

УДК 535.8

**МАТРИЦЫ ДЕТЕКТОРОВ СВЕРХПРОВОДНИК-  
ИЗОЛЯТОР-НОРМАЛЬНЫЙ МЕТАЛЛ-ИЗОЛЯТОР-СВЕРХПРОВОДНИК  
ДЛЯ ТЕРАГЕРЦОВОЙ РАДИОАСТРОНОМИИ**

М. А. Тарасов<sup>1</sup>, А. А. Гунбина<sup>1,2</sup>, С. Лемзяков<sup>3</sup>, М. Ю. Фоминский<sup>1</sup>,  
А. М. Чекушкин<sup>1</sup>, Г. В. Якопов<sup>4</sup>, В. Ф. Вдовин<sup>2</sup>, В. С. Эдельман<sup>3</sup>

*Разработаны и исследованы детекторы структуры сверхпроводник-изолятор-нормальный металл-изолятор-сверхпроводник (СИНИС) для применения в космических и наземных радиотелескопах. Разработаны и изготовлены матрицы полуволновых и электрически малых антенн с последовательным и с параллельным соединением элементов для считывания полевыми транзисторами или сверхпроводящими квантовыми интерферометрами (СКВИДаами). Впервые разработана и изготовлена конструкция с частотным мультиплексированием каналов, в которой каждый пиксель представляет собой копланарный резонатор, подключенный к общей копланарной линии и считываемый с помощью криогенного СВЧ усилителя. Впервые разработан и изготовлен прототип джозефсоновского параметрического усилителя бегущей волны (ДПУБВ) на основе алюминиевых СИС переходов. Усилитель обеспечивает быстрое считывание по одной коаксиальной линии сотен каналов, устранение шумов со спектром  $1/f$ , снижение тепловой нагрузки на криостат растворения за счет снижения количества подводящих проводов от нескольких сотен до одного коаксиального кабеля.*

**Ключевые слова:** терагерцовые детекторы, субмиллиметровая радиоастрономия, многопиксельные матрицы изображения, СИНИС детекторы, СКВИДы, джозефсоновские параметрические усилители бегущей волны (ДПУБВ), проект Миллиметрон, БТА САО РАН.

<sup>1</sup> ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, 125009 Россия, Москва; e-mail: tarasov@hitech.cplire.ru.

<sup>2</sup> Институт прикладной физики РАН, 603950 Россия, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

<sup>3</sup> Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, 119334 Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 2.

<sup>4</sup> Специальная астрофизическая обсерватория РАН, 369167 Россия, Нижний Архыз.

В проекте Миллиметрон поставлены весьма амбициозные задачи, в частности для фотометра-поляриметра предполагается создание матрицы из  $100 \times 100$  пикселей с эквивалентной шуму мощностью на уровне  $10^{-18} - 10^{-19}$  Вт/Гц $^{1/2}$  при температуре 0.1 К, со спектральным разрешением  $R = f/\Delta f = 3$  в диапазоне 0.1–15 ТГц и с поляризационным разрешением не хуже 0.1%. Для низкочастотного приемника предусмотрены четыре поддиапазона 100–200, 130–350, 350–700, и 700–1000 ГГц с эквивалентной шуму мощностью (МЭШ) менее  $10^{-16}$  Вт/Гц $^{1/2}$ . Широкополосный приемник должен иметь равномерный спектральный отклик, высокую чувствительность, большой динамический диапазон. Такое устройство можно рассматривать как распределенный абсорбер в виде большой матрицы электрически малых антенн [1], согласованный с излучением с помощью рупора или иммерсионной линзы. Увеличение числа элементов в каждом пикселе позволяет повысить мощность насыщения и динамический диапазон устройства.

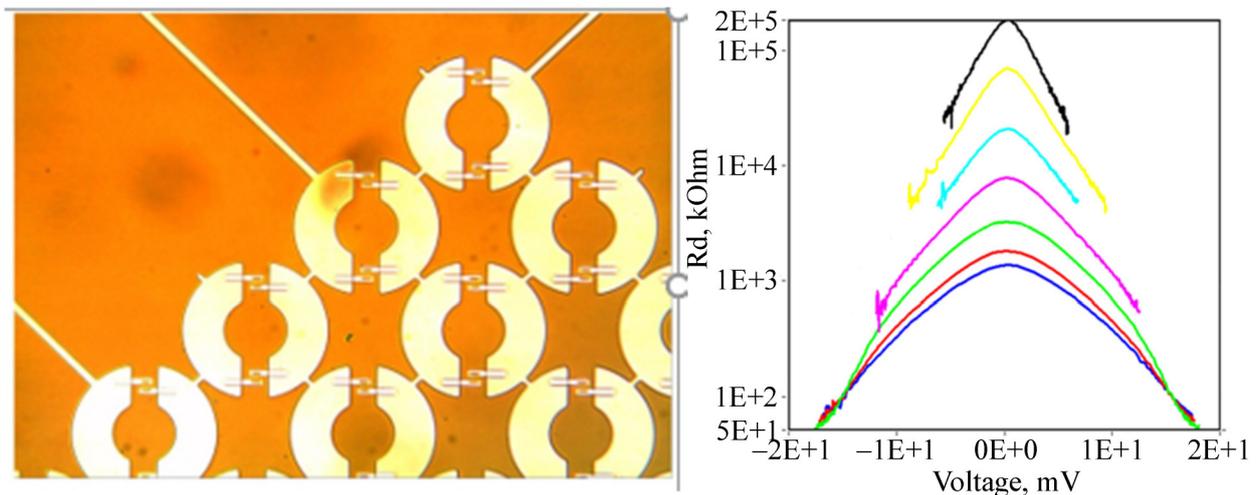


Рис. 1: Сверхпроводящие электрически малые антенны: (а) фотография фрагмента матрицы  $10 \times 10$  элементов; (б) измеренное дифференциальное сопротивление матрицы при рабочей температуре 100–300 мК (от верхней кривой до нижней), [2].

Мы разработали, изготовили и исследовали различные варианты матриц кольцевых антенн, как полуволновых, так и электрически малых, с различными диаметрами от половины длины волны до  $1/10$  и с различной шириной колец. Матрицы полуволновых колец содержали  $5 \times 5$  элементов, матрицы малых колец  $10 \times 10$  элементов. Лучшие результаты получены в случае сверхпроводящих алюминиевых кольцевых антенн, в которых снижены электрические потери и улучшен теплоотвод из области туннельных переходов за счет большого объема электродов и антенн (рис. 1). Измеренное отношение

максимального и асимптотического сопротивлений (см. рис. 1) при рабочей температуре 100 мК достигло рекордных 10000. Крутизна сигнальной характеристики такого детектора на частоте 350 ГГц достигает  $10^9$  В/Вт.

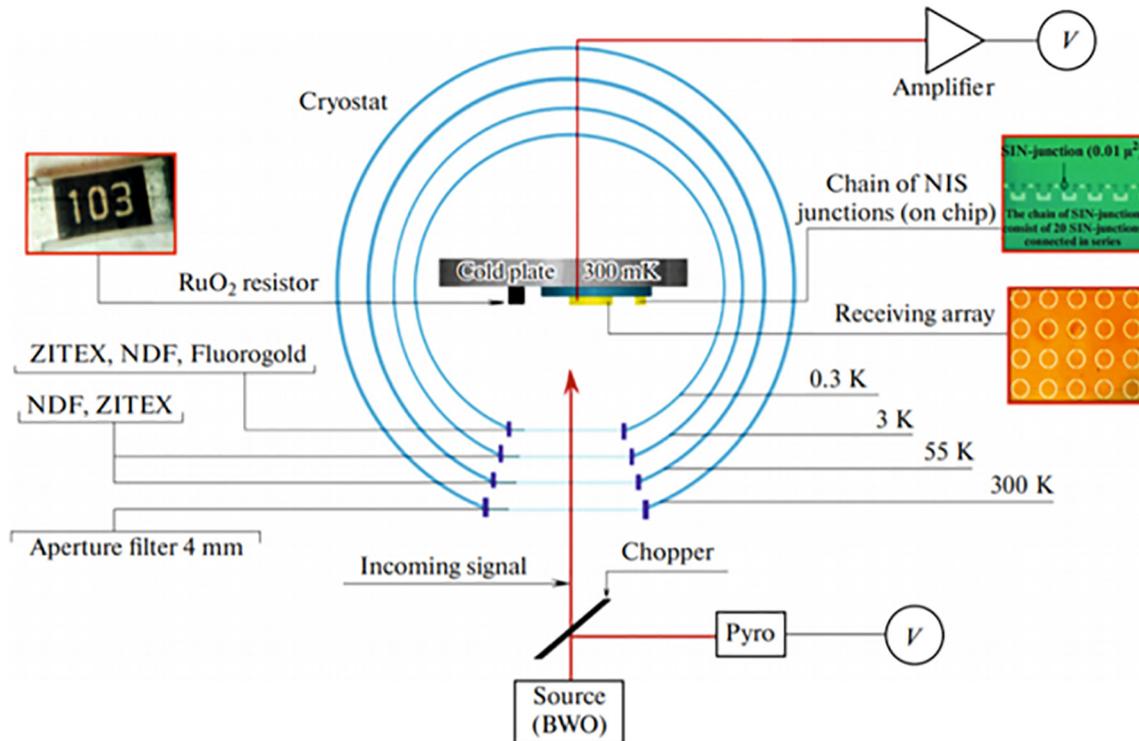


Рис. 2: Модифицированная экспериментальная установка для измерения спектральных характеристик охлаждаемых приемных элементов: Блок-схема из [3].

Для исследования отклика и повышения точности оценки спектральных характеристик приемных структур был модифицирован измерительный стенд (рис. 2, [3]), в котором излучение от лампы обратной волны (ЛОВ) через квазиоптический переключатель попеременно попадает на пироприемник и на образец через четыре оптических окна в камеру криостата, где установлены: приемная матрица, калибровочный болометр на основе RuO<sub>2</sub> резистора на холодной плите криостата, и термометр в виде длинной цепочки СИН переходов на исследуемом чипе для калибровки приходящего излучения. Такая методика позволяет уменьшить ошибки в определении спектральных характеристик.

Для численного моделирования матриц антенн возможны два принципиально разных подхода. Первый рассматривает одиночную ячейку матрицы и ее периодическое повторение в бесконечных пределах с периодическими граничными условиями, как это было в наших ранних работах [1, 4, 5]. В этом случае мы моделируем, по сути, фази-

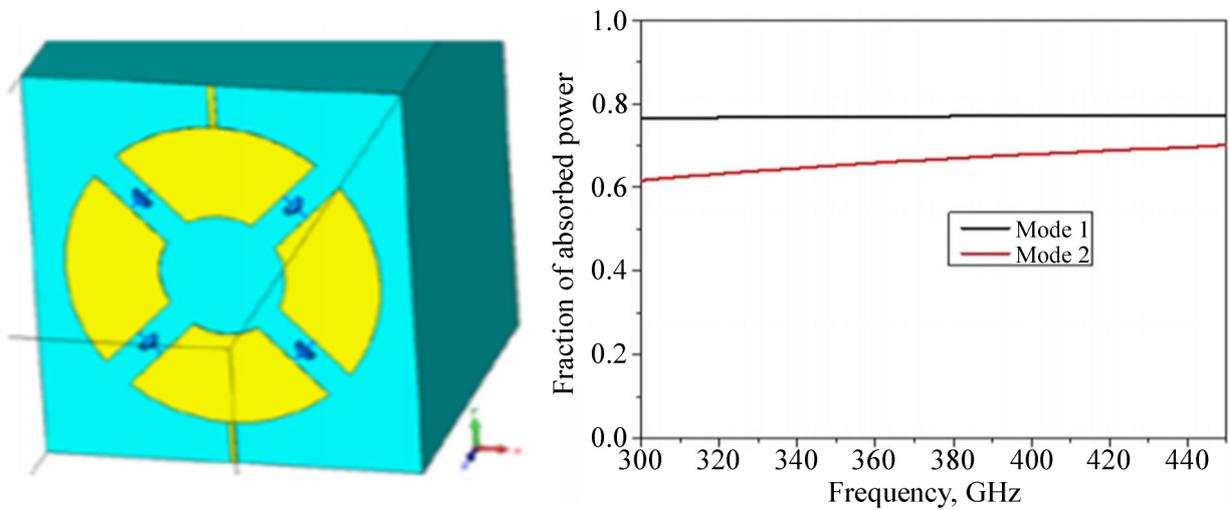


Рис. 3: Упрощенное численное моделирование одиночной ячейки с бесконечным периодическим повторением и периодическими граничными условиями, [1, 5]. Мода 1 для вертикальной поляризации, мода 2 для горизонтальной поляризации.

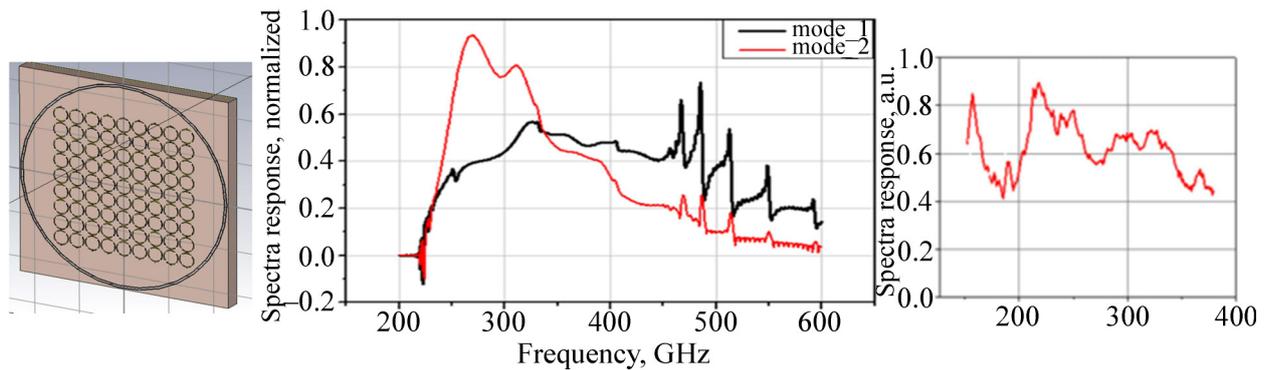


Рис. 4: Численное моделирование полной конечной матрицы кольцевых антенн с СИ-НИС детекторами, [3, 2] в центре. Моды 1 и 2 для разных поляризаций возбуждения. Справа эксперимент.

роvanную антенную решетку, что не соответствует действительности в случае наличия диссипации в элементах матрицы, см. рис. 3 и 4. Такой подход применим для расчета квазиоптических фильтров с чисто реактивными параметрами, и позволяет достаточно точно определить спектр пропускания в узкой полосе вблизи резонансной частоты, но плохо работает с диссипативными элементами. Моделирование всей матрицы с большим количеством поглощающих и переизлучающих портов представляет собой более сложную задачу и требует на два порядка больше времени расчетов, достигающего

10 дней для сложной структуры. Однако этот подход позволяет получить более правдоподобную спектральную зависимость, как показано на рис. 4.

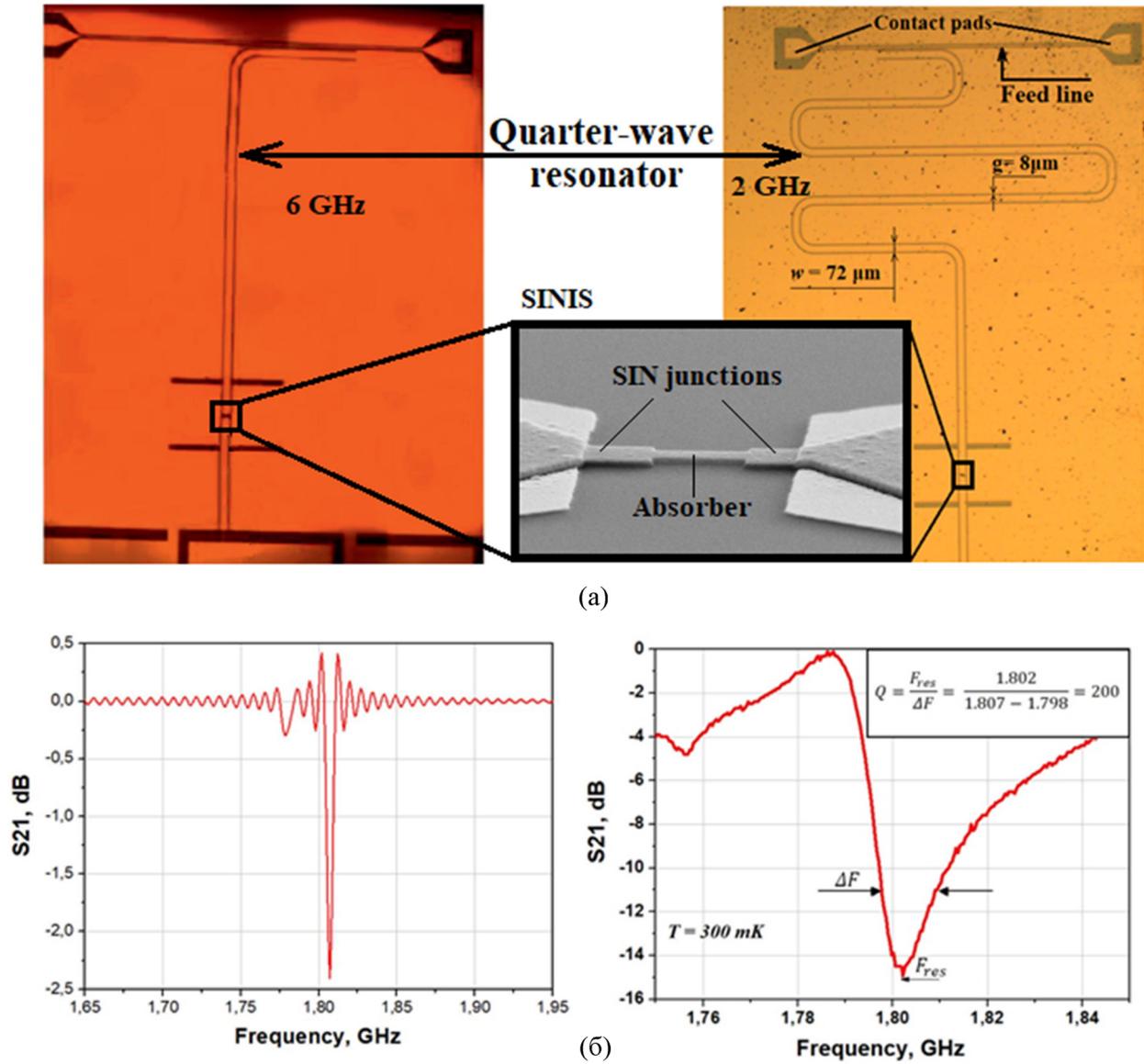


Рис. 5: Прототип приемного пикселя для осуществления частотного мультиплексирования: (а) фотографии одиночных пикселей с частотой сигнала 90 ГГц для частотного мультиплексирования (слева – частота считывания 6 ГГц, справа – частота считывания 1.8 ГГц, в центре – фотография СИНИС-детектора); (б) смоделированный и измеренный  $S_{21}$ -параметр.

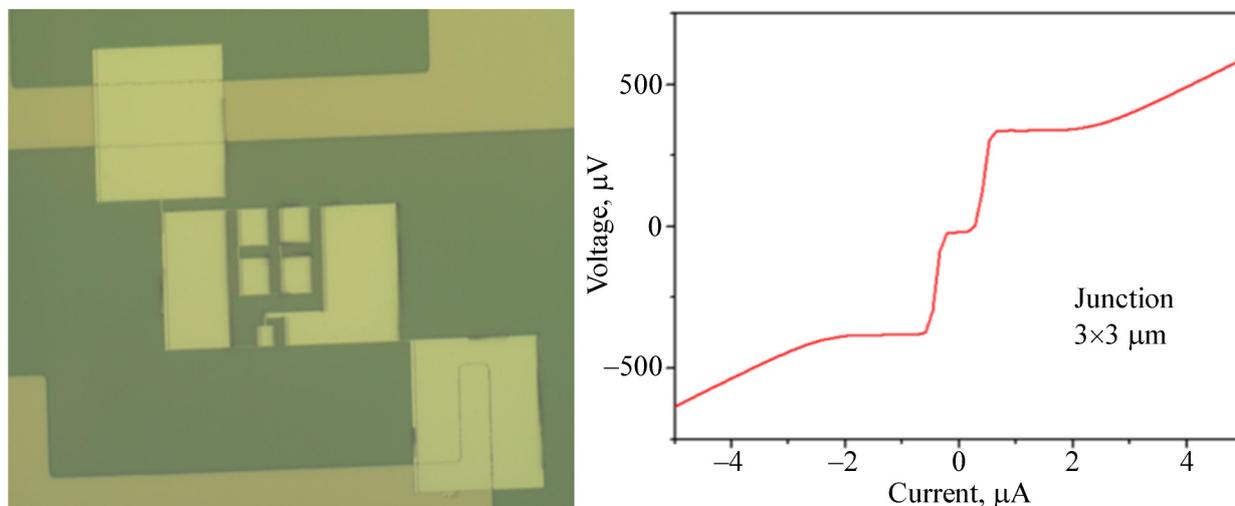


Рис. 6: Фотография сквид элемента ДПУБВ, изготовленного по теневой технологии, и его вольтамперная характеристика [10].

Как указано в техническом задании высокочастотного приемника проекта Миллиметрон, он должен содержать 10000 каналов. Если предположить, что масса одного полупроводникового усилителя составляет 10 г, то блок усилителей будет весить 100 кг и подключаться к матрице с помощью 20000 проводов, что невозможно даже для наземных приемников. Решение этой проблемы заключается в использовании частотного мультиплексирования и микроволнового считывания по одному коаксиальному кабелю. Мы разработали прототип элемента такой матрицы с четвертьволновым резонатором на частоте считывания и двойной щелевой антенной на частоту сигнала [6, 7], см. рис. 5. Для системы считывания с частотным мультиплексированием возможно применение серийного охлаждаемого полупроводникового усилителя с шумовой температурой на уровне 5 К. А для достижения предельных характеристик возможно создание джозефсоновского параметрического усилителя бегущей волны (ДПУБВ) с шумовой температурой на уровне квантовой, т.е. менее 0.5 К в диапазоне 4–8 ГГц. Улучшение на порядок шумовой температуры усилителя означает снижение эквивалентной шуму мощности ( $\text{МЭШ}=\text{NEP}$ ) также на порядок, поскольку до настоящего времени шумовые характеристики СИНИС детекторов определялись шумами считывания [1–7]. Для решения этой задачи мы разрабатываем два варианта ДПУБВ с использованием традиционной технологии теневого напыления (рис. 6, [8]) и с использованием новой технологии магнетронного напыления и прямой электронной литографии рис. 7, [2, 9].

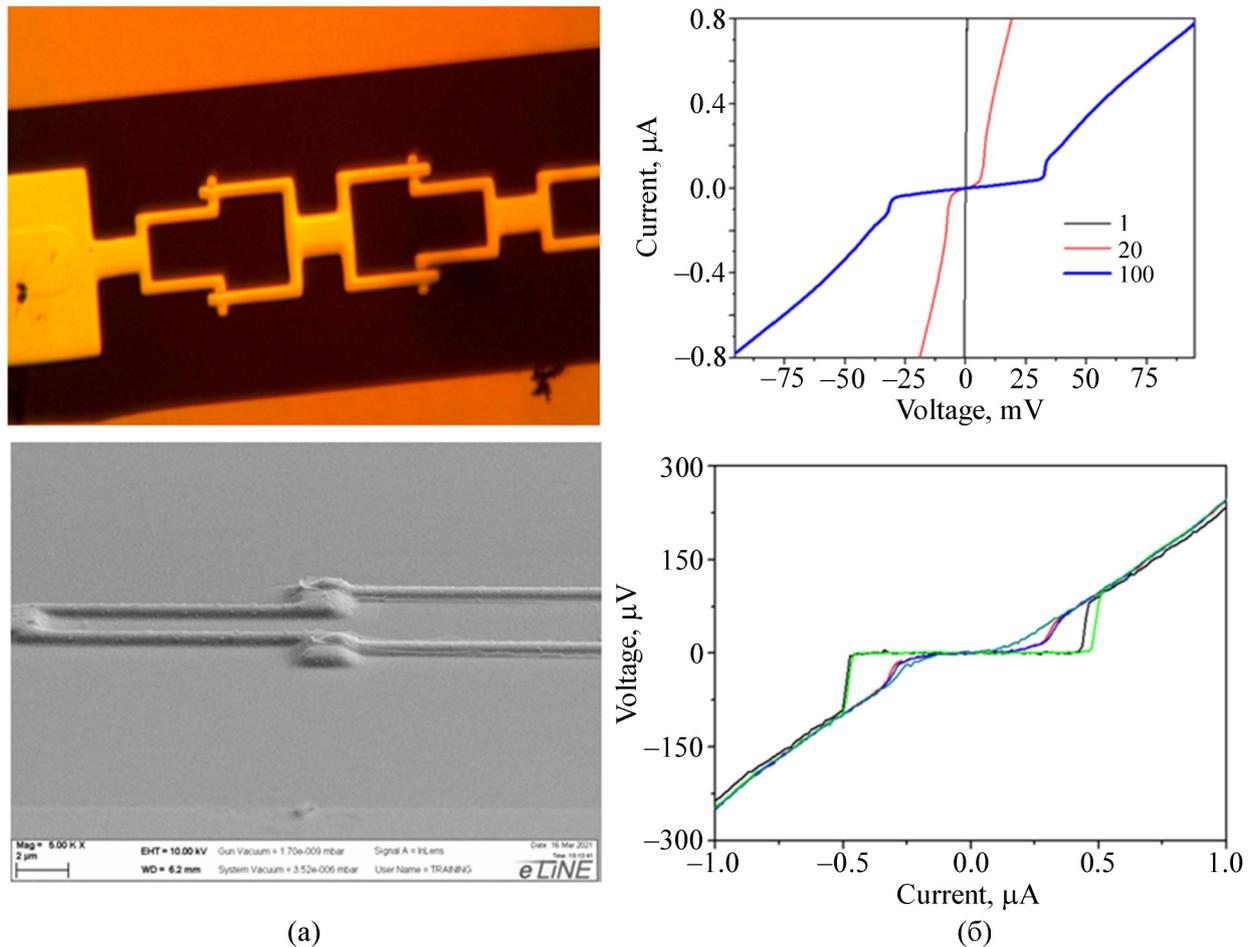


Рис. 7: Алюминиевые сквиды, изготовленные по технологии магнетронного напыления с отдельной литографией: (а) оптическая фотография нескольких сквидов (сверху) и изображение в электронном микроскопе одиночного СКВИДа (снизу); (б) измеренные при 300 мК вольтамперные характеристики (ВАХ) цепочек СКВИДов из 1, 20 и 100 элементов (сверху) и ВАХ одного сквида при разных уровнях магнитного потока.

*Заключение.* Разработаны, изготовлены и экспериментально исследованы приемные матрицы с интегрированными СИНИС детекторами для астрофизических исследований с крутизной характеристики до  $10^9$  В/Вт, что удовлетворяет требованиям ТЗ проекта Миллиметрон. Показано, что наиболее перспективно использовать матрицы электрически малых антенн, изготовленных из сверхпроводящего материала (алюминия). Впервые изготовлены прототипы СИНИС детекторов с микроволновой системой считывания для осуществления частотного мультиплексирования. В качестве системы считывания разработана конструкция джозефсоновского параметрического усилителя бегу-

щей волны (ДПУБВ). Впервые изготовлены и исследованы тестовые образцы ДПУБВ на основе СКВИДов по алюминиевой технологии с использованием магнетронного распыления и прямой электронной литографии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ-БРИКС № 19-52-80023, в рамках госзадания ИРЭ РАН проект ААА-А19-119041990058-5. Разработка и создание элементов экспериментальной установки были проведены в рамках проекта РФФИ № 19-19-00499 и государственного задания ИПФ РАН. Экспериментальное исследование образцов проведено при финансовой поддержке государственного задания ИФП им. П. Л. Капицы РАН и САО РАН.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] M. Tarasov, A. Sobolev, A. Gunbina, et al., *Journal of Applied Physics* **125**(17), 174501-1 (2019). DOI: 10.1063/1.5054160.
- [2] A. Gunbina, M. Tarasov, S. Lemzyakov, et al., Preprint for conference MetaNano 2021. (2021). <https://www.researchgate.net/publication/350691213> Arrays of electrically small antennas with SINIS detectors for SubTHz astronomy and atmosphere propagation research.
- [3] A. Gunbina, M. Tarasov, S. Lemzyakov, et al., *Physics of the Solid State* **62**(9), 1604 (2020). DOI: 10.1134/S1063783420090097.
- [4] S. Mahashabde, A. Sobolev, A. Bengtsson, et al., *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* **5**(1), 145 (2015). DOI: 10.1109/TTHZ.2014.2362010.
- [5] A. S. Sobolev, B. Beiranvand, A. M. Chekushkin, et al., *EPJ Web of Conferences* **195**, 05009-1 (2018). DOI: 10.1051/epjconf/201819505009.
- [6] A. A. Gunbina, S. Mahashabde, M. A. Tarasov, et al., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* (2020), DOI: 10.1109/TASC.2021.3068999.
- [7] М. А. Тарасов, С. Махашабде, А. А. Гунбина и др., *Физика твердого тела* **62**(9), 1415 (2020). DOI: 10.21883/FTT.2020.09.49763.17Н.
- [8] М. А. Тарасов, А. А. Гунбина, Д. В. Нагирная, М. Ю. Фоминский, “Способ изготовления устройств с тонкопленочными туннельными переходами”. Патент России на изобретение RU 2733330 С1 от 22.07.2019, опубликован 01.10.2020.
- [9] М. А. Тарасов, А. А. Гунбина, М. Ю. Фоминский, А. М. Чекушкин, “Способ изготовления тонкопленочных туннельных переходов методом отдельной литографии”. Заявка на патент России на изобретение RU 2021108441 А от 30.03.2021.

- [10] М. Тарасов, А. Гунбина, С. Лемзяков и др., *Физика твердого тела* **63**(9), 1223 (2021). DOI: 10.21883/ФТТ.2021.09.51242.11Н.

Поступила в редакцию 26 апреля 2021 г.

После доработки 23 июля 2021 г.

Принята к публикации 24 июля 2021 г.

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