

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.6.4>

УДК: 520.622

СУБТЕРАГЕРЦОВЫЙ СИНИС ДЕТЕКТОР С ПОДВЕШЕННЫМ НАД ПОДЛОЖКОЙ ПОГЛОТИТЕЛЕМ

Р.А. Юсупов ¹, А.А. Гунбина ¹, М.Ю. Фоминский ¹,
А.М. Чекушкин ¹, В.С. Эдельман ², М.А. Тарасов ¹

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

² ИФП им. П.Л. Капицы РАН, 119334, Москва, ул. Косыгина, 2

Статья поступила в редакцию 8 мая 2026 г.

Аннотация. В работе рассмотрена конструкция высокочувствительного субтерагерцового детектора излучения на основе структуры сверхпроводник – изолятор – нормальный металл – изолятор – сверхпроводник с подвешенным над подложкой поглотителем. Описана технология изготовления таких структур с использованием жидкостного травления алюминия. Предложены конструкции детектора такой структуры, в которых нет подавления сверхпроводимости в алюминиевых электродах от разводки из нормальных металлов. По предложенной технологии изготовлены и исследованы структуры на основе алюминия, с различными вариантами материала поглотителя из нормального металла (гафний, медь, палладий). Описана схема измерений отклика таких структур на внешнее излучение. Проведено измерение отклика на внешнее излучение от источника излучения в виде черного тела и рассчитаны вольт-ваттные чувствительности и техническая мощность эквивалентная шуму.

Ключевые слова: субтерагерцовый детектор, прямой детектор, болометр, квантовый детектор, сверхпроводниковые туннельные структуры, структура сверхпроводник – изолятор – нормальный металл – изолятор – сверхпроводник, жидкостное травление, магнетронное распыление.

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

Автор для переписки: Юсупов Ренат Альбертович, yusupovrenat@hitech.cplire.ru

Введение

Сверхпроводниковые детекторы являются наиболее чувствительным видом устройств в субтерагерцовом частотном диапазоне и на данный момент применяются в первую очередь в субтерагерцовой радиоастрономии [1]. Современная субтерагерцовая радиоастрономия предъявляет крайне высокие требования по чувствительности и шумовым характеристикам таких детекторов (мощность эквивалентная шуму менее 10^{-19} Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$). Очевидно, что достижение таких параметров невозможно без охлаждения до криогенных температур и большинство таких детекторов работают в субкельвиновых криостатах. Наиболее чувствительными детекторами, находящими применения в существующих радиоастрономических проектах, являются болометры на краю сверхпроводящего перехода (TES) [2] и болометры на кинетической индуктивности (KID или MKID) [3]. Считается что MKID лучше подходят для матричных применений, так как в них естественным образом реализуется частотное мультиплексирование, но и для TES также развиваются такие системы считывания [4]. Перспективным классом детекторов являются устройства на основе структуры сверхпроводник – изолятор – нормальный металл – изолятор – сверхпроводник (СИНИС) [5]. Эта структура лежит в основе болометров на холодных электронах [6], такое название было дано этому типу детекторов за эффект электронного охлаждения [7,8], которое позволяет понизить электронную температуру нормального металла в СИНИС структурах ниже фоновой температуры. Для болометров на холодных электронах заявляется о достижении рекордной чувствительности, ограниченной фотонным шумом [9]. Несмотря на это, даже в этих последних работах характеристики исследуемых

СИНИС структур и вольт-ваттные чувствительности детекторов на их основе еще далеки от теоретических оценок [10].

С учетом модели квантового отклика [11] СИНИС детектора, для увеличения чувствительности перспективным является подход, где поглотитель термически развязан с подложкой (подвешен над подложкой). В такой реализации детектора исключается уход высокоэнергичных фонов напрямую из поглотителя в подложку, что уменьшает квантовую эффективность такого детектора. Квантовая модель с учетом неравновесности процессов более полно описывает потери энергии в СИНИС детекторах, что позволяет оптимизировать конструкцию и искать способы увеличения чувствительности таких детекторов.

1. Изготовление и исследование образцов

Технология изготовления СИНИС структур с подвешенным над подложкой мостиком из нормального металла с помощью жидкостного травления алюминия была разработана и впервые реализована на технологической платформе Чалмерского технологического университета, Швеция. (Chalmers University of Technology) [12]. Данная технология представляет альтернативу распространенной технологии с использованием теневого напыления [13] (напыления под углами через толстую резистивную маску) для формирования СИН и СИНИС структур в одном цикле напыления, без разрыва вакуума.

Предложенный способ изготовления не требует установок с поворотным столиком и не ограничивается использованием только установок термического распыления для формирования пленок. Схематичное изображение разработанной конструкции приведено на рисунке 1: перемычка («мостик») из нормального металла соединяет два «берега» алюминиевых электродов и создает СИН переходы на каждом из них.

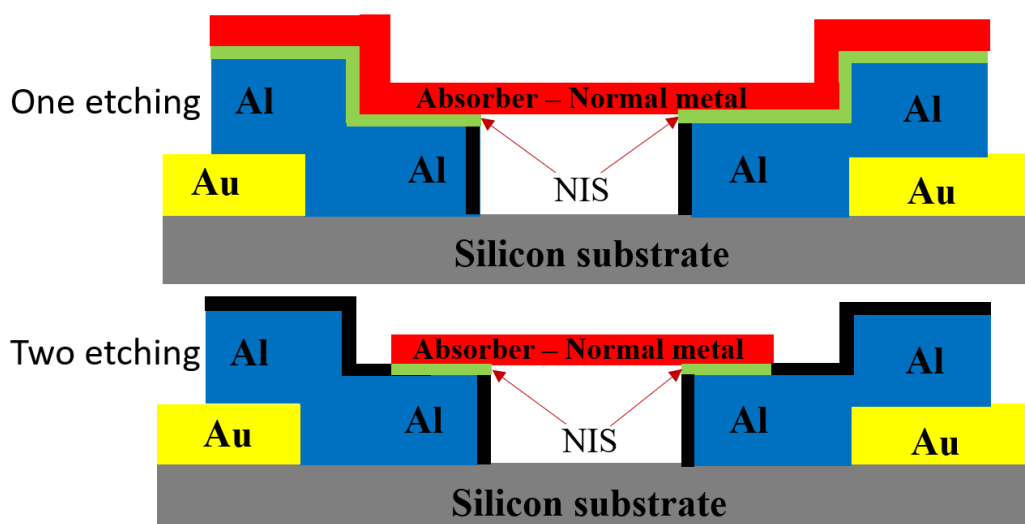


Рис. 1. Схематичное изображение (не в масштабе) конструкции СИНИС детектора с подвешенным над подложкой поглотителем, версия с изготовлением с одним и двумя травлениями.

Разработанный технологический маршрут включает в себя формирование структур слоев с использованием электронной литографии и процесса «взрыва» (liftoff), пленки напылялись термическим способом (электронным лучом). Пошаговая схема изготовления приведена на рисунке 2. В первую очередь, формируются разводка на чипе, антенны и контактные площадки из нормального металла. В качестве нормального металла применяется трехслойная структура Ti/Au/Pd с толщинами слоев 5/35/10 нм, в которой подслой титана нужен для улучшения адгезии золота к кремниевой подложке, а слой палладия убирает нежелательный интерфейс золото – алюминий [14]. Далее в едином цикле напыления (без разрыва вакуума) наносится и формируется методом взрывной литографии трехслойная структура Al/AlO_x/нормальный металл. Толщина слоя алюминия 70 нм, толщина слоя нормального металла 15 – 20 нм. Барьер формировался методом статического окисления алюминия в атмосфере чистого кислорода, время окисления 10 – 15 мин при давлении 10 торр. Целевые значения произведения площади перехода на нормальное сопротивление туннельного перехода $R_n S = 1 - 10 \text{ кОм} \cdot \text{мкм}^2$. Для формирования СИНИС структуры селективно удаляется слой алюминия под поглотителем в области, определяемой маской из резиста. Удаление алюминия проводится жидкостным травлением в

слабом основании (1 % раствор KOH). Дополнительное травление для варианта с медным верхним слоем трехслойной структуры применялось для ограничения области СИН переходов и отдаления их от нормальной разводки. Травление меди также проводилось жидкостным способом, но в слабом растворе азотной кислоты.

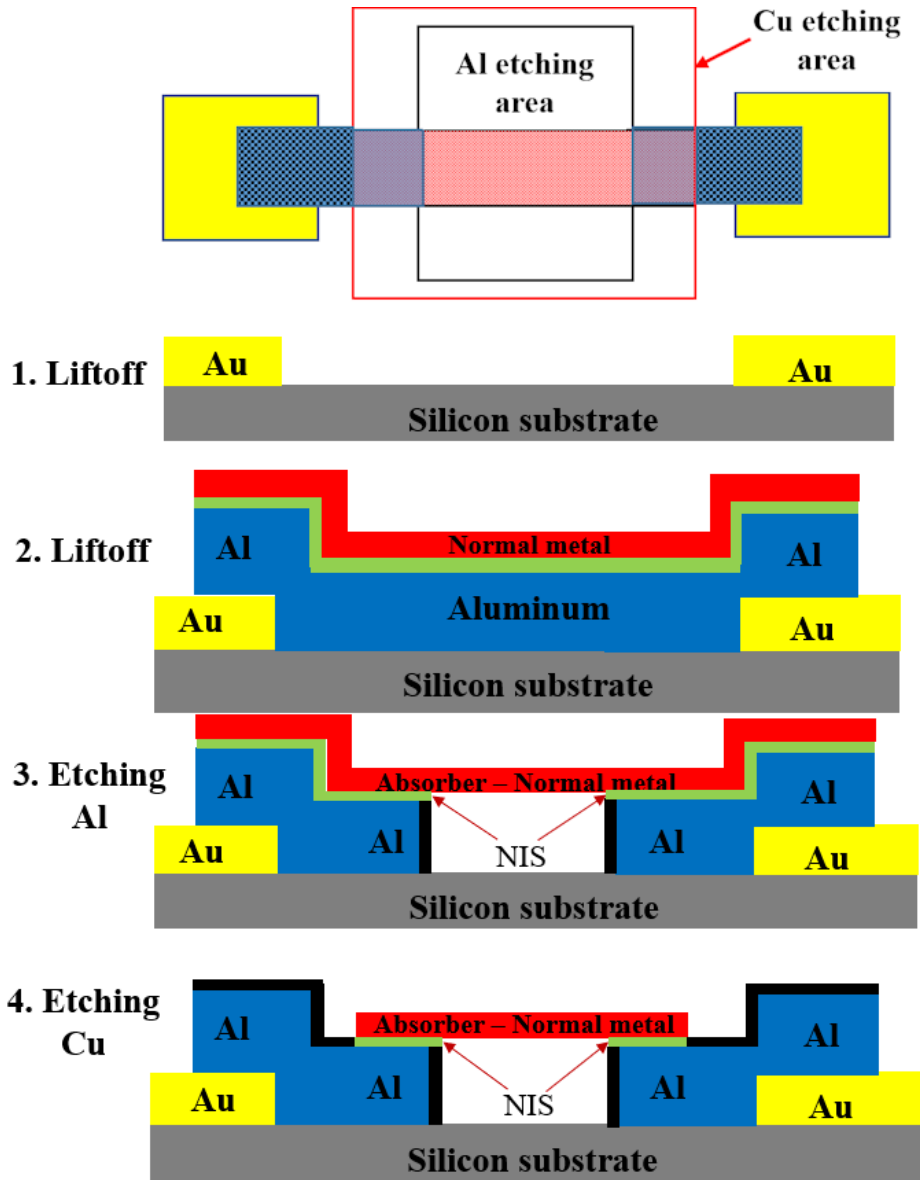


Рис. 2. Последовательность изготовления СИНИС детектора с подвешенным над подложкой медным поглотителем с двумя травлениями.

Основные проблемы разработанной технологии связаны с этапами жидкостного травления. Тонкий мостик нормального металла при жидкостном травлении имеет тенденцию провисать и даже рваться из-за капиллярных сил в момент сушки образца после травления. Для решения данной проблемы была

использована сушка в критической точке в жидком CO_2 , но это еще больше усложняло и удлиняло технологический процесс. Альтернативой может быть плазмохимическое травление алюминия в хлорсодержащих газах. Несмотря на анизотропность данного вида травления, при подборе правильных режимов возможно удаление алюминия под мостом нормального металла без существенных его повреждений. Вторая проблема – это ограничение области туннельных переходов: вариант с травлением верхнего слоя трехслойной структуры применим только для ряда нормальных металлов, и нами апробирован для медных поглотителей. Альтернативой данному подходу может быть напыление трехслойной структуры по специальной маске с использованием напыления под углами. В таком варианте слой алюминия напыляется под прямым углом, а слой нормального металла напыляется под углом так, что частично металл напылялся на стенки резиста и в дальнейшем удаляется с резистом [11]. Также авторами была исследована возможность изготовления СИНИС структур с использованием магнетронного распыления и фотолитографии для формирования структуры всех слоев [14]. Неочевидной сложностью при данном исполнении оказалось, что травление мостика начинается уже при проявке слоя резиста для формирования маски области травления алюминия, так как фоторезисты проявляются в щелочных проявителях. При этом, так как магнетронное распыление не позволяет реализовать осаждение пленки строго под прямым углом, возникают дополнительные требования к краям фоторезиста (обратный профиль) для успешного прохождения взрывной фотолитографии.

Детекторные СИНИС структуры изготавливались на кремниевых подложках с толщинами 330 – 500 мкм. На чипе размером 7 на 7 мм с 16 контактными площадками по периметру располагалось от одной до 3 СИНИС структур в планарных антеннах (рис. 3) и несколько тестовых СИНИС структур для темновых измерений. Перед электрическими измерениями проводился визуальный контроль изготовленных структур в оптическом и электронном микроскопах. При контроле в оптическом и электронном микроскопе область

СИНИС структуры, где удалялся слой алюминия выглядит более светлой, чем область СИН переходов, что позволяет судить о завершении травления. Но чтобы подтвердить, что мостик из нормального металла подвешен между СИН переходами и не касается (или касается) подложки образец устанавливался в электронный микроскоп под углом 85° к столику, что позволяло «заглянуть» под мостик (см. рис. 4). По нашему опыту, мостики из жестких материалов, например, гафния и палладия, с большой вероятностью сохраняли свою форму, а медные прогибались и касались подложки, что не мешало проводить измерения таких структур и получать хорошие величины чувствительности при приеме внешнего излучения. Определяющими были и размеры мостиков, оптимальным оказались мостики шириной около 1 мкм и длиной 4 – 6 мкм. Создание мостиков шириной менее 1 мкм и толщиной менее 15 нм является не решенной задачей, что ограничивает детекторное применение таких структур. Сложной задачей является создание матриц детекторов по такой технологии, так как выход годных СИНИС структур не высокий, даже в рамках одной подложки.

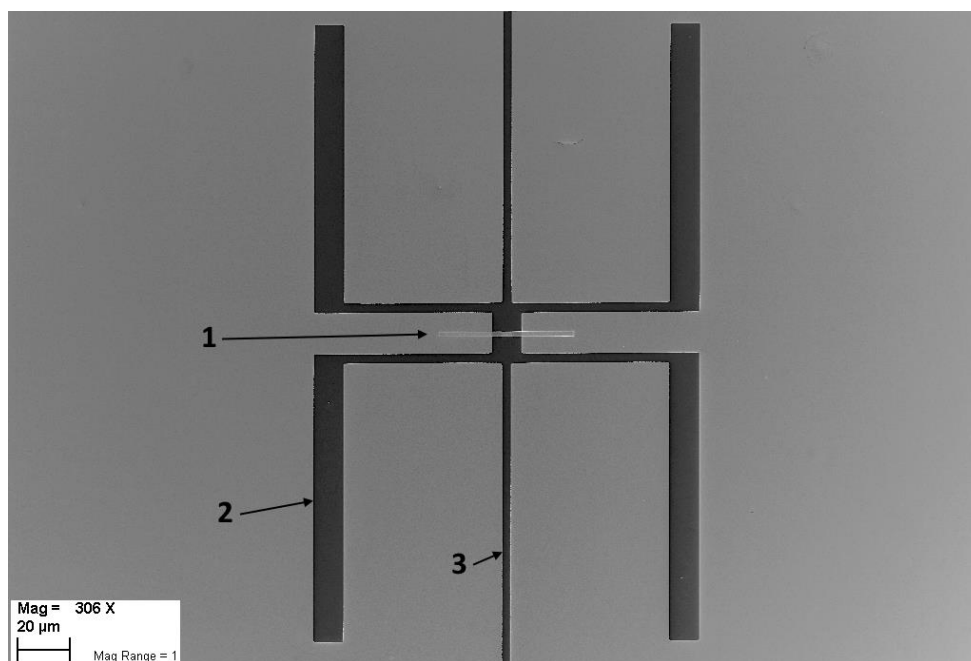


Рис. 3. Вид изготовленной СИНИС структуры (1) с подвешенным над подложкой поглотителем в двойной щелевой антенне (2) разрезанной неизлучающей щелью (3) в электронном микроскопе.

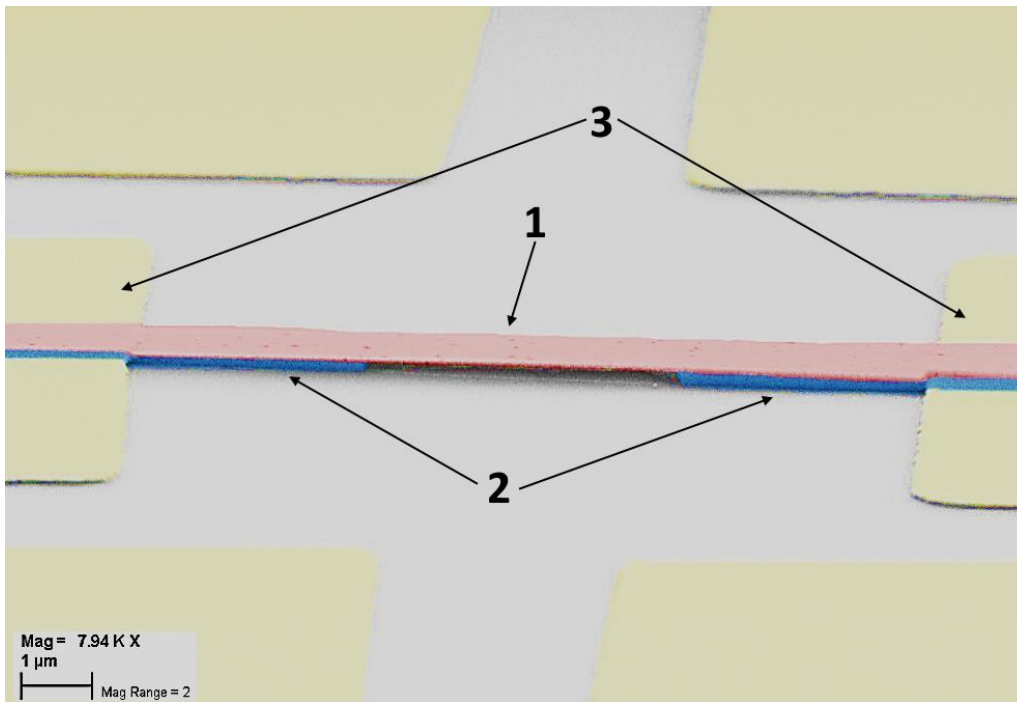


Рис. 4. Вид под углом 85° в электронном микроскопе СИНИС детектора: поглотитель (1) из нормального металла подвешен над подложкой между двумя СИН переходами (2), подключенных к антенне из нормального металла (3).

2. Схема эксперимента и расчет мощности принятого излучения

Основные криогенные измерения проводили при температурах до 100 мК в криостате растворения замкнутого цикла конструкции В.С. Эдельмана [15], который представляет собой вставку в транспортный гелиевый сосуд Дьюара. Особенностью данной криогенной системы является работа без вибраций и дополнительных электромагнитных наводок, свойственных криостатам на основе импульсных труб или криорефрижераторам замкнутого цикла Гиффорда-МакМагона. Для предварительных темновых измерений использовался криостат Oxford Instruments Helox AC-V с рабочей температурой до 270 мК. Схема эксперимента приведена на рисунке 5. Образец устанавливался на холодную ступень криостата в специальном держателе на сапфировую линзу, электрический контакт к площадкам на чипе осуществлялся с помощью специальных пружинных зондов (pogo-pins), обеспечивающих надежный электрический контакт и незначительные контактные сопротивления при криогенных температурах.

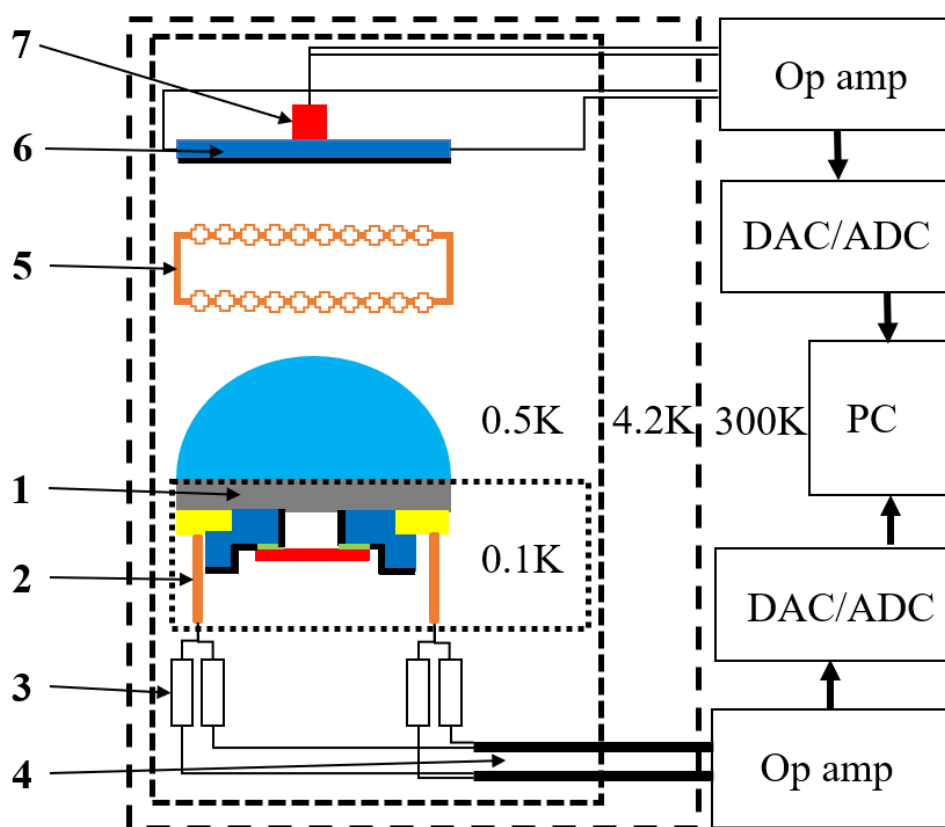


Рис. 5. Схема измерения отклика разработанного СИНИС детектора с подвешенным над подложкой поглотителем на излучение теплового источника излучения (черного тела). 1 – Чип с СИНИС детектором в держателе с сапфировой линзой, 2 – пружинные зонды, обеспечивающие электрический контакт к площадкам на чипе, 3 – холодные резисторы в линиях измерения по постоянному току, 4 – витые пары проводов, 5 – сборка фильтров, 6 – ЧТ в виде нихромовой пленке на сапфировой подложке, 7 – RuO_2 термометр для контроля температуры ЧТ.

Фильтры располагались на дне радиационного экрана с двух сторон диафрагмы диаметром 9 мм. Полосно-пропускающие фильтры изготавливались самостоятельно методом протравливания отверстий крестообразной формы в медной фольге [17]. Фильтры были рассчитаны на центральную частоту около 350 ГГц, характеристики фильтров были предварительно измерены на стенде с перестраиваемым источником излучения – для сборки из двух фильтров ширина полосы пропускания на полувысоте составила около 70 ГГц (20 %).

Измерения ВАХ детекторов на основе СИНИС структур проводилось по 4-х зондовой схеме измерения на постоянном токе. Использовались витые пары проводов для минимизации магнитных наводок. Дополнительно в каждой линии были установлены резисторы номиналом 820 кОм для уменьшения наводок,

поступающих по проводам. Усиление сигнала происходит низкошумящими операционными усилителями, находящимися при комнатной температуре. Сборка усилителей вместе с балластными резисторами для выбора диапазона задания тока, коммутационной матрицей находилась в экранированном корпусе прямо на многоконтактном разъеме криостата. Для оцифровки сигнала по коаксиальным проводам сигнал передавался на коммутационную плату ЦАП/АЦП NI-6289, подключенного к компьютеру. Управление нагревом ЧТ и контроль его температуры осуществлялся по аналогичной схеме. Для сбора и обработки информации использовалось специализированное программное обеспечение IRTECON [18].

Нетривиальным в таком эксперименте является расчет мощности, поступающей на детектор. Интенсивность излучения с единичной площади ЧТ в единичном телесном угле и в единичной полосе частот описывается формулой Планка

$$I(f, T) = \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1}.$$

Для грубых оценок можно использовать закон Стефана – Больцмана. Но основной задачей является оценка: какая часть мощности от черного тела приходит на линзу с установленным на нее детектором в антенне. В первую очередь необходимо учесть «неидеальность» используемого черного тела. По нашим оценкам используемая нихромовая пленка имеет «коэффициент черноты» 0.5. Далее геометрический фактор 0.14, учитывающий телесные углы и диафрагму. Фильтры определяют полосу излучения, поступающую на антенну с интегрированным СИНИС детектором. Фильтры отсекают паразитную засветку в ИК диапазоне, которая даже при невысоких температурах ЧТ сильно перегревает детектор и оказывает значительное влияние на его характеристики. Уточнение характеристик фильтра и излучателя проделано в работе [19] и было использовано при написании настоящей работы. На рисунке 6 представлены характеристики используемых фильтров и показано, что максимум излучения ЧТ при температуре 4.5 К приходится на частоту 300 ГГц.

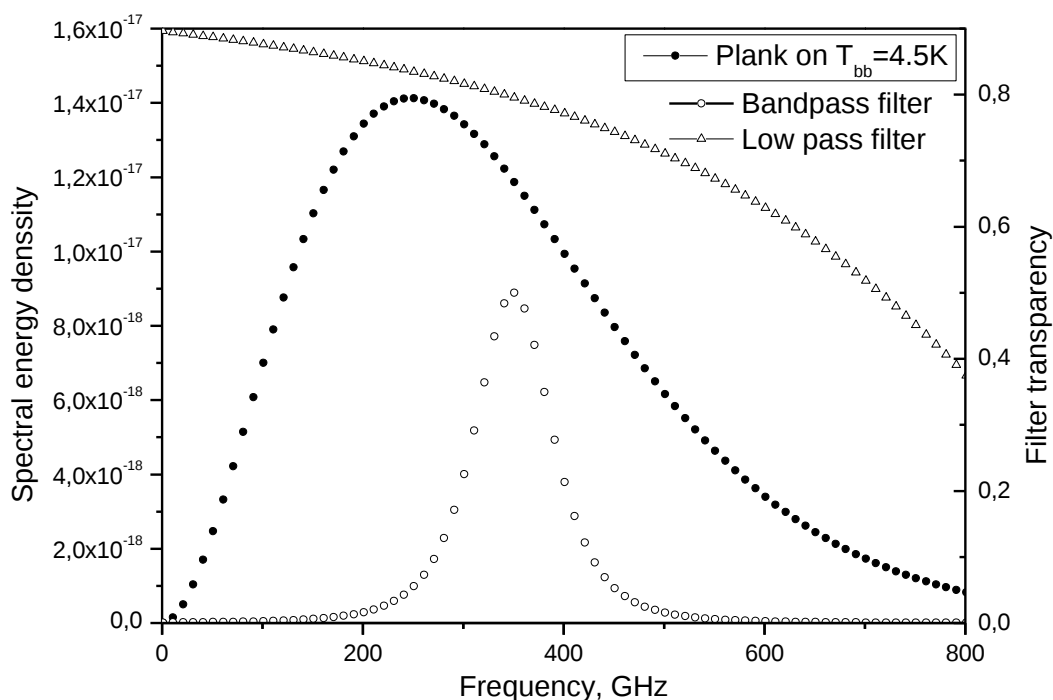


Рис. 6. График спектральной плотности по распределению Планка для температуры черного тела 4.5 К и пропускание используемого полосового фильтра и фильтра низких частот.

Рассчитанная мощность излучения, приходящая на линзу, будет оценкой «сверху» для мощности, принимаемой детектором. Для оценки мощности, поглощенной детектором, необходимо брать в учет полосу антенны и учитывать рассогласование детектора с антенной. Дополнительно нужно учесть отражение от поверхностей сапфировой линзы: при отражении от двух границ раздела сред прохождение составит 0.83. Эти расчеты будут разные для разных вариантов детекторов (с разными материалами поглотителя из нормального металла), разных вариантов антенн. Поэтому сравнения разных вариантов детекторов мы используем всю мощность, приходящую на линзу. То есть приведенные в следующем разделе значения чувствительности характеризуют сборку на линзе детектора в антенне и являются оценкой «снизу» для чувствительности самого детектора, что оставляет возможность дальнейших оптимизаций конструкций детектора и антенны.

3. Результаты измерений

Изготовленные чипы с детекторами на основе СИНИС структур предварительно были протестированы при комнатной температуре. Целью таких измерений было отобрать чипы с наибольшим числом работоспособных структур на них. Распространенным дефектом для таких структур является разрыв нормального поглотителя, при котором структура при комнатной температуре имеет бесконечное сопротивление. Другой распространенный дефект – недотрав слоя алюминия под мостом, при котором не формируется СИНИС структура и измерительный ток протекает по нижнему слою алюминия. При этом измеряемое сопротивление составляет всего несколько Ом, вместо характерных нескольких кОм для нормально сформированной туннельной структуры.

При криогенных исследованиях в первую очередь измерялись ВАХ СИНИС структур. Измерения проводились в режиме задания тока, но для удобства результаты представлены в виде зависимостей от напряжения. Диапазон задания токов выбирался так чтобы прописать особенности ВАХ при напряжениях равным удвоенному щелевому напряжению алюминия (около $380 \mu\text{V}$) и выход на нормальное сопротивление при напряжениях выше щелевого. Дополнительно измерялась ВАХ в малом диапазоне задания тока для определения дифференциального сопротивления (R_d) около нуля напряжения. Максимум отношения сопротивлений R_d/R_n при заданной температуре является важным параметром для характеристики СИНИС структуры. В эксперименте оно всегда отличается от теоретических оценок в меньшую сторону и может свидетельствовать как о неидеальности самой туннельной структуры, так и о существующих в системе перегревах, так как исследуемые СИНИС структуры очень чувствительны к внешнему излучению и электрическим наводкам.

Первыми были исследованы СИНИС структуры, где в качестве нормального металла использовался гафний и выполненные по базовой технологии с одним травлением. Измеренная ВАХ без внешней засветки (темновая) была продифференцирована ($R_d(V)$) и нормирована на нормальное

сопротивление, чтобы была возможность сравнить кривые дифференциального сопротивления не только качественно, но и количественно. На кривой дифференциального сопротивления для гафниевых структур на рисунке 7 видно две характерные особенности: подавление сверхпроводимости (щелевая особенность при менее 200 мкВ) в алюминиевых электродах за счет близко расположенной разводки из нормальных металлов и провал при нуле напряжений связанный с Андреевским отражением в таких структурах [20]. Из-за Андреевского отражения максимально измеренное отношение R_d/R_n оказывается сравнительно небольшим, около 300, но, если аппроксимировать вершину по неискаженной кривой, максимальное отношение сопротивлений достигло бы 10^4 , что является хорошим показателем для этой температуры, даже с учетом подавленной щели.

Для характеристики детекторных свойств разработанной структуры важен отклик на прием (нагрев) внешним излучением. Выделяют два вида отклика: отклик по току – разница токов при фиксированном напряжении на структуре при наличии внешнего излучения и без него; и отклик по напряжению – разница напряжений при фиксированном токе через структуру при наличии излучения и без него. Оба отклика можно пересчитать из измеренных ВАХ: без засветки (темновой) и с воздействием внешнего излучения. Так как измерения проводились в режиме задания тока, отклик по напряжению более естественный и может измеряться в рабочей точке как разность напряжений при фиксированном токе. Для исследуемой СИНИС структуры лучший измеренный отклик по напряжению составил около 7 мкВ при температуре черного тела 5 К. Вольт-ваттная чувствительность составила около $2 \cdot 10^7$ В/Вт. При отсутствии описанных выше особенностей ВАХ отклик должен быть выше при температуре в криостате 85 мК.

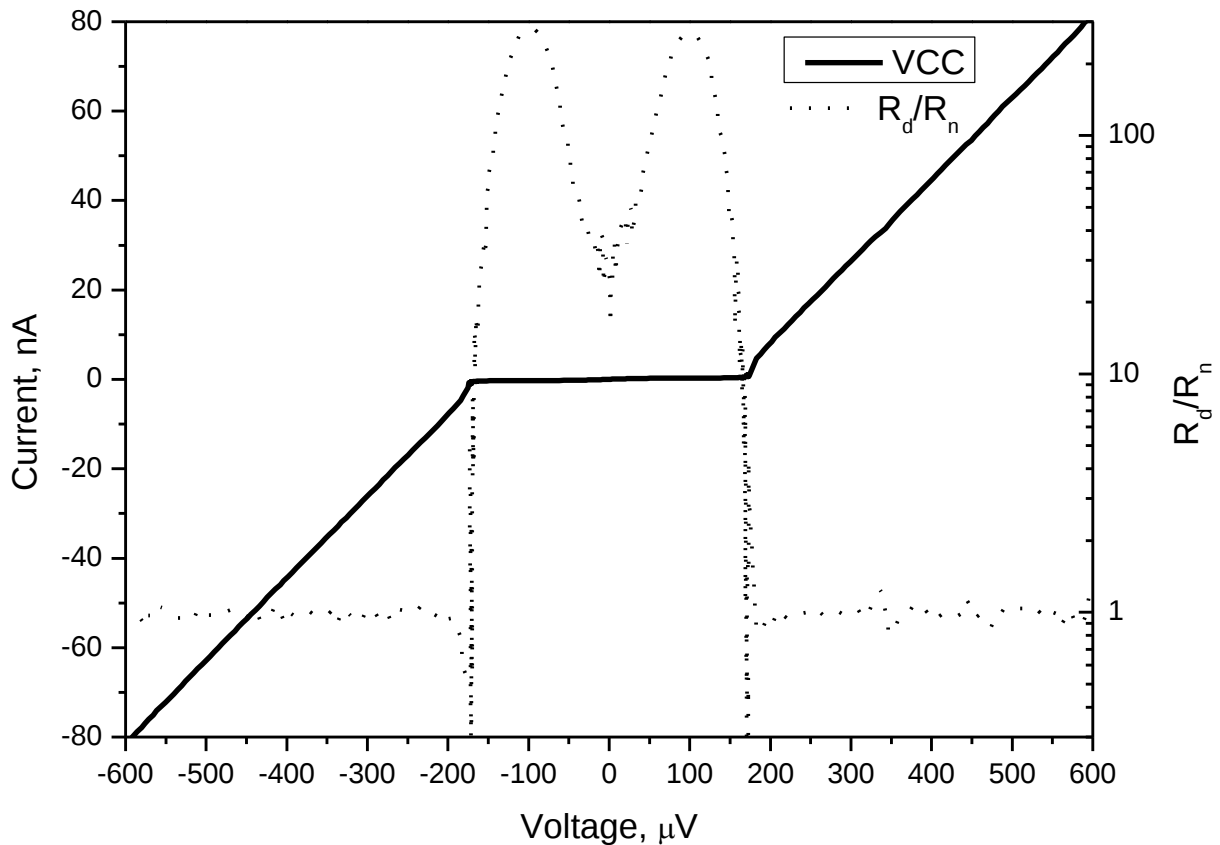


Рис. 7. ВАХ и дифференциальное сопротивление в полулогарифмическом масштабе СИНИС структуры с подвешенным над поверхностью поглотителем из гафния при 85 мК.

Для устранения влияния нормальной разводки на сверхпроводимость алюминиевых электродов в СИН переходах было предложено ограничить площадь верхнего слоя нормального металла тем самым отдалив нормальный металл от СИН переходов. Сделать это возможно, например, дополнительным селективным травлением, если выбран соответствующий материал в качестве нормального металла. Мы исследовали структуры с медным поглотителем, травление которого проводилось жидкостным способом в кислотах. В данных структурах удалось побороть эффект близости от нормальной разводки: на ВАХ значения щелевого напряжения соответствуют удвоенной щели алюминия и составляют около 380 мКВ (см. рис. 8). Отношение сопротивлений R_d/R_n превысило 2500, но форма дифференциальной кривой далека от теоретической. Основываясь на форме измеренной кривой дифференциального сопротивления R_d/R_n должно было превысить 10^4 .

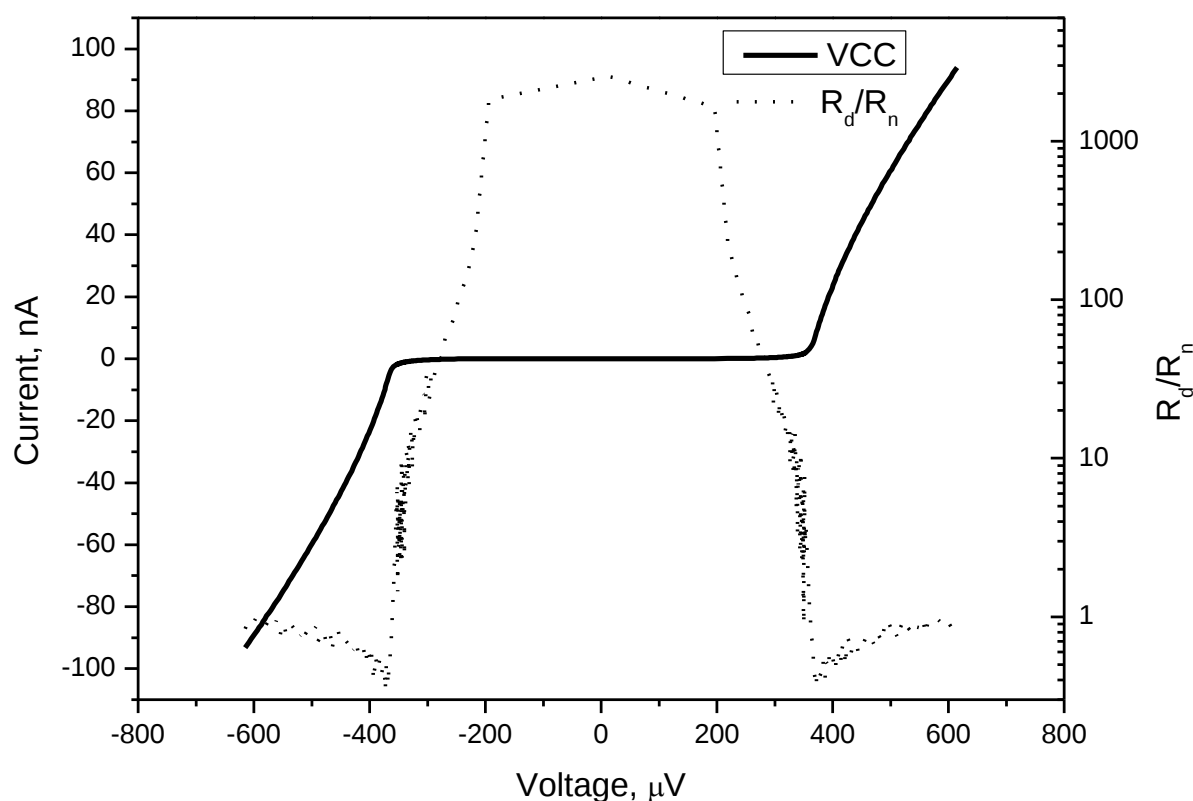


Рис. 8. ВАХ и дифференциальное сопротивление в полулогарифмическом масштабе СИНИС структуры с подвешенным над поверхностью поглотителем из меди при 105 мК.

Для максимума отклика по напряжению, который находится примерно на половине щелевого напряжения, измеренное максимальное значение R_d не оказывает большого влияния, и отклик по напряжению достиг 12 мкВ при температуре черного тела 5 К, что почти в 2 раза выше чем для образцов с гафниевым поглотителем, при этом температура по термометру в криостате была выше и составила 105 мК. Вольт-ваттная чувствительность достигает $7 \cdot 10^7$ В/Вт при мощности излучения 0.04 пВт, максимально теоретически возможном около $5 \cdot 10^8$ В/Вт (для отклика детектора на половине щели при $R_d = 100$ кОм [11]). Такая разница с теоретическими оценками в первую очередь объясняется тем, что в работе рассчитывается мощность, пришедшая на линзу, а не поглощенная непосредственно СИНИС структурой.

Были также исследованы СИНИС детекторы с подвешенным поглотителем на основе СИН переходов $\text{Al}/\text{AlO}_x/\text{Cu-Pd}$. Но несмотря на то, что в таких структурах нет подавления щели от нормальной разводки и измеренная щель

даже превышает двойную щель алюминия, отношение сопротивлений R_d/R_n достаточно низкое и составляет около 30 при 100 мК (см. рис. 9). Проблема получения высококачественных СИН переходов с поглотителем из палладия известна и в данной реализации не удалось от нее полностью избавиться. Вольт-ваттная чувствительность для таких детекторов составила всего $4 \cdot 10^6$ В/Вт [14].

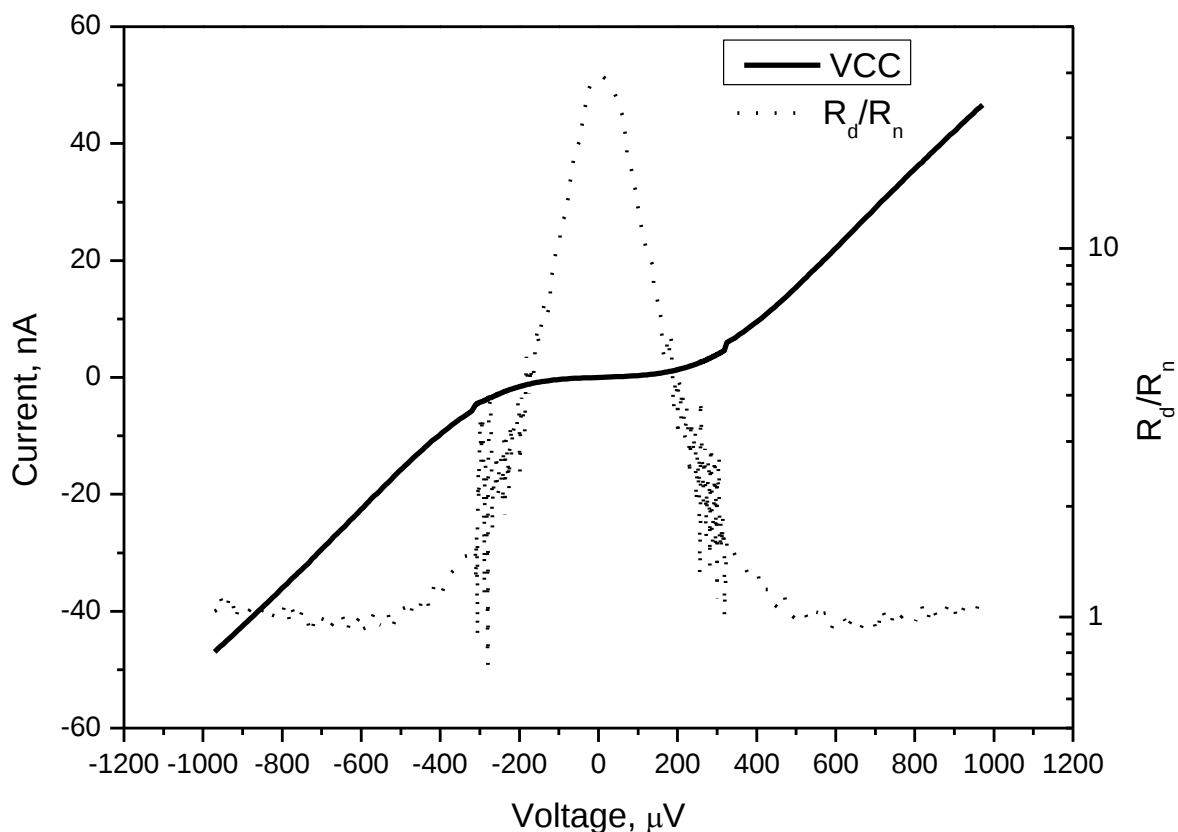


Рис. 9. ВАХ и дифференциальное сопротивление в полулогарифмическом масштабе СИНИС структуры с подвешенным над поверхностью поглотителем из палладия с подслоем меди при 100 мК.

Для высокочувствительных детекторов важным является мощность эквивалентная шуму (МЭШ) и эквивалентная шуму измеряемая разница температур (NETD). В данных измерениях шумы определялись теплыми усилителями с характерным уровнем шума около $10 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$. Из измеренных в эксперименте откликов по напряжению (рисунок 10) и оцененных вольт-ваттных чувствительностей (таблица 1) можно рассчитать так называемую техническую мощность эквивалентную шуму (ТМЭШ) которая достигает $1.25 \cdot 10^{-16} \text{ Вт}/\sqrt{\text{Гц}}$ при 105 мК. А эквивалентная шуму разница измеряемых температур (TNETD) при изменении температуры ЧТ от 4 до 5 К составила

0.7 мК/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Напрямую сравнивать полученные значения чувствительности и ТМЭШ (TNEP) с СИНИС детекторами с поглотителями на подложке не корректно, так как исследуемые детекторы были не согласованы с антенной – для всех трех вариантов абсорбера использовалась одинаковая двойная щелевая антенна и конструкции СИНИС структур были схожие. Для практических применений с учетом используемой антенны должен проектироваться СИНИС детектор, чтобы согласовать импеданс приемной антенны с импедансом болометра.

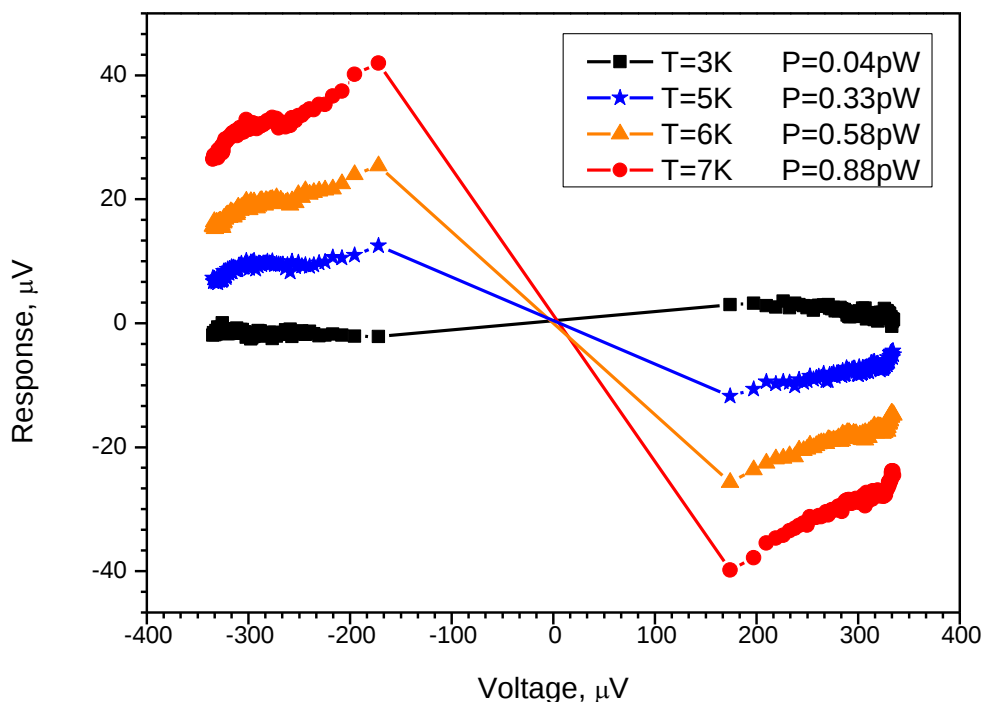


Рис. 10. Отклики по напряжению СИНИС структур с структуры с подвешенным над поверхностью поглотителем из меди на излучение черного тела различной температуры.

Таблица 1. Отклики и чувствительность СИНИС детектора с подвешенным над поверхностью поглотителем из меди.

T_{bb} , К	P , пВт	dU , мкВ	dU/P , В/Вт
3	0.04	3.5	$8 \cdot 10^7$
5	0.33	12	$3.6 \cdot 10^7$
6	0.58	26	$4.5 \cdot 10^7$
7	0.88	42	$4.83 \cdot 10^7$

Заключение

Экспериментально исследованы детекторы в виде СИНИС структуры с подвешенным над поверхностью подложки между двумя СИН переходами поглотителем из нормального металла. В отличие от традиционных СИНИС детекторов, в которых поглотитель напыляется прямо на подложку, в такой конструкции невозможен уход энергии напрямую из поглотителя в подложку, что повышает чувствительность таких детекторов. Описана базовая технология изготовления таких структур и варианты: с напылением под углом поглотителя и вариант с использованием магнетронного распыления для формирования всех слоев структуры. СИНИС структура формируется из пленки Al/AlO_x /нормальный металл, которая напыляется в одном вакуумном цикле, методом селективного жидкостного травления. Разработаны и исследованы варианты конструкций, где нет подавления сверхпроводимости от нормальных электродов, что должно повысить отклик таких детекторов. Изготовлены и исследованы варианты СИНИС структур с различными вариантами электрода из нормального металла: гафний, медь, палладий. Измерения изготовленных структур проведено при температурах до 100 мК; проведены как темновые измерения, так и при облучении детекторов, интегрированных в планарные антенны, излучением теплового источника излучения (черного тела). Для расчета чувствительности детекторов была оценена мощность, приходящая на детектор, с учетом элементов оптического тракта и неидеальности используемого черного тела. Вольт-ваттная чувствительность для образцов с медным поглотителем достигает $8 \cdot 10^7$ В/Вт. Техническая МЭШ составляет около 10^{-16} Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Эквивалентная шуму разница температур менее 1 мК/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Проведенные исследования демонстрируют, что по предложенной технологии можно создавать СИНИС структуры для детекторных применений с высокой чувствительностью, которые конкурентоспособны как с существующими детекторами на основе СИНИС структур (БХЭ), так и с другими типами сверхпроводниковых высокочувствительных детекторов. Преимуществом данной технологии является то, что она не требует напыления под углами и

совместима с магнетронным способом нанесения пленок. Среди недостатков стоит отметить сложность создания структур с поглотителями нано размеров (шириной менее 1 мкм и толщинами менее 20 нм), а также общую сложность изготовления и ненадежность подвешенных поглотителей.

Благодарности

Выражаем благодарность С. А. Лемзякову за участие в экспериментах, проводимых в ИФП РАН. Изготовление и исследование образцов выполнено с использованием уникальной научной установки “Криоинтеграл” (УНУ № 352529) Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

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

Литература

1. Likhachev S.F. et al. Subterahertz astronomy in the Russian Federation: Prospects and directions // Cosmic Research. – 2024. – Т. 62. – №. 1. – С. 117-131. <https://doi.org/10.1134/S0010952523700764>
2. De Lucia M. et al. Transition edge sensors: Physics and applications // Instruments. – 2024. – Т. 8. – №. 4. – С. 47. <https://doi.org/10.3390/instruments8040047>
3. Ulbricht G., De Lucia M., Baldwin E. Applications for microwave kinetic induction detectors in advanced instrumentation // Applied Sciences. – 2021. – Т. 11. – №. 6. – С. 2671. <https://doi.org/10.3390/app11062671>
4. Шитов С.В. и др. Прогресс технологии RF TES-детекторов // Журнал технической физики. – 2024. – Т. 94. – №. 7. – С. 1060-1070. <https://doi.org/10.61011/JTF.2024.07.58341.168-24>
5. Balega Y. et al. Microwave Receiving System Based on Cryogenic Sensors for the Optical Big Telescope Alt-Azimuth // Sensors. – 2024. – Т. 24. – №. 2. – С. 359. <https://doi.org/10.3390/s24020359>

6. Кузьмин Л.С. Сверхчувствительные болометры на холодных электронах для исследования темной материи и темной энергии // Успехи физических наук. – 2005. – Т. 175. – №. 5. – С. 549-555. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0175.200505h.0549>
7. Nahum M., Eiles T.M., Martinis J.M. Electronic microrefrigerator based on a normal-insulator-superconductor tunnel junction // Applied Physics Letters. – 1994. – Т. 65. – №. 24. – С. 3123-3125. <https://doi.org/10.1063/1.112456>
8. Lemziakov S.A. et al. Applications of superconductor–normal metal interfaces // Journal of Low Temperature Physics. – 2024. – Т. 217. – №. 1. – С. 54-81. <https://doi.org/10.1007/s10909-024-03144-8>
9. Kuzmin L.S. et al. Photon-noise-limited cold-electron bolometer based on strong electron self-cooling for high-performance cosmology missions // Communications Physics. – 2019. – Т. 2. – №. 1. – С. 104. <https://doi.org/10.1038/s42005-019-0206-9>
10. Golubev D., Kuzmin L. Nonequilibrium theory of a hot-electron bolometer with normal metal-insulator-superconductor tunnel junction // Journal of Applied Physics. – 2001. – Т. 89. – №. 11. – С. 6464-6472. <https://doi.org/10.1063/1.1351002>
11. Юсупов Р.А. и др. Квантовый отклик болометра на основе структуры СИНИС с подвешенным абсорбером // Физика твердого тела. – 2020. – Т. 62. – №. 9. – С. 1403-1406. <https://doi.org/10.21883/FTT.2020.09.49761.11H>
12. 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. <https://doi.org/10.1063/1.4986463>
13. Schallenberg T. et al. Shadow mask technology // Thin Solid Films. – 2002. – Т. 412. – №. 1-2. – С. 24-29. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)00307-3](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00307-3)
14. Юсупов Р.А. и др. Изготовление туннельных сверхпроводниковых структур селективным химическим травлением алюминия // Журнал технической физики. – 2025. – Т. 95. – №. 9. – С. 1793-1799. <https://doi.org/10.61011/JTF.2025.09.61240.98-25>

15. Edelman V.S. A dilution microcryostat-insert // Instruments and Experimental Techniques. – 2009. – Т. 52. – №. 2. – С. 301-307. <https://doi.org/10.1134/S002044120902033X>
16. Lemzyakov S.A., Edelman V.S. The use of RuO₂ resistors as broadband low-temperature radiation sensors // Instruments and Experimental Techniques. – 2016. – Т. 59. – №. 4. – С. 621-626. <https://doi.org/10.1134/S0020441216040205>
17. Чекушкин А.М. и др. Криогенный перестраиваемый спектральный фильтр для калибровки высокочувствительных болометров // Журнал радиоэлектроники. – 2017. – №. 1. <http://jre.cplire.ru/jre/jan17/11/text.pdf>
18. Ermakov A.B. et al. A data acquisition system for test and control of superconducting integrated receivers // IEEE transactions on applied superconductivity. – 2001. – Т. 11. – №. 1. – С. 840-843. <https://doi.org/10.1109/77.919475>
19. Лемзяков С.А., Тарасов М.А., Эдельман В.С. Влияние внешних воздействий на низкотемпературную проводимость СИНИС туннельных структур // Успехи физических наук. – 2025. – Т. 195. – №. 7. – С. 759-765 <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.12.039844>
20. Селиверстов А., Тарасов М., Эдельман В. Исследование Андреевской проводимости структур сверхпроводник–изолятор–нормальный металл // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2017. – Т. 151. – №. 4. – С. 752-766. <https://doi.org/10.7868/S0044451017040150>

Для цитирования:

Юсупов Р.А., Гунбина А.А., Фоминский М.Ю., Чекушкин А.М., Эдельман В.С., Тарасов М.А. Субтерагерцовый СИНИС детектор с подвешенным над подложкой поглотителем // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.6.4>