

08

## Сверхпроводниковые СИС приемники субтерагерцового диапазона для космической и наземной радиоастрономии

© К.И. Рудаков,<sup>1,2</sup> Ф.В. Хан,<sup>1,2,3</sup> Л.В. Филиппенко,<sup>1,2</sup> А.М. Чекушкин,<sup>1</sup> А.В. Худченко,<sup>1,2</sup> В.П. Кошелец,<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
125009 Москва, Россия

<sup>2</sup>Астрокосмический центр ФИАН,  
117810 Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия  
e-mail: valery@hitech.cplire.ru

Поступило в Редакцию 15 мая 2024 г.

В окончательной редакции 15 мая 2024 г.

Принято к публикации 15 мая 2024 г.

Представлены результаты разработок в области создания малошумящих приемных систем субТГц-диапазона, выполненных в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в последние годы и направленных на создание приемников с квантовой чувствительностью для использования в радиотелескопах космического и наземного базирования. Описана технология изготовления интегральных приемных структур на основе туннельных переходов сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС), представлены результаты разработки СИС приемников диапазонов 211–275 GHz и 800–950 GHz с шумовой температурой в двухполосном режиме около 20 и 220 К соответственно.

**Ключевые слова:** сверхпроводниковые устройства, туннельный переход сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник, приемные системы субТГц-диапазона.

DOI: 10.61011/JTF.2024.07.58344.171-24

### Введение

Разработка сверхчувствительных приемников терагерцового (THz) диапазона является в настоящее время одним из наиболее интенсивно и успешно развиваемых направлений сверхпроводниковой электроники. Сверхпроводниковые приемные устройства уже доказали свое превосходство в данном частотном диапазоне [1–5]. Сверхпроводниковые элементы обладают чрезвычайно высокой характеристической частотой и очень сильной нелинейностью, а также предельно низкими собственными шумами, обусловленными квантовой природой элементов и криогенной рабочей температурой. Комбинация этих качеств в одном сверхпроводниковом элементе позволяет создавать приемные системы THz-диапазона с уникальными параметрами, недостижимыми для устройств, основанных на других принципах. Поскольку время накопления для приема сверхслабых сигналов и обнаружения сверхмалых концентраций веществ пропорционально квадрату шумовой температуры используемого устройства, приемники на основе сверхпроводниковых переходов позволяют значительно сократить время наблюдения. В настоящее время сверхпроводниковые приемники 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 спектрально-го разрешения  $\Delta f/f$  лучше  $10^{-6}$ ; такого разрешения

можно достичь только с помощью гетеродинных приемных 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.

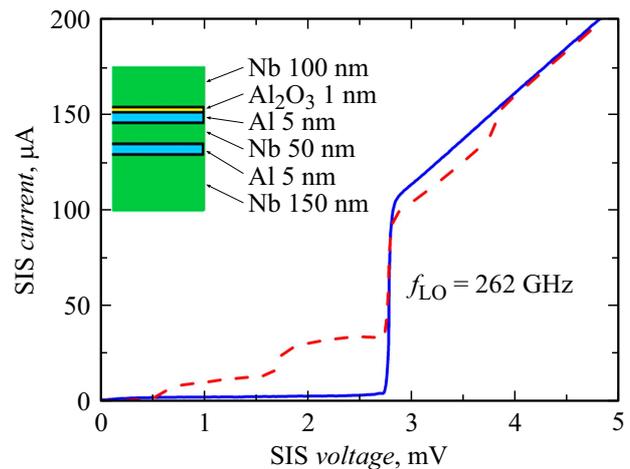
Смесители на основе туннельных переходов сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС) являются наиболее чувствительными входными устройствами в гетеродинных приемниках на частотах  $f$  от 0.1 до 1.2 THz [1,2,5–7]. Под действием сигнала гетеродина туннельный ток через переход увеличивается; этот процесс называется стимулированным туннелированием под действием фотонов [1]. Величину туннельного тока можно рассчитать с использованием квантово-механической модели [1,6]. 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 [1,2,6,7]. Шумовая температура смесителя в двухполосном режиме (DSB) ограничена квантовой величиной  $hf/(2k_B)$  [1,8], где  $h$  и  $k_B$  — постоянные Планка и Больцмана соответственно. СИС смесители уже успешно используются как для космических миссий, так и для наземных радиотелескопов [3,4,9]. Это подтверждено, в частности, успешными результатами по наблюдению тени сверхмассивной черной дыры в центре галактики M 87 [10,11] в рамках проекта ЭНТ (Event Horizon Telescope) [12], в котором все измерения

проводились с применением волноводных СИС смесителей с внешним генератором гетеродина на частоте около 230 GHz. Использование СИС смесителей в радиообсерваториях в рамках проекта ЕНТ показало, что волноводный вариант построения приемника является наиболее надежным, практичным, и дает высокую стабильность и чувствительность. Предельно высокое угловое разрешение будет реализовано в проекте Российского космического агентства (РКА) „Миллиметр“ по созданию радиоинтерферометра Космос–Земля с базой в 1.5 млн. километров [13,14].

## 1. Туннельные СИС переходы

Для реализации предельных характеристик приемных систем необходимы туннельные СИС переходы с чрезвычайно низким током утечки ниже щелевого напряжения  $V_g$  и минимальным размытием энергетической щели  $\delta V_g$ . Технология изготовления туннельных переходов Nb–AlO<sub>x</sub>–Nb основана на том, что тонкий слой Al толщиной 5–7 nm может полностью покрывать базовый Nb-электрод, планаризируя столбчатую микроструктуру пленки Nb [15,16]. Этот слой Al впоследствии окисляется, а затем на окисленный слой осаждается верхний электрод из Nb, формируя так называемую трехслойную структуру [17,18]. Из-за эффекта близости слой алюминия, обладающего большой длиной когерентности, становится сверхпроводящим, образуя структуру Nb/Al–AlO<sub>x</sub>/Nb (S–S'/I/S). Наличие слоя алюминия вблизи туннельного барьера приводит к появлению на ВАХ переходов коленообразной особенности при напряжениях немного выше  $V_g$ . Точная форма ВАХ туннельного перехода зависит от плотности состояний квазичастиц в S'-слое (Al). Эта плотность состояний для бислоев Nb/Al была рассчитана с использованием модели микроскопического эффекта близости [19]. Модель предполагает короткую длину свободного пробега электронов (грязные предельные условия) как в материалах S (Nb), так и в материалах S' (Al). Наличие коленообразной особенности на ВАХ приводит к особенностям на квазичастичных ступенях, что, в свою очередь, приводит к неустойчивости и нелинейности работы смесителя на некоторых частотах. Для подавления коленообразной особенности, вызванной влиянием нормального слоя алюминия, были предложены структуры с дополнительной прослойкой Al в нижнем Nb-электроде [20,21]. При этом параметр порядка в структуре Nb–Al вблизи барьера становится пространственно-однородным и плотность состояний близка к распределению, используемому в теории Бардина–Купера–Шриффера (БКШ), что позволяет реализовывать „идеальную“ ВАХ СИС перехода (рис. 1).

Важнейшим этапом является формирование туннельных СИС переходов. Минимальные воспроизводимые геометрические линейные размеры переходов, которые могут быть получены с помощью оптической фотоли-



**Рис. 1.** ВАХ туннельной структуры Nb–AlO<sub>x</sub>–Nb с дополнительной прослойкой Al в нижнем Nb-электроде (см вставку): сплошной синей кривой показана автономная ВАХ, штриховой линией представлена ВАХ при воздействии сигнала гетеродина на частоте 262 GHz при оптимальной мощности.

тографии, составляют  $0.8 \mu\text{m}$ , что позволяет получать переходы площадью  $0.5 \mu\text{m}^2$ . Переходы формируются реактивно-ионным травлением (RIE) в химически активной среде CF<sub>4</sub>, с характерным давлением  $8 \cdot 10^{-2}$  mbar и мощностью 50 W путем удаления слоя верхнего Nb многослойной структуры по маске из фоторезиста. В качестве стоп-слоя, предотвращающего дальнейшее травление структуры, выступает слой окисленного барьерного алюминия. После RIE проводят анодирование в этиленгликолевом растворе пентабората аммония до 10 V с использованием той же фоторезистивной маски, затем методом ВЧ магнетронного напыления наносят изолирующий слой SiO<sub>2</sub> толщиной 250 nm. Анодизация необходима для обеспечения более надежной изоляции по периметру СИС переходов во избежание возможных микроразоротов между базовым и верхним подводящим электродами в этих областях. Вскрытие контактов к переходам осуществляется в диметилформамиде методом взрывной литографии. Верхний электрод также формируется методом взрывной фотолитографии из слоя ниобия толщиной 350–400 nm. Аналогичным образом изготавливают золотые контактные площадки основного и верхнего электродов.

Для работы на частотах порядка 1 THz требуются туннельные переходы с очень высокой прозрачностью туннельного барьера. Существует предел повышения прозрачности барьера AlO<sub>x</sub> (плотность тока около 10–15 kA/cm<sup>2</sup>); при большей плотности тока происходит резкое ухудшение качества перехода. Эта проблема была решена путем разработки туннельных переходов Nb–Al/AlN–Nb, которые демонстрируют достаточно хорошее соотношение  $R_{sg}/R_n > 10$  при очень высоких плотностях тока до 100 kA/cm<sup>2</sup> [22,23]. Слой AlN формируется путем нитридации Al в ВЧ разряде. Чтобы

добиться хорошего согласования между переходами с такой высокой плотностью тока и антенной, необходимы СИС переходы субмикронных размеров, геометрия которых формируется описанным выше способом.

Рабочая частота СИС приемников на основе пленок ниобия ограничена частотой энергетической щели Nb (приблизительно 700 GHz). Решение этой проблемы состоит в использовании микрополосковых линий на основе соединений Nb с более высокими значениями частоты энергетической щели, в частности, используется NbTiN [24–26]; во избежание перегрева СИС перехода верхний электрод линии обычно изготавливают из металла, который находится в нормальном состоянии при гелиевых температурах (как правило, Al). Мы разработали СИС смеситель на основе двояных туннельных переходов Nb/AlN/NbN с высокой плотностью туннельного тока (до 30 kA/cm<sup>2</sup>), встроенных в микрополосковую линию, образованную нижним электродом из пленки NbTiN толщиной 320 nm (заземляющая плоскость) и верхнего электрода из Al толщиной 500 nm [27]. Электроды микрополосковой линии разделены изолирующим слоем SiO<sub>2</sub> толщиной 250 nm. Сдвоенные СИС переходы расположены на пленке NbTiN на расстоянии 5–7 μm друг от друга для отстройки их емкости, а NbN-электрод СИС переходов контактирует с верхним алюминиевым электродом линии. Следует отметить, что еще одним преимуществом переходов Nb–AlN–NbN является существенно большее значение энергетической щели [21] (до 3.7 mV для переходов с плотностью тока до 10 kA/cm<sup>2</sup> на кремниевой подложке).

Для получения туннельных структур, исследованных в настоящей работе, использовалось оборудование, входящее в состав УНУ „Криоинтеграл“ — „Технологический и измерительный комплекс для изготовления сверхпроводниковых наносистем на основе новых материалов“ [28], созданный в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Этот комплекс является уникальным и, согласно опубликованному данным, единственным в РФ, где возможно изготовление высококачественных туннельных переходов на основе ниобия с высокой плотностью тока. На протяжении последних лет была разработана технология изготовления туннельных переходов Nb–AlO<sub>x</sub>–Nb и Nb–AlN–NbN с высокой плотностью тока и малой утечкой [18,20,21,27]. На этой основе была создана технология изготовления многослойных микросхем с число элементов до 1 000; проведена оптимизация технологии с целью повышения степени интеграции и процента выхода работающих схем.

## 2. Приемные СИС элементы и результаты их измерений

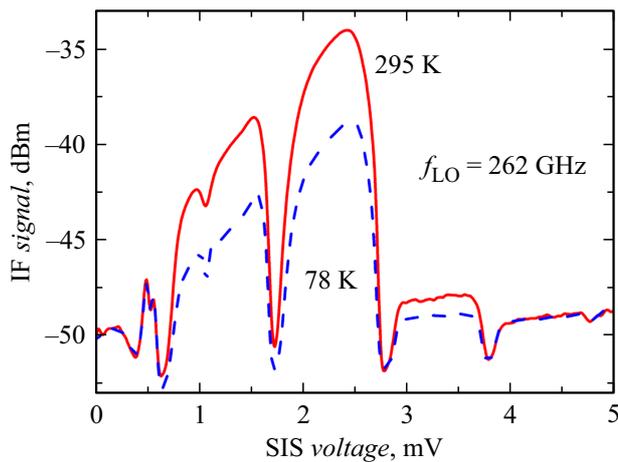
Для достижения низкой шумовой температуры СИС приемника требуется обеспечить хорошее согласование по высокой (входной) и промежуточной (выходной) частоте, низкий уровень потерь СВЧ сигнала и высокий

коэффициент преобразования смесительного элемента. Для оценки широкополосности согласования СИС смесителя использовался фурье-спектрометр Майкельсона (FTS). Широкополосный источник излучения субТГц-диапазона (черное тело, нагретое до 1500 K) 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 от частоты. Экспериментальные данные демонстрируют хорошее согласие с результатами численного моделирования в частотных диапазонах 200–300 и 700–950 GHz [21,29].

### 2.1. Приемник диапазона 211–275 GHz

На рис. 1 представлена ВАХ смесительного СИС элемента Nb–AlO<sub>x</sub>–Nb при воздействии сигнала гетеродина частоты 262 GHz оптимальной мощности. Под воздействием излучения генератора гетеродина с частотой  $f$  на автономной вольт-амперной характеристике (ВАХ) СИС перехода появляются квазичастичные ступени, удаленные от щели на величину  $hf/e$ , пропорциональной частоте гетеродина. Для реализации квазичастичного режима смешения с предельно низкими шумами требуется подавить критический ток СИС перехода, что достигается с помощью магнитного поля, задаваемого в туннельный переход. Выбор рабочей точки на квазичастичной ступени ВАХ СИС позволяет подобрать наиболее оптимальные условия для преобразования спектра СВЧ в спектр ПЧ.

Для разработки смесителя была спроектирована топология смесительного элемента, проведено моделирование и оптимизация его характеристик, изготовлены микросхемы с туннельными структурами Nb/AlO/Nb с площадью порядка 1 μm<sup>2</sup> [21,29]. Для достижения низкой шумовой температуры также требуется компенсировать значительную емкость СИС перехода ( $C_{\text{spec}} \approx 0.085 \text{ pF}/\mu\text{m}^2$ ). В результате импеданс структуры снижается до единиц Ω и требуется согласовать итоговый импеданс СИС перехода на высокой частоте с импедансом волновода порядка 400 Ω, что было реализовано путем использования планарной структуры, состоящей из отрезков копланарных и микрополосковых линий Nb/SiO<sub>2</sub>/Nb. Приемный элемент изготавливался на кварцевой подложке толщиной 125 μm, для предотвращения утечки ВЧ сигнала в конструкции смесительного элемента использовались ВЧ загораживающие фильтры [21,29]. Приемный элемент располагался перпендикулярно плоскости распространения волны в прямоугольном волноводе 500 × 1000 μm, он находился на расстоянии 230 μm от конца волновода, что образует четвертьволновую закоротку. Волноводная камера (английское название back-piece) включает микросхему с СИС переходом, четвертьволновую закоротку и плату



**Рис. 2.** Выходной сигнал СИС приемника на ПЧ 6.5 GHz от напряжения смещения на СИС, измеренный для холодной (78 K — штрих) и горячей (295 K — сплошная кривая) входных нагрузок на входе приемника при частоте гетеродина 262 GHz.

вывода ПЧ сигнала на коаксиальный коннектор. Смесительный волноводный блок состоит из входного рупора, центральной части с волноводом, волноводной камеры и блока задания магнитного поля [21,29].

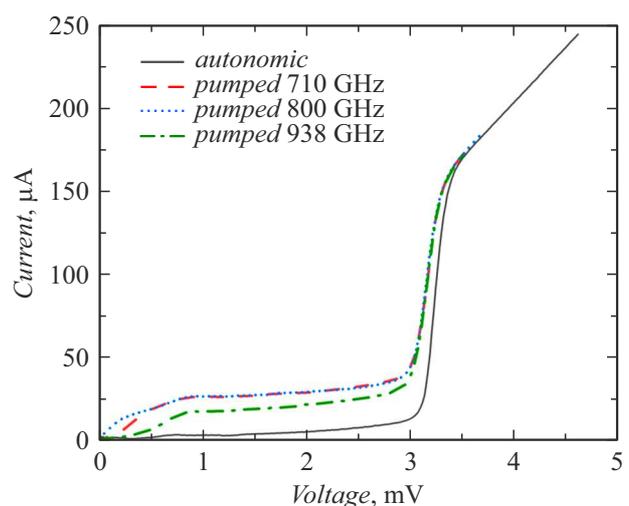
Шумовая температура смесителя в двухполосном режиме определялась стандартным методом измерения  $Y$ -фактора; в качестве „горячей“ нагрузки использовался поглотитель комнатной температуры (295 K), а в качестве „холодной“/ нагрузки — поглотитель, охлаждаемый жидким азотом (78 K). На рис. 2 показана зависимость выходного сигнала приемника SIS от напряжения смещения, измеренного для гетеродина 262 GHz и ПЧ 6.5 GHz (полоса пропускания фильтра ПЧ 60 MHz). Величина  $Y$ -фактора определялась путем вычитания откликов по ПЧ, измеренных в dB для горячей и холодной нагрузок. Значение  $Y$ -фактора в лучшей точке превышает 5.0 dB, что соответствует шумовой температуре приемника менее 20 K. Значения DSB шумовой температуры  $T_n$  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 GHz; полученные значения соответствуют техническим требованиям к приемнику диапазона 211–275 GHz космического радиотелескопа „Миллиметрон“ [13,14].

## 2.2. Приемные системы диапазона 650–950 GHz

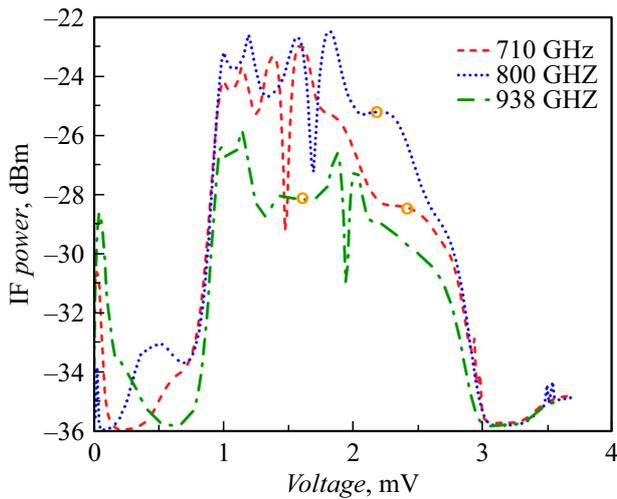
Технология переходов Nb–AlN–NbN [21,27,30] позволяет реализовывать заметно большие значения энергетической щели (более 3.15 mV даже для переходов с высокой плотностью тока (рис. 3)) по сравнению с традиционными структурами Nb–AlO–Nb и Nb–AlN–Nb со щелью не более 2.8 mV [22,24]. Большое щелевое напряжение дает существенное преимущество за счет

расширения диапазона напряжения смещения, в котором СИС переход осуществляет эффективное смешение сигналов. Для смесителей, настроенных на прием сигналов на частотах от 700 до 1000 GHz, это особенно актуально, так как в диапазон квазичастичной ступени попадает область первой джозефсоновской ступени, негативно влияющей на работу смесителя. Проявление этого эффекта продемонстрировано на рис. 4 на зависимостях выходной мощности СИС смесителя от напряжения смещения. На напряжениях около 1.5, 1.7 и 1.9 mV для штриховой, пунктирной и штрихпунктирной линий соответственно, возникает негативный пик с последующими подъемами справа и слева от самого пика. Из-за наличия пика с подъемами область шириной от 0.5 до 1 mV становится недоступной для работы смесителя, так как в ней коэффициент усиления смесителя может меняться нелинейно в зависимости от мощности сигнала, и стабильность всего смесителя заметно ухудшается из-за шумов, обусловленных эффектом Джозефсона.

Приведенные особенности, связанные с проявлением критического тока, обусловлены сложностью полного подавления эффекта Джозефсона в двойных СИС переходах. Также принципиально то, что в рабочую область попадает край именно первой джозефсоновской ступени, который наиболее сильно искажает ВАХ и поэтому влияет на дифференциальное сопротивление перехода, определяющее его согласование с выходным трактом промежуточной частоты. Искажения, соответствующие пикам на кривых на рис. 4, четко видны на кривых отклика СИС смесителя (рис. 5), определяющих его чувствительность. Так, например, на пунктирной кривой (частота опорного генератора 800 GHz) пик, расположенный на 1.7 mV, вносит искажения в отклик от 1.3



**Рис. 3.** ВАХ СИС перехода Nb–AlN–NbN. Сплошная кривая показывает автономную ВАХ с подавленным критическим током. Остальные кривые отображают ВАХ при оптимальной накачке сигналом опорного генератора различной частоты: штриховая линия — 710 GHz, пунктирная линия — 800 GHz, штрихпунктирная линия — 938 GHz.



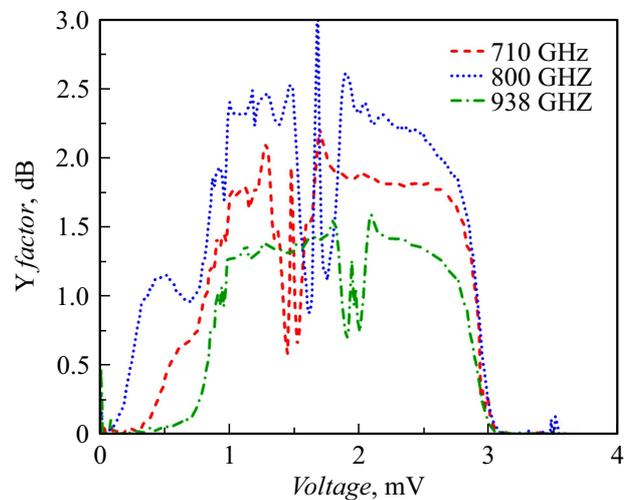
**Рис. 4.** Измеренные кривые, показывающие зависимость мощности выходного сигнала СИС смесителя на промежуточной частоте от напряжения на СИС переходе. Кривые соответствуют различной частоте опорного генератора: штриховая линия — 710 GHz, пунктирная линия — 800 GHz, штрихпунктирная линия — 938 GHz. Мощность ПЧ сигнала проинтегрирована в интервале 4–12 GHz. Кружками на кривых отмечены напряжения смещения, которые соответствуют оптимальной рабочей точке для выбранной частоты опорного генератора. При измерении на входе приемника была нагрузка, эквивалентная черному телу с температурой 300 К.

до 2.1 mV, из-за этого оптимальная рабочая точка, показанная кружком на соответствующей кривой на рис. 4, попадает на 2.2 mV. В рабочей точке СИС смеситель должен иметь максимальный отклик (рис. 5), также в ней крайне желательно иметь горизонтальный участок на кривых на рис. 4, так как в такой точке смеситель будет наиболее стабилен по уровню выходной мощности, поскольку шумы напряжения не будут транслироваться в уровень выходной мощности приемника.

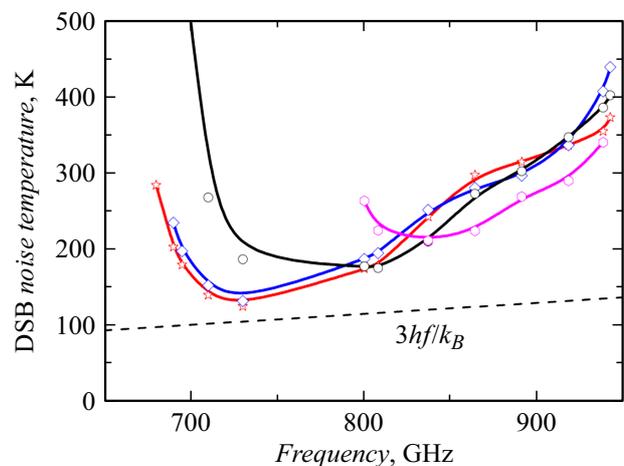
На рис. 4 показаны рабочие точки для частот опорного генератора 710 GHz — 2.4 mV, 800 GHz — 2.2 mV, 938 GHz — 1.6 mV. Соответствующий отклик, определенный как контраст выходной мощности приемника для входных нагрузок 77 и 300 К (так называемый Y-фактор метод), имеет уровень 1.8, 2.25, 1.4 dB (рис. 5). Стоит отметить, что для двух нижних частот опорного генератора рабочая точка была расположена по напряжению выше проблемной области, вызванной критическим током, а вот на самой высокой частоте она должна быть уже ниже этой области (рис. 4). Это обусловлено тем, что чаще всего наилучшие рабочие области обычно находятся ближе к центру квазичастичной ступени. Поэтому использование Nb–AlN–NbN СИС переходов, целевое напряжение которых на 0.35 mV шире, чем для Nb–AlO–Nb-технологии, дает существенное преимущество. Проведен цикл исследований волноводных СИС смесителей [21,29], оптимизирована конструкция смесительных элементов. Результаты измерения шумовой тем-

пературы в двухполосном режиме (DSB) для четырех СИС смесителей различной конструкции в зависимости от частоты представлены на рис. 6. Пунктирная линия показывает шумовую температуру, соответствующую величине  $3hf/k_B$  DSB.

Таким образом, разработанная технология позволяет реализовать плотности туннельного тока переходов до  $30 \text{ kA/cm}^2$  при параметре качества  $R_{sg}/R_n$  выше 20. Были разработаны и испытаны СИС смесители для волноводного приемника с рабочей частотой до 950 GHz [27]. Использование конструкции двояных СИС переходов позволяет получить широкий рабочий диапазон приемника (675 – 950 GHz) и достаточно хорошую шумовую температуру в этом диапазоне, достигающую в лучших точках величины 120 К [21]. Смесители на осно-



**Рис. 5.** Отклик СИС смесителя, измеренный методом Y-фактора. Величина Y-фактора показана в dB и определена как отношение выходных мощностей СИС смесителя для нагрузок 300 и 77 К.



**Рис. 6.** Шумовая температура в двухполосном режиме (DSB) для четырех СИС смесителей различной конструкции в зависимости от частоты. Пунктирная линия показывает шумовую температуру, соответствующую величине  $3hf/k_B$ .

ве двойных туннельных переходов Nb/AlN/NbN, включенных в микрополосковую линию NbTiN/Al [21,27], могут быть использованы для модернизации высокочастотных приемников 7-пиксельной матрицы для прибора CHAMP+, установленного на телескопе APEX (Atacama Pathfinder EXperiment), диапазон входных частот 790–950 GHz [31,32]. Разработанные СИС смесители могут быть использованы также для китайской обсерватории на Куполе А (Антарктика), для бразильского телескопа LLAMA, строящегося в Андах [33], а также для космической обсерватории Миллиметрон (в режиме одиночного телескопа).

### 3. Параметры пленок NbTiN

На более высоких частотах энергия фотонов  $hf$  превышает двукратную энергию  $2\Delta$  Nb, а потери в электродах линий передачи приводят к ухудшению характеристик приемника [34]. Соединения Nb с более высокой энергетической щелью (например, NbN и NbTiN) используются, чтобы преодолеть это ограничение частоты. Для оптимизации методов изготовления интегральных сверхпроводниковых устройств на основе пленок NbTiN было исследовано влияние различных технологических процессов на качество и параметры изготавливаемых структур. Было проведено исследование пленок NbTiN, изготовленных в различных условиях, при помощи THz-спектрометра с временным разрешением TeraView TPS Spectra 3000 [35]. Полученные в ходе измерений спектры коэффициентов пропускания пленок на подложках аппроксимируются выражениями модели многослойных сред [36]. Сверхпроводящие свойства учитываются при помощи модели Циммермана [37], в которой также учитывается и конечное время свободного пробега квазичастиц.

Было изготовлено 5 типов экспериментальных образцов:

- 1) пленка NbTiN на кремниевой подложке;
- 2) пленка NbTiN на буферном слое  $Al_2O_3$ , напыленном на кремниевую подложку;
- 3) пленка NbTiN на буферном слое  $Al_2O_3$  с проанодированной поверхностью;
- 4) пленка NbTiN на буферном слое  $Al_2O_3$  с тонким слоем алюминия на поверхности;
- 5) пленка NbTiN на буферном слое  $Al_2O_3$  с тонким слоем алюминия и проанодированной поверхностью.

Параметры пленок  $\Delta_0$  — сверхпроводниковая щель при  $T = 0$  K,  $\lambda_0$  — лондоновская глубина проникновения при  $T = 0$  K,  $T_c$  — критическая температура и  $\sigma_0$  — проводимость по постоянному току в нормальном состоянии вблизи  $T_c$  для всех исследованных пленок приведены в таблице. Температурные зависимости  $\Delta$  и  $\lambda$  для образцов #2 и #5 представлены на рис. 7. Показано, что все дополнительные слои оказывают незначительное влияние на параметры пленок. Небольшое уменьшение

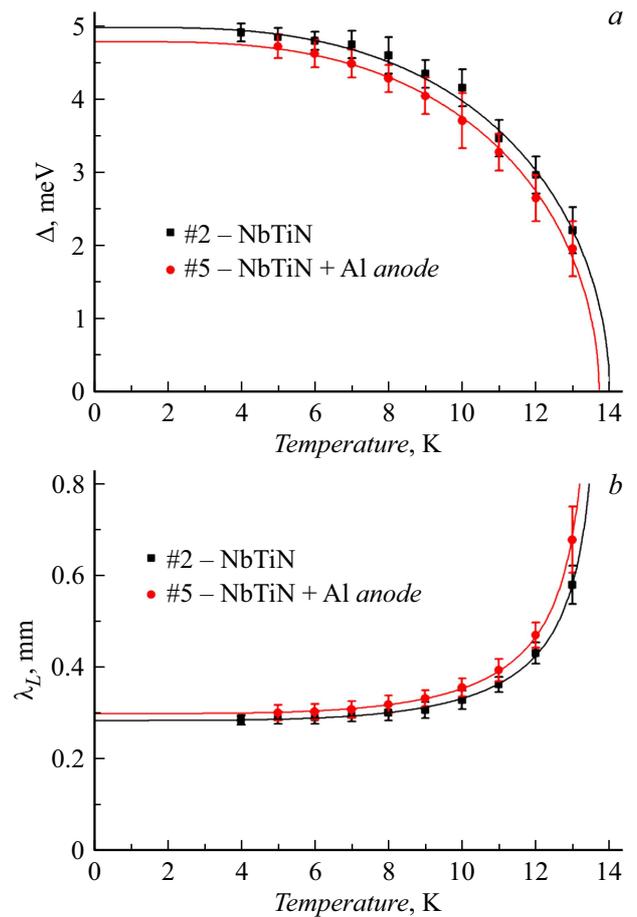


Рис. 7. Температурные зависимости сверхпроводниковой щели  $\Delta$  (a) и лондоновской глубины проникновения (b) для образцов #2 и #5.

критической температуры, щели и увеличение лондоновской глубины можно объяснить эффектом близости между пленкой NbTiN и проанодированным слоем Al.

### Заключение и выводы

Мы спроектировали, изготовили и протестировали СИС смеситель для диапазона частот 211–275 GHz. Нескорректированная шумовая температура приемника, равная примерно  $16.5 \pm 2$  K, была измерена на частоте 255 GHz, что лишь незначительно превышает квантовое значение  $hf/k_B$ . Этот смеситель удовлетворяет техническим требованиям космической миссии „Миллиметрон“ и может использоваться для новых наземных радиотелескопов (Suffa, LLAMA). Для высокочастотных приемников мы использовали смесители Nb–AlN–NbN, включенные в микрополосковую линию NbTiN–Al. Такие смесители демонстрируют шумовые температуры DSB от 210 до 400 K и могут быть использованы для модернизации высокочастотного матричного приемника диапазона 790–950 GHz на телескопе APEX. Методом терагерцовой спектроскопии с временным разрешением

Параметры исследованных пленок

Номер образца	$d$ , nm	$\sigma_{0,DC}$ , $10^4(\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$	$T_{c,DC}$ , К	$\sigma_{0,TDS}$ , $10^4(\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$	$T_{c,TDS}$ , К	$2\Delta_0$ , meV	$\lambda_0$ , nm
#1	338	1.07	15.2	1.12	13.8	5.2	282
#2	330	1.03	15.1	1.09	13.9	5.0	283
#3	340	n.a.	n.a.	1.00	13.7	4.7	310
#4	340	n.a.	n.a.	1.07	13.8	4.8	295
#5	340	n.a.	n.a.	1.01	13.7	4.8	300

изучено влияние различных технологических процессов на качество и параметры изготавливаемых структур на основе пленок NbTiN.

При исследовании была использована Уникальная научная установка „Криоинтеграл“ № 352529.

### Финансирование работы

Работа поддержана Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-538). Разработка СИС-смесителей диапазона 800–950 ГГц и технологии их изготовления выполнены за счет гранта РНФ (№ 23-79-00019, <https://rscf.ru/project/23-79-00019/>). Изготовление и измерение СИС-смесителей диапазона 211–275 GHz выполнено за счет гранта РНФ (№ 23-79-00061, <https://rscf.ru/project/23-79-00061/>)

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] J.R. Tucker, M.J. Feldman. *Rev. Mod. Phys.*, **57**, 1055 (1985). DOI: 10.1103/RevModPhys.57.1055
- [2] J. Zmuidzinas, P.L. Richards. *Proc. IEEE*, **92**, 1597 (2004). DOI: 10.1109/JPROC.2004.833670
- [3] ALMA Observatory Website. Available online: <https://www.almaobservatory.org/en/about-alma/>
- [4] Herschel Space Observatory Website. Available online: <https://www.herschel.caltech.edu/>
- [5] E.L. Wolf, G.B. Arnold, M.A. Gurvitch, J.F. Zasadzinski. *Josephson Junctions. History, Devices, and Applications* (Jenny Stanford Publishing, NY, 2017), DOI: 10.1201/9781315364520
- [6] J.R. Tucker. *IEEE J. Quantum Electron.*, **15**, 1234 (1979). DOI: 10.1109/JQE.1979.1069931
- [7] P.L. Richards, T.M. Shen, R.E. Harris, F.L. Lloyd. *Appl. Phys. Lett.*, **34**, 345 (1979). DOI: 10.1063/1.90782
- [8] A.R. Kerr, M.J. Feldman, S.-K. Pan. *Proceedings of the Eighth International Symposium on Space Terahertz Technology* (Cambridge, MA, USA, 25–27 March, 1997), p. 101.
- [9] T. De Graauw, F.P. Helmich, T.G. Phillips, J. Stutzki, E. Caux, N.D. Whyborn, N. Trappe. *Astronomy & Astrophysics*, **518** (1), L6 (2010). DOI: 10.1051/0004-6361/201014698
- [10] *First Image of a Black Hole Website*. Available online: <https://eventhorizontelescope.org/press-release-april-10-2019-astronomers-capture-first-image-black-hole>
- [11] K. Akiyama, A. Alberdi, W. Alef, J.C. Algaba, R. Anantua, K. Asada, L.D. Matthews. *Astronomy & Astrophysics*, **681**, A79 (2024).
- [12] *The Event Horizon Telescope Website*. Available online: <https://eventhorizontelescope.org/>
- [13] *Millimetron Space Observatory Website*. Available online: <http://millimetron.ru/index.php/en/>
- [14] И.Д. Новиков, С.Ф. Лихачев, Ю.А. Щекинов, А.С. Андрианов, А.М. Барышев, А.И. Васюнин, Д.З. Вибе, Т. де Граау, А.Г. Дорошкевич, И.И. Зинченко, Н.С. Кардашев, В.И. Костенко, Т.И. Ларченкова, Л.Н. Лихачева, А.О. Ляховец, Д.И. Новиков, С.В. Пилипенко, А.Ф. Пуланова, А.Г. Рудницкий, А.В. Смирнов, В.И. Шематович. *УФН*, **191**, 404 (2021). [I.D. Novikov, S.F. Likhachev, Yu.A. Shchekinov, A.S. Andrianov, A.M. Baryshev, A.I. Vasyunin, D.Z. Wiebe, Th. de Graauw, A.G. Doroshkevich, I.I. Zinchenko, N.S. Kardashev, V.I. Kostenko, T.I. Larchenkova, L.N. Likhacheva, A.O. Lyakhovets, D.I. Novikov, S.V. Pilipenko, A.F. Punanova, A.G. Rudnitsky, A.V. Smirnov, V.I. Shematovich. *Phys. Usp.*, **64**, 386 (2021). DOI: 10.3367/UFNe.2020.12.038898
- [15] T. Imamura, T. Shiota, S. Hasuo. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **2**, 1 (1992). DOI: 10.1109/77.124922
- [16] T. Imamura, T. Shiota, S. Hasuo. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **2**, 84 (1992). DOI: 10.1109/77.139224
- [17] M. Gurvitch, M.A. Washington, H.A. Huggins. *Appl. Phys. Lett.*, **42**, 472 (1983). DOI: 10.1063/1.93974
- [18] L.V. Filippenko, S.V. Shitov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, V.P. Koshelets, J.R. Gao. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **2001**, 816 (2001). DOI: 10.1109/77.919469
- [19] A.A. Golubov, E.P. Houwman, J.G. Gijbbersen, V.M. Krasnov, J. Flokstra, H. Rogalla, M.Yu. Kupriyanov. *Phys. Rev. B*, **51**, 1073 (1995). DOI: 10.1103/PhysRevB.51.1073
- [20] P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, A.G. Kovalenko, V.P. Koshelets, N.N. Iosad, A.A. Golubov, M.Yu. Kupriyanov. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **9**, 3970 (1999). DOI: 10.1109/77.783897
- [21] K.I. Rudakov, A.V. Khudchenko, L.V. Filippenko, M.E. Paramonov, R. Hesper, D.A. Lima, A.M. Baryshev, V.P. Koshelets. *Appl. Sci.*, **11**, 10087 (2021). DOI: 10.3390/app112110087
- [22] A.W. Kleinsasser, R.E. Miller, W.H. Mallison. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **5**, 2318 (1995). DOI: 10.1109/77.403049

- [23] J. Kawamura, D. Miller, J. Chen, J. Zmuidzinis, B. Bumble, H.G. LeDuc, J.A. Stern. *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 2119 (2000). DOI: 10.1063/1.126272
- [24] B.D. Jackson, G. de Lange, T. Zijlstra, M. Kroug, T.M. Klapwijk, J.A. Stern. *J. Appl. Phys.*, **97**, 113904 (2005). DOI: 10.1063/1.1927281
- [25] B.D. Jackson, N.N. Iosad, G. De Lange, A.M. Baryshev, W.M. Laauwen, J.R. Gao, T.M. Klapwijk. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **11** (1), 653 (2001). DOI: 10.1109/77.919429
- [26] J.W. Kooi, J.A. Stern, G. Chattopadhyay, H.G. LeDuc, B. Bumble, J. Zmuidzinis. *Intern. J. Infrared Millimeter Waves*, **19**, 373 (1998). DOI: 10.1023/A:1022595223782
- [27] A. Khudchenko, A.M. Baryshev, K.I. Rudakov, P.M. Dmitriev, R. Hesper, L. de Jong, V.P. Koshelets. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, **6**, 127 (2016). DOI: 10.1109/TTHZ.2015.2504783
- [28] *VHV Kpouuueзpaи Website*. Available online: <http://ckp-rf.ru/usu/352529/>
- [29] K.I. Rudakov. *Development of Advanced Superconductor-Insulator-Superconductor Mixers for Terahertz Radio Astronomy*, Ph.D. Thesis (University of Groningen, Groningen, The Netherlands, 2021), DOI: 10.33612/diss.174103493
- [30] M.Yu. Torgashin, V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, P.A. Yagoubov, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **17**, 379 (2007). DOI: 10.1109/TASC.2007.898624
- [31] R. Güsten, R.S. Booth, C. Cesarsky, K.M. Menten, C. Agurto, M. Anciaux, F. Wyrowski. *Proc. SPIE 6267, Ground-based and Airborne Telescopes*, 626714 (2006). DOI: 10.1117/12.670798.
- [32] C. Kasemann, R. Güsten, S. Heyminck, B. Klein, T. Klein, S.D. Philipp, A. Korn, G. Schneider, A. Henseler, A. Baryshev, T.M. Klapwijk. *Millimeter and Submillimeter Detectors and Instrumentation for Astronomy III*. Edited by J. Zmuidzinis, W.S. Holland, S. Withington, W. Duncan (Proceedings of the SPIE 6275, 62750N, 2006), DOI: 10.1117/12.670810
- [33] *LLAMA Observatory Website*. Available online: <https://www.llamaobservatory.org/>
- [34] D.C. Mattis, J. Bardeen. *Phys. Rev.*, **111** (2), 412 (1958). DOI: 10.1103/PhysRev.111.412
- [35] E.S. Zhukova, B.P. Gorshunov, L.S. Kadyrov, K.V. Zhivetev, A.V. Terentiev, A.M. Chekushkin, F.V. Khan, A.V. Khudchenko, N.V. Kinev, V.P. Koshelets. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **34** (3), 1100605 (2024). DOI: 10.1109/TASC.2024.3353139
- [36] M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics: Electromagnetic-Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light* (Pergamon Press, England, Oxford, 1987)
- [37] W. Zimmermann, E.H. Brandt, M. Bauer, E. Seider, L. Genzel. *Physica C: Superconduct.*, **183** (1-3), 99 (1991). DOI: 10.1016/0921-4534(91)90771-P