

## СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИЕМНИКИ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ И НАЗЕМНОЙ РАДИОАСТРОНОМИИ

В. Кошелец<sup>1,2</sup>, К. Рудаков<sup>1,3</sup>, А. Худченко<sup>1,2</sup>, Л. Филиппенко<sup>1</sup>, Р. Хеспер<sup>3</sup>,  
Ж. Лепин<sup>4</sup>, Шен-Каи Ши<sup>5</sup>, А. Барышев<sup>3</sup>

*В статье 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. Смесители сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС) на основе высококачественных туннельных переходов являются ключевыми элементами наиболее чувствительных гетеродинных приемников субтерагерцового (субТГц) диапазона. В статье представлены результаты разработки СИС-приемников диапазонов 211–275 ГГц и 800–950 ГГц с шумовой температурой в двухполосном режиме (DSB) около 20 К и 220 К соответственно. Эти разработки будут использованы при создании приемных систем для наземных телескопов АРЕХ и LLMA, а также для космической миссии Millimetron.*

**Ключевые слова:** радиоастрономия, высококачественные туннельные переходы на основе ниобия, малошумящие СИС-приемники, смесители с квантовой чувствительностью терагерцового диапазона.

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

<sup>2</sup> Астрокосмический Центр ФИАН, 117997 Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32; e-mail: valery@hitech.cplire.ru.

<sup>3</sup> Астрономический институт университета Гронингена, Нидерланды, Гронинген.

<sup>4</sup> Астрономический институт университета Сан-Пауло, Бразилия, Сан-Пауло.

<sup>5</sup> Лаборатория ММ и субММ волн, Обсерватория Пурпурной горя, Китай, Нанкин.

*Введение.* Туннельные структуры сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник (СИС) являются наилучшими входными элементами для когерентных приемников на частотах от 0.1 до 1.2 ТГц [1–10], они нашли применение в большинстве современных приемных устройств для радиоастрономии. Это объясняется чрезвычайно высокой нелинейностью сверхпроводниковых туннельных элементов и возможностью получения предельно низких шумовых температур, ограниченных только квантовым пределом; это обусловлено малыми токами утечки в высококачественных туннельных структурах и криогенной рабочей температурой. Гетеродинные СИС – приемники постоянно работают на большинстве наземных радиотелескопов; они используются во всех высокочастотных диапазонах самого большого многоэлементного интерферометра AtacamaLargeMillimeter/submillimeterArray (ALMA) [7–9]. СИС-приемники успешно работали на борту космической обсерватории Гершель, в составе которой находился гетеродинный инструмент HIFI (HeterodyneInstrumentfortheFarInfrared) [5, 6, 11]. В настоящее время в стадии разработки находится несколько космических миссий, в том числе проект Российского Космического Агентства “Миллиметрон” [12, 13]. Проект “Миллиметрон” нацелен на проведение исследований астрономических объектов во вселенной в дальнем инфракрасном, субмиллиметровом и миллиметровом диапазонах спектра электромагнитного излучения со сверхвысокой чувствительностью. Измерения планируется вести как в режиме одиночного телескопа, так и в режиме интерферометра Космос – Земля с рекордно высоким угловым разрешением.

Для выполнения научных задач проекта “Миллиметрон” необходимо создание целого ряда гетеродинных приемных систем с чувствительностью, близкой к квантовому пределу. Приемники диапазона 211–275 ГГц с шумовой температурой менее 45 К в однополосном режиме (SSB) требуются для работы как в режиме космического интерферометра Космос – Земля, так и для спектрометра высокого разрешения ( $R > 10^6$ ) в режиме одиночного телескопа. Отметим, что приемники этого диапазона использовались для получения первого в истории “изображения” сверхмассивной черной дыры в центре галактики М 87 в рамках проекта Event Horizon Telescope (ЕНТ). Для улучшения шумовых характеристик 7-пиксельного матричного приемника для телескопа APREX (AtacamaPathfinderEXperiment) [14] были разработаны и исследованы СИС приемные структуры с рабочей частотой до 950 ГГц. В данной статье представлены результаты разработки СИС-приемника диапазонов 211–275 и 790–950 ГГц, выполненных в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН совместно с коллегами из Астрономического института университета Гронингена (Нидерланды).

СИС-смеситель диапазона 211–275 ГГц. В качестве приемного элемента для волнового смесителя диапазона 211–275 ГГц был использован туннельный СИС переход Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb, изготовленный на кварцевой подложке толщиной 125 мкм. СИС переход площадью 1 мкм<sup>2</sup> был включен в планарную структуру на основе копланарных и микрополосковых линий Nb/SiO<sub>2</sub>/Nb, которая позволила компенсировать емкость СИС перехода в рабочем диапазоне частот и согласовать импеданс СИС перехода на высокой частоте (порядка 20–40 Ом) с импедансом волновода. Для предотвращения утечки ВЧ сигнала через структуру образца на его поверхности изготовлены ВЧ загораживающие фильтры. Волноводный приёмный элемент размещается в прямоугольном волноводе 500×1000 мкм<sup>2</sup> ортогонально к плоскости распространения волны на расстоянии 230 мкм от оконечности волновода [15].

На вольт-амперной характеристике (ВАХ) перехода Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb, изготовленного по стандартной технологии, присутствует коленообразная особенность, возникающая на ВАХ чуть выше целевого напряжения  $V_g$ . Эта особенность обусловлена наличием нормального слоя алюминия вблизи туннельного барьера, его присутствие существенно модифицирует плотность состояний электронов в сверхпроводящем электроде. Наличие коленообразной особенности приводит к появлению падающего участка на квази-частичных ступенях при воздействии мощности гетеродина, вызывая нестабильность работы СИС-смесителя и существенно сокращая рабочий диапазон.

Для решения этой проблемы была модернизирована технология изготовления туннельных структур, в нижний электрод был введен дополнительный слой алюминия толщиной 5 нм на расстоянии 50 нм от туннельного барьера. Этот слой не только улучшил морфологию пленки ниобия вблизи барьера, но и существенно изменил функцию распределения электронов в электроде вблизи барьера. Все это привело к полному подавлению коленообразной особенности, ВАХ туннельной структуры Nb/Al/Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb представлена на рис. 1. Новая технология изготовления позволила не только получать туннельные переходы без падающих участков и особенностей, но и реализовывать чрезвычайно малый ток утечки на напряжениях ниже целевого (отношение сопротивлений под и над щелью  $R_j/R_n = 37$ ). Это близко к предельно возможному значению для переходов на основе ниобия и позволяет реализовывать шумовые температуры, ограниченные лишь квантовым пределом. При воздействии на туннельный переход сигнала гетеродина с частотой  $f_{LO}$  на ВАХ возникают квазичастичные ступени, размер которых по напряжению определяется частотой гетеродина  $\Delta V_{qp} = hf_{LO}/e$  ( $h$  – постоянная Планка,  $e$  – заряд электрона).

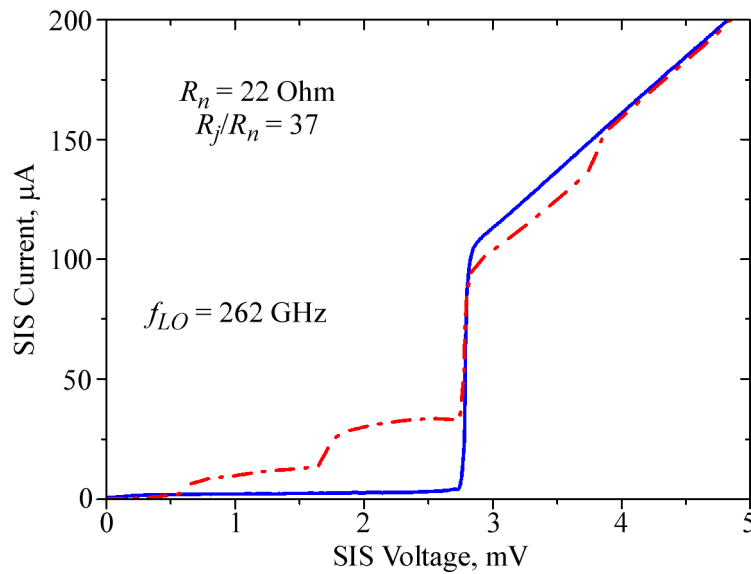


Рис. 1: ВАХ смесительного элемента на основе структуры  $Nb/Al/Nb-AlO_x-Nb$  площадью  $1 \text{ мкм}^2$ : сплошной кривой показана автономная ВАХ, штрих-пунктирной – ВАХ при воздействии гетеродина оптимальной мощности на частоте 262 ГГц.

Экспериментальная ВАХ при воздействии гетеродина частотой 262 ГГц с мощностью, оптимальной для работы СИС-смесителя, показана на рис. 1 штрих-пунктирной линией. Для экспериментального измерения отклика приёмного элемента был использован Фурье интерферометр Майкельсона (ФТС). В качестве широкополосного источника субТГц излучения был использован резистивный нагреватель. Для измерения отклика приёмного элемента на СИС переходе задавалась рабочая точка по напряжению на уровне 2.5 мВ (чуть ниже щелевого напряжения); результаты ФТС продемонстрировали хорошее соответствие требуемому частотному диапазону.

Шумовая температура была измерена стандартным Y-фактор методом, в качестве “теплой” нагрузки использовался поглотитель при 295 К, а в качестве “холодной” нагрузки был использован охлаждённый до 78 К поглотитель. Температура поглотителей измерялась и постоянно контролировалась с помощью калиброванных термометров с точностью 0.2 К. На рис. 2 показаны зависимости выходного сигнала СИС-приемника от напряжения смещения, измеренные при частоте гетеродина 262 ГГц на промежуточной частоте (ПЧ) 6.5 ГГц (полоса фильтра ПЧ 40 МГц); отклик для холодной нагрузки на входе показан сплошной кривой, для теплой нагрузки – штрих-пунктирной. Разница этих кривых дает значение Y-фактора, который в лучших точках достигает величины

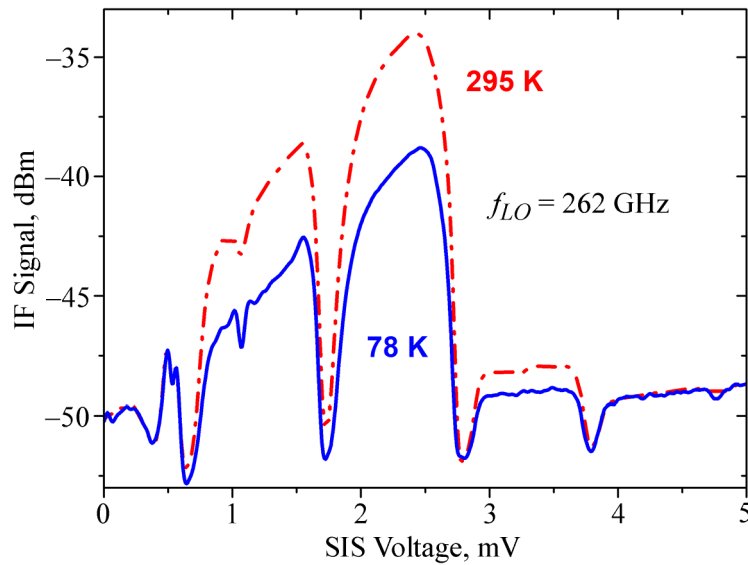


Рис. 2: Зависимости выходного сигнала СИС-приемника для структур Nb/Al/Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb без колена, измеренные на промежуточной частоте 6.5 ГГц при “холодной” и “горячей” нагрузке на входе (сплошная и штрих-пунктирная линия, соответственно).

5 дБ, что соответствует шумовой температуре приемника менее 20 К. Измеренные зависимости двухполосной шумовой температуры (DSB) СИС-приемника были получены без каких-либо коррекций на потери в тракте приемника (потери в разделителе луча, во входном окне криостата и фильтрах на ступенях 78 и 4.2 К не вычитались). Полученные значения двухполосной шумовой температуры, измеренные в полосе ПЧ 4–8 ГГц, лишь немного превышают величину квантового предела  $hf/k_B$  и составляют  $19 \pm 2$  К на частоте 251 ГГц. Приведенные в статье точности итоговой шумовой температуры ( $\pm 2$  К) учитывают не только погрешности в измерении температуры поглотителей, но и другие возможные погрешности измерений. Полученные значения шумовой температуры удовлетворяют техническим требованиям к приемнику диапазона 211–275 ГГц для приемного комплекса космического радиотелескопа “Миллиметрон”.

*Матричный приемник диапазона 790–950 ГГц для телескопа АРЕХ.* Для модернизации 7-пиксельного матричного приемника на телескопе АРЕХ [14] диапазона 790–950 ГГц (см. рис. 3) были разработаны СИС-смесители на основе туннельных переходов Nb-AlN-NbN с высокой критической плотностью тока, включенные в микрополосковую линию, состоящую из нижнего электрода толщиной 320 нм, изготовленного из NbTiN, и верхнего электрода толщиной 500 нм из Al, разделенных изолятором SiO<sub>2</sub> толщиной 250 нм. Критическая температура пленки NbTiN составляет 14.5 К; детали конструк-

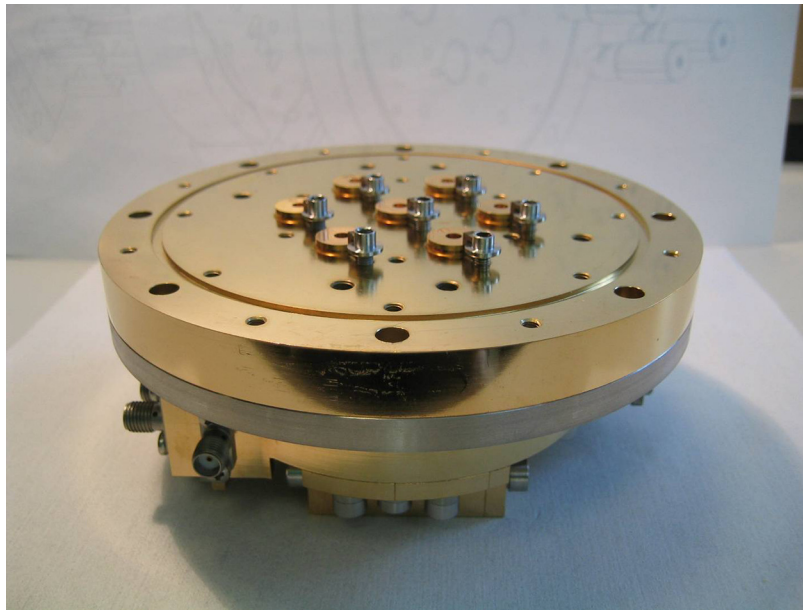


Рис. 3: Фото 7-пиксельного матричного приемника диапазона 790–950 ГГц для телескопа APEX (*Atacama Pathfinder Experiment*), видны входные рупора смесителей.

ции и технологии изготовления были представлены в нашей статье [14]. Существенным преимуществом новых Nb-AlN-NbN смесителей является более высокое щелевое напряжение по сравнению со старыми смесителями с Nb-электродами: 3.15 мВ и 2.8 мВ соответственно. Это играет важную роль для высокочастотных применений, поскольку для частоты 950 ГГц размер фотонной ступени составляет 3.9 мВ и превышает щелевое напряжение перехода. Для модернизированных смесителей диапазон напряжения, доступный для работы СИС смесителя, примерно на 0.7 мВ шире, чем у существующих, что является существенным преимуществом.

СИС переходы Nb-AlN-NbN [10, 16] позволяют реализовывать плотности туннельного тока перехода вплоть до  $30 \text{ кА/см}^2$  при сохранении высокого качества (отношение сопротивления утечки к нормальному 25–30). Использование конструкции с двойными СИС переходами дает возможность получать широкополосный отклик и обеспечивать хорошую шумовую температуру в требуемом диапазоне частот (см. рис. 4). Скорректированная шумовая температура DSB смесителей варьируется от 200 К на низких частотах до 400 К на частоте 950 ГГц. В шумовую температуру внесена поправка на потери в делителе луча (примерно 10%) и на вклад от источника гетеродина, который находился при температуре 300 К [17]. Из данных на рис. 4 можно сделать вывод, что модернизация СИС-смесителей позволяет существенно улучшить чувствительность

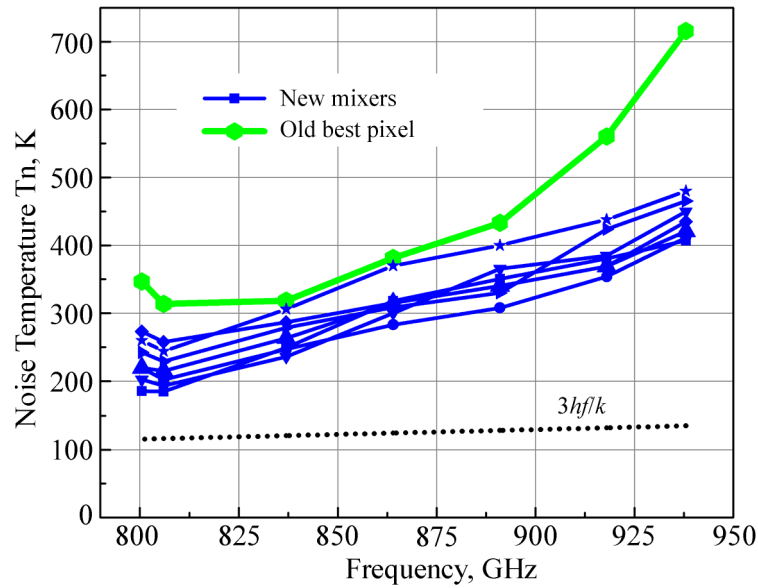


Рис. 4: Зависимость шумовой температуры пикселей матричного приемника от частоты гетеродина, измеренная в диапазоне ПЧ 4–12 ГГц. Для сравнения приведены данные для центрального пикселя предшествующего приемника.

приемника СНАМР +. Для модернизированного центрального пикселя шумовая температура смесителя составляет 203, 283 и 407 К на частотах 800, 864 и 938 ГГц, что в 1.7, 1.35 и 1.75 раза лучше, чем для предыдущей версии (345, 381 и 716 К соответственно). Такое улучшение чувствительности позволяет примерно вдвое увеличить скорость астрономических измерений, а также открывает возможность для наблюдения недоступных ранее источников.

Таким образом, разработаны и исследованы СИС-смесители диапазона 211–275 ГГц с шумовой температурой менее 20 К. Полученные значения двухполосной шумовой температуры лишь немного превышают величину  $hf/k_B$ , что делает такие приемники основными кандидатами для новых наземных и космических радиоастрономических проектов. Представлены результаты модернизации 7-пиксельного матричного приемника на телескопе АРЕХ диапазона 790–950 ГГц; шумовая температура разработанных Nb-AlN-NbN смесителей варьируется от 200 К до 400 К. Модернизация СИС-смесителей позволила улучшить чувствительность СНАМР + примерно в 1.5 раза, что позволит сократить вдвое время измерений.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 19-52-80023, разработка смесителя диапазона 211–275 поддержана проектом РНФ 19-19-00618. Туннельные

структуры изготовлены в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН в рамках государственного задания с использованием УНУ 352529.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] J. R. Tucker, IEEE J. Quantum Electronics **15**, 1234 (1979). DOI: 10.1109/JQE.1979.1069931.
- [2] J. R. Tucker, M. J. Feldman, Reviews of Modern Physics **57**, 1055 (1985). DOI: 10.1103/RevModPhys.57.1055.
- [3] J. W. Kooi, M. Chan, T. G. Phillips, et al., IEEE Trans. Microwaves Theory and Techniques **40**, 812 (1992). DOI: 10.1109/22.137383.
- [4] A. Karpov, J. Blondell, M. Voss, K. H. Gundlach, IEEE Trans on Appl. Superconductivity **5**, 3304 (1995). DOI: 10.1109/77.403298.
- [5] B. D. Jackson, G. de Lange, T. Zijlstra, et al., IEEE Trans. Microw. Theory Techn. **MTT-54**(2), 547 (2006). DOI: 10.1109/TMTT.2005.862717.
- [6] A. Karpov, D. Miller, F. Rice, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity **17**, 343 (2007). DOI: 10.1109/TASC.2007.898277.
- [7] A. R. Kerr, S-K. Pan, S. M. X. Claude, et al., IEEE Trans. THz Sci. Technol. **4**, 201 (2014). DOI: 10.1109/TTHZ.2014.2302537.
- [8] A. M. Baryshev, R. Hesper, F. P. Mena, et al., Astronomy & Astrophysics **577**, A129 (2015). DOI: 10.1051/0004-6361/201425529.
- [9] Y. Uzawa, Y. Fujii, A. Gonzalez, et al., IEEE Trans. on Appl. Supercond. **25**, 2401005 (2015). DOI: 10.1109/TASC.2014.2386211.
- [10] A. Khudchenko, A. M. Baryshev, K. Rudakov, et al., IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology **6**(1), 127 (2016). DOI: 10.1109/TTHZ.2015.2504783.
- [11] Th. de Graauw, F. P. Helmich, T. G. Phillips, et al., Astronomy & Astrophysics **518**, L6 (2010). DOI: 10.1051/0004-6361/201014698.
- [12] A. V. Smirnov, A. M. Baryshev, P. de Bernardis, et al., Radiophysics and Quantum Electronics **54**(8-9), 557 (2012). DOI: 10.1007/s11141-012-9314-z.
- [13] <http://millimetron.ru/en/>
- [14] R. Güsten, R. Booth, C. Cesarsky, et al., Proc. of SPIE **6267**, 626714-1 (2006). DOI: 10.1117/12/670798.



- [15] K. Rudakov, P. Dmitriev, A. Baryshev, et al., Radiophysics and Quantum Electronics **62**(7-8), 547 (2019). DOI: 10.1007/s11141-020-10001-7.
- [16] P. N. Dmitriev, I. L. Lapitskaya, L. V. Filippenko, et al., IEEE Trans. on Appl. Supercond. **13**(2), 107 (2003). DOI: 10.1109/TASC.2003.813657.
- [17] A. Khudchenko, A. M. Baryshev, P. Dmitriev, et al., Proceedings of the *28th International Symposium on Space Terahertz Technology, International Symposium on Space Terahertz Technology ISSTT 2017*; pp. 87-90, 2017; ISBN:9781510859722.

Поступила в редакцию 28 апреля 2021 г.

После доработки 1 августа 2021 г.

Принята к публикации 2 августа 2021 г.

*Публикуется по рекомендации оргкомитета 1-ой “Московской Международной конференции по миллиметровой и субмиллиметровой астрономии”, 12–16 апреля 2021, АКЦ ФИАН.*