

Изготовление туннельных сверхпроводниковых структур селективным химическим травлением алюминия

© Р.А. Юсупов,¹ А.А. Гунбина,¹ М.А. Маркина,^{1,2} М.А. Тарасов,¹ М.Ю. Фоминский,¹
А.М. Чекушкин,¹ В.С. Эдельман³

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009 Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“,
109028 Москва, Россия

³Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН,
119334 Москва, Россия
e-mail: yusupovrenat@hitech.cplire.ru

Поступило в Редакцию 13 мая 2025 г.

В окончательной редакции 13 мая 2025 г.

Принято к публикации 13 мая 2025 г.

Предложен и апробирован технологический маршрут изготовления туннельных сверхпроводниковых структур с использованием жидкостного селективного травления алюминия для разрыва электрического контакта по нижнему слою трехслойной туннельной структуры и формирования подвешенного над поверхностью подложки мостика. Продemonстрировано, что по предложенному технологическому маршруту формирование трехслойной структуры может производиться всеми методами нанесения пленок, включая магнетронное распыление, а не только термическим распылением, как это делалось ранее. Для отработки технологии изготовлены образцы с туннельными переходами $\text{Al}/\text{AlO}_x/\text{Nb}$. Изготовленные структуры измерены при температурах до 2.8 К, отношение дифференциального сопротивления в области нулевого напряжения к нормальному сопротивлению достигает 12. Исследованы туннельные структуры сверхпроводник–изолятор–палладий–изолятор–сверхпроводник. Исследована проблема негативного влияния палладия на туннельные барьеры на основе алюминия и предложены методы решения данной проблемы.

Ключевые слова: сверхпроводниковые туннельные структуры, туннельный барьер, сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник, болометры на холодных электронах, нормальный металл–изолятор–сверхпроводник–изолятор–нормальный металл, жидкостное травление, магнетронное распыление.

DOI: 10.61011/JTF.2025.09.61240.98-25

Введение

Актуальной задачей для субтерагерцовой радиоастрономии [1] является создание современных высокочувствительных приемных устройств на основе структур сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник (СИНИС) [2]. Данный вид приемных устройств основан на болометрическом (тепловом) методе детектирования излучения [3,4]. Как известно, туннельный ток в переходе сверхпроводник–изолятор–нормальный металл (СИН) экспоненциально зависит от температуры [5], что делает их высокочувствительными термометрами, которые регистрируют небольшие изменения температуры металлического поглотителя (абсорбера) за счет разогрева внешним излучением. Другое название данного типа детекторов — болометры на холодных электронах (БХЭ) [6,7], так как в данном типе структур возможно понижение температуры электронной подсистемы поглотителя (абсорбера) ниже физической (фононной) температуры [8,9]. Одним из направлений развития таких приемных систем является повышение чувствительности этих устройств путем

создания подвешенного над поверхностью подложки поглотителя (абсорбера) из нормального металла, что позволит устранить или снизить потери, связанные с уходом тепла в подложку. Показана перспективность такого подхода: экспериментально была достигнута квантовая эффективность 15 электронов на квант излучения на частоте 350 GHz [10]. Однако технология создания таких устройств требует доработки: повышения надежности и воспроизводимости результата, что и является основной задачей данных исследований.

Ранее технология изготовления приемных структур с подвешенным поглотителем с помощью жидкостного травления алюминия была апробирована при изготовлении СИНИС структур на технологической платформе Чалмерского технологического университета, Швеция. (Chalmers University of Technology) (рис. 1). В рамках данной технологии в первую очередь формируются разводка на чипе и контактные площадки из трехслойной структуры $\text{Ti}/\text{Au}/\text{Pd}$. Далее в едином цикле напыления (без разрыва вакуума) наносится и формируется трехслойная структура $\text{Al}/\text{AlO}_x/\text{нормальный металл}$. В конце избирательно стравливается слой алюминия под по-

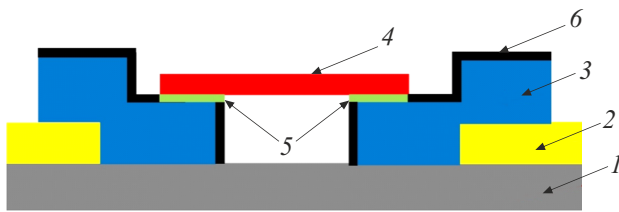


Рис. 1. Схематическое изображение (не в масштабе) ранее исследуемой [10] конструкции СИНИС структуры: 1 — кремниевая подложка, 2 — разводка и антенны (Ti/Au/Pd), 3 — сверхпроводник (алюминий), 4 — поглотитель из нормального металла (медь, палладий, или гафний), 5 — туннельный барьер, 6 — окисел на поверхности.

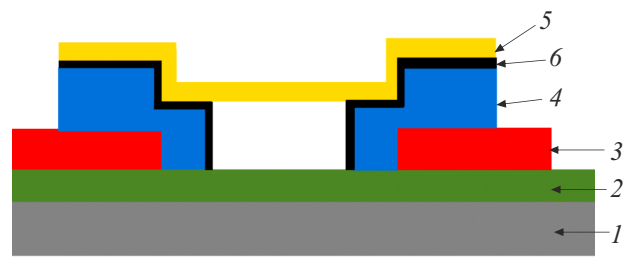


Рис. 2. Схематическое изображение (не в масштабе) предлагаемой конструкции болометра: 1 — кремниевая подложка, 2 — защитный слой оксида алюминия, 3 — разводка и антенна, 4 — сверхпроводящий алюминий, 5 — нормальный абсорбер Pd, 6 — туннельный барьер AlO_x и окисел на поверхности.

глотивелем в области, определяемой окном в резисте. Алюминий под мостиком из нормального металла полностью удаляется жидкостным травлением в слабом основании (Microposit MF CD 26 developer). Травление алюминия в кислотах менее воспроизводимо [11], а сухое травление в плазме имеет маленькие боковые подтравы материала под перемышкой. С уменьшением толщины поглотителя из нормального металла до 20 nm и ниже существовала проблема провисания мостиков и их контакта с подложкой при сушке образцов после жидкостного травления из-за капиллярных сил. Чтобы избежать этого использовалась сушка в критической точке в жидком CO_2 . Но основной недостаток изначального варианта — подавление сверхпроводимости нормальным металлом разводки на границах переходов СИН. Для устранения этой проблемы была предложена модификация технологии: было добавлено дополнительное травление верхнего слоя нормального металла, но реализуемо оно было только для определенного набора материалов верхнего электрода.

1. Описание разработанной технологии

На основе первоначальной технологии (без дополнительного травления) был предложен вариант технологической карты изготовления СИНИС структур с подвешенным поглотителем с использованием магнетронного распыления, адаптированный под особенности и возможности, существующей в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН технологической базы. Образцы изготавливаются на кремневых подложках с ориентацией $\langle 100 \rangle$, КДБ 10 (кремний с дырочной электропроводностью) размером 24×24 mm. Для предотвращения утечек по подложке при измерениях при комнатных температурах подложка покрывалась аморфным слоем Al_2O_3 толщиной 100 nm с помощью магнетронного распыления (рис. 2). Слой антенн и разводки был выполнен из алюминия толщиной 50 nm, поверхность алюминия была защищена от окисления тонким слоем (3–5 nm) палладия. Это позволило решить проблему подавления сверхпрово-

димости в сверхпроводящих алюминиевых электродах СИН переходов от близко расположенного нормального металла разводки, существующую в раннем варианте. В некоторых вариантах использовалась разводка из Nb ($T_c = 9.2$ K), преимуществом выбора Nb является возможность формировать данный слой не только взрывной литографией (liftoff), но и плазмохимическим травлением по существующим отработанным технологическим картам.

Трехслойная прямоугольная структура $\text{Al}/\text{AlO}_x/\text{Pd}$ формировалась методами взрывной фотолитографии и магнетронного распыления, что является существенным отличием от используемого в прототипе термического напыления электронным лучом. Трехслойная пленка $\text{Al}/\text{AlO}_x/\text{Pd}$ толщиной 70/15 nm напылялась в одном цикле без разрыва вакуума. Параметры осаждения трехслойной структуры в едином вакуумном цикле для установки Leybold Heraeus L-560 UV приведены в таблице. Формирование барьера AlO_x может проводиться в режиме статического или динамического окисления. Выбор режимов окисления определяется целевым значением $R_n S$ — нормальным сопротивлением туннельного перехода (сопротивление при напряжениях выше целевого напряжения) на единицу площади. Для использования СИНИС структур как одиночных приемных элементов требуются достаточно высокие нормальные сопротивления структур, порядка $1 \text{ k}\Omega$, для оптимального согласования с измерительными цепями и минимизации шумов на таких структурах. Для исследуемых образцов выбрано целевое значение $R_n S = 1000 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$, формирование барьера проводилось в статическом режиме при давлении 16 mbar в течение 30 min.

Гладкость нанесенных пленок алюминия сильно зависит от толщины пленки и типа подложки, температуры подложки во время осаждения пленки и прочих факторов. По опыту авторов при прочих равных условиях пленки исследуемых толщин (около 70 nm), нанесенные методом магнетронного распыления, оказываются более гладкими (имеющими более мелкокристаллическую структуру), чем пленки, нанесенные термическими способами (распыление с лодочки или распыление

Осаждение трехслойной структуры в едином вакуумном цикле

Операция	Тип	Давление, mbar	P , W	I , A U , V	Время распыления	Толщина, nm (скорость, Å/s)
Осаждение Al	DC	$2.5 \cdot 10^{-3}$	604	1.6 A 383 V	39 s	70 (17.9)
Окисление		$1.6 \cdot 10^2$			30 min	$R_n S \sim 1000 \Omega \cdot \text{m}^2$
Осаждение Al	DC	$2.5 \cdot 10^{-3}$	102	0.3 A 370 V	50 s	≈ 70 (1.4)
Осаждение Pd	RF	$2.1 \cdot 10^{-3}$	265	RF DC bias 108 V	26 s	≈ 150 (5.8)

электронным лучом), т. е. магнетронное распыление позволяет создавать качественные гладкие тонкие пленки алюминия и соответственно однородные туннельные барьеры на ней. Но существует риск микрозакоротов трехслойной структуры при напылении в небольшое окошко в резисте и последующем процессе взрывной литографии. Из-за изотропии магнетронного напыления на вертикальные стенки резиста осаждается металл, и возможны закоротки при взрывной фотолитографии. Во избежание проблем при формировании трехслойной структуры использовался резист с сильным обратным профилем AZ 5214 [12], также возможно использование двухслойных резистов, например LOR 3A + S1813.

Следующий этап — формирование окон в резисте для селективного жидкостного травления алюминия для создания подвешенного поглотителя из нормального металла и одновременно электрического разрыва по нижнему слою алюминия (формирование СИНИС структуры). Травление алюминия проводится в слабом растворе щелочи (KOH в концентрации 1 %). Так как используемые резисты также проявляются в щелочи, этап проявки резиста и травления алюминия было решено объединить, и итоговое подобранное оптимальное время травления включает в себя и время проявки резиста (время проявки около 30 s). Предварительно время проявки можно откалибровать по травлению пленки алюминия, однако следует учесть, что скорости травления открытой поверхности и под мостом существенно отличаются. Останавливалось травление переносом образца в дистиллированную воду, сушка производилась потоком сухого азота. Была предусмотрена опция напыления толстого золота (200 nm) в области контактных площадок для обеспечения надежных электрических контактов. Но первичные тестовые измерения проводились прямым контактом к ниобиевым или алюминиевым площадкам (защищенным тонким слоем палладия).

В разработанном технологическом процессе есть несколько ключевых параметров. Один из них — толщина слоя алюминия в трехслойной структуре: чем больше толщина слоя алюминия, тем лучше будет проникать жидкость в области под мостом, и тем быстрее будет происходить процесс травления алюминия. Важный па-

раметр — отношение ширины мостика и толщины алюминия. Но необходимо учитывать, что толстые пленки алюминия имеют выраженную гранулированную структуру [13,14] и не подходят для формирования высококачественных туннельных барьеров. Важна и толщина слоя нормального металла: уменьшение данной толщины уменьшает объем нормального металла, что улучшает болометрические свойства такой структуры, но, с другой стороны, тонкие мостики получаются менее надежными, склонными к провисанию и касанию подложки, а также к разрывам. Надежность формирования подвешенных перемычек сильно зависит и от выбранного нормального металла в трехслойной структуре: например, мостики из гафния получаются более воспроизводимо, а перемычки из меди более гибкие и склонны к деформациям и провисаниям [10]. Выбор более жестких материалов позволяет создавать подвешенные поглотители большей длины, что важно с точки зрения согласования с импедансом планарных антенн, куда встраиваются разработанные СИНИС структуры. Для изготовления тестовых серий был выбран палладий — благородный металл платиновой группы, не являющийся сверхпроводником. В первую очередь, выбор обусловлен тем, что работа с данным металлом вписывалась в существующий технологический цикл.

2. Изготовление и исследование образцов

Для отработки технологии изготовления и исследования свойств СИНИС структур с подвешенным поглотителем был разработан дизайн чипа размером $7 \times 7 \text{ mm}$ с 16 контактными площадками по периметру. Всего было разработано три вариации тестовых чипов, отличающихся шириной мостика: 1, 1.5 и $2 \mu\text{m}$. На каждом чипе было 4 структуры для измерений: мостик длиной $4 \mu\text{m}$ в двойной щелевой антенне, мостики длиной 3, 4 и $6 \mu\text{m}$. Соответственно размеры поглотителя (мостика) варьировались как по длине, так и по ширине, при этом менялись и размеры СИН переходов, так как длина трехслойной структуры всегда оставалась постоянной и

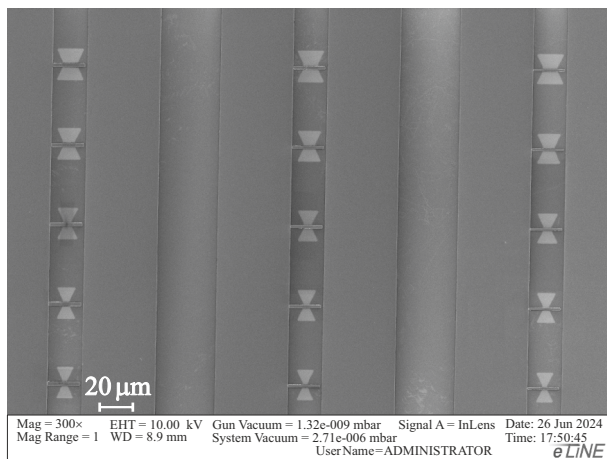


Рис. 3. Вид тестовой структуры с набором мостиков различной длины и ширины.

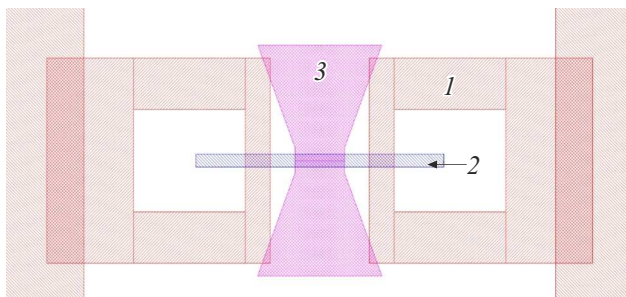


Рис. 4. Вид области разработанного дизайна СИНИС структуры: 1 — разводка Al/Pd, 2 — трехслойная структура Al/AlO_x/Pd, 3 — область жидкостного травления Al.

равной $20\text{ }\mu\text{m}$. В разработанной топологии закладывались сравнительно большие площади переходов — от 7 до $25.5\text{ }\mu\text{m}^2$ без учета уходов размеров. Для тестовых образцов размер СИН переходов не является критичным, и они были сделаны большими для повышения надежности и отработки технологии. Каждая структура имела возможность измерений по четырехзондовой схеме подключений для исключения влияния контактных сопротивлений и сопротивлений подводящих проводов. Дополнительно на каждом чипе размещено две тестовых структуры (рис. 3) для отработки режимов травления и оптического контроля, содержащие набор мостиков шириной 1, 1.5, $2\text{ }\mu\text{m}$ и длинами 2, 3, 4, 6, $8\text{ }\mu\text{m}$. Данные структуры расположены в нижней части чипа и повернуты на 90° относительно друг друга.

Разработанная технология критична к точности совмещения слоев. Размеры СИН переходов и однородность их размеров в СИНИС структуре сильно зависят от положения области под травление алюминия. Область под травление выполнена в виде песочных часов (рис. 4), что, по нашему опыту, улучшает затекание жидкости в область травления. В более позднем варианте было добавлено травление алюминия с краев трехслойной

структуры, что позволило уменьшить площади СИН переходов и смягчить требования к позиционированию при литографии трехслойной структуры.

Каждый технологический этап контролировался в оптическом микроскопе. После селективного травления алюминия в оптическом микроскопе при работе на отражение видно, что металл в области травления стал темнее (прозрачнее), что позволяет контролировать завершение травления (рис. 5). В оптическом микроскопе виден также характерный профиль травления и небольшие боковые подтравы (до $0.5\text{ }\mu\text{m}$) в стороны переходов. При превышении оптимального времени травления подтравы становятся существенными, вплоть до полного стравливания алюминия в области СИН переходов, при недостаточном времени травления остается тонкая перемычка алюминия, которая видна при контроле в оптическом микроскопе. Для повышения надежности и полного удаления алюминия под мостиком время травления рекомендуется выбирать больше минимально необходимого. Подбранное оптимальное время травления, включая этап проявления резиста для мостиков шириной $1\text{--}1.5\text{ }\mu\text{m}$, составило 100–110 с.

При контроле только в оптическом микроскопе нет возможности исследовать структуру в профиль и оценить, касается ли мостик подложки или нет. Для этого и для точного контроля размеров использовался растровый электронный микроскоп. Чтобы получить изображения структуры в профиль, образец устанавливался под углом 85° к поверхности столика. На изображениях, полученных в электронном микроскопе, можно различить границу, где алюминий стравлен, а где нет. Но даже такие исследования не дают „заглянуть под“ подвешенный мостик, а скорее дают представления о его профиле. Данные исследования также подтверждают, что подвешенные поглотители толстого Nb сохраняют форму, а мостики из тонкого Pd после жидкостного травления провисают и касаются подложки (рис. 6), т. е. мостики из Pd также склоны к провисанию, как и ранее

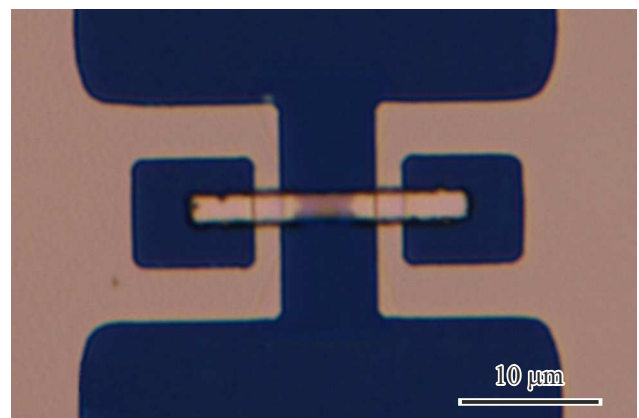


Рис. 5. Вид области изготовленной СИНИС структуры. Более темным выделяется область со стравленным алюминием.

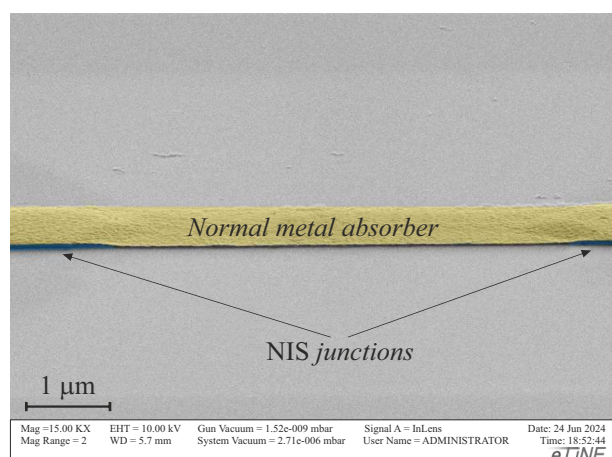


Рис. 6. Вид мостика с СИН переходами по краям в электронном микроскопе, полученный при наклонной установке образца.

исследуемые медные мостики, в отличие от мостиков из более жестких металлов, например, гафния.

3. Результаты измерений

Для отработки этапов литографии, нанесения пленок и жидкостного травления алюминия была изготовлена серия образцов с трехслойной структурой Al (100 nm) – AlO_x ($R_n S \sim 1 \text{ k}\Omega$) – Nb (80 nm). Для отработки технологии тонкий слой Pd был заменен на достаточно толстый слой жесткого металла Nb , что позволило оперативно проводить измерения таких структур в жидком гелии при температуре 4.2 К. Данная структура нормальный металл-изолятор-сверхпроводник-изолятор-нормальный металл (НИСИН) при 4.2 К измеряется так же, как и СИНИС структура — как два последовательных СИН перехода. Разводка по чипу была выполнена из алюминия для избегания эффекта близости (наведенной сверхпроводимости) в алюминиевых электродах СИН переходов.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) на постоянном токе изготовленных НИСИН структур исследованы при температуре 4.2 К в зонд-вставке в транспортный гелиевый сосуд Дьюара и в криостате замкнутого цикла при температурах до 2.8 К. Измерены сопротивления каждой из четырех тестовых структур на чипе при четырех зондовой схеме подключения и при двухзондовой схеме подключения. Во втором случае к сопротивлению собственно структуры добавляется сопротивление подводящих проводов, разводки на чипе и контактные сопротивления (которые могли меняться в разных циклах измерений). Электрический контакт к площадкам образца в держателе осуществлялся с помощью подпружиненных контактов (pogo pins).

Измерения проводились в режиме задания тока, выбор диапазона задания тока регулировался балластными

сопротивлениями. Для усиления сигнала использовалась схема с низкошумящими операционными усилителями. Вся схема, включая балластные сопротивления от $2 \text{ k}\Omega$ до $1 \text{ G}\Omega$, усилители по каналам тока и напряжения, а также коммутатор для выбора измерительных каналов, были собраны в экранированном корпусе и находились при комнатной температуре. Сканирующее напряжение, задающее ток, подавалось со специализированной ЦАП/АЦП платы производства National Instruments с управляющего компьютера. Данные платы работали под управлением специализированного программного обеспечения IRTECON [15]. Соединение теплого блока усилителей с коммутационной платой ЦАП/АЦП осуществлялось с помощью стандартных экранированных коаксиальных кабелей.

На рис. 7 приведены измеренные ВАХ и рассчитанные из них зависимости дифференциального сопротивления одной из тестовых структур при температурах 4.2 и 2.8 К. Параметром качества для СИНИС структур при определенной температуре является отношение дифференциального сопротивления без смещения к асимптотическому сопротивлению выше напряжения энергетической щели (R_d/R_n). Измеренное отношение сопротивлений R_d/R_n при температуре 4.2 К составило 4.5, а при температуре 2.8 К достигает 9. Щелевое напряжение соответствует двойной щели Nb и составляет 2.8 mV. Сопротивление разводки до перехода на четырехточечную схему подключения составляет около 75Ω для данной серии образцов. Если учесть эти последовательные сопротивления, то отношение сопротивлений достигает 12 при температуре 2.8 К. Измеренное отношение сопротивлений оказалось заметно меньше, чем предельное значение, рассчитанное по формулам для СИН перехода [16]. В первую очередь мы связываем это с перегревом незащищенных структур внешними электрическими шумами. В целом проведенные измерения демонстрируют, что по предложенному технологическому маршруту возможно создание качественных структур с туннельными переходами.

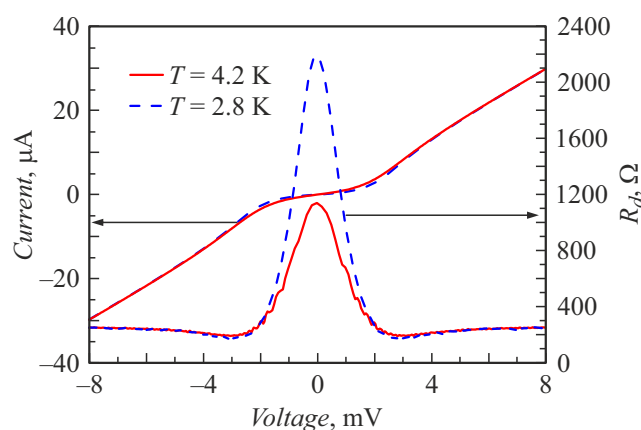


Рис. 7. Измеренные ВАХ и кривые дифференциального сопротивления НИСИН структуры при температуре 2.8 и 4.2 К.

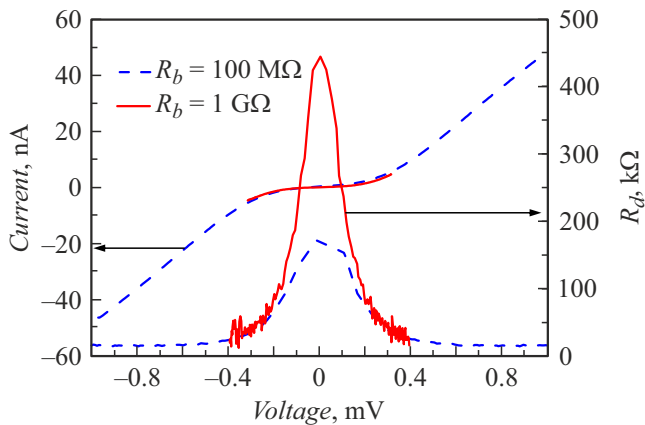


Рис. 8. Измеренная ВАХ и кривая дифференциального сопротивления СИНИС структуры с переходами Al/AlO_x/Cu-Pd при температуре 100 мК при разных диапазонах задания тока.

По результатам первых электрических измерений СИНИС структур с переходами Al/AlO_x/Pd при температуре 300 мК в сорбционном криостате на гелии-3 типа HELIOX-AC-V полученные ВАХ сильно отличались от теоретически ожидаемых. Такое поведение связали с химической активностью палладия и его влиянием на алюминиевые туннельные барьеры. Было предложено использование тонкого (3–5 нм) буферного слоя из алюминия перед напылением палладия, но это не дало существенного улучшения качества СИН переходов. Но использование тонкого буферного слоя меди заметно улучшает характеристики СИН переходов. На рис. 8 приведена ВАХ такой СИНИС структуры в логопериодической антенне, измеренная в разных диапазонах задания тока. Измерения проведены в криостате растворения ³He/⁴He при температурах до 100 мК. Отношение сопротивлений R_d/R_n достигает 30, что также далеко от предельных значений, но уже позволяет использовать такие структуры в качестве болометрических приемников. Отношение сопротивлений в простых тестовых структурах составило более 100, что выше, чем для структур в антенне. Это свидетельствует о неоптимальной оптической схеме в криостате и наличии перегрева антенных структур излучением с более теплых ступеней криостата.

Был измерен отклик по напряжению (рис. 9) такой структуры при температуре 100 мК, интегрированной в широкополосную логопериодическую антенну, установленную на линзе, на излучение черного тела с температурой около 9 К (мощность излучения, попадающего на антенну, около 4 пВт). Методика и схема эксперимента аналогична используемому в предыдущих работах [10]. Вольт-ваттная чувствительность составила $4 \cdot 10^6$ В/Вт, без учета оптического тракта и рассогласования используемой логопериодической антенны и СИНИС структуры.

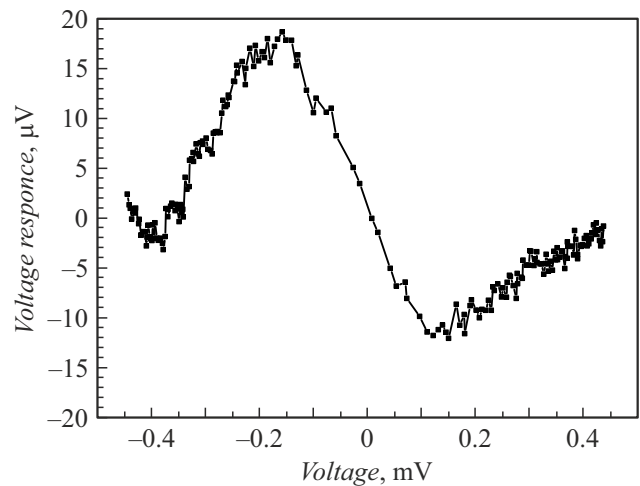


Рис. 9. Измеренный отклик по напряжению СИНИС структуры в логопериодической антенне с переходами Al/AlO_x/Cu-0Pd на излучение черного тела мощностью около 4 пВт при температуре 100 мК.

Заключение

Разработана и апробирована технология изготовления структур с туннельными переходами с применением селективного жидкостного травления алюминия. С помощью предложенной технологии можно изготавливать структуры типа СИНИС, а также НИСИН и сверхпроводник-изолятор-другой сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС'ИС) в зависимости от используемых материалов, рабочих температур и поставленных задач. По предложенной технологии изготовлены и измерены НИСИН структуры с переходами Al/AlO_x/Nb, отношение сопротивлений (R_d/R_n) достигает 12 при температуре 2.8 К. Данные измерения подтверждают, что по предложенной технологии удалось сформировать нешунтированную НИСИН структуру с туннельными барьерами. Исследования структур с переходами Al/AlO_x/Pd выявили проблему негативного влияния Pd на туннельный барьер с алюминием. Тонкий буферный подслой меди позволяет решить данную проблему и получить СИНИС структуры приемлемого качества (R_d/R_n более 30 при 100 мК) для болометрических применений.

Благодарности

Образцы изготовлены с использованием УНУ „Крио-интеграл“, поддерживаемой за счет государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10262, <https://rscf.ru/project/23-79-10262/>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S.F. Likhachev, A.G. Rudnitskiy, A.S. Andrianov, M.N. Andrianov, M.Yu. Arkhipov, V.F. Vdovin, E.S. Golubev, V.I. Kostenko, T.I. Larchenkova, S.V. Pilipenko, Ya.G. Podobedov, J.C. Razananirina, I.V. Tretyakov, S.D. Fedorchuk, A.V. Khudchenko, R.A. Cherniy, M.A. Shchurov. *Cosmic Res*, **62**, 117 (2024). DOI: 10.1134/S0010952523700764
- [2] Y. Balega, G. Bubnov, A. Chekushkin, V. Dubrovich, V. Edelman, A. Gunbina, S. Kapustin, T. Khabarova, D. Kukushkin, I. Lapkin, M. Mansfeld, A. Maruhno, V. Parshin, A. Raevskiy, V. Stolyarov, M. Tarasov, G. Valyavin, V. Vdovin, G. Yakopov, R.Yusupov, P. Zemlyanukha, I. Zinchenko. *Sensors*, **24** (2), 359 (2024). DOI: 10.3390/s24020359
- [3] D. Golubev, L. Kuzmin. *J. Appl. Phys.*, **89** (11), 6464 (2001). DOI: 10.1063/1.1351002
- [4] L. Kuzmin, D. Golubev. *Physica C: Superconductivity*, **372**, 3782 (2002). DOI: 10.1016/S0921-4534(02)00704-9
- [5] J.N. Ullom, *AIP Conf. Proceed.*, **605** (1), 135 (2002). DOI: 10.1063/1.1457613
- [6] Л.С. Кузьмин. *УФН*, **5** (175), 549 (2005). DOI: 10.3367/UFNr.0175.200505h.0549 [L.S. Kuz'min, *Phys. Usp.*, **48**, 519 (2005). DOI: 10.1070/pu2005v048n05abeh002128]
- [7] D.A. Pimanov, A.L. Pankratov, A.V. Gordeeva, A.V. Chiginev, A.V. Blagodatkin, L.S. Revin, S.A. Razov, V.Yu. Safonova, I.A. Fedotov, E.V. Skorokhodov, A.N. Orlova, D.A. Tatarsky, N.S. Gusev, I.V. Trofimov, A.M. Mumlyakov, M.A. Tarkhov. *Superconductor Sci. Technol.*, **38** (3), 035026 (2025). DOI: 10.1088/1361-6668/adb942
- [8] M. Nahum, T.M. Eiles, J.M. Appl. Phys. Lett., **65** (24), 3123 (1994). DOI: 10.1063/1.112456
- [9] S.A. Lemziakov, B. Karimi, S. Nakamura, D.S. Lvov, R. Upadhyay, C.D. Satrya, Z.-Y. Chen, D. Subero, Y.-C. Chang, L.B. Wang, J.P. Pekola. *J. Low Temperature Phys.*, **217** (1), 54 (2024). DOI: 10.1007/s10909-024-03144-8
- [10] M. Tarasov, V. Edelman, S. Mahashabde, M. Fominsky, S. Lemzyakov, A. Chekushkin, R. Yusupov, D. Winkler, A. Yurgens. *Appl. Phys. Lett.*, **110**, 242601 (2017).
- [11] O. Çakır. *J. Mater. Processing Technol.*, **199** (1–3), 337 (2008). DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.08.012
- [12] D.R. Dunbobbins, J. Faguet. *SPIE*, **922**, 247 (1988).
- [13] F.M. d'Heurle. *Metall. Mater. Transactions B*, **1**, 725 (1970).
- [14] F.M. Mwema, O.P. Oladijo, S.A. Akinlabi, E.T. Akinlabi. *J. Alloys Compounds*, **747**, 306 (2018). DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.03.006
- [15] A.B. Ermakov, S.V. Shitov, A.M. Baryshev, V.P. Koshelets, W. Luinge, *IEEE Transactions Appl. Supercond.*, **11**, 1, 840 (2001).
- [16] М.А. Маркина, А.М. Чекушкин, М.А. Тарасов, М.Ю. Фоминский, Т.Д. Пацаев, А.Л. Васильев. *ЖТФ*, **94** (7), 1079 (2024). [M.A. Markina, A.M. Chekushkin, M.A. Tarasov, M.Yu. Fominskiy, T.D. Patsaev, A.L. Vasiliev. *Tech. Phys.*, **69** (7), 1004 (2024). DOI: 10.61011/TP.2024.07.58804.169-24]