

**ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 621.396.67

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИНИС-
ДЕТЕКТОРОВ, ИНТЕГРИРОВАННЫХ В ПЛАНАРНЫЕ АНТЕННЫ
СУБТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА**

**©2026 г. А. А. Гунбина^а, А. М. Чекушкин^а, В. С. Эдельман^б,
Р. А. Юсупов^{а*}, М. А. Тарасов^а**

^а *Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова*

Российской академии наук

Россия, 125009, Москва, ул. Моховая 11, корп. 7

^б *Институт физических проблем им. П. Л. Капицы*

Российской академии наук

Россия, 119334, Москва, ул. Косыгина, 2

**e-mail: Yusupovrenat@hitech.cplire.ru*

Поступила в редакцию 30.10.2025 г.

После доработки 27.11.2025 г.

Принята к публикации 09.12.2025 г.

Рассмотрены этапы исследования частотных характеристик детекторов на основе структур сверхпроводник – изолятор – нормальный металл – изолятор – сверхпроводник (СИНИС), интегрированных в различные варианты планарных антенн субтерагерцевого диапазона. СИНИС-детектор не является частотно селективным приемником, и для приема субтерагерцевого излучения он встраивается в антенну и оптическую систему в соответствии с необходимой полосой приема. Рассмотрен вариант интеграции с широкополосной логопериодической и узкополосной двойной щелевой антеннами. Приведены результаты трехмерного электромагнитного моделирования разработанных дизайнов антенн. Изготовлены и измерены спектры масштабных моделей в СВЧ-диапазоне. Рассмотрены некоторые экспериментальные схемы измерения частотных характеристик СИНИС-детекторов и приведены результаты таких измерений.

1. ВВЕДЕНИЕ

Субтерагерцевый диапазон является наиболее привлекательным и малоосвоенным для исследований и создания приборов и техники для лабораторных и практических приложений

[1]. Одной из передовых практических задач является создание приемников и детекторов для радиоастрономических приложений. Наиболее высокие требования предъявляются для приборов космических миссий, где приемники работают в отсутствие фоновой засветки атмосферы и не ограничены в частотном диапазоне окнами пропускания атмосферы (при работе в режиме одиночного телескопа). В режиме интерферометра земля–космос частотные полосы приемников уже согласуются с окнами прозрачности, например 84–116 ГГц, (ALMA Band 3), 211–275 ГГц (ALMA Band 6), 275–373 ГГц (ALMA Band 7) [2]. Для различных радиоастрономических задач используются как гетеродинные, так и негетеродинные приемники, но во всех типах детекторы излучения встраиваются в планерные антенны нужного диапазона [3]. В соответствии с задачами и используемым приемным трактом это могут быть как узкополосные (одночастотные и многочастотные), так и широкополосные одиночные планарные антенны. Для повышения мощности насыщения и динамического диапазона детекторы, как правило, интегрируются в матрицы антенн, где входящая мощность излучения распределяется между несколькими детекторами.

Одними из перспективных высокочувствительных некогерентных приемников субтерагерцевого диапазона частот являются сверхпроводниковые детекторы на основе структур сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник (СИНИС) [4]. СИНИС-структура представляет собой два туннельных перехода сверхпроводник–изолятор–нормальный металл (СИН), соединенных общим электродом из нормального металла, выполняющим роль поглотителя (абсорбера). В зависимости от конструкции и выбора рабочих условий СИНИС-детектор может работать как в болометрическом режиме, так и в пропорциональном режиме (счетчик фотонов) [5]. Для приема излучения СИНИС-структуры удобно интегрируются с планарными антеннами. Туннельные переходы сверхпроводник–изолятор–нормальный металл в таких детекторах на субтерагерцевых частотах имеют маленький импеданс (за счет емкости перехода), и поэтому с антенной согласуется только активное сопротивление абсорбера СИНИС-детектора. Но при этом СИН-переходы изолируют по теплу абсорбер от сверхпроводящих электродов. Сопротивление абсорбера в СИНИС-детекторах может варьироваться от нескольких до десятков ом, оно определяется в первую очередь геометрическими размерами и используемым материалом. Типичные размеры абсорберов в таких детекторах таковы: длина – несколько мкм, ширина – меньше 1 мкм, толщина – меньше 100 нм. Такие детекторы хорошо встраиваются как в широкополосные антенны, например в логопериодическую антенну диапазона 100–500 ГГц (рис. 1а), так и в узкополосные резонансные антенны, например в двойную щелевую антенну на центральную частоту 345 ГГц (рис. 1б). Такие антенны имеют

характерные размеры порядка 1 мм, они с хорошей точностью и воспроизводимостью изготавливаются современными методами микроэлектроники: фотолитография или прямая лазерная литография и процесс взрывной литографии (liftoff) или плазмохимическое травление. Наиболее часто СИНИС-детекторы с антеннами изготавливаются на промышленных кремниевых подложках с толщиной 500 мкм, 330 и 270 мкм. Для выполнения отдельных задач также используются кварцевые и сапфировые подложки. С учетом нужного диапазона частот, используемых подложек и особенностей оптического тракта осуществляются выбор и оптимизация дизайнов планарных антенн с СИНИС-детекторами. В первую очередь оптимизируются амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), диаграмма направленности и импеданс антенны. Для согласования с антенной подбирается оптимальное сопротивление поглотителя СИНИС-детектора.

Рис. 1. Вид в оптическом микроскопе широкополосной логопериодической антенны

2. ИЗМЕРЕНИЕ МАСШТАБНЫХ МОДЕЛЕЙ ПЛАНАРНЫХ АНТЕНН

Прямое измерение характеристик планарных антенн диапазона 100–500 ГГц является нетривиальной задачей, предъявляющей высокие требования к оборудованию и схеме эксперимента: требуются калиброванные источники излучения и приемники данного диапазона частот. Обходным вариантом является изготовление масштабных моделей планарных антенн и измерение их характеристик в хорошо освоенном СВЧ-диапазоне частот. При увеличении субтерагерцевых антенн в 100 раз их рабочие частоты сдвинутся в диапазон 1–5 ГГц, измерения в котором удобно проводить с помощью широко распространенных векторных анализаторов цепей СВЧ-диапазона. Масштабные модели изготавливаются из фольгированного стеклотекстолита, как обычные печатные платы (рис. 2). В этом и заключается главный недостаток данного подхода, так как масштабируется только металлизация антенны без соответствующего масштабирования подложки. Для масштабирования распространенной подложки толщиной 500 мкм нужен кристалл кремния ($\epsilon = 11.9$) толщиной 5 см. Поэтому измерение масштабных моделей на обычном стеклотекстолите FR-4 (0.5–1 мм, $\epsilon = 4.5$) скорее соответствует измерениям металлических антенн без подложки.

Рис. 2. Фотографии изготовленных масштабных моделей широкополосной логопериодической антенны

Для представленных выше антенн изготовлены масштабные модели. Масштабный коэффициент для логопериодической антенны равен 100, для двойной щелевой антенны он составил 117–132. В середину антенны подпаивался отрезок жесткого коаксиального провода с SMA-разъемом для подключения к векторному анализатору цепей. Дополнительно

в середину могут устанавливаться SMD-компоненты для моделирования различных нагрузок. При подключении к векторному анализатору цепей измеряется параметр S_{11} , т. е. параметры антенны измеряются на излучение, но согласно теореме взаимности параметры антенн на прием и излучение сигнала не различаются.

Изготовленные масштабные модели были измерены с помощью векторного анализатора цепей R&S ZNB20 в диапазоне 100 кГц–20 ГГц. На рис. 3 представлены полученные спектры в диапазоне 1–5 ГГц для прямого сравнения с приведенными в следующем разделе результатами численного моделирования. По результатам данного моделирования видно, что логопериодическая антенна без подложки начинает эффективно работать, только начиная с частот выше 2.5 ГГц, а резонансные пики двойной щелевой антенны не ярко выражены и нет доминирующего явного резонанса на центральной частоте. Данные результаты связаны с тем, что конкретные дизайны антенн разработаны для работы совместно с кремниевой подложкой, которая существенно влияет на параметры расположенных на ней антенн. Также, исследуя масштабные модели, можно получить представление о диаграмме направленности таких антенн.

Рис. 3. Результаты измерений изготовленных масштабных моделей широкополосной логопериодической антенны

3. ЧИСЛЕННОЕ ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Трехмерное компьютерное численное моделирование – это современный способ определения основных параметров разрабатываемых планарных антенн. С учетом доступных вычислительных мощностей можно смоделировать не только антенну на подложке с детектором, но и полную сборку с элементами оптического тракта. Также при таком подходе можно оперативно менять и оптимизировать геометрию исследуемых конструкций. Для целей компьютерного трехмерного моделирования, как правило, используются коммерческие программные пакеты. Наиболее широко известные из них – это CST Studio Suite и Ansys HFSS. Для примера рассмотрим результаты численного расчета АЧХ антенн вышеупомянутого дизайна: логопериодической и двойной щелевой в CST Studio Suite (рис. 4).

Рис. 4. Вид проектов в CST Studio Suite широкополосной логопериодической антенны

Антенны моделировались на кремниевых подложках ($\epsilon = 11.9$) толщиной 280 мкм. Для логопериодической антенны основные размеры таковы: размер подложки $L = 2$ мм, максимальная высота антенны $A_h = 910$ мкм, максимальная ширина $A_w = 1100$ мкм. Для двойной щелевой антенны основные размеры таковы: высота щели $s_h = 248$ мкм (соответствует длине волны на частоте 350 ГГц), ширина щели $s_w = 12.3$ мкм, расстояние

между слотами $D_{bs} = 131.2$ мкм. Излучение задавалось через дискретный порт, встроенный в центр антенн. Граничные условия открытые, добавлено пространство (вакуум) перед антенной для корректного расчета (ГУ open+add space). Диапазон частот выбран от 50 до 1000 ГГц, использовалась адаптивная сетка разбиения для повышения точности расчета и исключения проблем, связанных с неправильной разбивкой. Материалы в проекте соответствуют реально используемым: кремниевая подложка и золотая металлизация антенны, хотя в данном случае конечная толщина и проводимость металлизации существенно не влияют на результаты расчетов [6].

Так же, как в случае исследования масштабных моделей, для определения АЧХ антенны на прием используется моделирование излучения антенны и рассчитывается параметр S_{11} . На рис. 5 показаны результаты расчетов оптимизированных конструкций в диапазоне 100–500 ГГц. Для широкополосной логопериодической антенны получена невысокая эффективность с отдельными резонансными частотами, а для двойной щелевой антенны – отклик с единственным высокочастотным резонансом около проектной частоты 350 ГГц. За пределами показанного на рис. 5б диапазона частот наблюдается вторая гармоника на частоте 700 ГГц. Полученные результаты соответствуют требованиям и коррелируют с предварительными оценками, сделанными по аналитическим формулам. Но в реальных условиях существуют дополнительные неучтенные особенности, поэтому результаты численного моделирования необходимо сравнивать с результатами экспериментальных исследований.

Рис. 5. Результаты численного расчета широкополосной логопериодической антенны

4. СХЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Прямое измерение спектра поглощения СИНИС-детектора, интегрированного в планарную антенну, является сложной задачей. Одной из проблем для реализации такого эксперимента является отсутствие коммерчески доступных перестраиваемых в широком диапазоне частот источников субтерагерцевого излучения, калиброванных по мощности выходного излучения. Достаточно широкополосными являются источники субтерагерцевого излучения на основе ламп обратной волны (ЛОВ), но для перекрытия интересующего нас диапазона 100–500 ГГц потребуется минимум 2 ЛОВ разных частотных диапазонов. А высокочастотные ЛОВ с рабочим диапазоном, приближающимся к 1 ТГц, являются редким и дорогим оборудованием. Главную сложность при работе с ЛОВ представляет их сильно изрезанная выходная характеристика: мощность выходного сигнала в рабочем диапазоне лампы может меняться на десятки дБ. Поэтому для измерения спектров с помощью ЛОВ требуются схемы измерений с отводом части излучения на калибровочный приемник.

Например, в нашей работе [7] СИНИС-детекторы измерялись в сорбционном криостате He-3 HELIOX-AC-V (Oxford Instruments) с базовой температурой 280 мК. Для исследования спектрального отклика была использована экспериментальная установка, схематично представленная на рис. 6. Излучение генератора обратной волны подается на образец через оптическое окно и три квазиоптических фильтра и аттенюатора на трех температурных ступенях, обеспечивающих ослабление на холодной ступени более 30 дБ. Для нормировки мощности излучения источника на основе лампы обратной волны использован диаграммный переключатель (chopper), который непрерывно с частотой 120 Гц переключает излучение ЛОВ от оптического окна криостата к пирозлектрическому приемнику, за счет чего достигаются как модуляция сигнала, необходимая для синхронного детектирования, так и одновременное измерение опорного уровня сигнала пирозлектрическим приемником. Измеренное отношение сигналов на этих двух каналах позволяет избавиться от неравномерности выходной спектральной плотности мощности ЛОВ.

Рис. 6. Схема и фотография экспериментальной установки с источником излучения и калибровочным приемником

Но при таких измерениях остается проблема, связанная с равномерностью пропускания оптической системы в криостате. При таких измерениях на определенных частотах возникают стоячие волны, которые сильно влияют на измеряемые характеристики [8]. Требуется дополнительная калибровка приходящего на исследуемый детектор сигнала детектором, находящимся внутри криостата, после всех элементов оптического тракта. В наших работах [9] дополнительная калибровка сигнала обеспечивается рутениевым резистором, расположенным на холодной плите вблизи образца (см. рис. 7). RuO₂-резисторы представляют собой классический тепловой болометр, и при рабочих температурах СИНИС-детектора (ниже 300 мК) они обладают достаточной чувствительностью и не являются частотно селективными детекторами [10]. Для ряда образцов, содержащих на чипе с СИНИС-детектором термометр на основе СИН-переходов [11], возможно использование этой цепочки СИН-переходов для калибровки мощности, приходящей на детектор. Как правило, СИН-термометры располагаются в стороне от приемной антенны СИНИС-детектора, но часть излучения также принимается цепочкой. За счет своей длины СИН-термометр работает как неселективная приемная антенна. Калибровка на такой отклик позволяет также исключить момент перегрева всего чипа внешним излучением. В данном эксперименте излучение в криостат вводилось по сверхразмерному волноводу и аттенюировалось снаружи криостата. Данные схемы громоздки, они позволяют получить качественную оценку спектрального отклика СИНИС-детекторов.

Рис. 7. Схема и фотография экспериментальной установки с калибровочным источником

Перспективным источником субтерагерцевого излучения кажется сам джозефсоновский переход (ДП). Максимальная частота и мощность джозефсоновских колебаний определяются критическим током I_c , нормальным сопротивлением R_n и их произведением $V_c = I_c R_n$. При этом характерная частота джозефсоновских колебаний задается формулой $f_c = (2e/h)V_c$. Характерное напряжение джозефсоновского перехода не превышает напряжения энергетической щели сверхпроводника, что, например, для широко распространенных ниобиевых переходов соответствует частотам порядка 700 ГГц. При использовании переходов на ВТСП можно реализовать рабочие частоты такого генератора выше 1 ТГц. Первоначально такой генератор на основе пленки YBaCuO ($T_c = 79$ К и $V_c > 4$ мВ) был исследован при установке на милликельвиновую ступень криостата с обратной стороны от исследуемого СИНИС-детектора [12]. Но при такой установке при напряжениях выше 1 мВ происходит сильный перегрев ДП. Для увеличения выходной мощности джозефсоновского источника излучения и увеличения частоты генерации ДП был установлен на ^4He -ступени криостата при температуре 1.8 К (рис. 8). Расстояние между излучателем и приемником составляло 3 см. Измеренный отклик по напряжению СИНИС-детектора приведен на рис. 8. В данном эксперименте отклик не нормировался на какой-либо опорный канал, поскольку мы полагали, что мощность джозефсоновского генератора существенно не зависит от частоты в нашем рабочем диапазоне. В результате получены довольно равномерный широкополосный отклик для логопериодической антенны и резонансный отклик на частоту около 300 ГГц для двойной дипольной антенны, также существенно выражена вторая гармоника. Данный подход сейчас наиболее широко используется для исследования СИНИС-детекторов [13], и перспективным кажется использование генераторов на переходах NbN, которые позволят поднять рабочую частоту таких генераторов до 1 ТГц [14].

Рис. 8. Схема эксперимента с источником излучения внутри криостата

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние годы компьютерное трехмерное моделирование сделало практически не актуальным изготовление и измерение масштабных моделей исследуемых субтерагерцевых планарных антенн, разработанных для работы с СИНИС-детекторами. В отличие от масштабных моделей, численное моделирование позволяет учесть реальную толщину и материалы подложки, а также при необходимости другие элементы оптического тракта, такие как линза или приемный рупор.

Экспериментальное исследование частотных характеристик изготовленных СИНИС-структур является достаточно сложной задачей во многом из-за отсутствия коммерчески доступных широкополосных источников излучения субтерагерцевого диапазона. Спектральные характеристики СИНИС-детекторов в разных планарных антеннах были исследованы как с источником излучения (ЛОВ) снаружи криостата, так и с джозефсоновскими источниками излучения, находящимися на холодных ступенях криостата. Для логопериодической антенны получен достаточно равномерный широкополосный отклик в диапазоне от 100 до более чем 700 ГГц. Для двойной дипольной антенны измерен резонансный отклик для центральной частоты около 300 Гц. Измеренные характеристики соответствуют ожидаемым и коррелируют качественно с результатами численного моделирования.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант №23-79-10262, <https://rscf.ru/project/23-79-10262/>).

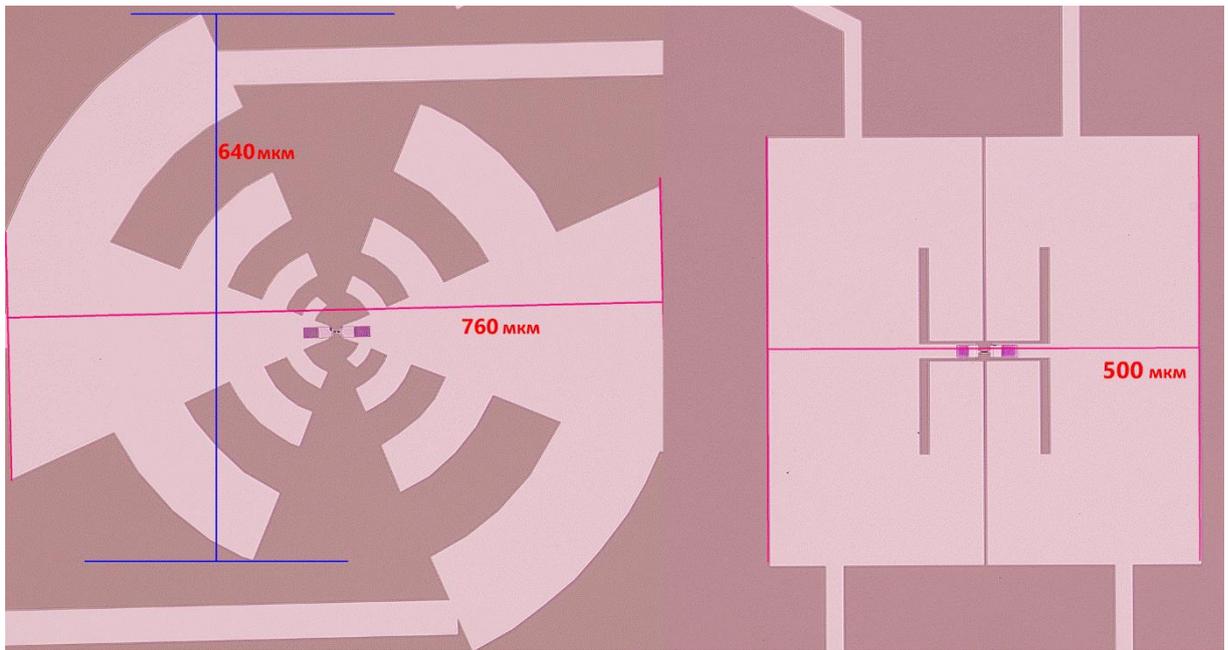
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Federici J., Moeller L.* // J. Appl. Phys. 2010. Т. 107. №. 11. Р. 111101. <https://doi.org/10.1063/1.3386413>
2. <https://www.eso.org/public/teles-instr/alma/receiver-bands>
3. *Likhachev S.F., Rudnitskiy A.G., Andrianov A.S. et al.* // Cosmic Res. 2024. Т. 62. №. 1. С. 117. <https://doi.org/10.1134/S0010952523700764>
4. *Tarasov M.A., Гунбина А.А., Чекушкин А.М. и др.* // Астрофизический Бюллетень. 2025. Т. 80. № 3. С. 523.
[*Tarasov M. A., et al.* // Astrophysical Bulletin. 2025. Т. 80. № 3. С. 502. <https://doi.org/10.1134/S1990341324600996>]
5. *Девятков И.А., Крутицкий П.А., Куприянов М.Ю.* // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 84. С. 61.
[*Devyatov I.A., Krutitskiy P.A., Kupriyanov M.Y.* // JETP Lett. 2006. Т. 84. С. 57. <https://doi.org/10.1134/S0021364006140037>]

6. *Гунбина А.А., Тарасов М.А., Чекушкин А.М., Юсупов Р.А.* // Журнал радиоэлектроники. 2025. №. 4. С. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.4.16>
7. *Tarasov M.A., Gunbina A.A., Mahashabde S. et al.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2019. V. 30. №. 3. P. 1. <https://doi.org/10.1109/TASC.2019.2941857>
8. *Tarasov M., Sobolev A., Gunbina A. et al.* // J. Appl. Phys. 2019. V. 125. №. 17. P. 174501. <https://doi.org/10.1063/1.5054160>
9. *Tarasov M.A., Chekushkin A.M., Yusupov R.A. et al.* // J. Commun. Technol. Electron. 2020. V. 65. №. 1. P. 60. <https://doi.org/10.1134/S1064226920010064>
10. *Лемзяков С.А., Эдельман В.С.* // ПТЭ. 2016. №. 4. С. 146. <https://doi.org/10.7868/S0032816216040248>
11. *Agulo I.J., Kuzmin L.* // Supercond. Sci. Technol. 2007. V. 21. №. 1. P. 015001. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/21/01/015001>
12. *Тарасов М., Кузьмин Л., Степанцов Е. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 79. С. 356. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17270892>
[*Tarasov M. et al.*. JETP Lett. 2004. V. 79. P. 298. <https://doi.org/10.1134/1.1759413>]
13. *Revin L.S., Pimanov D.A., Pankratov A.L. et al.* // Phys. Rev. Appl. 2024. T. 22. №. 6. С. 064040. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.22.064040>
14. *Kinev N.V., Chekushkin A.M., Khanet F.V. et al.* // Phys. Solid State. 2024. T. 66. №. 7. С. 1000. <https://journals.ioffe.ru/articles/58965>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

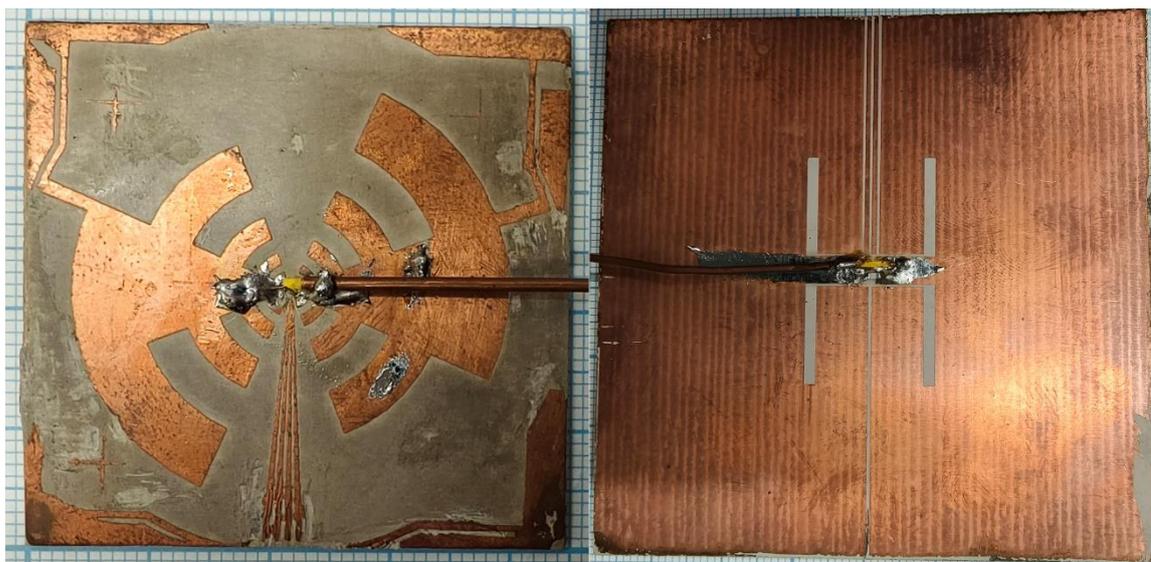
- Рис. 1.** Вид в оптическом микроскопе широкополосной логопериодической антенны диапазона 100–500 ГГц (**а**) и двойной щелевой антенны для центральной частоты 345 ГГц (**б**).
- Рис. 2.** Фотографии изготовленных масштабных моделей широкополосной логопериодической антенны диапазона 100–500 ГГц (**а**) и двойной щелевой антенны для центральной частоты 345 ГГц (**б**).
- Рис. 3.** Результаты измерений изготовленных масштабных моделей широкополосной логопериодической антенны диапазона 100–500 ГГц (**а**) и двойной щелевой антенны для центральной частоты 345 ГГц (**б**).
- Рис. 4.** Вид проектов в CST Studio Suite широкополосной логопериодической антенны диапазона 100–500 ГГц (**а**) и двойной щелевой антенны для центральной частоты 345 ГГц (**б**): 1 – золотая антенна, 2 – дискретный порт, 3 – кремниевая подложка.
- Рис. 5.** Результаты численного расчета широкополосной логопериодической антенны диапазона 100–500 ГГц (**а**) и двойной щелевой антенны для центральной частоты 345 ГГц (**б**).
- Рис. 6.** Схема и фотография экспериментальной установки с источником излучения и калибровочным приемником, находящимся снаружи криостата: 1 – источник излучения, 2 – делитель сигнала, 3 – пироприемник, 4 – криостат с оптическим окном, 5, 6, 7 – фильтры на оптических окнах.
- Рис. 7.** Схема и фотография экспериментальной установки с калибровочным источником, находящимся внутри криостата: 1 – источник излучения, 2 – аттенюаторы, 3 – волновод, 4 – криостат, 5 – фильтры, 6 – рупор, 7 – СИНИС-детектор в антенне, 8 – СИН-термометр (на чипе), 9 – RuO₂-термометр.
- Рис. 8.** Схема эксперимента с источником излучения внутри криостата (**а**) и экспериментально измеренные спектры СИНИС-детектора (**б**) в двойной дипольной (черная кривая) и логопериодической (синяя кривая) антеннах: 1 – джозефсоновский источник излучения, 2 – кремниевая линза, 3 – СИНИС-детектор в антенне.



(a)

(б)

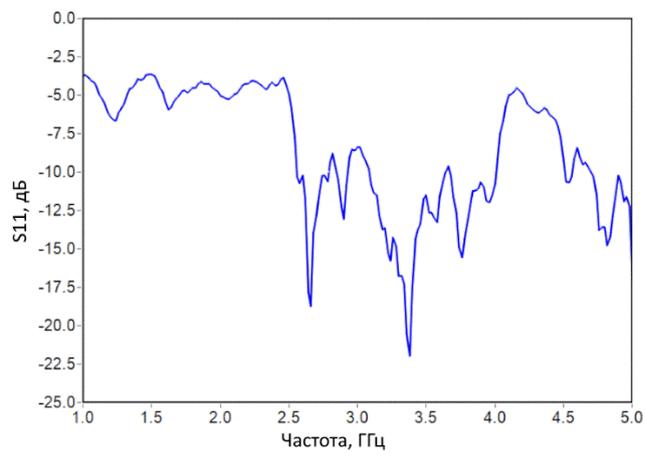
Рис. 1.



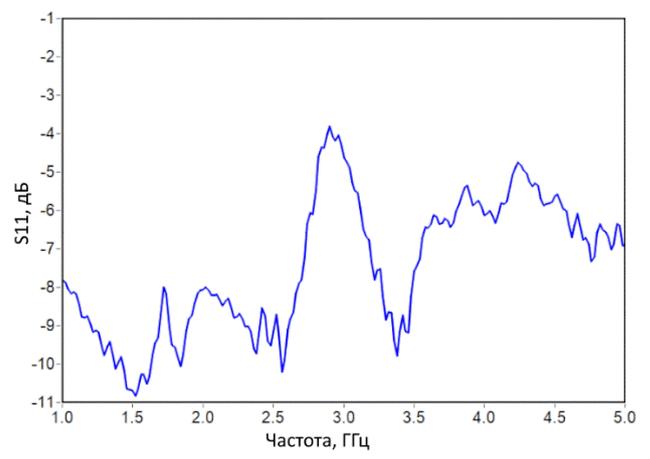
(a)

(б)

Рис. 2.

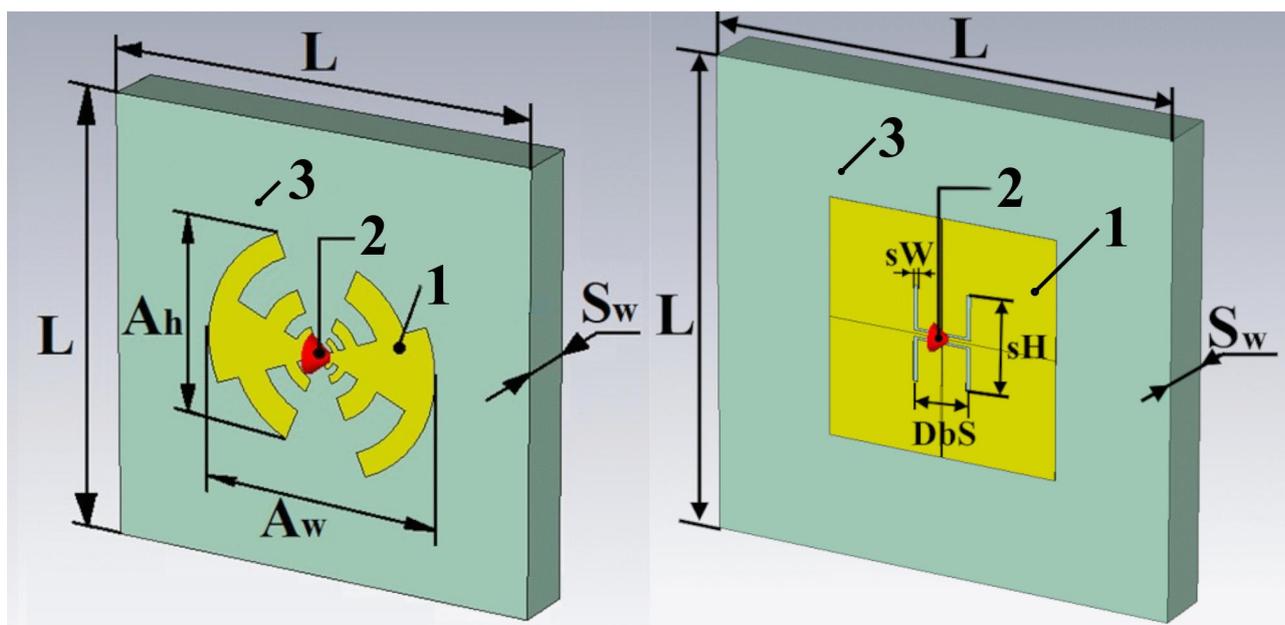


(a)



(б)

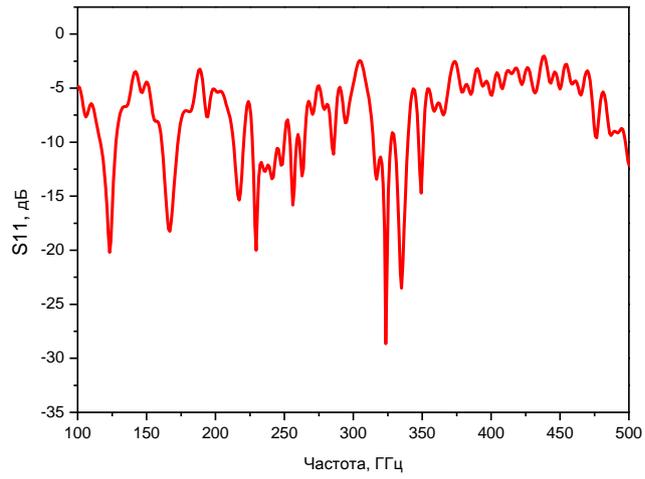
Рис. 3.



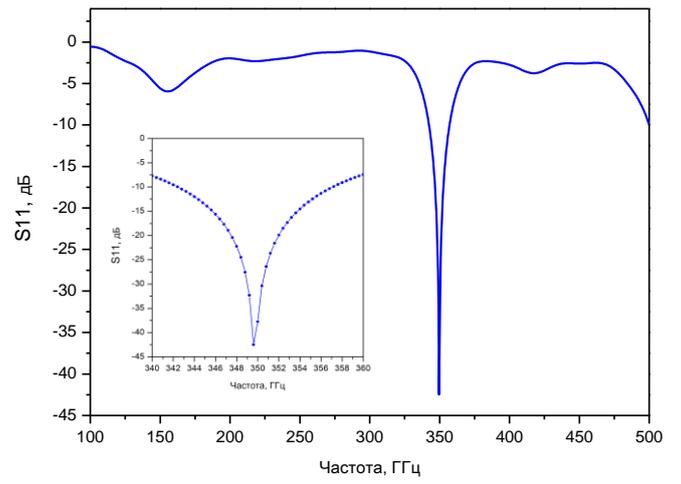
(a)

(б)

Рис. 4.



(а)



(б)

Рис. 5.

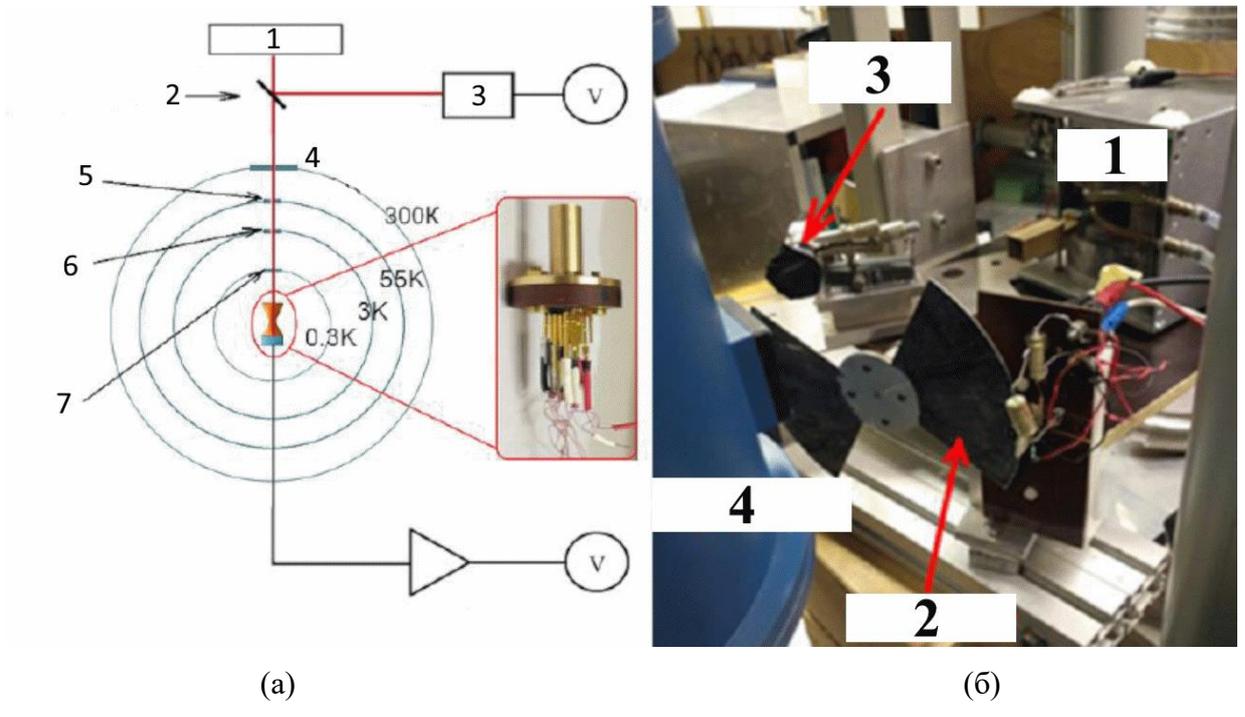


Рис. 6.

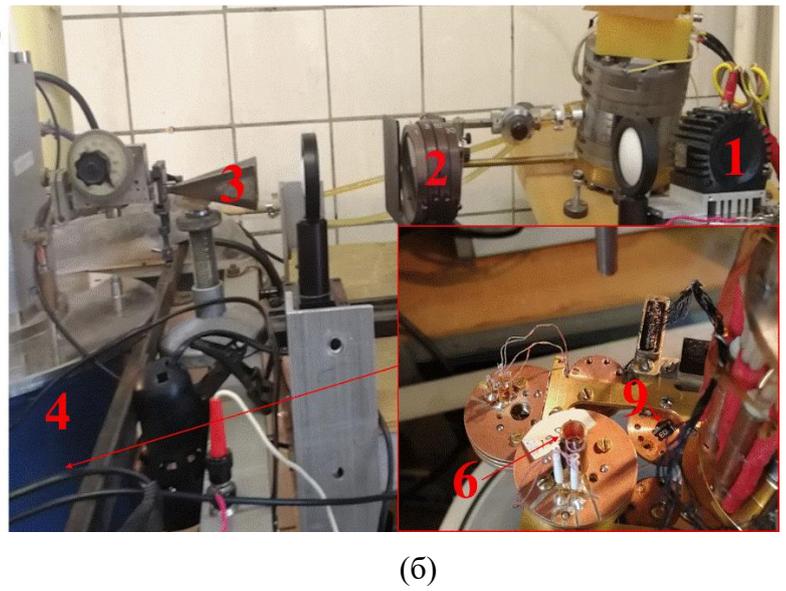
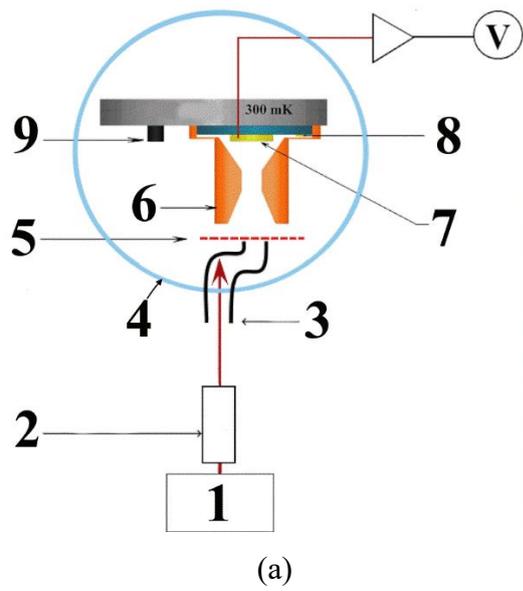
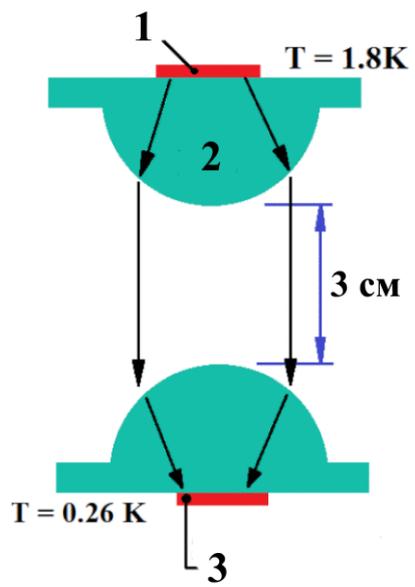
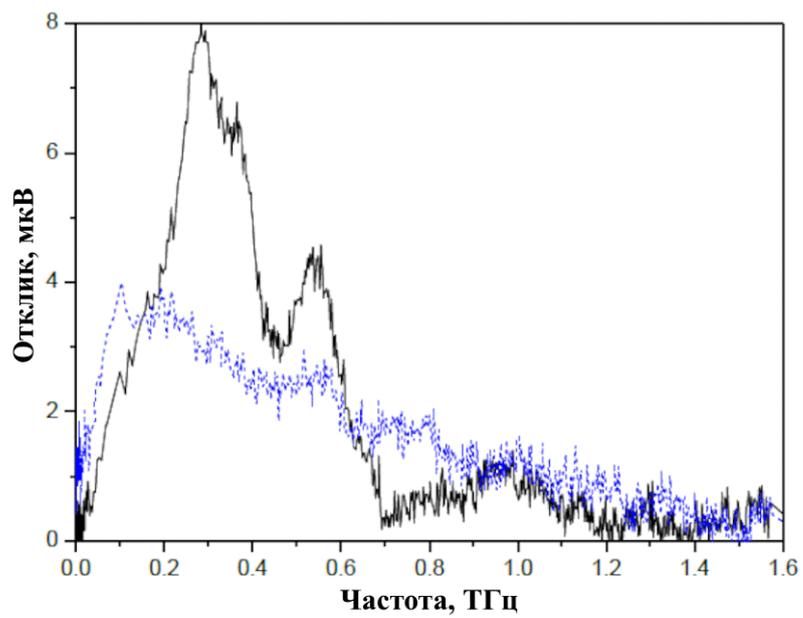


Рис. 7.



(a)



(б)

Рис. 8.