

УДК 537.8

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИЁМНЫЕ СТРУКТУРЫ ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА 700 ÷ 950 ГГц ДЛЯ РАДИОАСТРОНОМИИ

К. И. Рудаков^{1,2}, В. П. Кошелец¹, А. М. Барышев^{1,3}, П. Н. Дмитриев¹,
А. В. Худченко^{1,4}*

¹ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва;

² Московский физико-технический институт (государственный университет),
г. Долгопрудный, Россия

³ Астрономический институт университета Гронингена;

⁴ Нидерландский институт космических исследований, г. Гронинген, Нидерланды

Был разработан, изготовлен и протестирован волноводный приёмный элемент для частот 790 ÷ 950 ГГц на основе туннельных структур сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник. Два туннельных перехода Nb/AlN/NbN размещены в микрополосковой линии с нижним электродом с толщиной порядка 300 нм из плёнки NbTiN и верхним электродом с толщиной 500 нм из алюминия. Оптимизация технологических процессов позволила обеспечить следующие характеристики этих переходов: субмикронная площадь (0,5 мкм² для каждого), плотность тока около 30 кА/см² и ширина щели 3,2 мВ. Такие туннельные переходы обеспечили работу приёмного элемента в широкой области частот (700 ÷ 950 ГГц), что было подтверждено фурье-спектроскопией и измерениями шумовой температуры. Скорректированная шумовая температура приёмника на частоте 725 ГГц составила 120 К, что лишь в 3 раза превышает квантовый предел hf/k_B , где h — постоянная Планка, f — частота, k_B — постоянная Больцмана. Шумовая температура увеличивается до 390 К в верхней части частотного диапазона.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках проекта CHAMP [1] для телескопа «Atacama Pathfinder Experiment» (APEX) [2] был разработан и изготовлен высокочувствительный приёмник. Этот прибор, установленный на телескопе, состоит из двух 7-пиксельных матриц — гетеродинных приёмников, работающих в частотных диапазонах 600 ÷ 720 ГГц и 790 ÷ 950 ГГц, которые соответствуют окнам прозрачности атмосферы. Высокочувствительными элементами приёмников являются смесители на основе туннельных переходов сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС) Nb-AlO_x-Nb. Однако приёмники верхнего частотного диапазона имеют сравнительно высокую шумовую температуру, порядка 400 К. Для улучшения чувствительности телескопа был начат проект CHAMP+, целью которого является создание гетеродинного сверхпроводникового приёмника с шумовой температурой порядка 200 К, работающего в диапазоне частот 790 ÷ 950 ГГц.

Данная работа посвящена исследованию прототипа приёмника диапазона 790 ÷ 950 ГГц на основе смесительной структуры СИС NbTiN-Nb-AlN-NbN с субмикронным размером и высокой прозрачностью барьера (плотность тока составляет 30 кА/см²).

1. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРИЁМНОЙ СТРУКТУРЫ

Как известно, переходы с высокой плотностью тока J_C позволяют повысить рабочую частоту СИС-приёмников и расширить их полосу. Однако существует предел повышения прозрачности

* kirill.i.rudakov@gmail.com

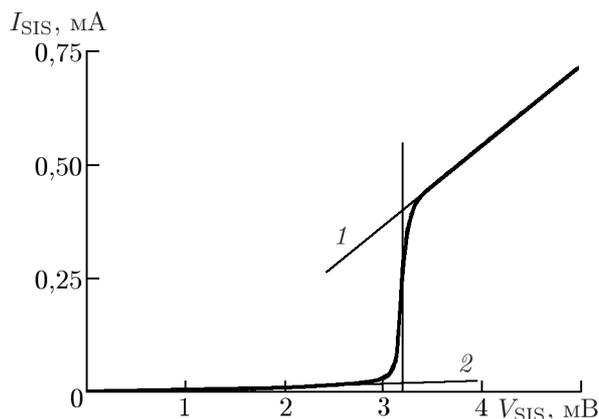


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика приёмной структуры на основе двух идентичных СИС-переходов. Прямые 1 и 2 соответствуют областям ВАХ с наклоном $R_n = 5,9$ Ом и R_j ($R_j/R_n = 37$), вертикальная прямая отвечает напряжению $V_g = 3,2$ мВ

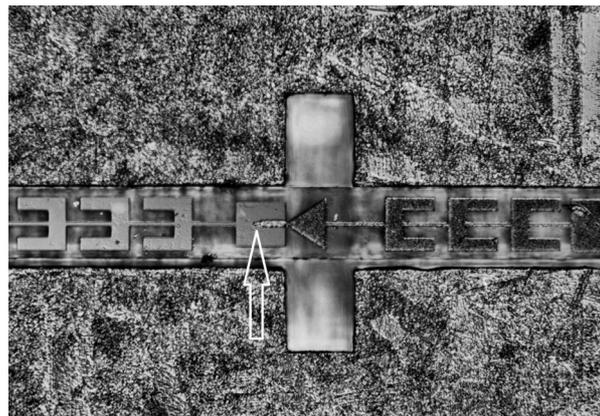


Рис. 2. Микрофотография основной части приёмного элемента. Стрелкой отмечена твин-структура

барьера для СИС-переходов на основе окиси алюминия. Этот предел отвечает плотности тока порядка $10 \div 15$ кА/см². При дальнейшем увеличении плотности тока резко снижается качество переходов. Чтобы преодолеть это ограничение, в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН была разработана технология изготовления туннельных СИС-переходов Nb/Al–AlN_x/NbN с экстремально высокой прозрачностью туннельного барьера (соответствующей плотности тока достигает 70 кА/см²) и с приемлемым параметром качества R_j/R_n , где R_j — подщелевое сопротивление СИС-перехода, измеренное при напряжении 2 мВ, а R_n — сопротивление СИС-перехода на «нормальной» (выше щели) части вольт-амперной характеристики (ВАХ). Для получения сверхтонкого и высококачественного барьера из алюминитрида AlN проводилась нитридизация поверхности алюминия в плазменном высокочастотном разряде в среде чистого азота N₂. На этой основе была разработана технология формирования многослойных микросхем и создан ряд сверхчувствительных приёмных устройств частотного диапазона 100 ÷ 1 000 ГГц.

Смесительный элемент выполнен по планарной технологии на кварцевой подложке и состоит из треугольной антенны-пробы в волноводной структуре с размером 300×75 мкм, согласующей микрополосковой структуры, системы высокочастотных фильтров в цепях вывода сигнала 4 ÷ 12 ГГц и детектора на основе двух идентичных СИС-переходов с площадью 0,5 мкм². Переходы расположены на малом расстоянии друг от друга и включены параллельно. Такая структура используется для отстройки ёмкости в широком диапазоне частот и часто называется твин-структурой (twin-structure). Её типичная ВАХ приведена на рис. 1, а микрофотография части смесительного элемента показана на рис. 2.

Поскольку рабочая частота приёмника превышает «щелевую» частоту ниобия, в качестве нижнего электрода приёмного элемента использовалась плёнка сверхпроводника NbTiN с толщиной 280 нм и критической температурой 14,1 К, а в качестве верхнего — высококачественная алюминиевая плёнка с толщиной 500 нм. В качестве диэлектрика в микрополосковой линии применяется оксид SiO₂ с толщиной 250 нм. Несмотря на то, что приёмники работают в условиях вакуума, при проведении тестовых испытаний верхний слой алюминия постепенно разрушается ввиду высокой химической активности металла. В связи с этим часть изготовленных образцов была пассивирована слоем SiO₂, что обеспечило большую надёжность и повторяемость результатов измерений характеристик СИС-переходов при термоциклировании.

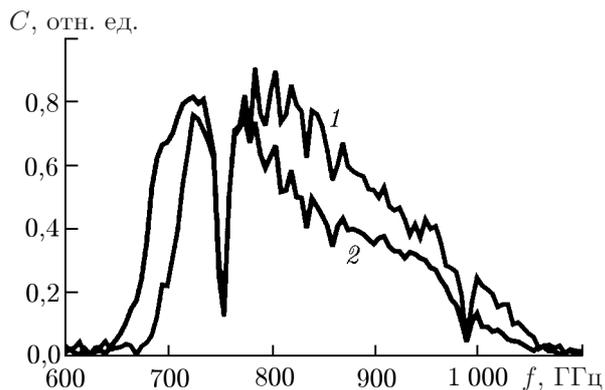


Рис. 3. Частотная зависимость экспериментальных откликов различных типов приёмных элементов. Кривая 1 соответствует элементу, который при проектировании был настроен на немного бóльшую удельную ёмкость, чем элемент, соответствующий кривой 2

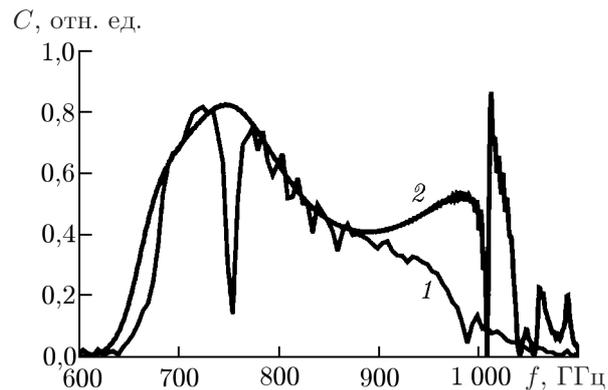


Рис. 4. Сравнение измеренного отклика (кривая 1) приёмного элемента и соответствующей теоретической оценки (кривая 2). Два глубоких и резких провала на экспериментальной кривой соответствуют линиям поглощения воды. Артефакты на частотах выше 1 ТГц на расчётной кривой связаны с особенностью используемого алгоритма

2. ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЁМНОЙ СТРУКТУРЫ

Для экспериментального измерения отклика приёмного элемента в полосе частот $790 \div 950$ ГГц был использован фурье-интерферометр Майкельсона. В качестве широкополосного источника терагерцового излучения применялся резистивный нагреватель — глобар. Для измерения отклика приёмного элемента на твин-переходах задавалась рабочая точка по напряжению 2,5 мВ. Результаты фурье-спектроскопии представлены на рис. 3. Для хорошего подавления критического тока туннельных переходов оказалось достаточным перейти в первый минимум его зависимости от внешнего магнитного поля; обычно в качестве оптимального уровня подавления выбирают второй или даже третий минимум этой зависимости. Чем выше порядок минимума, тем лучше подавление критического тока и ниже электрические шумы. Однако большое магнитное поле уменьшает энергетическую щель сверхпроводников, что приводит к понижению целевого напряжения на ВАХ и, как следствие, к серьёзному снижению верхней границы рабочего диапазона.

Для корректного расчёта необходимо точно знать удельную ёмкость переходов с туннельным слоем на основе алюминитрида AlN. Как следует из статьи [3], удельная ёмкость 60 фФ/мкм² достигается при критической плотности тока 56 кА/см², а в статье [4] приведена удельная ёмкость 85 фФ/мкм² при критической плотности тока 50 кА/см². Чтобы снизить неопределённость и заведомо реализовать требуемую входную полосу, в изготовленную серию были включены образцы, рассчитанные на различную удельную ёмкость. Анализ тестовой серии образцов, описанных в статье [5], позволил определить удельную ёмкость СИС-перехода для используемой плотности тока: она оказалась равной 80 фФ/мкм².

Было проведено полное трёхмерное моделирование изготовленных структур, включая настроечные элементы и размещение чипа-образца в волноводе. Как видно из рис. 4, экспериментальный отклик приёмной структуры оказался ниже расчётного в диапазоне частот $900 \div 1000$ ГГц. Учитывая высокое качество используемых СИС-переходов, мы полагаем, что расхождение с расчётными результатами в верхней части частотного диапазона вызвано бóльшими потерями в плёнках, чем даёт оценка, основанная на теории Маттиса—Бардина [6]. Для исследуемой серии образцов толщина слоя NbTiN в результате формирования структуры получилась меньше расчётной (вплоть

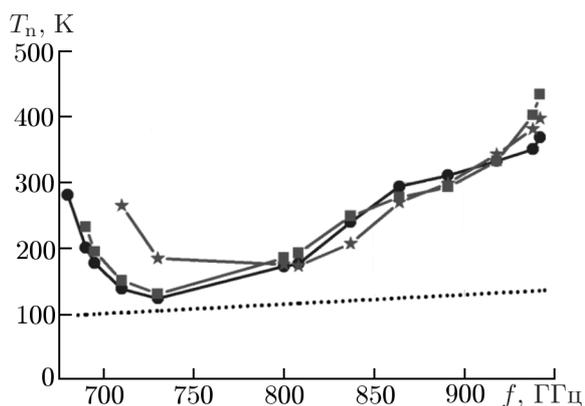


Рис. 5. Скорректированная шумовая температура различных приёмных элементов как функция частоты. Смеситель 1 (символы \bullet) и смеситель 2 (символы \blacksquare) имеют одинаковые настроечные структуры, смеситель 3 (символы \star) имеет отличный от смесителей 1 и 2 дизайн. Пунктиром показана шумовая температура, отвечающая величине $3hf/k_B$

Измеренная шумовая температура для приёмных элементов различных типов. Представленные данные скорректированы на майларовый делитель квазиоптического пучка с толщиной 12 мкм и коэффициентом пропускания 88%. В диапазоне 700–950 ГГц шумовая температура растёт от 120 до 390 К. На рис. 5 приведены зависимости шумовой температуры от частоты для различных образцов приёмных элементов, а также показана зависимость $3hf/k_B$ (величину hf/k_B называют квантовым пределом). Полученные результаты в большей части исследуемого частотного диапазона сравнимы с данными для 10-го диапазона радиотелескопа АЛМА [8].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измеренная шумовая температура приёмных элементов в значительной части частотного диапазона 790–950 ГГц меньше, чем аналогичный параметр для установленных на телескопе АРЕХ высокочастотных приёмников СНАМР+. В процессе оптимизации технологических процессов удалось достичь высокого качества туннельных переходов с площадью 0,5 мкм² и плотностью тока 30 кА/см². Однако на высоких частотах наблюдается быстрый рост шумовой температуры. Расчёты экспериментального отклика показывают, что высокочастотные потери в металле используемых плёнок возрастают с повышением частоты быстрее, чем следует из теоретических оценок. Мы полагаем, что для дальнейшего снижения шумовой температуры требуется улучшить качество используемых плёнок, а также увеличить толщину плёнки NbTiN до 350 нм, что позволит улучшить условия распространения электромагнитного высокочастотного излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение 14.613.21.0046, идентификатор RFMEFI61315X0046).

до значений, близких к лондоновской глубине проникновения). Такое изменение может приводить к проникновению электромагнитных полей в нижние слои плёнки NbTiN, структура и свойства которых отличаются от характеристик толстой плёнки, и даже в подложку. Вероятно, по этой причине наблюдается быстрый рост потерь на высокой частоте. Особенности расчётной кривой на частотах выше 950 ГГц являются артефактами используемых расчётных моделей [6, 7]. Два глубоких провала на экспериментальной кривой в нижней и верхней частях частотного диапазона являются линиями поглощения воды в квазиоптическом тракте интерферометра.

Шумовая температура была измерена стандартным методом «горячей» и «холодной» нагрузки (Y-фактор). В качестве «горячей» нагрузки использовался поглотитель при 300 К, а в качестве «холодной» — охлаждённый до 77 К поглотитель. На рис. 5 показаны частотные зависимости шумовой температуры для приёмных элементов различных типов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kasemann C. R., Güsten R., Heyminck S., et al. // Proc. SPIE. 2006. V. 6275. Art. no. 62750N.
2. Güsten R., Booth R., Cesarsky C., et al. // Proc. SPIE. 2006. V. 6267. Art. no. 626714-1.
3. Lodewijk F. J., Zijlstra T., Zhu S., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2007. V. 19. P. 395.
4. Kawamura J., Miller D., Chen J., et al. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. P. 2119.
5. Khudchenko A., Baryshev A. M., Rudakov K. I., et al. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2016. V. 6, No. 1. P. 127.
6. Zhou S., Jabbar A., Bao J., et al. // J. Appl. Phys. 1992. V. 71, No. 6. P. 2789.
7. Рудаков К. И., Кошелец В. П. // Нелинейный мир. 2014. № 2. С. 20.
8. Uzawa Y., Fujii Y., Gonzalez A., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2015. V. 25, No. 3. Art. no. 2401005.

Поступила в редакцию 26 апреля 2016 г.; принята в печать 6 июня 2016 г.

THE 700–950 GHz SUPERCONDUCTING RECEIVERS FOR RADIO ASTRONOMY

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

The waveguiding receiver, which is based on the tunnel superconductor–insulator–superconductor structures, operating in frequency range 790–950 GHz is designed, fabricated, and tested. Two Nb/AlN/NbN tunnel junctions are incorporated in a microstrip line consisting of the bottom NbTiN-film electrode with a thickness of about 300-nm and the top 500 nm-thick aluminum electrode. The production-process optimization allowed us to ensure the following characteristics of these junctions: the submicron area ($0.5 \mu\text{m}^2$ for each junction), the current density about $30 \text{ kA}/\text{cm}^2$, and the slot width 3.2 mV. Such tunnel junctions ensure the receiver operation in the wide frequency range (700–950 GHz), which was confirmed by the Fourier spectroscopy and the noise-temperature measurements. At a frequency of 725 Hz, the corrected noise temperature of the receiver amounted to 120 K, which exceeds the quantum limit hf/k_B , where h is the Planck constant, f is the frequency, and k_B is the Boltzmann constant by only a factor of three. In the upper part of the frequency range, the noise temperature increases up to 390 K.