08

СИНИС-детектор sub-THz-диапазона из ниобия и алюминия

© М.А. Маркина,[1,2] М.А. Тарасов,[1] Р.А. Юсупов,[1] Ф.В. Хан,[1,3] М.Ю. Фоминский,[1] А.М. Чекушкин[1]

[1]Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009 Москва, Россия
[2]Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“,
101000 Москва, Россия
[3]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия
e-mail: markina_ma@hitech.cplire.ru

Поступило в Редакцию 12 мая 2026 г.
В окончательной редакции 12 мая 2026 г.
Принято к публикации 12 мая 2026 г.

Разработана технология изготовления и предложена конструкция детекторов субтерагерцового диапазона на основе структур сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник (СИНИС) для работы при температурах 1.5–6.0 K, где в качестве сверхпроводящего материала используется ниобий ($T_c = 9.2$ K) а в качестве нормального металла — алюминий ($T_c = 1.2$ K). Предложена технология изготовления СИНИС-детектора с туннельными переходами из ниобия и алюминия, основанная на модернизированной технологии SNEAP (от англ. — Selective Niobium Etching and Anodization Process) с жертвенным слоем SiO_2. Предложен дизайн приемной структуры, где СИНИС-элемент $Nb/AlO_x/Al/AlO_x/Nb$ интегрирован в логопериодическую антенну из Nb или Au диапазона 50–500 GHz. Проведено численное моделирование разрабатываемой структуры. По результатам моделирования приемная структура функционирует на нескольких резонансных частотах, а материал антенны (Nb или Au) оказывает незначительное влияние на спектральные характеристики приемной структуры. Мощность, эквивалентная шуму детектора на основе переходов сверхпроводник–изолятор–нормальный металл из Nb и Al с алюминиевым абсорбером, оценивается на уровне 10^{-16} W/$\sqrt{\text{Hz}}$ при температуре 1.5 K.

Ключевые слова: туннельный переход, СИНИС-детектор, амплитудно-частотная характеристика, SNEAP, приемная структура, терагерцовый диапазон.

DOI: 10.61011/JTF.2026.09.63503.169-26

Введение

На сегодняшний день устройства и технологии субтерагерцового (sub-THz) диапазона активно используются в самых разных областях — от фундаментальной науки до прикладных задач. Среди них можно выделить исследования в радиоастрономии (изучение холодных объектов Вселенной [1], реликтового излучения [2], межзвездной среды [3], эффекта Сюняева–Зельдовича [4] и других астрофизических явлений [5–8]), развитие медицинских технологий (например, неинвазивная диагностика [9]), обеспечение безопасности (борьба с терроризмом [10,11], контроль качества продукции), оборонные разработки (защищенные каналы связи, обнаружение мин [12] и летательных аппаратов [13]), а также искусствоведение (анализ материалов и подлинности произведений [14]). Однако sub-THz-диапазон остается одним из наиболее слабо изученных направлений для создания приборов, ориентированных на лабораторные и практические цели [15]. В связи с этим актуальной является разработка как источников, так и приемников излучения данного диапазона. Важной практической задачей здесь является создание высокочувствительных детекторов, пригодных для радиоастрономических наблюдений. Перспективным типом детекторов для решения таких задач может быть приемное устройство на основе структуры сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник (СИНИС) [16], интегрированной в планарные антенны различных типов или матрицы антенн для расширения динамического диапазона приемной ячейки [17]. Для отработки технологии, а также для первичной оценки приемных характеристик таких детекторов наиболее удобным вариантом является использование одиночных планарных антенн.

В настоящее время для работы на терагерцовых частотах чаще всего используются детекторы на основе СИНИС-структур $Al/AlO_x/Al+Fe/AlO_x/Al$, где антенна выполнена из хорошо проводящего материала золота. Рабочая температура данных приемных структур ниже критической температуры алюминия 1.2 K. При охлаждении до 300 mK МЭШ (мощность, эквивалентная шуму) этих детекторов достигает значений 10^{-17}–10^{-18} W/$\sqrt{\text{Hz}}$ [18]. Однако поддержание столь низких температур требует применения сложного криогенного оборудования. К тому же при наземных наблюдениях такая высокая чувствительность оказывается излишней из-за влияния атмосферного водяного пара, который поглощает и переизлучает принимаемый сигнал. Для решения этой задачи предложено использовать детекторы на основе СИНИС-структур

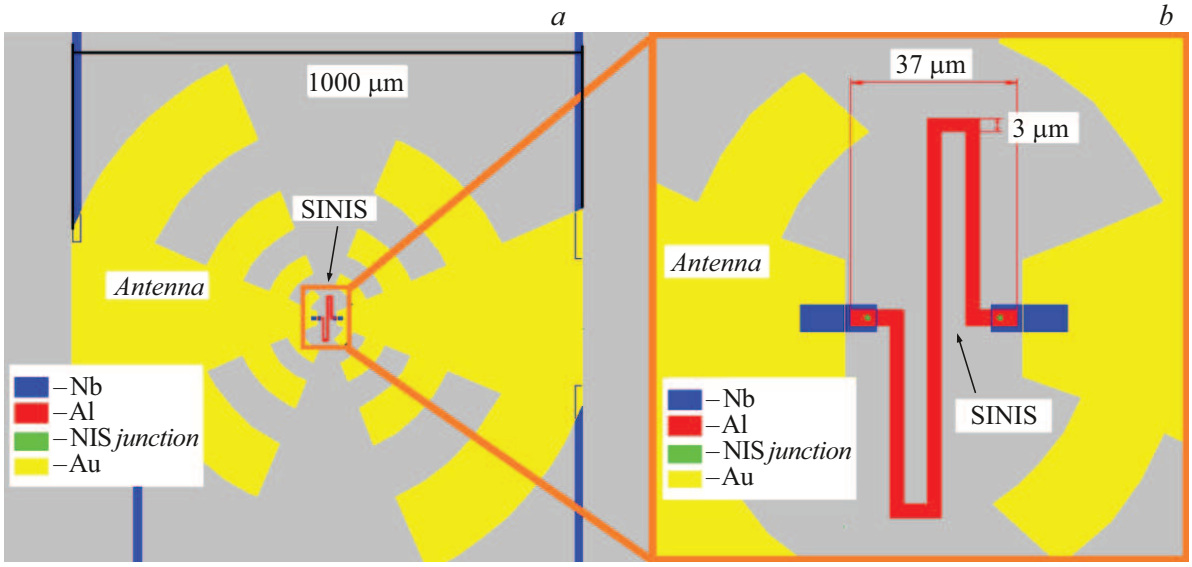

Рис. 1. *a* — топология СИНИС-детектора с антенной из Au. Желтым цветом показана антенна, в центре нее интегрированная СИНИС-структура с узким абсорбером из Al (показан красным цветом); *b* — топология интегрированной СИНИС-структуры. Красным цветом показан узкий абсорбер в виде меандра, зеленым — области СИН переходов из Nb и Al, синим показаны области ниобиевых верхних подводящих электродов структуры. Желтым показана антенна из Au.

$Nb/AlO_x/Al/AlO_x/Nb$. Здесь в роли сверхпроводника выступают ниобий (Nb), а алюминий используется в качестве нормального металла. Основное преимущество таких приемных структур — возможность работы при более высоких температурах (от 1.5 до 6.0 K) по сравнению с традиционными СИНИС-детекторами, где алюминий используют в качестве сверхпроводника (ниже 0.6 K). При этом, согласно предварительным оценкам [19], их чувствительности будет вполне достаточно для проведения наземных измерений. МЭШ (мощность, эквивалентная шуму) приемной структуры на СИН-переходах из Nb и Al с алюминиевым абсорбером при температуре 1.5 K оценивается на уровне $10^{-16}\,W/\sqrt{Hz}$ [20], где определяющим шумом является шум теплых усилителей на уровне $10^{-8}\,V/\sqrt{Hz}$. В настоящей работе разработан дизайн и описана технология изготовления приемной структуры на основе СИНИС-элементов $Nb/AlO_x/Al/AlO_x/Nb$, интегрированных в широкополосную логопериодическую антенну с двумя вариантами материалов — ниобий (Nb), который при рабочих температурах детектора перейдет в сверхпроводящее состояние, и золото (Au), которое является нормальным металлом с хорошей проводимостью.

Требования к криогенному оборудованию у таких приемников ниже, чем у традиционных СИНИС-детекторов с алюминием, где рабочая температура ниже 0.6 K. Такие структуры могут быть полезны там, где более сложное криогенное оборудование сложно применимо, например, для изучения космического излучения на аэростатных миссиях.

1. Разработка дизайна приемной структуры

Основной целью исследования является разработка конструкции и технологии изготовления приемных систем, в которых чувствительным элементом является СИНИС-структура из Nb и Al. Для согласования с внешним излучением СИНИС-детектор устанавливают в планарные антенны с необходимыми частотными параметрами.

В решении задачи корректного согласования с импедансом приемной антенны ключевую роль играет активная составляющая импеданса СИНИС-детектора, а именно резистивное сопротивление металлического поглотителя. Что касается реактивной составляющей, обусловленной емкостью туннельных переходов, то ее влияние на рабочих частотах антенн является незначительным. Для повышения эффективности приемника уменьшают объем нормального металла в абсорбере — изготавливают тонкие пленки толщиной порядка 10–50 nm при длине 30–100 μm и ширине от 100 nm до 5 μm. В итоге сопротивление такого элемента при рабочих температурах детектора может находиться в пределах 10–70 Ω , что достаточно для того, чтобы согласовать СИНИС-структуру с планарными антеннами.

Для первой реализации было решено интегрировать структуру $Nb/AlO_x/Al/AlO_x/Nb$ в логопериодическую антенну из Nb и Au диапазона 50–500 GHz (рис. 1, *a*), волновой импеданс такой антенны составляет 10–350 Ω в рабочем диапазоне частот. Выбор логопериодической антенны обусловлен тем, что такая антенна имеет широкую полосу приема и в связи с этим удобна для

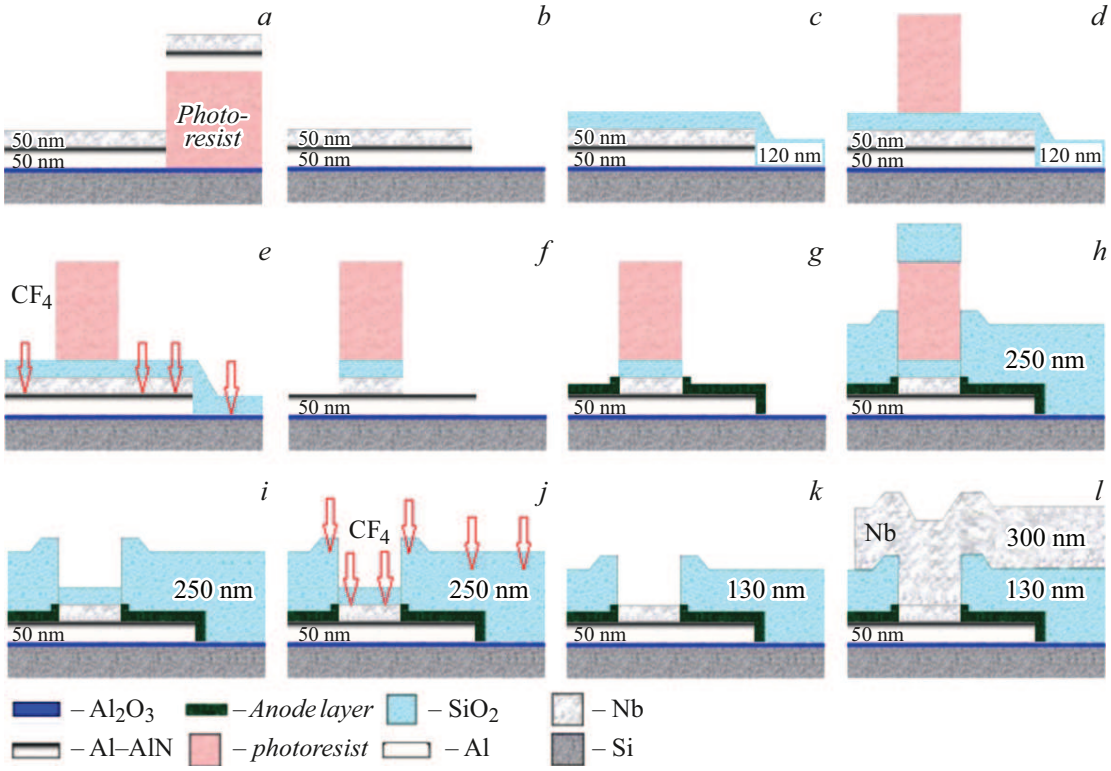

Рис. 2. Этапы технологии изготовления: *a* — формирование маски по топологии нижнего электрода и напыление трехслойной структуры; *b* — взрывная литография для удаления металла; *c* — напыление жертвенного слоя SiO_2; *d* — фотолитографическое формирование области НИС-перехода; *e* — плазмохимическое травления жертвенного слоя SiO_2; *f* — плазмохимическое травления верхнего слоя Nb; *g* — анодизация структуры; *h* — напыление изоляции; *i* — lift-off; *j*, *k* — плазмохимическое травление жертвенного SiO_2 в области туннельного перехода; *l* — напыление верхнего подводящего электрода.

исследования тестовых структур одиночных неселективных по частоте СИНИС-детекторов. Для изготовления приемного элемента на основе СИН-переходов был предложен следующий дизайн: на кремниевой подложке размером 3×4 mm размещена логопериодическая антенна с геометрическим размером порядка 1 mm, при этом ширина абсорберов из нормального металла Al интегрированных в нее СИНИС-структур составляет $3\,\mu$m (рис. 1, *b*). Измеренное на контрольном образце сопротивление на квадрат для Al толщиной 50 nm составило $R_\square = 0.31\,\Omega/\square$. Спроектированный абсорбер имеет вид меандра и состоит из 67 квадратов, следовательно, его сопротивление будет составлять приблизительно $20.7\,\Omega$, что даже при такой толщине алюминия подходит для согласования с используемой логопериодической антенной, но стоит отметить, что планируется изготовление детектора и с толщинами поглотителя 20 nm и меньше для повышения сопротивления абсорбера и лучшего согласования с антенной. Подключение к антенне может осуществляться по двух- или четырехконтактной схеме. На одном чипе с приемной антенной расположены тестовые СИНИС-структуры, идентичные тем, что использованы в антенне. Также на чипе размещена цепочка СИН-переходов [19], выполняющая функцию термометра [21,22], для контроля температуры подложки.

2. Оптимизация технологии изготовления и исследование свойств получившихся элементов

Для интеграции СИНИС-детекторов в антенну могут быть использованы различные технологии в зависимости от топологии детектора и имеющегося оборудования [23]. Как было приведено выше, классические СИНИС-детекторы — структуры на основе туннельных переходов типа $Al/AlO_x/Al{+}Fe$, где в качестве сверхпроводника выступает алюминий. Поглотитель также изготавливается из Al, однако для подавления его сверхпроводимости он наносится на ультратонкий слой Fe толщиной 1.5–2 nm [16]. Для получения подобных структур применяется метод термического теневого напыления. В данной технологии используется маска из фоторезиста, подвешенная над подложкой (мостики Долана) [24]. Маска может состоять из двух и более слоев резиста, что обеспечивает формирование канавок требуемой глубины с нависающими мостами. В зависимости от угла напыления теневое изображение маски проецируется в разные места на подложке, создавая наложение двух тонких пленок на подложке с четко определенной геометрией.

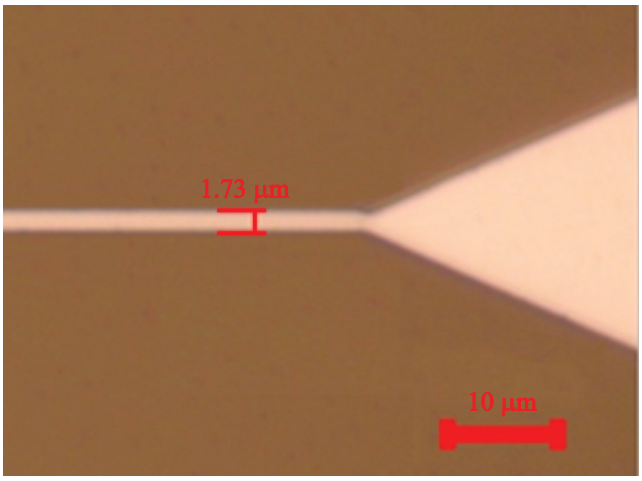

Рис. 3. Микрофотография абсорбера из Al, изготовленного по технологии SNEAP с жертвенным слоем SiO_2.

Получение высококачественного Nb возможно только методом магнетронного напыления, что исключает применение теневой технологии. В работе [19] ранее был рассмотрен процесс формирования трехслойной структуры $Al/AlO_x/Nb$ без нарушения вакуума с использованием магнетронного напыления и окисления в стационарном режиме, после чего области туннельных переходов создавались по технологии селективного травления и анодирования ниобия (Selective Niobium Etching and Anodization Process, SNEAP) [25].

Изготовление СИНИС-структур по указанной выше технологии сопровождается подтравом нормального металла (Al), что обусловлено особенностями технологического процесса: при проявлении маски из фоторезиста, нанесенной на трехслойную структуру с алюминием, в 1%-ном водном растворе KOH наблюдалась коррозия алюминия примерно на $7\,\mu$m от края металла вглубь. Следует отметить, что в работе [19] качество структур оставалось высоким, поскольку туннельные переходы диаметром $1.6-5.4\,\mu$m формировались в центральной части электрода размером $100\times100\,\mu$m, и коррозия Al по краям не оказывала влияния на их параметры. Однако данный эффект исключает возможность создания абсорберов малой ширины (менее $10\,\mu$m), что требует модернизации технологии изготовления СИНИС-структур.

В работе [26] было рассмотрено несколько способов, которые позволяют избежать коррозии алюминия при изготовлении СИНИС-структур по технологии SNEAP. Был найден оптимальный способ — улучшение технологии SNEAP с помощью добавления жертвенной маски (рис. 2), предотвращающий подтрав нижнего алюминиевого электрода при этапах изготовления. Минимальным размером СИН-перехода в приведенной работе был выбран диаметр $1.5\,\mu$m, что позволило изготовить абсорбер в СИНИС-структуре шириной $3\,\mu$m. А минимальный размер поглотителя, получаемый по предложенной технологии, оказался равным $1.7\,\mu$m (рис. 3). Стоит отметить, что минимальная ширина абсорбера ограничивалась разрешающей способностью контактной фотолитографии. Структуры, изготавливаемые по предложенной технологии, хорошего качества: характерные параметры структур близки к теоретически ожидаемым, метод показал хорошую повторяемость [21]. В связи с этим следующим этапом стала разработка технологии создания приемного устройства с интегрированным СИНИС-элементом.

Для создания приемной структуры предложена технология в 3 этапа (рис. 4):

I — по модернизированной технологии SNEAP изготовить СИНИС-структуры типа $Nb/AlO_x/Al/AlO_x/Nb$ с узким абсорбером: напылить трехслойную структуру и жертвенный слой поверх нее (рис. 4, *a*), сформировать переходы (рис. 4, *b*, *c*) и напылить слой SiO_2 для изоляции верхнего и нижнего электродов везде кроме областей самих туннельных переходов и мостиков анодизации (рис. 4, *d*);

II — стравить мостики анодизации (рис. 4, *h*), предварительно защитив все остальные структуры на подложке резистом (рис. 4, *e*). Стоит отметить, что травление мостиков анодизации происходит в два этапа — сначала травление жертвенного слоя SiO_2 и верхнего электрода Nb в плазме CF_4 (рис. 4, *f*), а затем — жидкостное травление Al (рис. 4, *g*): так как на абсорбере есть изоляция, подтрава Al в сторону самих переходов происходить не будет;

III — стравить жертвенный слой изоляции в области самих туннельных переходов (рис. 4, *i*, *j*), в случае сверхпроводящей антенны — в топологию верхнего электрода включить дизайн антенны и на этапе верхнего электрода сформировать ниобиевую антенну с помощью процесса взрывной фотолитографии (lift-off), а в случае антенны из Au — на этапе верхнего электрода накрыть туннельные переходы перемычками из Nb (рис. 4, *k*), а на этапе контактных площадок — сформировать золотую антенну также по технологии lift-off (рис. 4, *l*).

В таблице приведена технологическая карта.

3. Расчет приемной структуры в программе численного трехмерного моделирования

Расчет сверхпроводниковых СВЧ-структур выполнялся с использованием программы трехмерного численного моделирования Ansys HFSS [27]. В этом пакете для определения СВЧ-полей применяется метод конечных элементов (FEM) с адаптивным построением сетки: структура последовательно разбивается на тетраэдры, при этом каждое последующее разбиение производится в областях с максимальной вычислительной погрешностью, выявленной на предыдущем шаге.

Для проведения численного моделирования разрабатываемой структуры предварительно была подготовлена

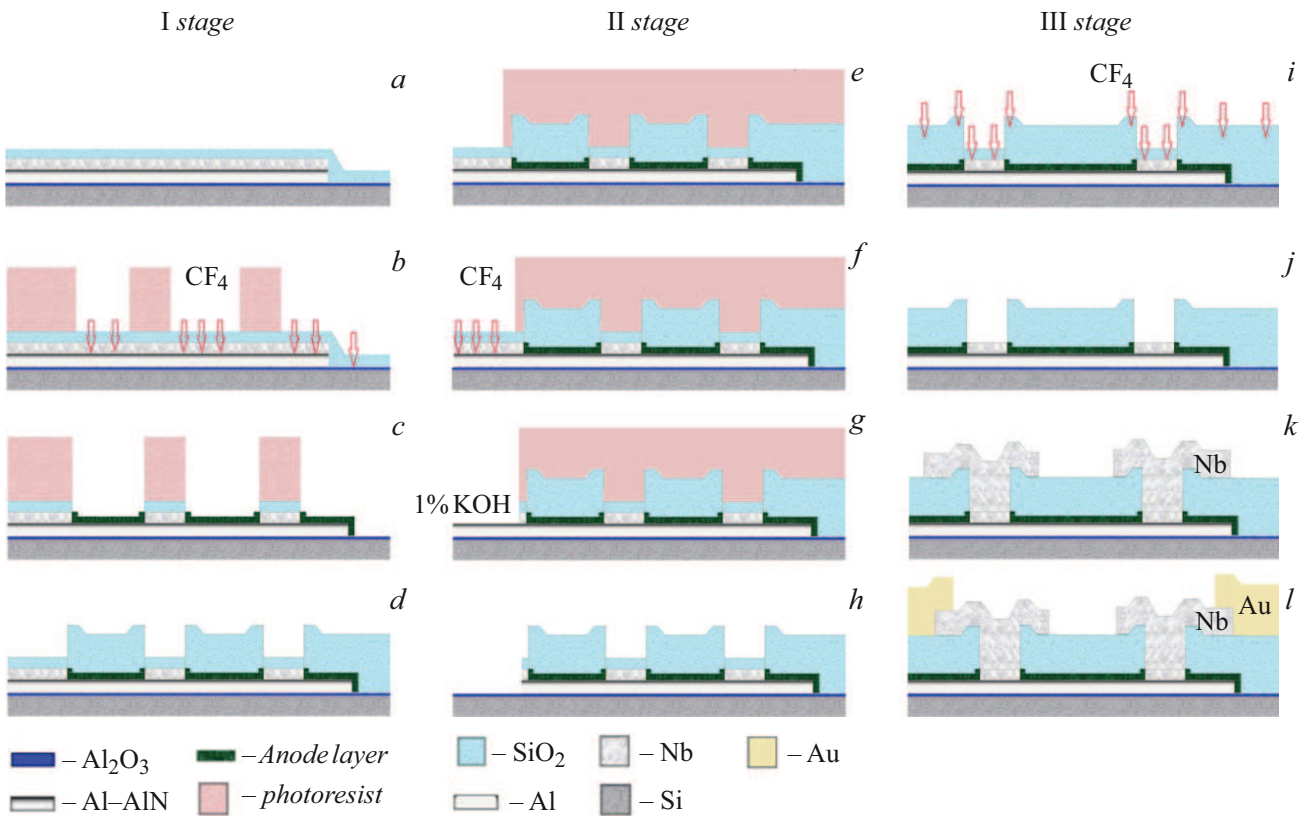

Рис. 4. Этапы технологии изготовления СИНИС-детектора с Au-антенной: *a* — фотолитографическое формирование области НИС-переходов поверх структуры Al/AlO_x/Nb+SiO_2; *b* — плазмохимическое травление жертвенного слоя SiO_2 и верхнего слоя Nb-структуры; *c* — анодизация; *d* — напыление изоляции и взрывная литография; *e* — нанесение резиста на всю структуру помимо подводящих проводов для анодизации; *f* — плазмохимическое травление слоев SiO_2 и Nb в области мостиков анодизации, *g* — жидкостное травление AlO_x+Al, результат — полное удаление проводов анодизации; *h* — удаление резиста в области структуры; *i,j* — плазмохимическое травление жертвенного SiO_2 в области туннельного перехода; *k* — формирование областей и напыление верхнего подводящего Nb-электрода; *l* — формирование области и напыление Au-антенны.

топология антенны в AutoCAD, а затем конвертирована в программу численных расчетов (рис. 5).

Проводилось численное моделирование логопериодической антенны, в качестве подложки использовался кремний ($\varepsilon = 11.9$) толщиной 500 μm. Геометрические параметры антенны характеризуются следующими величинами: размеры подложки составляют 3×3 mm, при этом максимальная длина (Al) структуры достигает 1003.2 μm, а максимальная ширина (Aw) — 993.5 μm. В центре логопериодической антенны располагается СИНИС-структура с поглотителем, физически представляющем собой тонкую пленку из нормального металла. В модели он был задан при помощи сосредоточенного порта с сопротивлением 20 Ω. Диапазон частот выбран от 50 до 650 GHz, использовалась адаптивная сетка разбиения для повышения точности расчета и исключения проблем, связанных с неправильной разбивкой.

Традиционно в моделировании все сверхпроводниковые материалы заменяются на идеальный проводник (англ. perfect electric conductor, PEC). В расчете проводилось сравнение, насколько сильно будут отличаться результаты моделирования в трех случаях: для PEC, золота с конечной проводимостью и сверхпроводника (ниобия). Параметры PEC и золота были взяты из встроенной библиотеки данных. Параметры ниобия для генерации наборов данных для поверхностного импеданса следующие: проводимость $18 \cdot 10^6\,(\Omega \cdot \mathrm{m})^{-1}$, $T_c = 9.2$ K, $\Delta = 1.4$ meV, $T = 4.2$ K.

В Ansys HFSS отсутствует встроенный модуль для учета сверхпроводниковых эффектов: частичного проникновения магнитного поля в пленки сверхпроводников и скачкообразно увеличения поверхностного сопротивления на частотах выше значений, соответствующих щели. Сверхпроводниковые свойства пленок были учтены при помощи задания граничных условий, как описано в работах [28,29]. Так как вторая грань используемых кремниевых подложек не отполирована, можно предположить, что вклад отражения от обратной поверхности в экспериментальные данные будет минимальным.

Для определения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) антенны на прием, благодаря теореме о взаимности, используется моделирование излучения антенны и рассчитывается параметр S11. На рис. 6

Технологическая карта СИНИС-детекторов из Nb и Al

Шаг	Материал	Способ формирования	Толщина, nm
Нижний электрод. Напыление трехслойной структуры (рис. 4, *a*)	$Al/AlO_x/Nb$	Методом контактной литографии задание геометрии нижнего электрода. В одном вакуумном цикле: — магнетронное напыление Al; — термическое окисление для создания AlO_x; — магнетронное напыление Nb. lift-off	20–1.5–50
Осаждение жертвенного SiO_2 (рис. 4, *a*)	SiO_2	Осаждение на всю подложку, без этапа литографии. Магнетронное напыление.	100
Формирование СИН переходов: контактная фотолитография, травление жертвенного SiO_2, анодизация (рис. 4, *b*, *c*)	Al_2O_3, Nb_2O_5	Методом контактной литографии задание геометрии и размеров СИН переходов на этом этапе также резистом закрываются мостики анодизации для того, чтобы в последствии на них не был осажден слой изоляции. Травление жертвенного SiO_2 и Nb в плазме CF_4, анодизация торцов формируемых переходов в этиленгликолевом растворе пентабората аммония.	20
Напыление слоя изоляции SiO_2 (рис. 4, *d*)	SiO_2	Магнетронное напыление, lift-off	250
Травление мостиков анодизации (рис. 4, *e*–*h*)	–	Методом фотолитографии задаются области, где нужно провести травление, все остальные части закрыты резистом (рис. 4, *e*). Травление осуществляется в 2 этапа: — травление жертвенного оксида и Nb в плазме CF_4 (рис. 4, *f*); — жидкостное травление Al в 1 % водном растворе KOH (рис. 4, *g*).	–
Формирование верхнего электрода с помощью контактной литографии и lift-off (рис. 4, *i*–*k*)	Nb	Формирование геометрии электрода и антенны для дизайна антенн из ниобия формируется на этом этапе контактной фотолитографией. Травление жертвенного оксида в области переходов в плазме CF_4 (рис. 4, *i*). Так как Nb тоже травится в плазме CF_4, на этом шаге важно остановиться на верхнем электроде трехслойной структуры (рис. 4, *j*), а не провести травление до туннельного барьера. Магнетронное напыление Nb, lift-off (рис. 4, *k*).	90–100
Формирование контактных площадок (рис. 4, *l*)	Au	Формирование геометрии электрода и антенны для дизайна антенн из золота формируется на этом этапе контактной фотолитографией. Магнетронное напыление Nb, lift-off.	100–300

показаны результаты расчетов. Из полученных данных видно, что устройство функционирует на нескольких резонансных частотах, а также — что материал антенны оказывает незначительное влияние на спектральные характеристики структуры. Точность вычислений с учетом точности применяемых параметров материалов составляет приблизительно 5 %, что позволяет сказать, что вычисления совпадают в рамках погрешности.

Планируемые экспериментальные исследования будут заключаться в непосредственном измерении отклика по току или напряжению приемной структуры на внешние электромагнитные излучения. В качестве источника излучения выбрано черное тело (ЧТ) — пленка нихрома на подложке из сапфира, из широкого спектра излучения которого будет вырезан необходимый диапазон частот с помощью полосно-пропускающих фильтров.

Заключение

СИНИС-детектор на основе структуры $Nb/AlO_x/Al/AlO_x/Nb$, где в качестве сверхпроводящего материала используется ниобий ($T_c = 9.2\,K$), а в качестве нормального металла — алюминий ($T_c = 1.2\,K$),

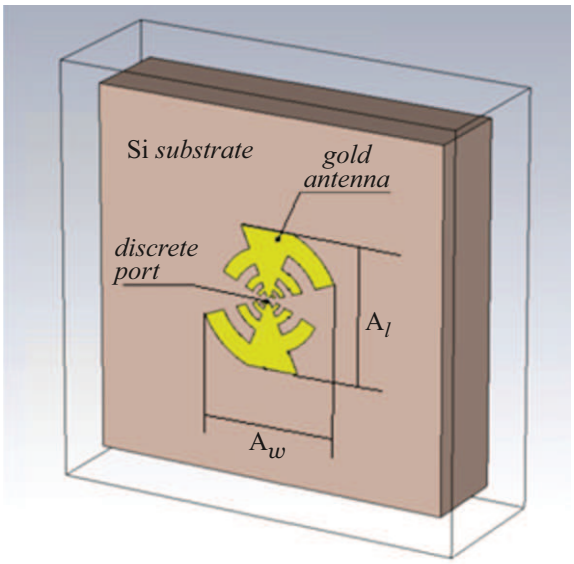

Рис. 5. Моделируемый проект логопериодической антенны на кремниевой подложке.

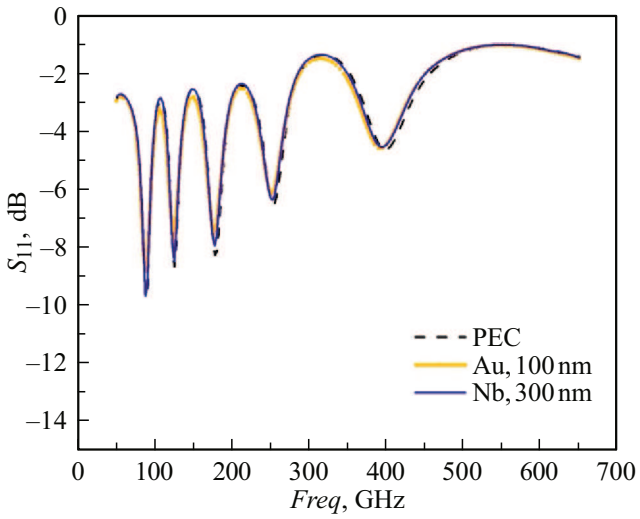

Рис. 6. Вид параметра S_{11} логопериодической антенны при отсутствии отражения от одной из граней кремниевой подложки.

способен работать при температурах 1.5–6.0 K, что более чем на порядок превышает типичную/стандартную рабочую температуру классических СИНИС-детекторов с алюминием (ниже 0.6 K).

В работе СИНИС-структура из Nb и Al интегрирована в логопериодическую антенну из двух типов материалов — Nb или Au диапазона 100–500 GHz. Для тестирования предложенных приемных структур разработан дизайн чипа, содержащий логопериодическую антенну с интегрированным в нее СИНИС-структурой $Nb/AlO_x/Al/AlO_x/Nb$: на кремниевой подложке размером 7×7 mm размещена логопериодическая антенна с геометрическим размером порядка 1 mm, при этом ширина абсорберов из нормального металла Al интегрированных в нее СИНИС-структур составляет $3\,\mu$m. Было проведено численное моделирование сверхпроводниковых приемных структур терагерцового диапазона в программе численного трехмерного моделирования Ansys HFSS. Волновой импеданс предложенной логопериодической антенны составляет 10–350 Ω в рабочем диапазоне частот, а само устройство функционирует на нескольких резонансных частотах. С помощью численного моделирования продемонстрировано, что материалы антенны (Nb или Au) оказывают минимальное влияние на ее спектральные характеристики.

Предложена и апробирована технология изготовления приемных структур методами магнетронного напыления и контактной фотолитографии, позволяющая получить узкий абсорбер (шириной менее $3\,\mu$m) и вместе с тем высокое качество СИН-переходов (характерные параметры близки к теоретически ожидаемым). Планируемые экспериментальные исследования будут заключаться в измерении отклика приемной структуры на излучение ЧТ.

Благодарности

При разработке технологии изготовления использовано оборудование Уникальной научной установки № 352529 „Криоинтеграл“.

Финансирование работы

Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 23-79-10262 (https://rscf.ru/project/23-79-10262/).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] I. Zinchenko, L. Pirogov, M. Toriseva. Astron. Astrophys. Suppl., **133**, 337 (1998).
[2] W. Hu, S. Dodelson. Annu. Rev. Astron. Astrophys., **40**, 171 (2002).
[3] A.V. Lapinov, P. Schilke, M. Juvela, I. Zinchenko. Astron. Astrophys., **336** (1), 007 (1998).
[4] J.E. Carlstrom, G.P. Holder, E.D. Reese. Ann. Rev. Astron. Astrophys., **40**, 643 (2002).
[5] И.И. Зинченко. Изв. вузов: Радиофизика, **46** (8), 9 (2003).
[6] F. Bensch, G.J. Melnick, D.A. Neufeld, M. Harwit, R.L. Snell, B.M. Patten, V. Tolls. Icarus, **184** (2), 602 (2006).
[7] Г.М. Бубнов, Ю.Н. Артеменко, В.Ф. Вдовин, Д.Б. Данилевский, И.И. Зинченко, В.И. Носов, П.Л. Никифоров, Г.И. Шанин, Д.А. Раупов. Известия вуз: Радиофизика, **59** (8–9), 852 (2016).
[8] Ф.Е. Шалькевич. *Методы аэрокосмических исследований*: курс лекций (БГУ, Минск, 2005).
[9] J.J. Chieh, C.Y. Hong. Rev. Sci. Instrum., **82** (8), 084301 (2011).

[10] J.F. Federici, D. Gary, R. Barat, Z.-H. Michalopoulou. IEEE Spectrum, **44** (7), 47 (2007).
[11] C. Zhang, K. Mu. 2009 34th Intern. *Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* (Busan, Korea (South), **1**, 2009).
[12] T.R. Clem, M.C. Froelich, D.J. Ovenvay, J.W. Purpura, R.F. Wiegert, R.H. Koch, D.K. Lathrop, J. Rozen, J.H. Eraker, J.M. Schmidt. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **7** (2), 3287 (1997).
[13] A. Chwala, M. Schmelz, V. Zakosarenko, M. Schiffler, M. Schneider, M. Thürk, S. Bräuer, F. Bauer, M. Schulz, A. Krüger, R. Stolz. Supercond. Sci. Technol., **32**, 2 (2019).
[14] A. Cosentino. Technologies, **4** (1), 6 (2016).
[15] J. Federici, L. Moeller. J. Appl. Phys., **107** (11), 111101 (2010).
[16] J. Clarke, G. Hoffer, P. Richards. Revue de Physique Appliquée, **9**, 69 (1974).
[17] M. Nahum, T.M. Eiles, J.M. Martinis. Appl. Phys. Lett., **65**, 3123 (1994).
[18] M. Tarasov, A. Gunbina, A. Chekushkin, V. Vdovin, A. Kalaboukhov. Appl. Sci., **11** (20), 9649 (2021).
[19] М.А. Маркина, А.М. Чекушкин, М.А. Тарасов, М.Ю. Фоминский, Т.Д. Пацаев, А.Л. Васильев. ЖТФ, **94** (7), 1079 (2024).
[20] M.A. Tarasov, A.A. Gunbina, A.M. Chekushkin, M.A. Markina, R.A. Yusupov, M.Yu. Fominskii, L.V. Filippenko, V.S. Edelman, V.F. Vdovin, V.A. Stolyarov, I.I. Zinchenko, A.M. Krasilnikov, A.S. Marukhno, M.A. Mansfeld, D.E. Kukushkin, D.A. Sazonenko, O.S. Bolshakov, A.B. Ermakov, V. Lesnov, A.F. Valeev. Astrophys. Bull., **80** (3), 502 (2025).
[21] М.А. Маркина, М.А. Тарасов, Р.А. Юсупов, Ф.В. Хан, М.Ю. Фоминский, Р.К. Козулин, А.М. Чекушкин. ЖТФ, **95** (9), 1800 (2025).
[22] L. Kuzmin. Physica C: Superconductivity, **468**, 142 (2008).
[23] A. Gunbina, M. Tarasov, M. Fominsky, A. Chekushkin, R. Yusupov, D. Nagirnaya, R. Banchuin. In S.Y. Yurish (ed.). *Advances in Microelectronics Reviews* (IFSA Publishing, SL, Barcelona, Spain 2021), v. 3, p. 183.
[24] G.J. Dolan. Appl. Phys. Lett., **31** (5), 337 (1977).
[25] V.P. Koshelets, S.A. Kovtonyuk, I.L. Serpuchenko, L.V. Filippenko, A.V. Shchukin. IEEE Trans. Magn., **27**, 3141 (1991).
[26] М.А. Маркина, А.М. Чекушкин, М.А. Тарасов, М.Ю. Фоминский. Приборы и техника эксперимента, **1**, 22 (2026).
[27] Электронный ресурс. Режим доступа: https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss
[28] V. Belitsky, C. Risacher, M. Pantaleev, V. Vassilev. Intern. J. Infrared Millimeter Waves, **27** (6), 809 (2006).
[29] A.R. Kerr. MMA Memo, **21** (245), 1 (1999).