

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.30>

УДК: 535.231.62

БОЛОМЕТРЫ С ПОДВЕШЕННЫМИ АБСОРБЕРАМИ

М.А. Тарасов¹, А.А. Гунбина^{1,2}, А.М. Чекушкин¹, Р.А. Юсупов¹,
Р.К. Козулин¹, М.Ю. Фоминский¹

¹ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7

² ИПФ им. А.В. Гапонова-Грехова РАН
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Статья поступила в редакцию 29 октября 2024 г.

Аннотация. Описана технология изготовления подвешенных мостиков для улучшения характеристик сверхпроводниковых микро и наноустройств датчиков и электронных охладителей. Изготовлены образцы болометров и электронных охладителей структуры сверхпроводник-изолятор-нормальный металл-изолятор-сверхпроводник (СИНИС), у которых полоска нормального металла не касается подложки, а висит между берегами из сверхпроводящего алюминия. Технология изготовления включает изотропное химическое травление алюминия и сушку в критической точке, что позволяет удалить слой сверхпроводника под нормальным мостиком и избежать провисания и прилипания мостика к подложке. Измерены вольтамперные характеристики таких устройств при температуре 0.3 К.

Ключевые слова: болометры, сверхпроводниковые туннельные переходы, сушка в критической точке, электронное охлаждение, подвешенные мостики.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по гранту 075-15-2024-482.

Автор для переписки: Тарасов Михаил Александрович tarasov@hitech.cplire.ru

Введение

Отличием структур с подвешенными мостиками от ближайших аналогов с абсорбером на подложке является значительное снижение потерь энергии в подложку и снижение перегрева абсорбера тепловыми фонами в подложке, за счет чего возрастает чувствительность детектора и повышается уровень электронного охлаждения. Разработанные детекторы предназначены для фундаментальных научных исследований в наземной и космической радиоастрономии, в экологии для дистанционного исследования загрязнений атмосферы, криогенной техники для создания твердотельных микроохладителей и термометров. Реализация электронных охладителей открывает перспективы для замены дорогостоящих и громоздких криостатов растворения на компактные твердотельные СИНИС рефрижераторы, не требующие большой мощности питания и сложного обслуживания. Все разработки технологических методов и подходов для создания туннельных структур различных типов также могут быть внедрены для таких перспективных областей исследований, как квантовые компьютеры, элементы сверхпроводниковой электроники и др.

Практический интерес представляет рассмотрение детектирующих структур типа МДМДМ (металл-диэлектрик-металл-диэлектрик-металл) и СИНИС (сверхпроводник-изолятор-нормальный металл-изолятор-сверхпроводник) и исследование их характеристик при различных температурных уровнях. Такие детекторы предназначены для использования в радиотелескопах как наземного, так и космического базирования.

Разрабатываемые некогерентные детекторы могут иметь флуктуационную чувствительность ниже квантового предела шумовой температуры $T_n = hf / k$, что позволяет создавать на их основе приборы с рекордной чувствительностью и эквивалентной шуму мощностью (МЭШ). Наши исследования показывают, что в основу требуемых приемников могут быть положены болометры структуры сверхпроводник-изолятор-нормальный металл – изолятор – сверхпроводник (СИНИС) [1], обладающие МЭШ сравнимой с традиционными криогенными

болометрами на краю сверхпроводящего перехода (БКП), но имеющими значительно более широкий динамический диапазон и на три порядка большее быстродействие. Технология создания СИНИС структур с подвешенными мостиками была реализована авторами проекта и впервые опубликована в [2]. Для практических применений также требуются болометрические приемники, работающие при более высоких температурах вплоть до комнатных, со сравнительно большой чувствительностью. Альтернативой существующим полупроводниковым детекторам могут быть болометры структуры металл-изолятор-металл-изолятор-металл (МИМИМ или МДМДМ) [3].

Туннельные переходы структуры сверхпроводник-изолятор-нормальный металл (СИН) находят широкое применение в различных областях, и на их основе изготавливается множество различных устройств [4,5,6]: от термометров [7,8,9] и электронных охладителей [10,11,12,13] до различных детекторов – Андреевский болометр [14,15,16], болометр на холодных электронах [17,18], СИНИС-болометры [19,20,21], СИНИС-детекторы [22,23] и т.д.

Микроволновые детекторы предельной чувствительности на основе структур сверхпроводник-изолятор-нормальный металл-изолятор-сверхпроводник (СИНИС) нашли применение преимущественно в радиоастрономии [24]. Для практического применения весьма востребованными задачами в настоящее время являются: создание приемников для систем безопасности, неразрушающего контроля материалов, медицинской диагностики, дистанционного мониторинга загрязнения окружающей среды. Применение таких детекторов в системах безопасности [25] требует повышения чувствительности и надежности, а также снижение стоимости таких детекторов. Возможности, которые предлагает микроволновый диапазон – сочетание хорошего проникновения через непрозрачные материалы (одежда и стены) с хорошим пространственным разрешением, ограниченным дифракцией. Пассивное сканирование оказывается предпочтительнее, чем активная радиолокация объекта, для предотвращения облучения людей и животных.

Для получения различного сигнала при пассивном приеме излучения от объектов наблюдения необходимы высокие уровни чувствительности (МЭШ), что является выполнимой задачей для СИНИС и МДМДМ детекторов.

Созданные СИНИС детекторы с подвешенными абсорберами могут быть интегрированы в матрицы изображений необходимых размеров. Эффективность приема излучения тепловых детекторов (болометров) удастся повысить за счет уменьшения тепловых потерь в подложку и контакты и эффективного согласования с приемными антеннами, что является важным преимуществом предлагаемых структур с подвешенным абсорбером. Разработаны новые технологии изготовления матриц таких детекторов, а также для создания устройств сверхпроводниковой электроники, включая электронные охладители и прецизионные низкотемпературные термометры. Электронные охладители позволяют достигать температуры менее 100 мК без применения сложных и дорогостоящих криостатов растворения. Наличие подвешенного мостика позволяет устранить перегрев за счет теплопритока из подложки и достигнуть температуры, близкой к предсказываемой в теории.

1. Требования к конструкции образцов и технология изготовления

Требования к создаваемым устройствам заключаются в геометрических размерах сверхпроводниковых туннельных переходов от 1 кв. мкм для детекторов и термометров до 100 кв. мкм для электронных охладителей. Удельное асимптотическое сопротивление туннельных переходов от 0.5 до 5 кОм/мкм². Размеры подвешенных мостиков от 1 до 10 мкм в длину и 0.5 до 3 мкм в ширину. Для последовательных цепочек СИН и СИНИС переходов в детекторах и термометрах разброс асимптотического сопротивления не должен превышать 10%, величины энергетической щели не более чем на 3%. Качество туннельных переходов характеризуется отношением максимального сопротивления при нулевом смещении к асимптотическому сопротивлению и должно превышать 30 при температуре 300 мК и 300 при температуре 100 мК. Показателями достигнутых результатов являются геометрические размеры

изготовленных структур, в частности размер подвешенных мостиков длиной 2-5 мкм, шириной 1-3 мкм, толщиной 50-150 нм для СИНИС детекторов терагерцового диапазона. Размеры туннельных переходов от 1 кв. мкм для детекторов и термометров до 100 кв. мкм. для НИС охладителей.

2. Используемые ранее технологии изготовления

Впервые СИНИС болометр с подвешенным поглотителем и результаты исследований были приведены в публикациях [2,26]. Первая используемая технология была довольно простая и включала в себя два технологических цикла (**Рис. 1а**): напыление под прямым углом алюминия, его окисление и напыление нормально металла; далее – литография для формирования открытого окна в резисте для травления алюминия под нормальным металлом – создание подвешенного поглотителя. Результаты измерения (**Рис. 1б**, черная кривая), показали, что происходит подавление щели из-за эффекта близости (для одного алюминиевого перехода 200 мкВ, и соответственно 400 мкВ для одиночной СИНИС-структуры). В связи с этим был добавлен еще один технологический шаг – травление нормального металла, что позволило добиться требуемого результата (**Рис. 1в**, а результаты измерений – **Рис. 1б**, красная кривая). Несмотря на то, что был достигнут требуемый результат, такой подход (химическое травление нормального металла) не является надежным – низкий уровень выхода годных образцов, соответственно нет перспективы создания матрицы таких устройств. Другой недостаток – ограничены в выборе материала нормального металла. Фотографии образцов, изготовленных по технологии с дополнительным травлением и поглотителем из меди приведены на **Рис. 2**.

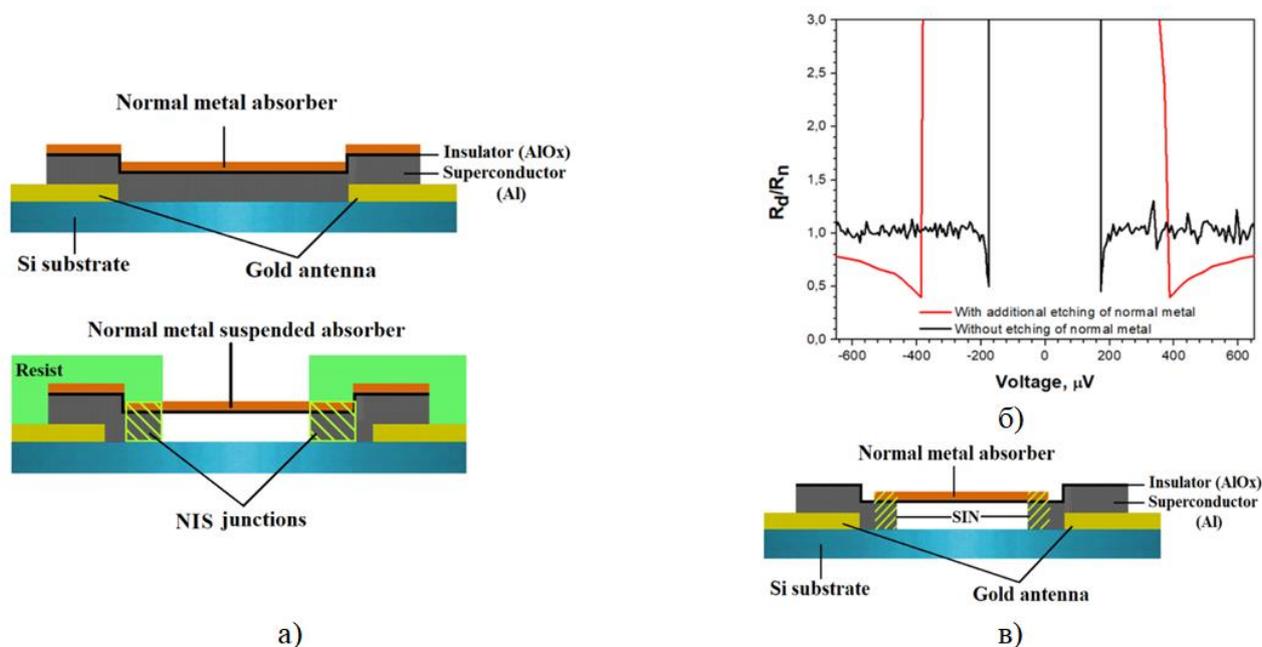


Рис. 1. Схематичное изображение используемых ранее технологий изготовления для создания первых СИНИС-болометров с подвешенным поглотителем. Иллюстрации из публикации [27].

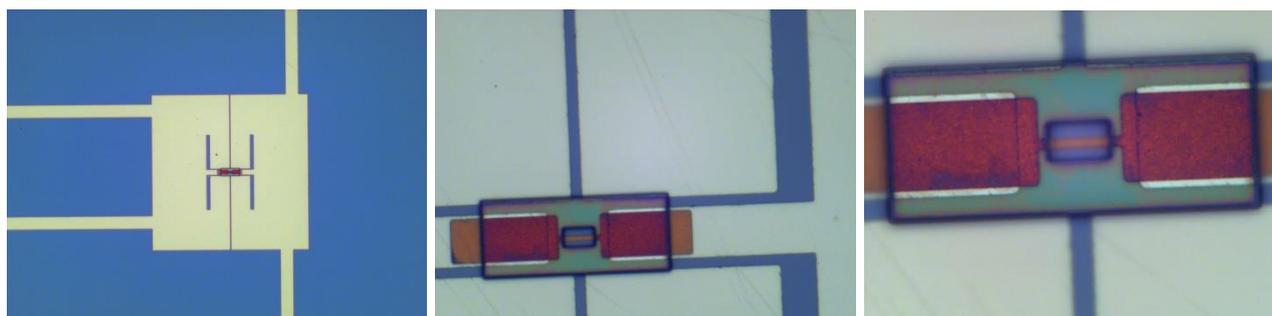


Рис. 2. Фотографии в оптическом микроскопе изготовленных образцов СИНИС болометров с подвешенным поглотителем из меди и дополнительным ее травлением.

3. Новые разрабатываемые технологии

Разработана конструкция и технология изготовления образцов с подвешенными мостами для изготовления как с использованием термического направленного напыления, так и магнетронного распыления. На Рис. 3 приведена топология образцов СИНИС детекторов, интегрированных в двойную щелевую антенну диапазона 350 ГГц.

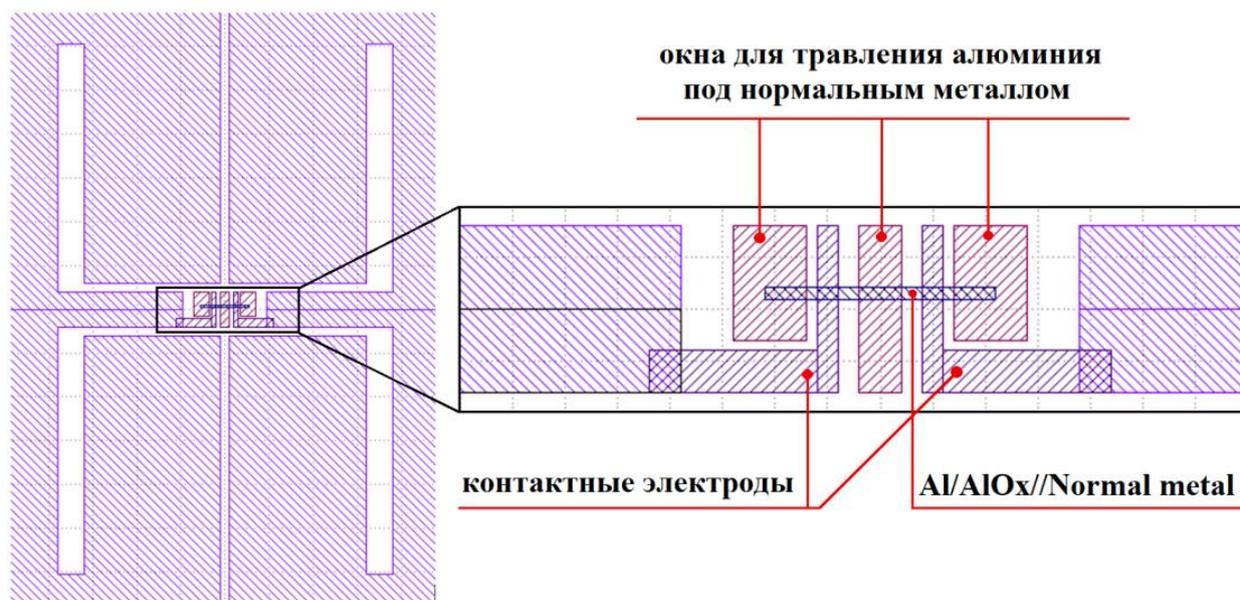


Рис. 3. Топология СИНИС детектора с подвешенным абсорбером, интегрированного в двойную щелевую антенну на частоту сигнала 350 ГГц и вид центральной части конструкции с областью подвешенного моста и окон для травления.

Разработано предложение по новой технологии изготовления СИНИС-детектора с подвешенным поглотителем с применением Манхэттанской технологии (или безмостиковой технологии напыления под углом) [28,29]. Топология структуры представлена на **Рис. 4** слева. Приведенная топология выполняется одним цикле литографии, различные элементы структуры выделены цветами. 3D-разрез области, где будут медные проводники, после проявления резистивной маски приведен на **Рис. 4** справа. Топологические размеры узких полосок обусловлены выбором толщин резистов: нижний слой сополимера 120 нм и верхний слой ПММА 220 нм. При таком сочетании резистов максимально допустимая ширина канавки (чтобы не происходило запыления при ортогональной ориентации подложки) – 220 нм.

Суть предлагаемой технологии заключается в следующем:

- на первом этапе напыляются медные проводники, через которые будет осуществляться контакт с разводкой или краями антенны, в которую может быть интегрирован СИНИС-детектор. Напыление проводится вдоль оранжевых канавок под двумя углами (сверху-вниз и снизу-вверх, т.е. наклон

подложки $\pm 45^\circ$ вдоль канавок). Внешний вид структуры после напыления меди приведена на **Рис. 5а**.

- далее, под прямым углом напыляется алюминий, который будет выполнять роль сверхпроводящего электрода СИНИС-структуры, а также жертвенный слой для удаления этого алюминия из-под поглотителя (нормального металла), **Рис. 5б**.

- для создания слоя изолятора алюминий окисляется.

- напыление нормального металла (справа-налево, слева-направо: поворот подложки на 90° и напыление под углами $\pm 45^\circ$ вдоль синей канавки), **Рис. 5в**.

- заключительным этапом является травление алюминия, например в щелочном проявителе. Уширения в области СИН-переходов нужны для предотвращения излишнего стравливания Al/AlO_x .

Достоинство предлагаемой технологии – не нужно делать дополнительный цикл литографии для травления алюминия под мостиком, СИНИС-структура изготавливается в одном технологическом цикле.

Недостатки: использование специализированного технологического оборудования с возможностью поворота и наклона подложки внутри напылительной камеры.

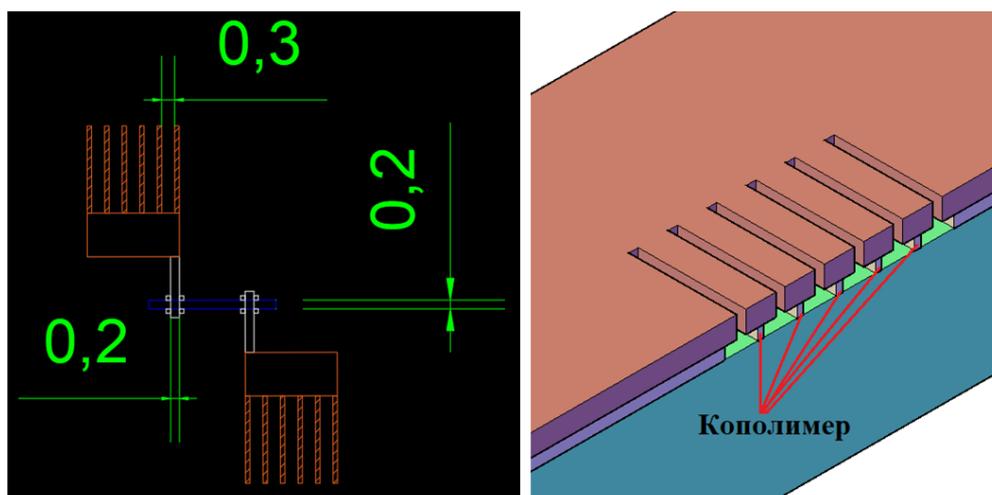


Рис. 4. Топология структуры СИНИС болометра с подвешенным поглотителем с применением безмостиковой технологией (слева) и разрез 3D-модели резистивной маски в области медных проводников.

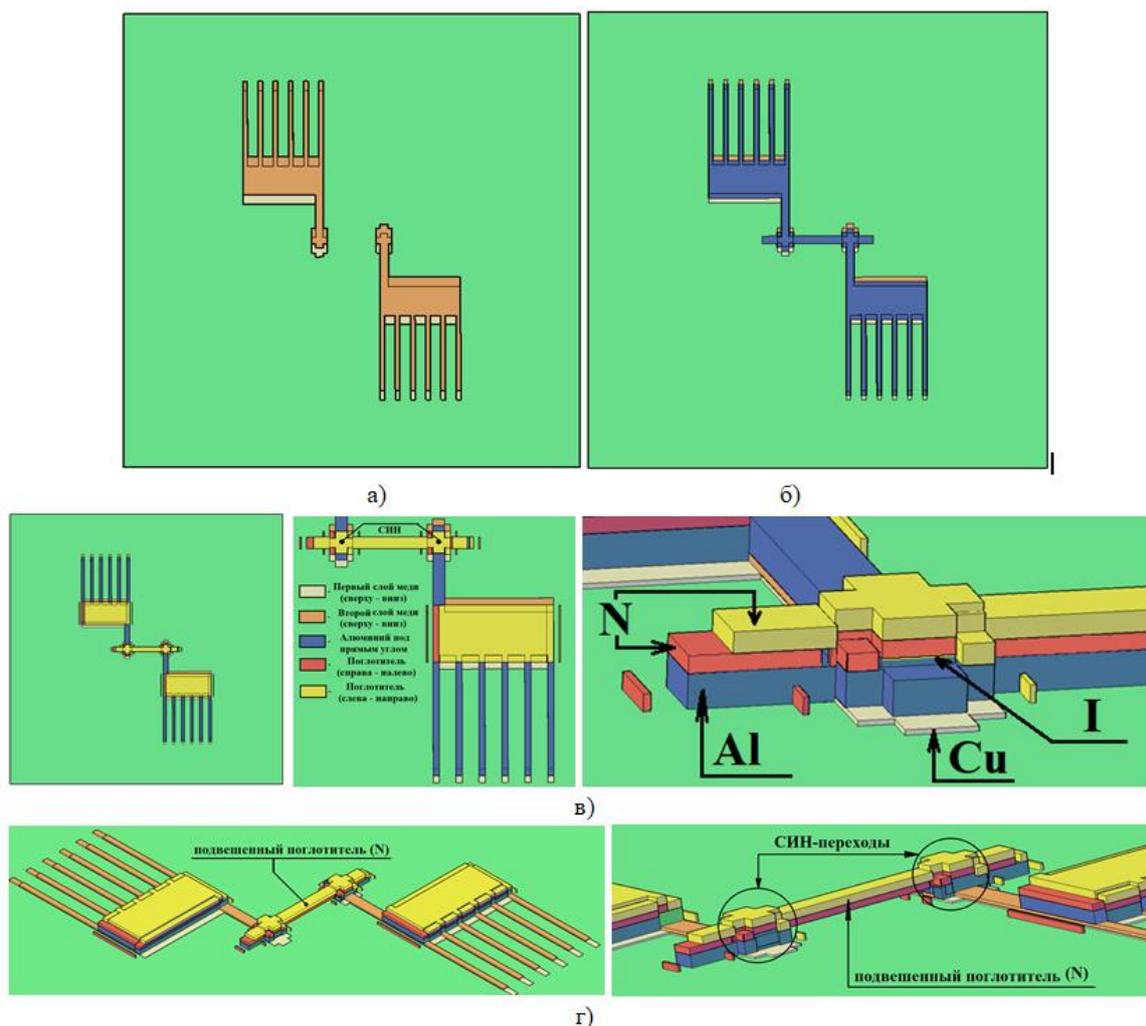


Рис. 5. Схематичное изображение процесса пошагового напыления структуры (резистивная маска скрыта для наглядности):

- а) – напыление медных проводников (сверху-вниз и снизу-вверх);
 б) – напыление алюминия под прямым углом; в) – напыление нормального металла (справа-налево и слева-направо), обозначения на рисунке справа: N – нормальный металл, Al – алюминий, Cu – медь, I – изолятор (окисленный алюминий); г) – СИНИС-структура после травления алюминия.

Особенностью новых образцов, изготовленных в ИРЭ РАН, является применение установки сушки в критической точке, что позволяет значительно повысить надежность изготовления висячих мостов и устранить опасность провисания и прилипания мостиков к подложке. Для выполнения этой операции была приобретена установка SCD-350M, см. **Рис. 6**. Из-за поверхностного натяжения жидкости под пленкой мостика после химического травления может происходить повреждение образца и его разрушение. Целью сушки в критической точке является установление таких значений давления

и температуры, чтобы жидкость в камере с образцом достигла критической точки и полностью перешла из жидкой фазы в критическую. При таком процессе нет никакого поверхностного натяжения жидкости, образец высушивается без повреждений. В критическом состоянии стирается различие между жидкой углекислотой и газом, они становятся единой средой, которая испаряется из образца, не повреждая его, поскольку нет границы раздела жидкость-газ и нет капиллярных сил, вызывающих деформации мостика. Результаты применения такого процесса приведены на **Рис. 7**.



Рис. 6. Установка SCD-350M сушки в критической точке углекислоты.

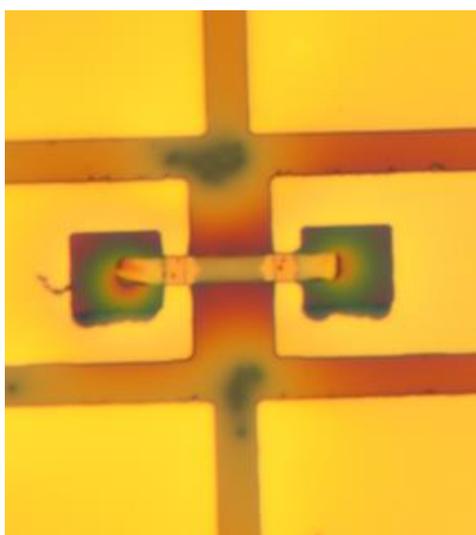


Рис. 7. Пример применения сушки в критической точке при изготовлении подвешенного моста.

4. Электронный охладитель

Разработана топология электронного охладителя (Рис. 8). Первым слоем изготавливаются контактные площадки и соединительные провода (зеленый). Далее, наносится трехслойная СИН-структура Al/AlO_x/Cu (синий цвет). Следующим этапом стравливается медь (окна обозначены на рисунке), также, дополнительно травление меди выполняется в областях «квадратиков» – это необходимо для дальнейшего травления алюминия под медью в кислоте. Последним этапом, через открытые окна стравливает алюминий при помощи щелочного проявителя. Фотографии изготовленных структур приведены на Рис. 9

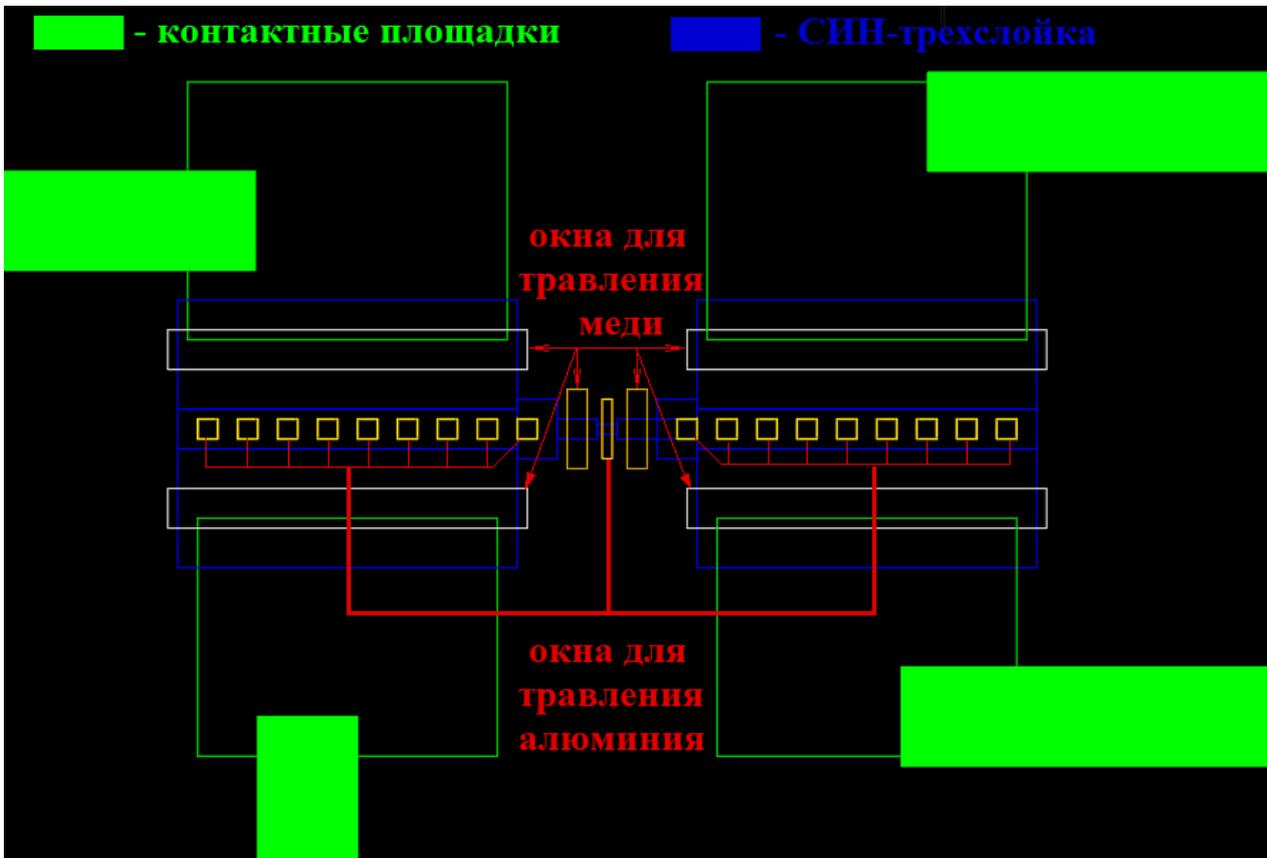


Рис. 8. Топология электронного охладителя.

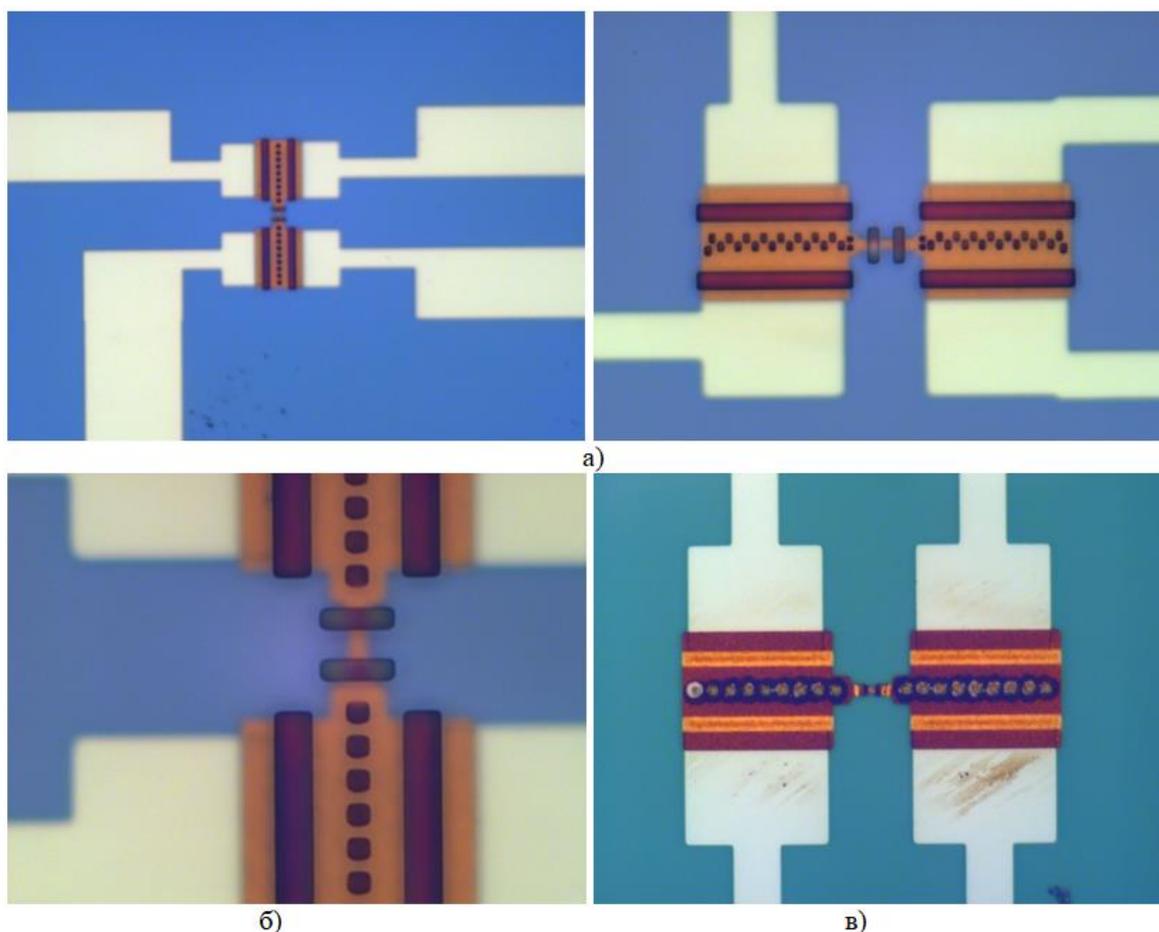


Рис. 9. Фотографии изготовленного электронного охладителя:
 а) – две топологии с различным расположением отверстий под травление;
 б) – увеличенный фрагмент с открытыми окнами в резисте для травления;
 в) – структура после травления алюминия.

5. Результаты измерений

Микроволновые детекторы представляют собой тонкопленочные структуры типа сверхпроводник-изолятор-нормальный металл-изолятор-сверхпроводник (СИНИС) $\text{Al}/\text{AlO}_x/\text{Pd}/\text{AlO}_x/\text{Al}$ для криогенных температур и Металл-Изолятор-Металл-Изолятор-Металл (МИМИМ) для азотных и комнатных температур. Изолятор представляет собой туннельный барьер AlO_x с удельным сопротивлением порядка $1 \text{ кОм}/\text{мкм}^2$, а средний металлический слой представляет собой полоску пленки нормального металла (Pd, Cu, Al) шириной 1-3 мкм и длиной 3-5 мкм. Параметром качества для СИНИС структур является отношение дифференциального сопротивления без смещения к асимптотическому сопротивлению выше напряжения энергетической щели, которое теоретически превышает 1000 при температурах ниже 100 мК.

Аналогичные требования предъявляются и для СИНИС криогенных охладителей, позволяющих снизить электронную температуру подвешенного нормального мостика с 300 мК до 100 мК. Параметр отношения сопротивлений непосредственно может использоваться как индикатор электронной температуры, в качестве абсолютного термометра. Значение энергетической щели алюминия составляет 190 мкэВ, т.е. для СИНИС структуры 380 мкэВ. Размытие энергетической щели не должно превышать 10 мкэВ. Проведены электрические измерения вольтамперных характеристик при температуре 300 мК в сорбционном криостате на Гелии-3 типа HELIOX-AC-V. Первые тестовые образцы с абсорбером из палладия показали нелинейные характеристики, отличающиеся от идеальных расчетных. Такое поведение может быть связано с химической активностью палладия, несколько подавляющего туннельный барьер. Для будущих структур планируется применить тонкий буферный слой из алюминия, чтобы приблизиться к ожидаемым характеристикам. Структура слоев СИНИС образцов в этом случае будет $\text{Al-AlO}_x\text{-AlPdAl-AlO}_x\text{-Al}$.

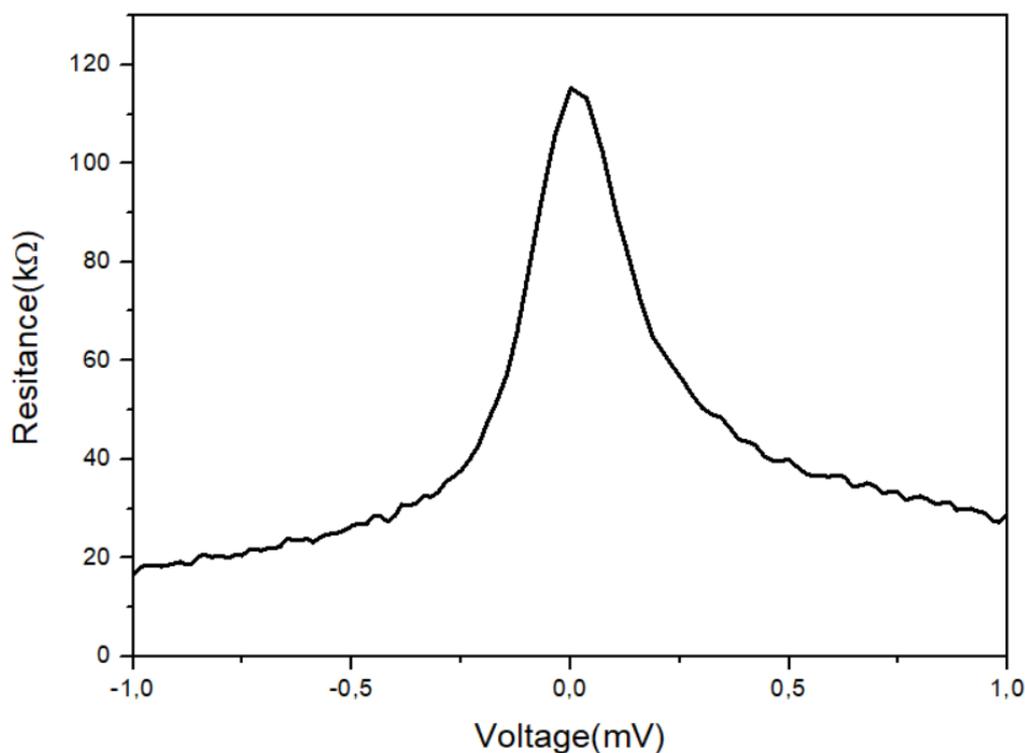


Рис. 10. Дифференциальное сопротивление тестового образца, выполненного по технологии магнетронного напыления и сушки в критической точке.

Заключение

Разработаны, изготовлены, экспериментально исследованы СИНИС структуры с подвешенными над подложкой мостиками нормального металла. Разработана технология изготовления тонкопленочных туннельных структур с подвешенными над подложкой мостиками для детекторов сигналов, электронных охладителей и термометров с использованием химического травления в щелочи и сушке в критической точке. Изготовлена пробная партия образцов и проведено измерение вольтамперных характеристик при температуре 300 мК. Исследованы процессы поглощения энергии и теплопередачи в таких структурах. Получена квантовая эффективность СИНИС детектора с подвешенным абсорбером равная 17 электронам на квант сигнала на частоте 350 ГГц.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по гранту 075-15-2024-482.

Литература

1. Tarasov M. et al. Microwave SINIS Detectors //Applied Sciences. – 2022. – Т. 12. – №. 20. – С. 10525.
2. Tarasov M. et al. Electrical and optical properties of a bolometer with a suspended absorber and tunneling-current thermometers //Applied Physics Letters. – 2017. – Т. 110. – №. 24.
3. Tarasov M.A. et al. Cryogenic Mimim and Simis Microwave Detectors //2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC). – IEEE, 2020. – С. 25-27.
4. Giazzotto F. et al. Opportunities for mesoscopics in thermometry and refrigeration: Physics and applications //Reviews of Modern Physics. – 2006. – Т. 78. – №. 1. – С. 217-274.
5. Ullom J.N. Physics and applications of NIS junctions //AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics, 2002. – Т. 605. – №. 1. – С. 135-140.

6. Tarasov M., Edelman V. Nanodevices with Normal Metal–Insulator–Superconductor Tunnel Junctions //Functional Nanostructures and Metamaterials for Superconducting Spintronics: From Superconducting Qubits to Self-Organized Nanostructures. – 2018. – С. 91-116.
7. Feshchenko A.V. et al. Tunnel-junction thermometry down to millikelvin temperatures //Physical Review Applied. – 2015. – Т. 4. – №. 3. – С. 034001.
8. Pekola J. Trends in thermometry //Journal of low temperature physics. – 2004. – Т. 135. – С. 723-744.
9. Isosaari E. et al. Thermometry by micro and nanodevices //The European Physical Journal Special Topics. – 2009. – Т. 172. – №. 1. – С. 323-332.
10. Pekola J.P. et al. Microrefrigeration by quasiparticle tunnelling in NIS and SIS junctions //Physica B: Condensed Matter. – 2000. – Т. 280. – №. 1-4. – С. 485-490.
11. Nguyen H.Q. et al. Trapping hot quasi-particles in a high-power superconducting electronic cooler //New Journal of Physics. – 2013. – Т. 15. – №. 8. – С. 085013.
12. Clark A.M. et al. Cooling of bulk material by electron-tunneling refrigerators //Applied Physics Letters. – 2005. – Т. 86. – №. 17.
13. O'Neil G.C. Improving NIS tunnel junction refrigerators: Modeling, materials, and traps: дис. – University of Colorado at Boulder, 2011.
14. Nahum M., Martinis J.M. Ultrasensitive-hot-electron microbolometer //Applied physics letters. – 1993. – Т. 63. – №. 22. – С. 3075-3077.
15. Nahum M., Richards P.L., Mears C.A. Design analysis of a novel hot-electron microbolometer //IEEE transactions on applied superconductivity. – 1993. – Т. 3. – №. 1. – С. 2124-2127.
16. Выставкин А.Н. и др. Болومتر на горячих электронах в нормальном металле с андреевским отражением в сверхпроводящих берегах //ЖЭТФ. – 1999. – Т. 15. – С. 1085.
17. Kuzmin L.S., Devyatov I.A., Golubev D. Cold-electron bolometer with electronic microrefrigeration and general noise analysis //Millimeter and Submillimeter Waves IV. – SPIE, 1998. – Т. 3465. – С. 193-199.

18. Brien T.L. R. et al. A strained silicon cold electron bolometer using Schottky contacts //Applied Physics Letters. – 2014. – Т. 105. – №. 4.
19. Schmidt D.R. et al. Normal metal–insulator–superconductor junction technology for bolometers //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2006. – Т. 559. – №. 2. – С. 516-518.
20. Schmidt D.R. et al. A superconductor–insulator–normal metal bolometer with microwave readout suitable for large-format arrays //Applied Physics Letters. – 2005. – Т. 86. – №. 5.
21. Tarasov M. et al. Arrays of annular cryogenic antennas with SINIS bolometers and cryogenic receivers for SubTHz observatories //EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2018. – Т. 195. – С. 05010.
22. Девятов И.А., Крутицкий П.А., Куприянов М.Ю. Исследование различных мод работы сверхпроводникового детектора микроволнового излучения сверхмалых размеров //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2006. – Т. 84. – №. 2. – С. 61-66.
23. Девятов И.А., Куприянов М.Ю. Исследование неравновесности электронной подсистемы в низкотемпературных детекторах микроволнового излучения //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2004. – Т. 80. – №. 10. – С. 752-757.
24. Балега Ю.Ю. и др. Сверхпроводниковые приемники для космических, аэростатных и наземных субтерагерцовых радиотелескопов //Известия вузов. Радиофизика. – 2020. – Т. 63. – №. 7. – С. 533-566.
25. Luukanen A. et al. Passive Euro-American terahertz camera (PEAT-CAM): passive indoor THz imaging at video rates for security applications //Passive Millimeter-Wave Imaging Technology X. – SPIE, 2007. – Т. 6548. – С. 57-63.
26. Tarasov M. et al. SINIS bolometer with a suspended absorber //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 969. – №. 1. – С. 012088.

27. Gunbina A. et al. Fabrication of aluminium nanostructures for microwave detectors based on tunnel junctions //Advances in Microelectronics Reviews; Yurish, SY, Ed.; IFSA Publishing, SL: Barcelona, Spain. – 2021. – Т. 3. – С. 183-212.
28. Zhang K. et al. Bridge-free fabrication process for Al/AlOx/Al Josephson junctions //Chinese Physics B. – 2017. – Т. 26. – №. 7. – С. 078501.
29. Lecocq F. et al. Junction fabrication by shadow evaporation without a suspended bridge //Nanotechnology. – 2011. – Т. 22. – №. 31. – С. 315302.

Для цитирования:

Тарасов М.А., Гунбина А.А., Чекушкин А.М., Юсупов Р.А., Козулин Р.К., Фоминский М.Ю. Болометры с подвешенными абсорберами. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.30>