миллиметрон» предназначена для проведения исследований астрономических объектов во Вселенной в дальнем инфракрасном, субмиллиметровом и миллиметровом диапазонах спектра электромагнитного излучения со сверхвысокой чувствительностью в режиме одиночного телескопа и рекордно высоким

\* valery@hitech.cplire.ru

угловым разрешением в режиме наземно-космического интерферометра. Для выполнения научных задач проекта потребуется создание целого ряда гетеродинных приёмных систем с чувствительностью, близкой к квантовому пределу. Диапазон  $211 \div 275$  ГГц будет задействован как для работы в режиме космического интерферометра космос–Земля, так и для спектрометра высокого разрешения (более  $10^6$ ) в режиме одиночного телескопа (требуемая шумовая температура менее 45 К в двухполосном режиме, полоса промежуточных частот  $4 \div 12$  ГГц, спектральное разрешение лучше 1 МГц). Актуальность данного диапазона была подтверждена опубликованием первого в истории «изображения» сверхмассивной чёрной дыры в центре галактики M 87 (измерения были проведены на частоте 230 ГГц). На очереди чёрная дыра в центре нашей Галактики (радиоисточник Стрелец A) и множество других сверхкомпактных объектов. Эти исследования ведутся в рамках проекта ЕНТ (Event Horizon Telescope); создаются новые точки для интерферометрии со сверхдлинной базой, в том числе LLAMA (Large Latin American Millimeter Array) и российско-узбекский радиотелескоп «Суффа».

В данной работе представлены результаты разработки и первых измерений характеристик СИС-приёмника с диапазоном  $211 \div 275$  ГГц, проведённых учёными Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН совместно с коллегами из Астрономического института университета Гронингена (Нидерланды). Для реализации предельных параметров СИС-смесителей требуется создание и оптимизация воспроизводимой и надёжной технологии изготовления туннельных наноструктур с толщиной туннельного барьера порядка 1 нм с экстремально высокой плотностью тока и малыми токами утечки. Технология изготовления таких структур создана и апробирована в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН.

Конструкция СИС-смесителя и методы создания приёмных СИС-структур, а также технология их изготовления описаны в разделе 1. В разделе 2 обсуждается коленообразная особенность, возникающая на вольт-амперной характеристике СИС-переходов, и её влияние на работу СИС-смесителя. Описание экспериментальных методик для исследования СИС-смесителей и результаты измерения шумовых характеристик СИС-приёмника представлены в разделе 3; выводы приведены в разделе 4.

## 1. КОНСТРУКЦИЯ СИС-СМЕСИТЕЛЯ И МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРИЕМНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

В качестве приёмного элемента был использован туннельный переход СИС на основе плёнок ниобия, изготовленный на кварцевой подложке с толщиной 125 мкм. Для достижения низкой шумовой температуры требуется компенсировать большую ёмкость СИС-перехода в рабочем диапазоне частот и согласовать его импеданс на высокой частоте (порядка  $20 \div 40$  Ом) с импедансом волновода порядка 400 Ом. Это достигалось посредством включения СИС-перехода в планарную структуру, состоящую из отрезков копланарных и микрополосковых линий Nb/SiO<sub>2</sub>/Nb. Такая конструкция позволила компенсировать ёмкость перехода на рабочей частоте и согласовать получившийся низкий импеданс с волноводом. Образец располагается в металлическом канале и является диэлектрическим волноводом с частотой отсечки выше 280 ГГц, однако волноводная линия, образованная ниобиевым электродом и стенкой волновода, поддерживает стационарную моду в диапазоне  $211 \div 275$  ГГц. Для предотвращения утечки высокочастотного сигнала через структуру образца на его поверхности размещены высокочастотные заграждающие фильтры. На рис. 1а показана трёхмерная модель дизайна смесительного элемента.

Волноводный приёмный элемент размещается в прямоугольном волноводом с размерами  $500 \times 1000$  мкм ортогонально к плоскости распространения волны на расстоянии 230 мкм от оконечности волновода. Смесительный волноводный блок состоит из центральной части с волноводом,

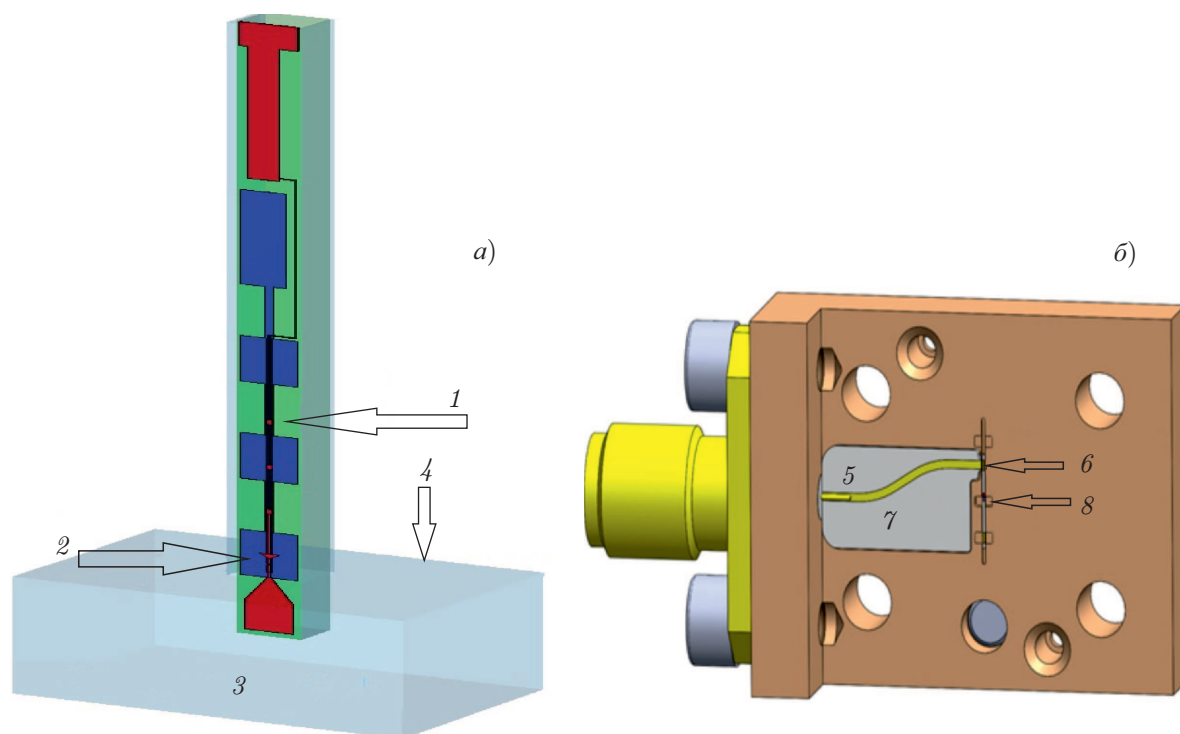


Рис. 1. Конструкция смесительного элемента и центральной части блока смесителя: Панель *a*: трёхмерная модель дизайна смесительного элемента с размерами  $3\,250 \times 150 \times 125$  мкм, размещённого в волноводе, 1 — фильтр высоких частот (ВЧ), 2 — СИС-переход, 3 — вход волновода, показано также расположение замыкающей стенки 4. Панель *б*: трёхмерная модель части смесительного блока с платой согласования по промежуточной частоте 5. В блоке установлен смесительный элемент 6, за которым в волноводе находится замыкающая плоскость; 7 — линия 50 Ом, 8 — сечение волновода, также показана область подключения волновода

блока замыкателя, блока задания магнитного поля и входного рупора. На промежуточной частоте длина волны излучения значительно больше размеров планарной структуры, поэтому настроечные микрополосковые линии вносят существенный ёмкостной вклад в импеданс образца на этой частоте. Для подстройки выходного импеданса смесительной структуры и его согласования с усилителем промежуточной частоты была использована микрополосковая линия, выполненная на дополнительной печатной плате с диэлектрической постоянной 9,8. На рис. 1б показана трёхмерная модель такой платы (на рисунке плата содержит только линию с волновым сопротивлением 50 Ом). С помощью пакета программ CST (Computer Simulation Technology) было проведено полное трёхмерное электромагнитное моделирование изготовленных структур, включая настроечные элементы и размещение чипа-образца в волноводе. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными будет приведено в разделе 3.

Для получения предельно низких шумовых температур приёмника требуются переходы с малыми токами утечки; наиболее распространённой характеристикой качества туннельного перехода является отношение сопротивлений под щелью  $R_{sg}$  и нормального сопротивления  $R_n$  выше щели (требуемое отношение  $R_{sg}/R_n > 25$  при температуре жидкого гелия, что близко к предельно возможному значению). В данной статье представлены результаты для СИС-смесителей на основе переходов Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb [13–15]. Туннельный барьер в таких структурах формируется методом окисления алюминия в среде чистого кислорода. Тонкая плёнка алюминия Al (толщина плёнки  $d \approx 5 \div 7$  нм) равномерно покрывает поверхность ниобия, предотвращая его окисление,

и образует на поверхности однородный окисел  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Переходы Nb/Al- $\text{AlO}_x$ /Nb имеют ряд преимуществ перед другими типами СИС-переходов: 1) малые токи утечки; 2) низкая удельная ёмкость (в зависимости от плотности тока составляет  $0,05 \div 0,08$  пФ/мкм<sup>2</sup>); 3) хорошая воспроизводимость параметров; 4) высокая стабильность к термоциклированию и неизменяемость туннельных характеристик в процессе длительного хранения. В ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН были разработаны и апробированы методы изготовления и характеристики сверхпроводниковых приёмных структур на основе плёнок ниобия [16–19].

Для изготовления СИС-переходов на основе структур Nb/Al- $\text{AlO}_x$ /Nb и Nb/Al- $\text{AlN}_x$ /Nb использовалась технология селективного травления и анодизации ниобия SNEAP (Selective Niobium Etching and Anodization Process) [15]. Далее приведено описание стандартного технологического маршрута изготовления туннельных джозефсоновских СИС-переходов, успешно применяемого в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН.

В качестве подложки обычно используются пластины из кварца с толщиной 125 мкм, стандартные размеры подложки —  $24 \times 24$  мм. Подложки предварительно очищаются в органическом растворителе (ацетон), отмываются дистиллированной водой и сушатся в потоке сжатого воздуха. Затем для предотвращения травления материала подложки в процессе формирования переходов плазмохимическим травлением проводится магнетронное напыление буферного стоп-слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с толщиной порядка 100 нм. Далее на подложке формируется маска фоторезиста, определяющая геометрию базового электрода под взрывную литографию. Следующим этапом является напыление многослойной структуры, определяющей структуру СИС-перехода. Напыление проводится магнетронным методом в едином вакуумном цикле в установке фирмы «Курт Лескер», оснащённой водоохлаждаемым держателем подложек и системами магнетронного распыления на постоянном токе (DC) и на частоте 13,56 МГц (RF). Давление остаточных газов в камере составляет  $3 \cdot 10^{-8}$  мбар. Сначала осаждается слой нижнего ниобия с толщиной 200 нм, затем слой барьерного алюминия с толщиной 7 нм. После этого поверхность алюминия окисляется в атмосфере чистого кислорода и осаждается слой верхнего ниобия с толщиной  $50 \div 100$  нм. Ниобий и алюминий осаждались методом реактивного DC-напыления в аргоновой среде. Окончательно базовый электрод формируется путём удаления плёнки фоторезиста, покрытой напылённой многослойной структурой, с незакрытых базовым электродом участков схемы в ацетоне или диметилформамиде с применением ультразвука (взрывная литография).

Далее осуществляется непосредственное формирование СИС-переходов. Геометрические размеры переходов задаются предельным разрешением оптической фотолитографии, составляющим 0,4 мкм, что позволяет получать переходы с площадью менее 1 мкм<sup>2</sup>. Переходы формируются плазмохимическим травлением в среде  $\text{CF}_4$  путём удаления слоя верхнего ниобия многослойной структуры по маске из фоторезиста, определяющей геометрию переходов. В качестве стоп-слоя, предотвращающего дальнейшее травление структуры, выступает барьерный слой  $\text{AlO}_x$ . После плазмохимического травления проводится анодирование в этиленгликолевом растворе пентабората аммония по той же маске фоторезиста и напыляется RF-магнетронным методом изоляционный слой  $\text{SiO}_2$ , типичная толщина которого составляет 250 нм. Анодизация необходима для обеспечения более надёжной изоляции по периметру СИС-переходов во избежание возможного закорачивания между базовым и верхним подводным электродами в этих областях. Вскрытие контактов к переходам осуществляется в диметилформамиде методом взрывной литографии. Верхний подводный электрод также формируется методом взрывной литографии путём напыления слоя ниобия с толщиной  $300 \div 500$  нм по маске фоторезиста с последующим его удалением в растворителях. Аналогичным способом формируются области контактных площадок, в качестве материала которых обычно используется золото.

## 2. ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИС-СМЕСИТЕЛЯ

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) СИС-смесительного элемента Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb с площадью 1 мкм<sup>2</sup> представлена на рис. 2 сплошной кривой. ВАХ измерена в режиме задания напряжения, критический ток СИС-перехода подавлен магнитным полем. Нормальное сопротивление СИС-перехода  $R_n = 38$  Ом, параметр качества, являющийся отношением сопротивлений под и над щелью,  $R_{sg}/R_n = 28$ , щелевое напряжение  $V_g = 2,83$  мВ, размытие щелевого напряжения  $\delta V_g = 0,3$  мВ. Обращает на себя внимание хорошо выраженная коленообразная особенность, возникающая на ВАХ при напряжениях чуть выше  $V_g$ . Она обусловлена наличием нормального слоя алюминия вблизи туннельного барьера, который существенно модифицирует плотность состояний электронов в сверхпроводящем электроде. Теоретическая модель такой структуры [20] построена на основе решения квазиклассических уравнений Узаделя при реализации условий так называемого грязного предела, когда длина свободного пробега электронов в нормальном металле и сверхпроводнике много меньше их длин когерентности, т. е. плёнки являются достаточно толстыми. Экспериментально зависимость эффекта от параметров туннельной структуры была исследована в работе [17].

При воздействии на туннельный переход сигнала гетеродина с частотой  $f_{LO}$  на ВАХ возникают квазичастичные ступени [1, 2], размер которых по напряжению  $\Delta V_{qp}$  определяется частотой гетеродина  $f_{LO}$ :  $\Delta V_{qp} = \hbar f_{LO}/e$  ( $\hbar$  — постоянная Планка,  $e$  — элементарный заряд). Размер ступеней «растёт» от щелевого напряжения, для частоты 265 ГГц  $\Delta V_{qp} = 1,095$  мВ. Экспериментальная ВАХ при воздействии гетеродина с частотой 265 ГГц и оптимальной для работы СИС-смесителя мощностью [1, 2]  $\alpha = 1$  (где  $\alpha = eV_{RF}/(\hbar f_{LO})$ ,  $V_{RF}$  — напряжение высокочастотного сигнала), показана на рис. 2 штрих-пунктирной линией. При подаче сигнала гетеродина коленообразная особенность существенно подавляется, однако её наличие может воздействовать на работу СИС-смесителя.

Для численного изучения воздействия гетеродина на ВАХ СИС-перехода была использована модель, описанная в работе [21], которая позволяет получить ВАХ, очень близкую к экспериментальной (см. рис. 3а, где показаны автономная модельная ВАХ и ВАХ при воздействии сигнала гетеродина, рассчитанная по теории Тукера—Фелдмана [2]). Расчёты показывают, что наличие коленообразной особенности вызывает появление падающего участка на ступени (см. рис. 3б), даже без учёта влияния импеданса внешней электродинамической системы. Наличие падающего участка приводит к большим значениям дифференциального сопротивления (см. рис. 3в, где показаны рассчитанные зависимости дифференциального сопротивления, нормированного на нормальное сопротивление перехода), что может заметно влиять на процесс работы СИС-смесителя, существенно сокращая диапазон напряжений его эффективного функционирования. Для сравнения на рис. 3в сплошной линией показана рассчитанная зависимость, полученная для модельной ВАХ без коленообразной особенности (параметр  $\gamma$ , характеризующий величину колена в модели, был уменьшен от 0,27 до 0,05). Пунктирной линией на этом рисунке показана зависимость

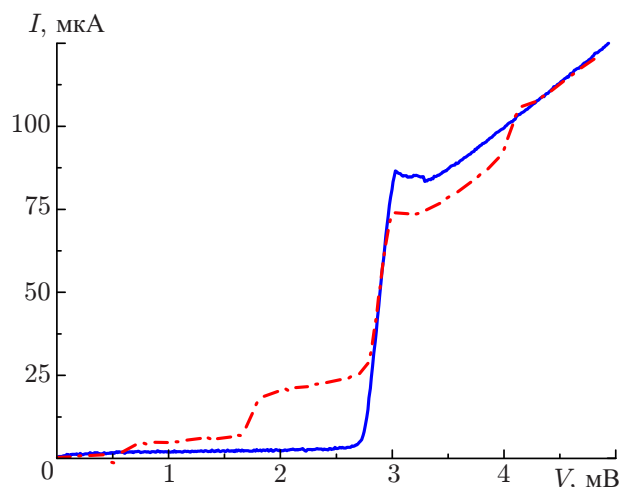


Рис. 2. Экспериментальная ВАХ смесительного элемента: сплошной кривой показана автономная ВАХ, штрих-пунктирной линией представлена ВАХ при воздействии гетеродина на частоте 265 ГГц при оптимальной мощности

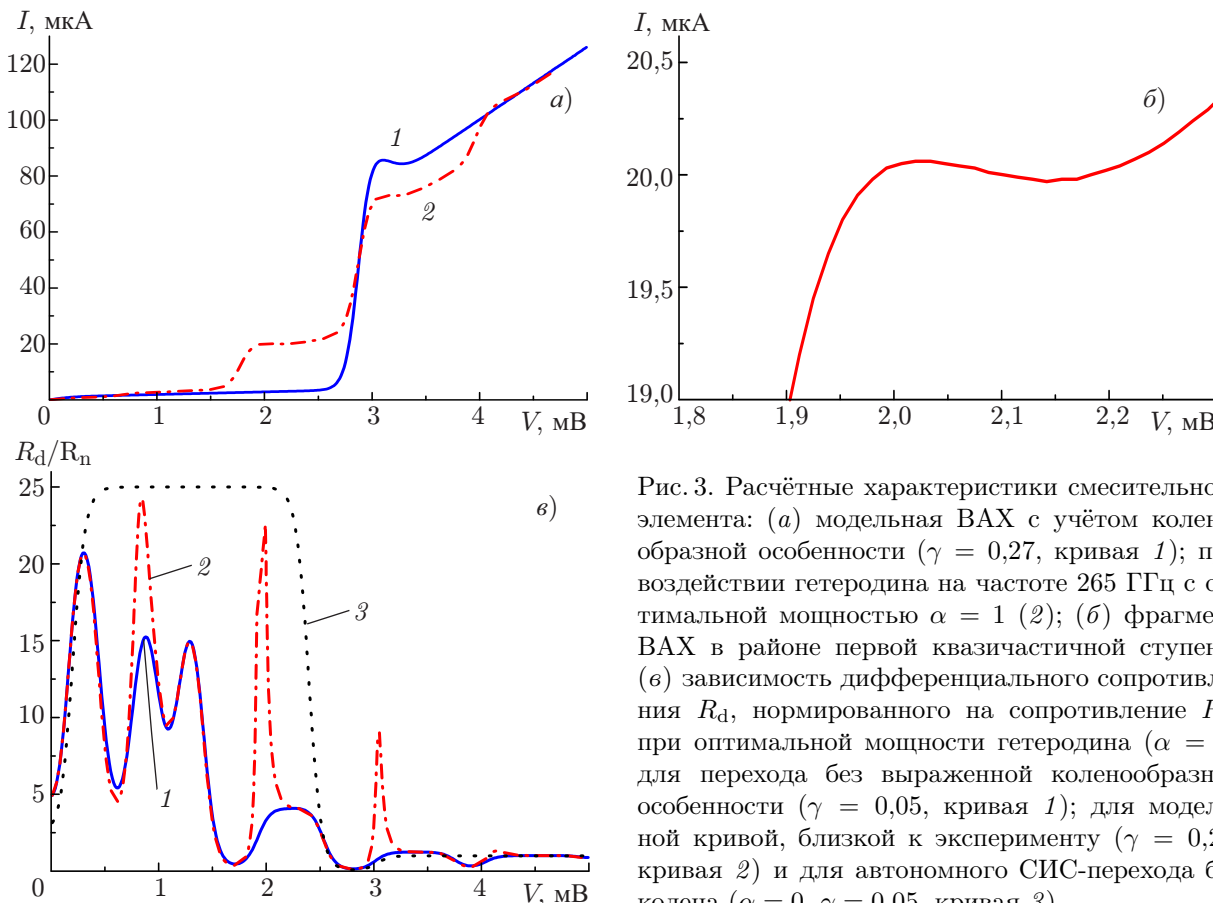


Рис. 3. Расчётные характеристики смесительного элемента: (а) модельная ВАХ с учётом коленообразной особенности ( $\gamma = 0,27$ , кривая 1); при воздействии гетеродина на частоте 265 ГГц с оптимальной мощностью  $\alpha = 1$  (2); (б) фрагмент ВАХ в районе первой квазичастичной ступени; (в) зависимость дифференциального сопротивления  $R_d$ , нормированного на сопротивление  $R_n$ , при оптимальной мощности гетеродина ( $\alpha = 1$ ) для перехода без выраженной коленообразной особенности ( $\gamma = 0,05$ , кривая 1); для модельной кривой, близкой к эксперименту ( $\gamma = 0,27$ , кривая 2) и для автономного СИС-перехода без колена ( $\alpha = 0, \gamma = 0,05$ , кривая 3)

дифференциального сопротивления, полученная для автономной ВАХ СИС-перехода без колена. Экспериментальные измерения характеристик образца, установленного в СИС-смеситель, показали, что влияние коленообразной особенности оказалось существенно меньше, чем в модельных расчётах; причина такого расхождения будет изучена в дальнейшем.

### 3. ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ И ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИС-ПРИЁМНИКА

Для экспериментального измерения отклика приёмного элемента был взят фурье-интерферометр Майкельсона. В качестве широкополосного источника субтерагерцового излучения был использован резистивный нагреватель-глобар. Для измерения отклика приёмного элемента на СИС-переходе задавалась рабочая точка по напряжению 2,5 мВ (чуть ниже целевого напряжения); результаты фурье-спектроскопии (ФТС) представлены на рис. 4 (кривая 1). Для хорошего подавления критического тока туннельных переходов обычно выбирался второй или даже третий минимум зависимости критического тока от внешнего магнитного поля. Чем выше порядок минимума зависимости критического тока от внешнего магнитного поля, тем лучше подавление критического тока и ниже электрические шумы. Однако большое магнитное поле уменьшает величину энергетической щели сверхпроводников, что приводит к понижению целевого напряжения на ВАХ. Измеренные зависимости отклика от частоты достаточно хорошо совпадают с результатами моделирования смесителя в CST (кривая 2 на рис. 4). При вычислении теоретического отклика в модели были использованы параметры СИС-элемента, полученного

на основе его ВАХ. Резонанс на частоте 325 ГГц обусловлен возбуждением волноводной моды в кварцевой подложке с толщиной 125 мкм, расположенной в металлическом канале. Этот резонанс находится существенно выше рабочей частоты приёмника и не влияет на его работу в диапазоне 211–275 ГГц. Следует отметить, что расчёт всей структуры с учётом сверхпроводниковых свойств ниобия требует значительного времени, поэтому моделирование было проведено для основной моды излучения в волноводе в диапазоне частот от 150 ГГц (частота отсечки моды  $TE_{10}$ ) до 300 ГГц (частота второй моды). Расчёт на более высоких частотах уже не является строгим, это обусловлено снижением его точности в рамках используемой модели на частотах выше 305 ГГц.

Шумовая температура была измерена стандартным Y-фактор методом, в качестве «горячей» нагрузки был взят поглотитель при температуре 295 К, а в качестве «холодной» нагрузки был использован поглотитель, охлаждённый до 78 К. На рис. 5 показаны зависимости выходного сигнала СИС-приёмника от напряжения смещения, измеренные при частоте гетеродина 265 ГГц на промежуточной частоте 6,5 ГГц (полоса фильтра промежуточной частоты 40 МГц); отклик для холодной нагрузки на входе показан кривой 1, для тёплой нагрузки — 2. На рис. 5б приведена зависимость Y-фактора от напряжения смещения. Значения Y-фактора в лучших точках практически достигают величины 5 дБ, что соответствует шумовой температуре приёмника 24 К. Зависимость двухполосной шумовой температуры СИС-приёмника от частоты гетеродина показана на рис. 6. Важно отметить, что экспериментальные значения приведены без каких-либо коррекций (потери в разделителе луча, во входном окне криостата и фильтрах на ступенях 78 и 4,2 К не вычитались). Полученные значения шумовой температуры лишь в два раза превыша-

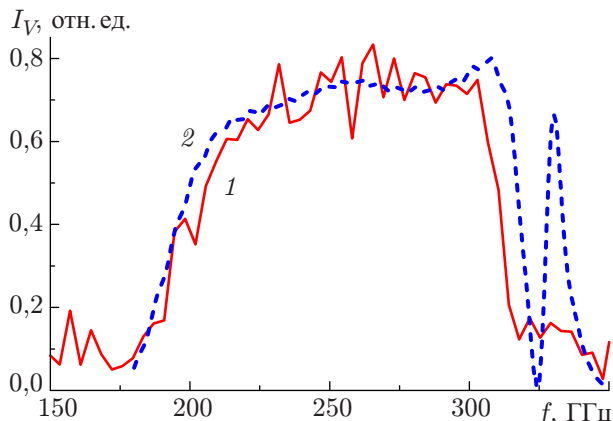


Рис. 4. Экспериментально измеренный отклики приёмной СИС-структуры  $I_V$  (сигнал, пропорциональный току СИС перехода при напряжении чуть ниже целевого), полученный с помощью ФТС (кривая 1) и расчётная зависимость отклика от частоты (2)

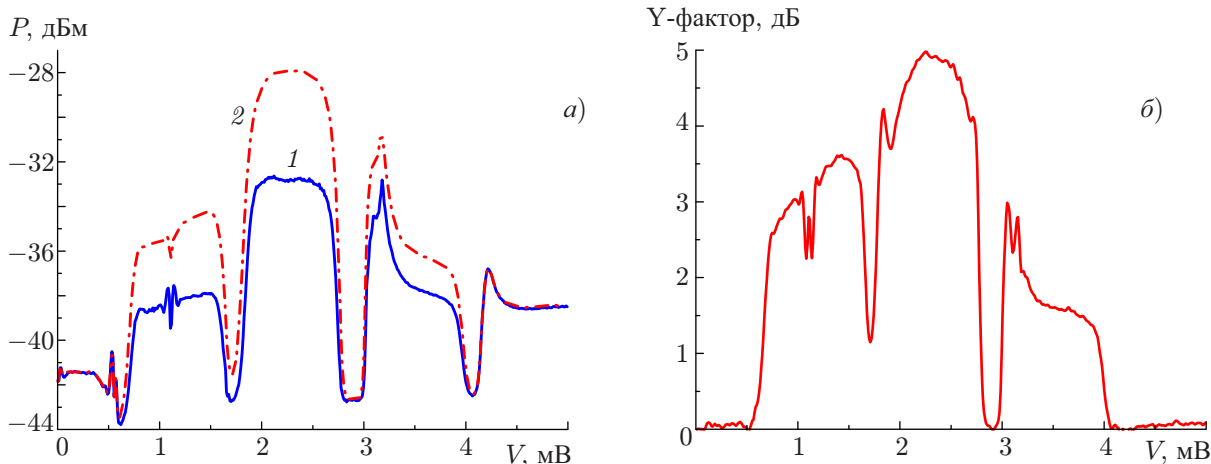


Рис. 5. Панель а: зависимости выходного сигнала  $P$  СИС-приёмника от напряжения смещения, измеренные на промежуточной частоте 6,5 ГГц при холодной (кривая 1) и тёплой (2) нагрузке на входе, частота гетеродина 265 ГГц. Панель б: зависимость Y-фактора от напряжения смещения, полученная из рис. 5а

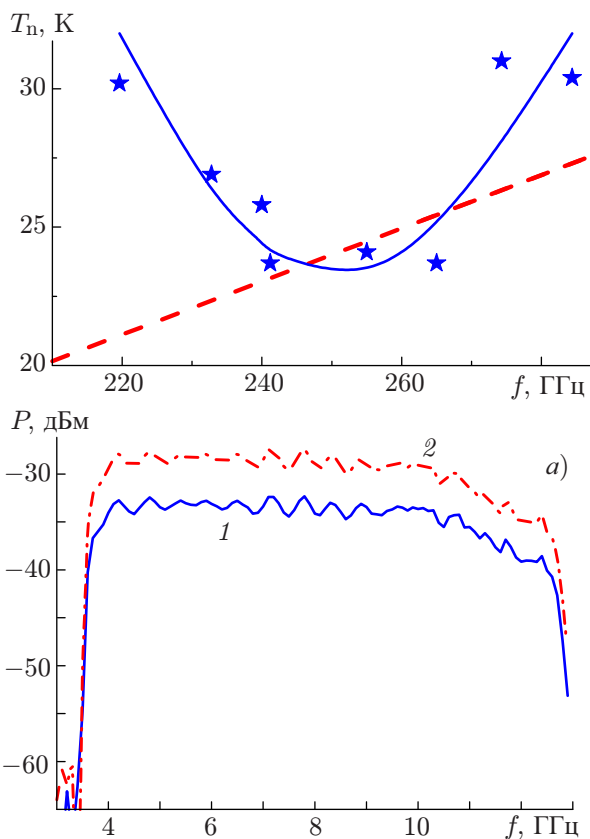


Рис. 7. Панель *a*: зависимости выходного сигнала СИС-приёмника от промежуточной частоты, измеренные на частоте гетеродина 265 ГГц для холодной (кривая 1) и тёплой (2) нагрузок на входе. Панель *б*: зависимость шумовой температуры СИС-приёмника от промежуточной частоты

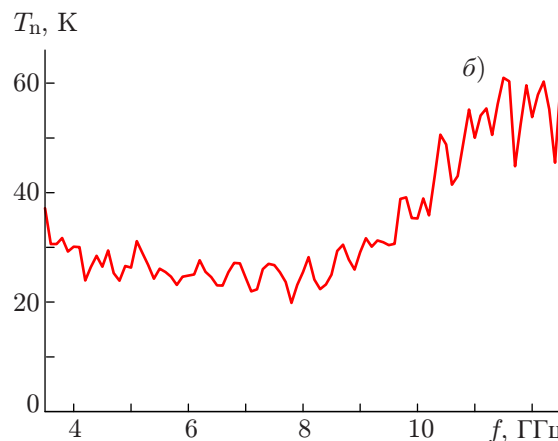
ют величину  $\hbar f/k_B$  ( $k_B$  — постоянная Больцмана) и удовлетворяют техническим требованиям к приёмнику диапазона 211÷275 ГГц для приёмного комплекса космического радиотелескопа «Миллиметрон».

Следует заметить, что для измерений использовались два гетеродина. На некоторых значениях частоты гетеродина возникали нестабильности в выходном сигнале промежуточной частоты, связанные как с неоптимальными значениями импеданса внешней электродинамической системы на этих частотах, так и с наличием коленообразной особенности. Данные, приведённые на рис. 5 и 6, получены на промежуточной частоте 6,5 ГГц. Зависимости выходного сигнала СИС-приёмника от промежуточной частоты, измеренные для холодной и тёплой нагрузки на входе, показаны на рис. 7а, соответствующая зависимость шумовой температуры СИС-приёмника от промежуточной частоты приведена на рис. 7б. В первых экспериментах на плате согласования промежуточной частоты не было установлено дополнительных согласующих структур, использовалась однородная микрополосковая линия с волновым сопротивлением 50 Ом. Это объясняет наличие изрезанности по промежуточной частоте и подъём шумовой температуры на высоких частотах.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны, изготовлены и предварительно исследованы приёмные элементы диапазона 211÷275 ГГц; экспериментально измеренная минимальная шумовая температура приёмника со-

Рис. 6. Зависимость двухполосной шумовой температуры  $T_n$  для СИС-приёмника от частоты. Представлены экспериментальные значения без корректировок на потери в разделителе луча и входном окне криостата





ставила 24 К, что лишь в два раза превышает квантовый предел  $\hbar f/k_B$ . Разрабатываемые приёмники предназначены для ряда создаваемых наземных радиотелескопов («Суффа», LLMA), а также для космической программы «Миллиметрон». Для использования в реальных радиотелескопах необходимо создание приёмников с разделением полос. Следующим нашим шагом будет разработка такого устройства и оптимизация канала промежуточной частоты. Следует отметить, что описанная в статье конструкция смесителя использует уже апробированный в приёмном комплексе ALMA (Чили) подход; испытанный в работе смеситель может быть использован как часть приёмника с разделением полос.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект 19–19–00618). Туннельные переходы были изготовлены в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН в рамках государственного задания с использованием уникальной научной установки 352529.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tucker J. R. // IEEE J. Quantum Electronics. 1979. V. 15, No. 11. P. 1 234.
2. Tucker J. R., Feldman M. J. // Rev. Modern Physics. 1985. V. 57, No. 4. P. 1 055.
3. Kooi J. W., Chan M., Phillips T. G., et al. // IEEE Trans. Microwaves Theory and Techniques. 1992. V. 40, No. 5. P. 812.
4. Karpov A., Blondell J., Voss M., Gundlach K. H. // IEEE Trans. Appl. Superconductivity. 1995. V. 5, No. 2. P. 3 304.
5. Jackson B. D., de Lange G., Zijlstra T., et al. // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 2006. V. MTT-54, No. 2. P. 547.
6. Karpov A., Miller D., Rice F., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2007. V. 17, No. 2. P. 343.
7. Kerr A. R., Pan S-K., Claude S. M. X., et al. // IEEE Trans. THz Sci. Technol. 2014. V. 4, No. 2. P. 201.
8. Baryshev A. M., Hesper R., Mena F. P., et al. // Astronomy & Astrophysics. 2015. V. 577. P. A129.
9. Uzawa Y., Fujii Y., Gonzalez A., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2015. V. 25, No. 3. Art. no. 2401005.
10. Khudchenko A., Baryshev A. M., Rudakov K., et al. // IEEE Trans. Terahertz Science and Technology. 2016. V. 6, No 1. P. 127.
11. de Graauw Th., Helmich F. P., Phillips T. G., et al. // Astronomy & Astrophysics. 2010. V. 518. P. L6.
12. Смирнов А. В., Барышев А. М., де Бернардис П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 54, № 8–9. С. 1.
13. Gurvitch M., Washington W. A., Huggins H. A. // Appl. Phys. Lett. 1983. V. 42, No. 5. P. 472.
14. Huggins H. A., // J. Appl. Phys. 1985. V. 57, No. 6. P. 2 103.
15. Kroger H., Smith L. N., Jillie D. W. // Appl. Phys. Lett. 1981. V. 39, No. 3. P. 280.
16. Koshelets V. P., Kovtonyuk S. A., Serpuchenko I. L., et al. // IEEE Trans. Magnetics. 1991. V. 27, No. 2. P. 3 141.
17. Dmitriev P. N., Ermakov A. B., Kovalenko A. G. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1999. V. 9, No. 2. P. 3 970.
18. Filippenko L. V., Shitov S. V., Dmitriev P. N. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2001. V. 11, No. 1. P. 816.
19. Dmitriev P. N., Lapitskaya I. L., Filippenko L. V., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2003. V. 13, No. 2. P. 107.

20. Golubov A. A., Houwman E. P., Gijbbers J. G., et al. // Phys. Rev. B. 1995. V. 51, No. 2. P. 1073.
21. Шитов С.В. Интегральные устройства на сверхпроводниковых туннельных переходах для приёмников миллиметровых и субмиллиметровых волн: Дисс. д.ф.-м.н. М.: Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, 2003. 428 с.

Поступила в редакцию 14 мая 2019 г.; принята в печать 5 июля 2019 г.

## LOW-NOISE SIS RECEIVERS FOR NEW RADIO-ASTRONOMY PROJECTS

*K. I. Rudakov, P. N. Dmitriev, A. M. Baryshev, A. V. Khudchenko, R. Hesper, and V. P. Koshelets*

We have developed, manufactured, and tested a waveguide mixer in the range 211–275 GHz on the basis of the tunnel structures superconductor–insulator–superconductor (SIS). The methods of manufacturing high-quality tunnel structures on quartz substrates have been developed. To extend the receiver band, the tunnel junctions Nb/AIO<sub>x</sub>/Nb and Nb/AlN/NbN with a high current density of up to 20 kA/cm<sup>2</sup> are employed. The dependence of the characteristics of the receiving elements on the signal frequency has been simulated for the intermediate-frequency band 4–12 GHz. The measurements demonstrate a good agreement of the input band of the receiving structures with the calculated results. The uncorrected noise temperature of the receiver amounted to 24 K at a frequency of 265 GHz, which is only two times higher than the quantum limit. The receivers under the development are intended for a number of terrestrial newly-built radio telescopes (Suffa, LLMA), as well as for the Millimetron space program.