

08

Развитие технологии изготовления NbN НЕВ-смесителей с малым разбросом DC- и RF-параметров для создания матричных приемников терагерцового диапазона

© И.В. Третьяков,¹ Н.С. Каурова,² И.В. Ивашенцева,² Б.М. Воронов,² Г.Н. Гольцман^{2,3}

¹Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
117997 Москва, Россия

²Московский педагогический государственный университет,
119435 Москва, Россия

³Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики,
101000 Москва, Россия
e-mail: ivantretykov@mail.ru

Поступило в Редакцию 16 мая 2024 г.

В окончательной редакции 16 мая 2024 г.

Принято к публикации 16 мая 2024 г.

Экспериментально исследовано влияние параметров процесса магнетронного осаждения тонкой 4–5 нм сверхпроводящей пленки нитрида ниобия NbN и технологии изготовления NbN НЕВ-смесителей на разброс их основных параметров для минимизации в дальнейшем этого разброса. Однородность параметров изготовленных NbN НЕВ-смесителей, кроме оптимизации процесса осаждения NbN-пленки, достигалась за счет подготовки поверхности Si-подложки, а также за счет использования осажденного *in situ* с пленкой NbN слоя Au — контакта с планарной THz-антенной. Изготовленные по оптимизированному маршруту NbN НЕВ-смесители имели практически идентичные $R(T)$ характеристики с разбросом критической температуры и нормального сопротивления не более 0.15 К и $2\ \Omega$ соответственно. Шумовая температура на частоте гетеродина 2.52 THz составляла 800 К с разбросом 150 К от образца к образцу. Шумовая полоса смесителей при $T = 4.5\text{ К}$ составляла в среднем 7 GHz.

Ключевые слова: терагерцовый диапазон, тонкая пленка нитрид ниобия, гетеродинный приемник.

DOI: 10.61011/JTF.2024.07.58346.174-24

Введение

С развитием приборной базы, для спектроскопических наблюдений оказались доступны субмиллиметровый и терагерцовый диапазоны электромагнитного излучения. В этих диапазонах находятся спектральные линии химических соединений важных в медицинских применениях, системах безопасности и контроля, экологии, космологии, планетарной астрономии и других областей, такие, как линии C^+ , CO, CH, CH^+ , CH_3D , HCN, HNC, O_2 , HCl, HF, Cl, OH, OH^+ , MgH, H_2O , O_3 .

Если при наблюдении спектральной линии определяется ее принадлежность к „спектральной подписи“ какого-либо соединения, то, исходя из ее интенсивности, можно судить о распространенности этого соединения, а также о протекающих процессах в наблюдаемой области пространства. Например, линия C^+ ($158\ \mu\text{m}$) является наиболее яркой в субмиллиметровом спектре излучения Млечного Пути, что говорит о высокой распространенности этого элемента в Галактике. По интенсивности этой линии определяются области звездообразования, где окружающие их пылевые скопления сильно разогреваются ультрафиолетовым излучением [1].

Существенный прогресс в области спектроскопии субмиллиметрового диапазона стал возможен благодаря разработке малошумящих смесителей на туннельном переходе сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС) [2,3]. Шумовая температура СИС приемников всего в несколько раз превышает квантовый предел, однако резко увеличивается при частотах гетеродина выше частоты щели для используемого сверхпроводника (700 GHz для Nb). Максимальная частота гетеродина, на которой продемонстрирована работа СИС смесителей на основе пленок NbTiN, составляет 1.4 THz [4]. На частотах выше 1 THz сверхпроводниковый смеситель на горячих электронах — hot electron bolometers (НЕВ) обладает самой высокой чувствительностью и при этом требует низкого уровня мощности гетеродина. Источник гетеродина на частоты выше 1 THz сам по себе является сложным устройством, состоящим из генератора и системы фазовой и частотной стабилизации. Ширина линии гетеродина определяет частотное разрешение приемника. В настоящее время на действующих инструментах в качестве генератора применяют умножители на диодах с барьером Шоттки, квантово-каскадные лазеры, фотопроводящие антенны, а также UTC-диоды (uni-revealing carriers diode). Так, шумовая

температура, измеренная в двухполосном режиме, достигла для НЕВ-смесителей 650 K на частоте гетеродина 2.5 THz [5].

Высокая чувствительность НЕВ-смесителей обеспечила их применение в астрономических проектах Европейского космического агентства: воздушная обсерватория SOFIA с 2.5-метровым зеркалом, способная вести наблюдения на частотах от 1 до 5 THz, [6] и TELIS [2] для работы в диапазоне 1.76–1.86 THz. В космической обсерватории HERSCHEL канал 1.4–1.9 THz также использовал НЕВ-смесители [7]. Среди инструментов SOFIA каналы 1.4, 1.9 и 2.5 THz инструмента GREAT основаны на одиночных волноводных NbN НЕВ-смесителях [8]. Инструмент upGREAT, приемник GREAT, представляет собой уже многопиксельную гетеродинную матрицу [9]. Низкочастотный массив upGREAT (LFA) состоит из волноводных НЕВ 2×7 пикселей, два набора необходимы для разделения поляризаций на 1.9–2.5 THz. Высокочастотный массив upGREAT (HFA) состоит из 7 волноводных НЕВ, настроенных на работу на частоте 4.745 THz. Шестиугольная конфигурация выбрана для максимальной эффективности отображения. LFA с шумовой температурой 600 K по центру частотного диапазона успешно введен в эксплуатацию для наблюдения линии CII 1.905 THz. [6].

Обсерватория DOME A, разрабатываемая Обсерваторией Пурпурной горы Китайской академии наук, может стать наиболее перспективной наземной наблюдательной площадкой для THz-астрономии [10]. Китай планирует построить 5-метровый THz-телескоп DATE5, оснащенный двухдиапазонным гетеродинным приемником на частоты атмосферных окон 0.85 и 1.4 THz на основе НЕВ-смесителей.

Проект „Миллиметр“ [11], создаваемый Астрокосмическим Центром ФИАН им. П.Н. Лебедева, шестой космический телескоп после обсерваторий ISO, SWAS, Odin, Spitzer и Herschel, предоставляющий возможность наблюдать на частотах выше 0.5 THz. „Миллиметр“ будет проводить исследования процессов происхождения и переноса воды во Вселенной — это одна из ключевых научных задач обсерватории [12]. В результате будет исследовано содержание воды в различных космических объектах от галактик до комет, изучены механизмы переноса воды между космическими объектами разных типов и связь межзвездных молекул воды с возникновением жизни на Земле.

Решение научных задач обсерваторией „Миллиметр“ по исследованию происхождения и переноса воды во Вселенной станет возможным благодаря наблюдениям в режиме одиночного зеркала с помощью бортового инструмента „Спектрометр высокого разрешения“. Этот инструмент включает в себя гетеродинные приемники для следующих частотных диапазонов: 500–600 GHz (M1), 750–900 GHz (M2), 1080–1230 GHz (M3), 1300–1400 GHz (M4), 1900 GHz (M5), 2400 GHz (M6), 2600 GHz (M7) [11]. Разбиение по

частотам учитывает текущие технические возможности по созданию приемников.

Для диапазонов M4–M7, работающих на частотах выше 1.3 THz, будут использованы гетеродинные семипиксельные матричные приемники на основе NbN НЕВ-смесителей [11]. Разупорядоченная ультратонкая (3.5–5 nm) сверхпроводниковая пленка NbN используется в качестве чувствительного элемента в НЕВ-смесителях терагерцового диапазона. В настоящее время каждый пиксель гетеродинной матрицы — НЕВ-смеситель — рассматривается как отдельный детектор, требующий индивидуальной настройки по напряжению смещения и необходимой мощности гетеродина. При размерах матрицы хотя бы в десяток пикселей такой индивидуальный подход по настройке матрицы практически не применим. Решением этой проблемы может стать создание унифицированных, не требующих индивидуальной настройки НЕВ-смесителей. Для этого необходимо усовершенствовать технологию осаждения пленок NbN и технологию изготовления NbN НЕВ-смесителей на Si-подложке. Необходимо изготавливать детекторы с максимально близкими $R(T)$ характеристиками и минимальным разбросом нормальных сопротивлений R_{300} при комнатной температуре для идентичных по геометрии детекторов в пределах одной партии.

Кроме того, современные НЕВ как гетеродинные детекторы практически достигли своего предела по чувствительности [13,14], однако они имеют полосу преобразования, не превышающую 3–4 GHz [15]. Дальнейшее уменьшение шумовой температуры, необходимой мощности гетеродина, а также увеличение полосы преобразования NbN НЕВ-смесителя представляет значительный практический интерес. Физические явления, определяющие работу смесителя на эффекте электронного разогрева в сверхпроводнике, теоретически позволяют реализовать смеситель с шумовой температурой, близкой к квантовому пределу, и с полосой промежуточных частот много большей, чем разработанные к настоящему моменту, поскольку время энергетической релаксации возбужденных электронов очень мало, и это теоретически позволяет создать на основе ультратонкой пленки NbN смеситель с полосой преобразования более 10 GHz. Однако быстродействие смесителя определяется временем ухода неравновесных фононов в подложку, поэтому для достижения такого быстродействия необходимо уменьшать это время, а также реализовать условия для диффузионного охлаждения электронной подсистемы пленки.

Использование схемы гетеродинного приема для субмиллиметрового и терагерцового диапазонов частот с высоким спектральным разрешением, кроме решения задач изучения объектов в холодных малоизлучающих частях далекой Вселенной, также дает уникальные возможности в прикладных задачах быстрой неразрушающей идентификации вещества предельно малых концентраций. Кроме того, область применения таких инструментов включает в себя терагерцовую микроскопию,

исследование полупроводниковых излучателей, системы безопасности, медицину и др. Для того чтобы наблюдать узкие рядом стоящие слабые линии (сигналы) от быстропротекающих процессов, необходимы в первую очередь высокочувствительные и быстрые приемники. На частотах выше 1.3 THz только НЕВ-смесители на основе NbN ультратонких пленок обеспечивают необходимую чувствительность.

1. Технология изготовления

Ключевыми аспектами технологии в сравнении с ранее представленными в [5,6], кроме оптимизации процесса осаждения пленки NbN по критической температуре T_c и толщине пленки h , стал специальный процесс подготовки поверхности Si-подложки. Этот процесс позволил получить однородную по толщине пленку

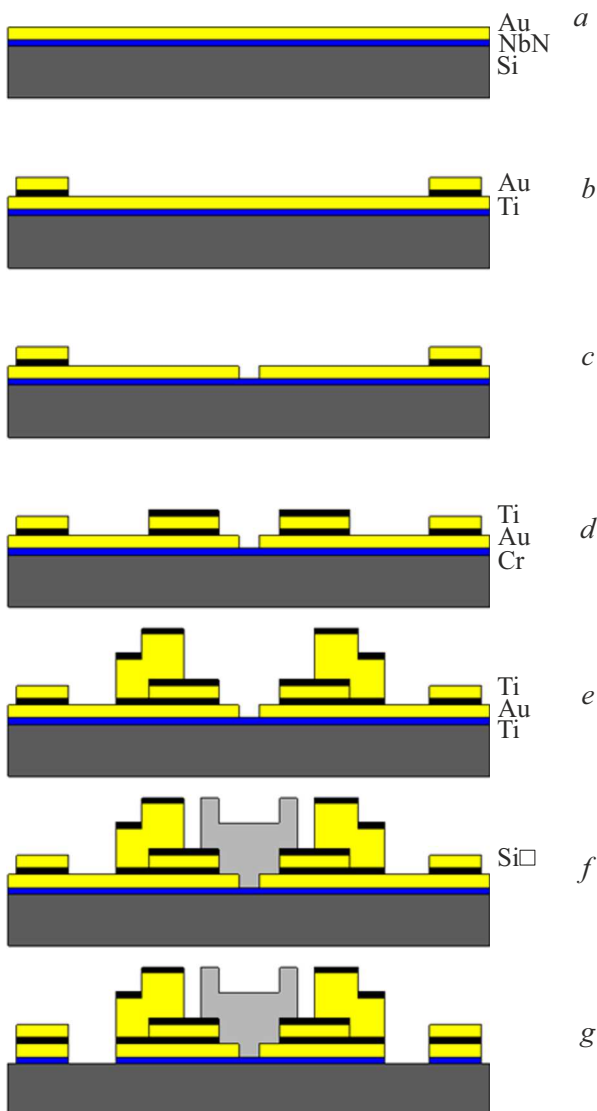


Рис. 1. Этапы технологического процесса изготовления квазиоптического NbN НЕВ-смесителя. Пояснения по содержанию этапов в табл. 1.

NbN. Осаждение *in situ* с пленкой NbN слоя золота Au толщиной 20 nm для формирования внутренней части планарной THz-антенны позволило контролировать контактное сопротивление NbN НЕВ-смесителей с антенной. Перед осаждением NbN пленки Si подложка с ориентацией 100 подвергалась чистке в кислородной плазме в течение 5 min при мощности 150 W и последующем травлении в HF:H₂O (1 : 30) в течение 30 s. Температура подложки при осаждении могла варьироваться от 25 до 350–450°C. Оптимальные значения толщины, критической температуры T_c и плотности критического тока j_c были получены при следующих параметрах процесса осаждения NbN: температура подложки — 400°C, парциальные давления Ar и N₂ — $5 \cdot 10^{-3}$ и $8-12 \cdot 10^{-5}$ mbar соответственно, значения тока и напряжения разряда — 300 mA и 300 V. За осаждением NbN после охлаждения подложки до 300°C следовало *in situ* нанесение слоя Au. Скорость осаждения пленки NbN при заданных характеристиках процесса определялась по измерению зависимости толщины пленок от времени распыления. Так же как и толщина пленок NbN, толщина Au контролировалась по времени процесса осаждения на основе полученных скоростей осаждения. Этапы технологического процесса изготовления квазиоптического NbN НЕВ-смесителя подробно представлены на рис. 1 и в табл. 1.

Типичные размеры болометров или сверхпроводящих мостиков NbN НЕВ-смесителей варьировались в диапазоне 0.1–0.4 μm в длину и 1–4 μm в ширину. SEM-фотография центральной части спиральной антенны представлена на рис. 2.

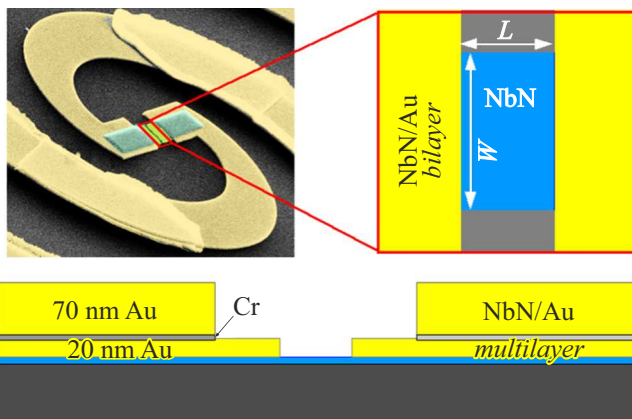
При нормальном сопротивлении на квадрат пленки NbN $R_{\square} = 500-600 \Omega/\square$ (при толщине NbN 3.5–4 nm), отношение длины болометра к его ширине L/W составляло 10 раз. На рис. 2 представлены калорированная SEM-фотография и схематическое изображение сечения NbN НЕВ-смесителя. Смеситель состоит из сверхпроводящей пленки NbN, включенной в Au-порты планарной антенны на диэлектрической подложке Si. В конструкции детектора можно выделить открытую часть NbN пленки между рукавами антенны — NbN мостик с заданными шириной W и длиной L и двухслойную структуру порта антенны NbN/Au. Пленка NbN под и вблизи Au контакта обладает более низкой критической температурой $(T_c)_2$, чем NbN мостик $(T_c)_1$.

2. Измерения на постоянном токе

Измерения на постоянном токе включали в себя измерения зависимости сопротивления NbN НЕВ-смесителя от температуры $R(T)$, критического тока j_c , остаточного сопротивления R_{res} . NbN НЕВ-смеситель устанавливался в медный держатель на конце погружной гелиевой вставки, изготовленной из нержавеющей стали, и погружался в сосуд Дьюара СТГ40. Сопротивление NbN НЕВ-смесителя измерялось по четырехточечной схеме

Таблица 1. Этапы технологического процесса изготовления квазиоптического NbN НЕВ-смесителя, показанные на рис. 1

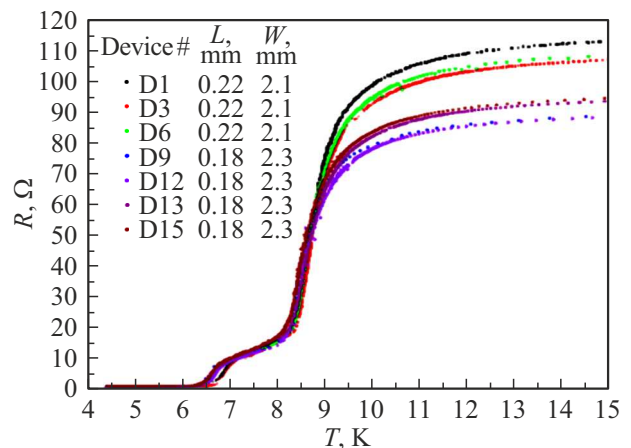
Этап	Содержание этапа
<i>a</i>	<i>In situ</i> нанесение двухслойной структуры NbN-Au методом реактивного магнетронного распыления
<i>b</i>	Изготовление знаков совмещения под фото- и электронную литографию
<i>c</i>	Формирование зазора в Au методом электронной литографии, ионного и химического травления
<i>d</i>	Формирование внутренней части спиральной антенны методом электронной литографии
<i>e</i>	Формирование внешней части спиральной антенны методом фотолитографии
<i>f</i>	Формирование защитной маски SiO под ионное и плазмохимическое травление NbN-Au по полю
<i>g</i>	Ионное и плазмохимическое травление NbN-Au по полю

**Рис. 2.** Внешний вид NbN НЕВ-смесителя, встроенного в планарную спиральную антенну. Схема слоев, составляющих внутреннюю часть смесителя, интерфейсы пленки NbN и Au планарной антенны.

с использованием прецизионного малощумящего стабильного источника тока и микровольтметра Solartron. Использование четырехточечной схемы позволяет исключить из измерений сопротивление подводящих проводов. Температура измерялась калиброванным диодным кремниевым термометром, закрепленным на держателе максимально близко к образцу, таким образом, что его температура равнялась температуре образца.

Применение чистки поверхности Si-подложки позволило нам изготовить образцы с разбросом $(T_c)_1$ не более 0.15 К. Для сравнения технология *in situ* без специальной подготовки подложки, представленная в работе, дает разброс $(T_c)_1$ порядка 1 К. На рис. 3 представлено семейство $R(T)$ характеристик, изготовленных по оптимизированному маршруту NbN НЕВ-смесителей. Полученная близость $(T_c)_1$ для изготовленного набора

говорит о возможности их работы, как единого прямого детектора при одной общей физической температуре, либо как гетеродинного детектора при одинаковой мощности гетеродина на входе каждого пикселя. В ранних работах пленка NbN под металлом Au-портов антенны подвергалась чистке в Ar- и O₂-плазме [5]. Этот процесс позволил минимизировать контактное сопротивление между NbN и Au, а также свести разброс нормальных сопротивлений детекторов с заданным L/W к минимальной величине не более 2 Ω. В настоящей работе вместо чистки контактов мы используем осажденное *in situ*

**Рис. 3.** $R(T)$ характеристики НЕВ-смесителей, изготовленных в технологии *in situ* с Au на подготовленной Si-подложке. Сверхпроводниковый переход в районе 8.5 К принадлежит пленке NbN в центре мостика между интерфейсами. Второй переход принадлежит NbN-пленке под *in situ* Au-антенны. Сопротивление после первого перехода говорит о наличии двух областей подавленной сверхпроводимости в NbN-мостике вблизи нормального металла (*in situ* Au) антенны, длина этих областей составляет порядка длины когерентности при заданной T .

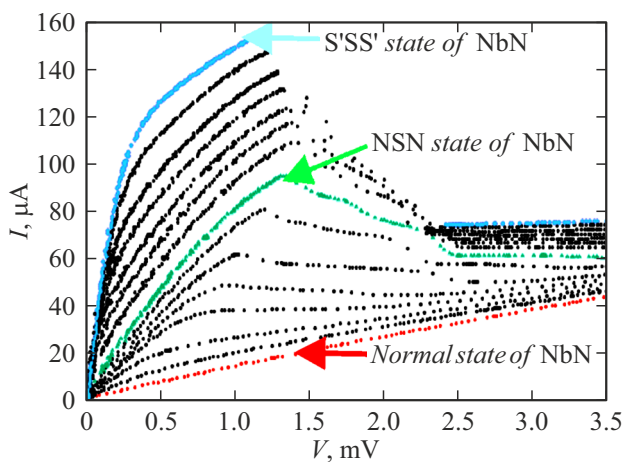


Рис. 4. Эволюции ВАХ NbN НЕВ-смесителя при переходе из S'SS'-состояния, когда NbN-мостик и NbN/Au-двухслойный контакт находятся в сверхпроводящем состоянии, в NSN-состояние, когда NbN-мостик еще сверхпроводит, а NbN/Au-двухслойные контакты уже находятся в нормальном состоянии.

с пленкой NbN слоя Au толщиной 20 nm — контакт с планарной THz-антенной. Качество электрического контакта между NbN и Au объясняет появление второго перехода на $R(T)$ за счет проявления эффекта близости. Сопротивление NbN НЕВ при $(T_c)_1 < T < (T_c)_2$ встроено в сверхпроводящий NbN мостик и обусловлено процессом конверсии тока нормальных электронов на длине порядка длины когерентности ξ в ток куперовских пар, его величина определяется W , ξ и поверхностным сопротивлением пленки NbN при температуре T немного выше $(T_c)_1$.

Величина $(T_c)_2$ НЕВ-смесителя косвенно говорит о толщине осажденной пленки NbN. Процесс конверсии носителей заряда, кроме возникновения дополнительного сопротивления, приводит к координатной зависимости параметра порядка при T вблизи $(T_c)_1$, что может приводить к размытию сверхпроводникового перехода NbN-мостика, увеличению $\Delta(T_c)_1$, и в результате уменьшает dR/dT -детектора. Так, для НЕВ, изготовленных без чистки NbN под металлом Ti/Au-портов антенны, второй переход отсутствовал и $\Delta(T_c)_1$ была 0.2–0.3 K в сравнении с $\Delta(T_c)_1$ 1.5–2 K для образцов, изготовленных с чисткой и в технологии *in situ*. При этом образцы, изготовленные без чистки, обладали высоким контактным сопротивлением порядка 25–30 Ω , и поэтому обладали существенно более высокой шумовой температурой.

На рис. 4 приведено семейство ВАХ детектора 2026_2#9 для набора температур подложки от 5 K до $T > (T_c)_1$ NbN НЕВ-смесителя. Рис. 4 также можно интерпретировать как процесс эволюции IV характеристики НЕВ при переходе из S'SS'-состояния, когда NbN-мостик и NbN/Au-слой антенны находятся в сверхпроводящем состоянии, в NSN-состояние, в котором NbN-мостик сверхпроводит, а NbN/Au-слой антенны находится в нормальном состоянии [8].

3. Измерения шумовой температуры

Измерения шумовой температуры проводилось на частоте гетеродина 2.52 THz по методике „холодного“/„горячего“ (77 K/300 K) абсолютно черного тела. В качестве источника гетеродинного излучения использовался субмиллиметровый лазер на парах воды, работающий на частоте 2.52 THz. На входе смесителя мощность излучения гетеродина регулировалась при помощи моторизованного квазиоптического поляризатора, образованного металлической сеткой с ячейкой $25 \times 500 \mu\text{m}$. При помощи делителя луча из майлара толщиной $3.5 \mu\text{m}$ излучение гетеродина совмещалось с излучением абсолютно черного тела. В качестве абсолютно черного тела использовался „Экосорб“. Коэффициент пропускания делителя луча составлял 97% на частоте 2.52 THz.

Излучение заводилось внутрь гелиевого криостата через окно с апертурой 50 mm, изготовленное из HDPE толщиной 0.2 mm. Коэффициент пропускания окна составлял 80%. Пройдя ИК фильтр из Zitex 106, закрепленный на азотном экране криостата, и полосопропускающий ИК сеточный фильтр на гелиевом экране, излучение падало на эллиптическую кремниевую линзу. Сеточный фильтр был изготовлен из Ni-сетки с периодом 100 μm . Суммарный коэффициент пропускания системы фильтров составлял 90%. Используемая в установке эллиптическая линза не имела просветляющего покрытия, поэтому из-за разницы коэффициентов преломления кремний–вакуум вносила дополнительные потери на отражение порядка 25%. С помощью эллиптической линзы диаметром 10 mm излучение собиралось в пятно Эйри на планарной антенне смесителя. Линза со смесителем закреплялась в смесительном блоке, термически связанным с холодной платой гелиевого криостата. Смесительный блок был изготовлен из бескислородной меди. Планарная антенна смесителя плавно переходила в 50-омную копланарную линию. Сигнал на промежуточной частоте (ПЧ) снимался при помощи гибкой 50-омной копланарной линии с SMA высокочастотным разъемом на выходе. Далее сигнал на ПЧ поступал на адаптер смещения с полосой 1–10 GHz. Адаптер использовался для смещения образца по постоянному току в режиме генератора напряжения и передачи сигнала ПЧ на вход охлаждаемого усилителя, шумовая температура в полосе 1–7 GHz не превышала 10 K. Сигнал ПЧ выводился из криостата по коаксиальной линии и дополнительно усиливался каскадом, находящимся при комнатной температуре. Для вторичного усиления также использовались два вида усилителей, оптимизированные на разные частотные диапазоны в зависимости от решаемой задачи. После первого „теплого“ усилителя сигнал проходил через перестраиваемый полосовой фильтр с полосой 50 MHz и шириной перестройки 1–10 GHz. Выходная мощность ПЧ измерялась с помощью квадратичного полупроводникового детектора с вольт-ваттной чувствительностью 1000 V/W, сигнал с детектора регистрировался микровольтметром и обрабатывался по

алгоритму быстрого преобразования Фурье. Излучение холодной нагрузки модулировалось нагрузкой комнатной температуры на частоте 12.5 Hz. Для высоких температур и низких частот, в приближении Рэля–Джинса, когда спектральная плотность излучения АЧТ прямо пропорциональна его физической температуре, шумовая температура вычисляется через Y -фактор по формуле

$$T_n = (T_{hot} + T_{cold} \cdot Y)/(Y - 1),$$

где T_{hot} и T_{cold} — температуры горячей и холодной нагрузок соответственно, через Y обозначается Y -фактор, равный отношению выходной мощности смесителя с горячей нагрузкой на входе к выходной мощности смесителя при холодной нагрузке. Y -фактор в случае модуляционной методики измерения определяется из спектра фурье-преобразования, как

$$Y = (U_- + K \cdot U)/(U_- - K \cdot U),$$

где U_- — значение напряжения на детекторе на нулевой частоте, U — напряжение на детекторе на частоте модуляции, коэффициент K определяется формой сигнала. При прямоугольных импульсах, т. е. когда апертура смесителя много меньше лопасти модулятора, $K = \pi/4$. В более общем случае, когда скважность импульсов 0.5, коэффициент K определяется как отношение амплитуды первой гармоники ряда Фурье к амплитуде импульсов.

Мощность теплового излучения при измерениях шумовой температуры, подаваемая на вход смесителя от нагрузки, являющейся абсолютно черным телом, в приближении Рэля–Джинса пропорциональна температуре нагрузки и входной полосе приемника:

$$P_{load} = k_B \cdot T \cdot \Delta F,$$

где k_B — постоянная Больцмана, T — температура нагрузки, ΔF — входная полоса приемника. Данное тепловое излучение, если ΔF не ограничена специальным образом, может вызывать болометрический отклик смесителя при смене „горячей“ и „холодной“ нагрузок на входе. Болометрический отклик приводит к сдвигу рабочей точки смесителя на ВАХ синхронно со сменой нагрузок на входе, что, в свою очередь, вызывает изменение коэффициента преобразования, и непропорциональное температуре нагрузки изменение выходного шума смесителя. Этот эффект называют эффектом прямого детектирования. При измерениях шумовой температуры смесителя, данный эффект оказывает негативное влияние, так как искажает измеряемый Y -фактор. Использование в установке охлаждаемого узкополосного фильтра позволило практически избавиться от прямого детектирования и снизить его влияние на результаты измерения шумовой температуры до уровня менее 5%.

Как упоминалось выше, оптический тракт смесителя состоит из полиэтиленового окна, широкополосного ИК фильтра Zitex 106, узкополосного Ni сеточного фильтра и эллиптической кремниевой линзы. Данные элементы

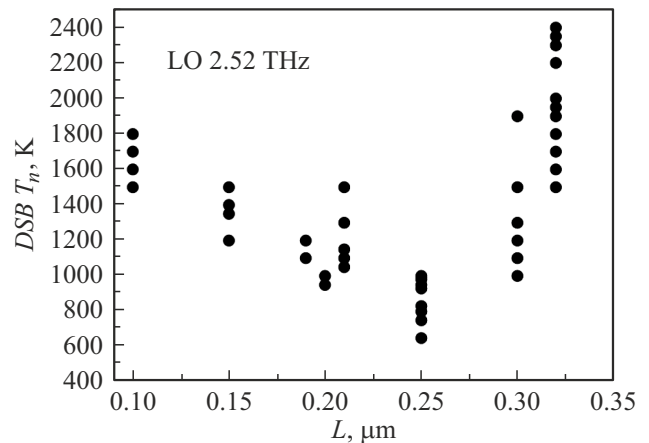


Рис. 5. Зависимость шумовой температуры NbN НЕВ-смесителя от длины NbN-мостика, измеренная на частоте гетеродина 2.52 THz. Смесители с длиной мостика 0.25 μm были изготовлены по оптимизированному технологическому маршруту. Разброс значений измеренной шумовой температуры при среднем значении 800 К не превышал 150 К.

тракта обладают потерями L (раз), при этом эквивалентная шумовая температура компонента с потерями L при физической температуре T может быть записана как:

$$T_{equiv} = T_{CW}(T) \cdot (L - 1),$$

где $T_{CW}(T)$ — эквивалентная температура абсолютно черного тела, находящегося при температуре T , рассчитанная по теореме Каллена–Велтона [16]:

$$T_{CW}(T) = (hf/k_B)/(\exp(hf/k_B T) - 1) + hf/2k_B,$$

где h — постоянная Планка, k_B — постоянная Больцмана, T — физическая температура, f — частота гетеродина. При относительно низких частотах f и высоких температурах T , $T_{CW} \approx T$, и выражение для эквивалентной шумовой температуры можно записать в виде $T_{equiv} = T \cdot (L - 1)$. В табл. 2 представлены измеренные значения коэффициентов потерь, физических температур и рассчитанные значения эквивалентных шумовых температур элементов оптического тракта смесителя.

Паспортное значение шумовой температуры холодного усилителя при температуре 15 К составляет 8–10 К в рабочей полосе усилителя. Шумовая температура всего холодного тракта ПЧ, включая магнитный вентиль с 50-омной нагрузкой, адаптер смещения и усилитель, составляет порядка 35 К. С учетом коэффициента усиления холодного усилителя 35 dB, шумовой температурой тракта ПЧ можно пренебречь.

Таким образом, общие потери оптического тракта составляли 3.17 dB с эквивалентной шумовой температурой 96.6 К.

Для оценки собственных потерь преобразования смесителя в процессе эксперимента измерялся U -фактор. U -фактор численно равен отношению выходных шумов,

Таблица 2. Значения коэффициентов потерь, физических температур и эквивалентных шумовых температур элементов оптического тракта смесителя

Компонент оптического тракта	Коэффициент потерь L , dB	Физическая температура T , К	Шумовая температура T_{equiv} , К
Делитель луча	0.3	300	21.5
Окно криостата (HDPE)	0.9	300	69.1
ИК фильтр Zitex 106	0.22	77	4
Сеточный полосопропускающий фильтр	0.25	4.2	0.25
Кремниевая линза	1.5	4.2	1.73

когда смеситель находится в рабочей точке с 300 К нагрузкой на входе, к выходным шумам, когда смеситель находится в сверхпроводящем состоянии, в этом случае усилитель нагружен на 50-омную нагрузку вентиля. Выражение для U -фактора можно записать так:

$$U = (T_{out} + T_{IF} + T_{load}) / (T_{load} + T_{IF}),$$

где $T_{out} = (T_n)_{mix} + T_{300}^* \eta$, $(T_n)_{mix}$ — собственные шумы, η — полные потери преобразования смесителя. T_{IF} — шумовая температура „холодного“ усилителя, T_{load} — температура 50-омной нагрузки. Из выражения для U -фактора можно выразить внутреннюю шумовую температуру смесителя:

$$(T_n)_{mix} = U(T_{load} + T_{IF}) - (T_{IF} + T_{load} + T_{300}^* \eta).$$

Полные потери преобразования смесителя рассчитываются как отношение рассчитанной через U -фактор к измеренной шумовой температуре смесителя

$$\eta = (T_n)_{mix} / T_{res}.$$

50-омная нагрузка циркулятора находилась при температуре $T_{load} = 4.2$ К, шумовая температура „холодного“ усилителя считалась равной $T_{IF} = 10$ К. Значение $T_{res} = 800$ К и U -фактор, равный 3, были получены в эксперименте со смесителем 1178/1 #21 на частоте гетеродина 2.5 THz. Таким образом, полные потери преобразования η смесителя 1178/1 #21 составляют 16.5 dB. Учтя потери в оптике 3.17 dB, собственные потери преобразования составляют 13.3 dB.

Результаты исследования изготовленных NbN НЕВ-смесителей при температуре 4.5 К в состоянии S'SS' демонстрируют шумовую температуру на частоте гетеродина 2.52 THz, T_n 800 К с разбросом 150 К, при этом шумовая полоса смесителей составляла 7 GHz. На рис. 5 представлена экспериментальная зависимость шумовой температуры *in situ* смесителя от ширины его NbN-мостика. Довольно большой разброс по шумовой температуре, порядка 1000 К, для образцов из одной партии, изготовленных по неоптимизированному

маршруту осаждения пленки и изготовления смесителей (с одинаковой шириной NbN-мостика), можно объяснить неоднородностью толщины пленки NbN по подложке, а также влиянием технологических процессов на пленку NbN в процессе изготовления смесителя. Также из рис. 5 видно, что зависимость имеет ярко выраженный минимум. В отличие от *ex situ* смесителей, при уменьшении ширины мостика NbN шумовая температура исследуемых смесителей уменьшается. Это продолжается до ширины мостика 0.25 μm , при этой длине минимальная шумовая температура смесителя составляла 600 К, эта партия была изготовлена по оптимизированной технологии. Ход зависимости шумовой температуры в области ширин NbN-мостика более 2 μm можно объяснить с точки зрения теории однородного разогрева в сверхпроводнике. Поскольку коэффициент теплоотвода G , входящий в выражения для шума Джонсона и шума термодинамических флуктуаций, квадратично зависит от ширины NbN-мостика, ее уменьшение должно приводить к уменьшению шумовой температуры смесителя, что и видно из правой части графика. Из этого можно сделать вывод, что ограничений по шумовой температуре, связанных с контактным сопротивлением у *in situ* смесителей нет.

При дальнейшем уменьшении ширины мостика NbN и, как следствие, его длины, шумовая температура смесителя начинает расти. Исходя из представлений теории, шумовая температура должна уменьшаться с уменьшением ширины и, как следствие, объема мостика по закону, близкому к представленному на правой части графика. Резкое увеличение шумовой температуры при достижении ширины мостика менее 2 μm не описывается в рамках теории однородного разогрева электронов в сверхпроводниках. Возможно, причиной роста шумовой температуры является увеличение контактного сопротивления между мостиком и портами планарной антенны за счет уменьшения площади контакта. Данный результат можно использовать как один из критериев качества контактов в технологии *in situ* изготовления НЕВ-смесителей. Второе, более вероятное, объяснение за-

ключается в том, что длина мостика при его ширине приближается к диффузионной длине в NbN. При этом электрон, поглотив высокоэнергичный фотон без взаимодействия с другими электронами, уходит в массивный металлический контакт без изменения электронной температуры в мостике. При этом возбужденный электрон не участвует в процессе отклика смесителя на излучение сигнала. Если это предположение верно, то, кроме потерь в полезном сигнале, работа дополнительного диффузионного канала охлаждения электронной подсистемы должна оказать влияние и на необходимую мощность гетеродина. Так или иначе, данный вопрос представляет научный интерес и требует дальнейшего целенаправленного и более подробного изучения.

Заключение

В работе были экспериментально определены оптимальные параметры осаждения пленки NbN для получения пленок толщиной 4–5 nm и режим чистки Si-подложки. Осаждение слоя Au *in situ* с осаждением пленки NbN обеспечило стабильный и низкоомный электрический контакт. Об отсутствии барьера на границе NbN/Au говорит появление второго сверхпроводникового перехода в зависимости $R(T)$ NbN НЕВ-смесителей, кроме того, NbN НЕВ-смесители, изготовленные из одной пленки NbN, имели практически идентичные $R(T)$ характеристики. Это обеспечивает одинаковую необходимую мощность гетеродина и напряжение смещения для образцов с идентичными размерами L и W . Оптимальные размеры L и W мостика NbN по шумовой температуре составили 0.25 и 2.5 μm . Шумовая температура таких NbN НЕВ-смесителей, измеренная на частоте гетеродина 2.52 THz, имела среднее значение 800 K с разбросом 150 K. Шумовая полоса смесителей при $T = 4.5$ K составляла 7 GHz. Собственные потери преобразования составляют 13.3 dB на промежуточной частоте 1.5 GHz.

Финансирование работы

Работы по изготовлению и тестированию характеристик НЕВ смесителей выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00187. Обзор литературы по предмету исследования выполнен в рамках проекта по участию университетов в развитии высокотехнологического производства при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение от 06.04.2022 № 075-11-2022-026).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] H.M. Pickett, R.L. Poynter, E.A. Cohen, M.L. Delitsky, J.C. Pearson, H.S.P. Muller. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **60**, 883 (1998). DOI: 10.1016/S0022-4073(98)00091-0
- [2] P.L. Richards, T.M. Shen, R.E. Harris, F.L. Lloyd. *Appl. Phys. Lett.*, **34**, 345 (1979). DOI: 10.1063/1.90782
- [3] G.J. Dolan, T.G. Phillips, D.P. Woody. *Appl. Phys. Lett.*, **34**, 347 (1979). DOI: 10.1063/1.90783
- [4] A. Karpov, D. Miller, J.A. Stern, B. Bumbl, H.G. LeDuc, J. Zmuidzinis. *Proc. 19th int. Symp. on Space Terahertz Technology* (Groningen, The Netherlands, 2008), p. 68.
- [5] I. Tretyakov, S. Ryabchun, M. Finkel, A. Maslennikova, N. Kaurova, A. Lobastova, B. Voronov, G. Gol'tsman. *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 033507 (2011). DOI: 10.1063/1.3544050
- [6] *SOFIA — Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy*. <http://www.sofia.usra.edu>.
- [7] Th. de Graauw, F.P. Helmich, T.G. Phillips, J. Stutzki, E. Caux, N.D. Whyborn, P. Dieleman, P.R. Roelfsema, H. Aarts, R. Assendorp, R. Bachiller, W. Baechtold, A. Barcia, D.A. Beintema, V. Belitsky, A.O. Benz, R. Bieber, A. Boogert, C. Borys, B. Bumble, P. Caïs, M. Caris, P. Cerulli-Irelli, G. Chattopadhyay, S. Cherednichenko, M. Ciechanowicz, O. Coeur-Joly, C. Comito, A. Cros, A. de Jonge, G. de Lange, B. Delforges, Y. Delorme, T. den Boggende, J.-M. Desbat, C. Diez-González, A.M. Di Giorgio, L. Dubbeldam, K. Edwards, M. Eggens, N. Erickson, J. Evers, M. Fich, T. Finn, B. Franke, T. Gaier, C. Gal, J.R. Gao, J.-D. Gallego, S. Gauffre, J.J. Gill, S. Glenz, H. Golstein, H. Goulooze, T. Günsing, R. Güsten, P. Hartogh, W.A. Hatch, R. Higgins, E.C. Honingh, R. Huisman, B.D. Jackson, H. Jacobs, K. Jacobs, C. Jarchow, H. Javadi, W. Jellema, M. Justen, A. Karpov, C. Kasemann, J. Kawamura, G. Keizer, D. Kester, T.M. Klapwijk, Th. Klein, E. Kollberg, J. Kooi, P.-P. Kooiman, B. Kopf, M. Krause, J.-M. Krieg, C. Kramer, B. Kruijenga, T. Kuhn, W. Laauwen, R. Lai, B. Larsson, H.G. Leduc, C. Leinz, R.H. Lin, R. Liseau, G.S. Liu, A. Loose, I. López-Fernandez, S. Lord, W. Luinge, A. Marston, J. Martín-Pintado, A. Maestrini, F.W. Maiwald, C. McCoe, I. Mehdi, A. Megej, M. Melchior, L. Meinsma, H. Merkel, M. Michalska, C. Monstein, D. Moratschke, P. Morris, H. Muller, J.A. Murphy, A. Naber, E. Natale, W. Nowosielski, F. Nuzzolo, M. Olberg, M. Olbrich, R. Orfei, P. Orleanski, V. Ossenkopf, T. Peacock, J.C. Pearson, I. Peron, S. Phillip-May, L. Piazza, P. Planesas, M. Rataj, L. Ravera, C. Risacher, M. Salez, L.A. Samoska, P. Saraceno, R. Schieder, E. Schlecht, F. Schlöder, F. Schmü lling, M. Schultz, K. Schuster, O. Siebertz, H. Smit, R. Szczerba, R. Shipman, E. Steinmetz, J.A. Stern, M. Stokroos, R. Teipen, D. Teyssier, T. Tils, N. Trappe, C. van Baaren, B.-J. van Leeuwen, H. van de Stadt, H. Visser, K.J. Wildeman, C.K. Wafelbakker, J.S. Ward, P. Wesselius, W. Wild, S. Wulff, H.-J. Wunsch, X. Tielens, P. Zaal, H. Zirath, J. Zmuidzinis, F. Zwart. *A&A*, **518** (L6), 7 (2010). DOI: 10.1051/0004-6361/201014698
- [8] P. Putz, C.E. Honingh, K. Jacobs, M. Justen, M. Schultz, J. Stutzki. *A&A*, **542** (L2), 5 (2012). DOI: 10.1051/0004-6361/201218916

- [9] C. Risacher, R. Gusten, J. Stutzki, H.W. Hubers, D. Buchel, U.U. Graf, S. Heyminck, C.E. Honingh, K. Jacobs, B. Klein, T. Klein, C. Leinz, P. Putz, N. Reyes, O. Ricken, H.J. Wunsch, P.M. Fusco, S.W. Rosner. *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, **6** (2), 199 (2016).
DOI: 10.1109/TTHZ.2015.2508005
- [10] S.-C. Shi, S. Paine, Q.-J. Yao, Z.-H. Lin, X.-X. Li, W.-Yi. Duan, H. Matsuo, Q. Zhang, Ji Yang, M.C.B. Ashley, Zh. Shang, Zh.-W. Hu. *Nature Astronomy*, **1** (1), (2017).
DOI: 10.1038/s41550-016-0001
- [11] Проект Миллиметррон.
<http://www.asc.rssi.ru/millimetron/rus/millim.htm>
- [12] Н.С. Кардашев, И.Д. Новиков, В.Н. Лукаш, С.В. Пилипенко, Е.В. Михеева, Д.В. Бисикало, Д.З. Вибе, А.Г. Дорошкевич, А.В. Засов, И.И. Зинченко, П.Б. Иванов, В.И. Костенко, Т.И. Ларченкова, С.Ф. Лихачев, И.Ф. Малов, В.М. Малофеев, А.С. Позаненко, А.В. Смирнов, А.М. Соболев, А.М. Черепашук, Ю.А. Шекинов. *УФН*, **184**, 1319 (2014).
DOI: 10.3367/UFNe.0184.201412
- [13] I. Tretyakov, S. Ryabchun, M. Finkel, A. Maslennikova, N. Kaurova, A. Lobastova, B. Voronov, G. Gol'tsman. *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 033507 (2011).
DOI: 10.1063/1.3544050
- [14] M. Shcherbatenko, I. Tretyakov, Yu. Lobanov, S.N. Maslennikov, N. Kaurova, M. Finkel, B. Voronov, G. Goltsman, T.M. Klapwijk. *Appl. Phys. Lett.*, **109**, 132602 (2016).
DOI: 10.1063/1.4963691
- [15] J.J.A. Baselmans, M. Hajenius, J.R. Gao, T.M. Klapwijk, P.A.J. de Korte, B. Voronov, G. Gol'tsman. *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 1958 (2004). DOI: 10.1063/1.1667012
- [16] H.B. Callen, Th.A. Welton. *Phys. Rev.*, **83**, 34 (1951).
DOI: 10.1103/PhysRev.83.34