

DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.4.16 УДК: 621.396.677

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЛАНАРНЫХ АНТЕНН СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА С СИНИС ДЕТЕКТОРАМИ

А.А. Гунбина, М.А. Тарасов, А.М. Чекушкин, Р.А. Юсупов

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

Статья поступила в редакцию 7 апреля 2025 г.

Аннотация. В статье представлены результаты моделирования различных планарных антенн субтерагерцового диапазона частот: широкополосных логопериодической и синусной, а также узкополосной двойной-щелевой антенны. Рассмотрены различные методы и подходы к моделированию таких структур в программном пакете численного трехмерного моделирования CST STUDIO SUITE, которые позволяют значительно сократить время вычисления при сохранении результата. Также, представлены результаты моделирования таких антенн на гиперполусферической линзе для улучшения характеристик диаграммы направленности таких антенн. Такие антенны удобны для интеграции в них сверхпроводниковых детекторов структуры сверхпроводник – изолятор – нормальный металл – изолятор – сверхпроводник для отработки новых технологий изготовления таких структур и тестирования первичных характеристик. Такие антенных могут быть использованы и для детекторов других типов.

Ключевые слова: субТГц, планарные антенны, широкополосные антенны, узкополосные антенны, СИНИС-детекторы, логопериодическая антенна, синусная антенна, двойная-щелевая антенна, CST STUDIO SUITE.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №23-79-10262, https://rscf.ru/project/23-79-10262/

Автор для переписки: Гунбина Александра Анатольевна,

aleksandragunbina@mail.ru

Введение

B настоящее время субтерагерцовый диапазон является наиболее привлекательным и малоосвоенным для исследований и создания приборов и техники для астрономии и практических приложений [1]. Наиболее амбициозные требования к приемным системам этого диапазона предъявляет астрономия [2]. В крупномасштабных радиоастрономических приборах, например, таких как Большой Телескоп Аль-Азимутальный (БТА), [3] и Миллиметрон [4], главное зеркало собирает сигнал от исследуемого объекта, а затем, при помощи различных элементов квазиоптического тракта, этот сигнал фокусируется на чувствительном элементе приемной системы – детекторе (матрице детекторов), которые в свою очередь интегрированы в планарные антенны [5]. Одним из перспективных типов детекторов для таких задач, предлагаемых авторами статьи, является детектор на основе структуры сверхпроводник – изолятор – нормальный металл – изолятор – сверхпроводник (СИНИС), [6]. Такие детекторы интегрируются в планарные антенны различных типов (или матрицы антенн для расширения динамического диапазона приемной ячейки, [7]). Для отработки технологии изготовления таких детекторов и оценки их первичных характеристик удобно использовать одиночные планарные антенны. СубТГц планарные антенны условно можно разделить на широкополосные, узкополосные и многочастотные, каждая из которых используется в зависимости от поставленной задачи и требований к приемной системе. Для моделирования характеристик таких антенн используются различные программные пакеты численного моделирования, например CST STUDIO SUITE. Выбор методики моделирования и оптимизация проекта, для сокращения времени моделирования при сохранении результата, является отдельной задачей, которая рассмотрена в данной публикации.

1. Методика моделирования планарных антенн в CST STUDIO SUITE

Оптимизацию методики моделирования и описание параметров проекта рассмотрим на классической логопериодической антенне диапазона 100-1000 ГГц. Моделируемый проект с обозначением элементов рассчитываемой структуры приведен на рисунке 1. Согласно теореме взаимности характеристики антенны одинаковы как на прием, так и на передачу сигнала. Для упрощения проекта, удобнее моделировать передающую антенну.



Рис. 1. Моделируемый проект логопериодической антенны на кремниевой подложке. L = 2 мм – сторона подложки, S_w – толщина подложки (далее будут рассмотрены различные толщины стандартных промышленных подложек от 280 до 1000 мкм), A_h = 910 мкм – размах антенны по высоте; A_w = 910 мкм – размах антенны по ширине.

Для возбуждения антенны используется дискретный порт с сопротивлением 50 Ом. На рисунке 1 справа обозначены граничные условия (ГУ) – boundaries box, устанавливаемые перед моделированием проекта. Для рассматриваемой задачи интерес представляют такие ГУ как open и open (add space):

- Open – открытое пространство – волны проходят через границу с минимальным отражением;

- Open (*add space*) – ГУ, аналогичное Open, но добавляется дополнительное пространство для моделирования дальней зоны. Эти ГУ необходимы для моделирования антенн и получения характеристик диаграммы направленности.

В нашем случае возможно два варианта: ГУ Open (*add space*) по всем направлениям моделирования проекта. Либо, использовать Open (*add space*) по оси Z, а по осям X и Y допускается использование ГУ Open. Для сравнения,

<u>ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ, eISSN 1684-1719, №4, 2025</u>

результаты моделирования логопериодической антенны на кремниевой подложке при использовании различных ГУ приведены на рисунке 2. Гладкая характеристика при использования открытых ГУ (open) обусловлена тем, что по направлениям X и Y нет дополнительного пространства между моделируемой структурой и ГУ, а сигнал поглощается на этой границе. На практике, для исследования таких тестовых структур при криогенных температурах, исследуемый образец помещается в специализированный держатель, изготавливаемый из меди. Для «имитации» электрических стенок возможно использовать электрические ГУ (Electric) по осям X и Y. Смоделированный S11-параметр при таких ГУ также представлен на рисунке 2.

Для моделирования фазированных антенных решеток, ГУ Open по осям X и Y могут быть заменены на Periodic или Unit cell. При таких ГУ связываются две противоположные границы с фазовым сдвигом, равным нулю, так, что область расчета будет периодически расширяться в соответствующем направлении. Периодические ГУ позволяют рассчитать изменение ближнего поля вокруг одной антенны.





Другой важный момент при создании модели – выбор сетки разбиения моделируемой структуры. Недостаточное количество узлов может привести к искаженному результату, а избыточное – к длительному времени моделирования. Рекомендуется для первого проекта использовать адаптивную сетку для

<u>ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ, eISSN 1684-1719, №4, 2025</u>

определения оптимальных параметров разбиения проекта на счетные ячейки. Далее, опираясь на полученные значения (cell per wavelength и cells per max model box), задавать эти значения для последующих итераций моделирования.

Еще одно упрощение, которое может ускорить время вычисления в моделях такого типа – использовать металлизацию антенны нулевой толщины. Это допустимо, т.к. в свойствах используемого библиотечного материала «Gold», из которого выполнена антенна, не учитывается толщина скин-слоя, свойства металла прописаны как для «объемного материала» даже при нулевой толщине. В связи с этим, если толщина антенны много меньше длины волны (т.е. геометрические размеры не влияют на моделируемые характеристики) – можно использовать металлизацию нулевой толщины. В нашем случае, толщина металлизации слоя антенны обычно составляет 100-200 нм, что много меньше длины волны в рассматриваемом диапазоне частот 100-1000 ГГц (3-0,3 мм). Были смоделированы S11-параметры логопериодической антенны с тремя вариантами толщины металлизации – 0, 0,2 мкм и 1 мкм (рис. 3). Как видно, различий практически нет, но время моделирования может быть уменьшено в разы



Рис. 3. Смоделированные S11-параметры логопериодической антенны с различной толщиной металлизации.

Если необходимо учитывать толщину пленки или другие ее свойства, то существует возможность создавать «собственный» материал. Дополнительно к электрическим свойствам материала можно задать температурные,

механические и физические свойства. Также, есть возможность создавать материалы различных «типов». В нашем случае можем рассмотреть два варианта:

Lossy metal – металл с потерями. Рекомендуется использовать такой тип материала на высоких частотах для учета скин-эффекта. Пример расчета для различных толщин приведен на рисунке 4;

Thin panel – «листовой» материал, состоящий из одного или нескольких слоев. Представляет собой «имитацию» тонких пленок, или их комбинации (например, на практике часто используется трехслойная пленка Ti/Au/Pd) Пример расчета для различных толщин приведен на рисунке 5.



Рис. 4. Смоделированные S11-параметры логопериодической антенны при использовании библиотечного материала CST и при использовании созданного материала типа lossy metal.



Рис. 5. Смоделированные S11-параметры логопериодической антенны при использовании библиотечного материала CST и при использовании созданного материала типа thin panel.

Как было отмечено выше, создание «собственного» материала необходимо в том случае, если требуется учитывать отдельные характеристики пленки или, например, скин-эффект. В рассматриваемом диапазоне 100-1000 ГГц толщина скин-слоя золота составит 236-75 нм соответственно. На практике, пылится пленка требуемой толщины, чтобы перекрыть исследуемый диапазон. В связи с этим вполне может быть использован обычный библиотечный материал.

2. Широкополосные планарные антенны

2.1 Логопериодическая антенна

Интерес к логопериодической антенне обусловлен тем, что такая антенна имеет широкую полосу приема и, в связи с этим, удобна для исследования тестовых структур одиночных неселективных по частоте СИНИС-детекторов. Облучая один тестовый образец различными источниками, можно провести исследования детектора на различных частотах в одном экспериментальном цикле.

Представленные выше результаты были получены для классической логопериодической антенны. Была спроектирована антенна аналогичной структуры с более равномерным откликом на низких частотах. Предварительно, для первой итерации были увеличены габаритные размеры путем масштабирования, но это не дало интересных результатов. Как известно, длина и ширина «лепестков» классической логопериодической антенны убывают по логарифмическому закону. Была выполнена модификация топологии антенны путем формирования большего количества лепестков с одинаковой шириной. Топологии исходной и модифицированной антенны и полученные результаты моделирования приведены на рисунке 6. Моделирование выполнялось аналогично разделу 1. S11-параметр модифицированной логопериодической антенны был улучшен с -3 до -10 дБ в диапазоне частот 400-800 ГГц, но и размер антенны был увеличен более чем в 3 раза.

ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ, eISSN 1684-1719, №4, 2025



Рис. 6. Модифицированная логопериодическая антенна: а) – топология «классической» антенны с габаритными размерами в мкм; б) – топология модифицированной логопериодической антенны с габаритными размерами; в) – сравнение смоделированных S11-параметров таких антенн.

Диаграмма направленности (ДН) логопериодической антенны слабо выражена. Для улучшения характеристик ДН дополнительно может быть использована гиперполусферическая кремниевая линза. Для расчета габаритных размеров линзы могут быть использованы материалы публикации [8]. В качестве основания такой линзы может быть использована подложка, на которой располагается антенна, а сверху на нее помещается полусфера требуемого радиуса. С точки зрения удобства изготовления и эффективности популярными являются полусферические линзы на цилиндрическом основании (схематично, параметры обозначены на рис. 7 справа).

<u>ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ, eISSN 1684-1719, №4, 2025</u>

Радиус линзы R и высоту цилиндрического продолжения L, соответствующие наилучшему приближению эллипсоидальной формы, можно найти с помощью следующих выражений:

$$R = \frac{3n^2}{1+3n^2},$$

$$L = b\sqrt{\frac{n+1}{n-1}} - R.$$
(1)

Соотношение гиперполусферической линзы: L = R/n. При толщине основания (L) 280 мкм и коэффициенте преломления кремния 3,45 ($n = \sqrt{\varepsilon} = \sqrt{11.9}$), из которого выполнена линза, ее радиус составит 966 мкм. В качестве первой итерации была рассчитана диаграмма направленности логопериодической антенны на частоту 550 ГГц (середина рабочего диапазона антенны). Смоделированные ДН на линзе и без нее приведены на рисунке 8.



Рис. 7. Моделируемый проект логопериодической антенны на кремниевой гиперполусферической линзе.

Аналитически, ширина главного лепестка по уровню –3 дБ может быть вычислена по следующей формуле [8,9]:

$$\Omega = 59^0 \frac{\lambda_0}{R},\tag{2}$$

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве (для частоты 550 ГГц это соответствует 550 мкм), *R* – радиус линзы. При исходных параметрах, ширина ДН по уровню – 3 дБ составляет 16,8°. По результатам численного моделирования (рис. 8) были получены следующие значения: толщина подложки (основания) 280 мкм – 17,6° и 16,42° в зависимости от направления линий электрического поля; 500 мкм – 16,4° и 22,8°. Полученные значения довольно близки к аналитически рассчитанным. Различия объясняются тем, что для основания 500 мкм использовалась линза с тем же радиусом, что и для 280 мкм (отклонения от соотношения гиперполусферической линзы).



Рис. 8. Диаграммы направленности в декартовых координатах логопериодической антенны на подложках различной толщины с линзой и без.

2.2 Синусная антенна

Другой тип широкополосной антенны – синусная антенна. Примеры реализации таких антенн приведены в публикациях [11-14]. Предполагалось, что такая антенна будет более эффективна по сравнению с логопериодической антенной. Топологии симметричной и ассиметричной синусных антенн приведены на рисунке 9.



Рис. 9. Топологии симметричной (слева) и ассиметричной (справа) синусной антенны. Размеры указаны в мкм.

Ячейка синусной структуры формируется из синусной кривой:

$$\varphi = \left(-1\right)^{p} \sin\left[\frac{\pi \ln\left(r/R_{p}\right)}{\ln\left(\tau\right)}\right] \pm \delta, \qquad (3)$$

где, *r* и *φ* – полярные координаты для кривой, состоящей из *p* ячеек. Минимальный и максимальный радиусы ячеек определяются исходя из выбранного диапазона (схематично обозначены на рис. 10):

$$R_N = 0.5 \frac{\lambda_{max}}{4(\alpha + \delta)},\tag{4}$$

$$R_1 = 1.2 \frac{\lambda_{min}}{4(\alpha + \delta)},\tag{5}$$

где, λ_{max} и λ_{min} — длины волн на максимальной и минимальной частоте соответственно. Излучение возникает в активных регионах, где электрическая часть длины ячейки кратна $\lambda/2$ (λ — длина волны). Первый активный регион возникает примерно $r(\alpha + \delta) = \lambda/4$ (углы — в радианах). Согласно работам [11-14], наилучшими значения α и δ — 45° и 22,5°.

Для проведения численного моделирования такой структуры предварительно была подготовлена топология в AutoCAD (рис. 9), а затем конвертирована в CST и подготовлен проект по методике, представленной в разделе 1. Смоделированный S11-параметр приведен на рисунке 11.



Рис. 10. Схематичное изображение одного плеча синусной антенны.



Рис. 11. Сравнение полученных результатов моделирования \$11-параметров логопериодической и синусной антенн.

Более равномерный отклик синусной антенны связан с большей площадью заполнения металлизацией. В будущем планируется модификация такой антенны: корректировка размеров и увеличение площади заполнения.

3. Узкополосная двойная-щелевая антенна

В данном разделе рассмотрен противоположный случай приведенных выше антенн (логопериодической и синусной) – узкополосная двойная-щелевая антенна [15,16], рассчитанная на частоту 350 ГГц. Для получения первичных параметров был проведен расчет антенны в свободном пространстве (без подложки,

и соответственно в размерах не учитывалось влияние материала подложки). Моделируемый проект с обозначениями параметров и результаты моделирования приведены на рисунке 12. Далее, размеры антенны корректировались с учетом диэлектрической проницаемости ε материала (11,9 для кремния) и толщины подложки (280 мкм). Наилучший вариант был получен для антенны со следующими параметрами (обозначения указаны на рис. 12а): sH = 248 мкм; sW = 12,3 мкм; DbS = 131,2 мкм; толщина подложки – 280 мкм. Рассчитанный S11-параметр такой антенны приведен на рисунке 126. Дополнительный («паразитный») резонанс на частоте 314 ГГц обусловлен толщиной подложки: длина волны, соответствующая частоте 314 ГГц, составляет 950 мкм, а с учетом материала подложки в $\sqrt{\varepsilon} = \sqrt{11,9} = 3,45$ раз меньше – 275 мкм.



Рис. 12. Двойная-щелевая антенна: а) – Моделируемый проект с обозначениями; б) – Смоделированные S11-параметры антенны в свободном пространстве и на кремниевой подложке толщиной 280 мкм.

Импеданс дискретного порта является эквивалентом сопротивления поглотителя изготавливаемого детектора. Сопротивление поглотителя может варьироваться в зависимости от используемых материалов и размеров плёнки и составляет десятки Ом. Смоделированные S11-параметры двойной – щелевой антенны при различном сопротивлении дискретного порта представлены на рисунке 13. В практических реализация не удается идеально согласовать

импеданс детектора и антенны, поэтому важно знать, как изменяются параметры S11 антенны при неоптимальной нагрузке.





Была смоделирована диаграмма направленности такой антенны. Как и в предыдущих случаях, улучшить характеристики ДН можно также п ри помощи гиперполусферической линзы. Результаты моделирования ДН двойной – щелевой антенны с линзой и без приведены на рисунке 14. С линзой ДН составила около 20° по уровню –3 дБ.



Рис. 14. Диаграмма направленности двойной-щелевой антенны: а) – 3D изображение ДН, слева-направо: антенна в свободном пространстве, антенна на кремниевой подложке, антенна на гиперполусферической линзе; б) – ДН в декартовых координатах.

4. Технология изготовления планарных антенн с СИНИС детекторами.

Исследуемые антенны субтерагерцового диапазона частот имеют размеры единицы миллиметров и требуют точность изготовления лучше 10 мкм. Для изготовления моделируемых антенн используются стандартные технологии микро- и наноэлектроники: литография и напыление тонких пленок металлов. Так как для изготовления антенн, как правило, используются благородные и хорошо проводящие материалы, например золото или палладий, структуру слоя формируют обычно с помощью так называемого процесса взрывной фотолитографии (lift-off). Схематичное изображение процесса приведено на рисунке 15. На очищенную кремниевую подложку наносится двухслойный резист: кополимер (для создания подтрава) и резист (для формирования рисунка топологии) (рис. 15а), далее проводится экспозиция требуемой топологии (рис. 15б) и проявление (рис. 15в). Следующим этапом выполняется напыление пленки из требуемого материала (рис. 15г), как правило это трехслойка Ti/Au/Pd (тонкий подслой титана улучшает адгезию, а Pd предотвращает контакт золота с последующим слоем алюминия в СИНИС детекторах), и удаление резистивной маски в растворителе (рис. 15д,е).



Рис. 15. Схематичное изображение процесса изготовления планарной антенны.

Для интеграции СИНИС-детекторов в такую антенну могут быть использованы различные технологии в зависимости от топологии детектора и имеющегося оборудования. Подробно, технологии изготовления СИНИС-детекторов приведены в обзорной публикации [17]. Как уже упоминалось выше, для согласования с импедансом приёмной антенны важна действительная часть импеданса СИНИС детектора – нормально сопротивление металлического абсорбера. Реактивная часть, связанная с емкостью туннельных СИН переходов, на рабочих частотах антенн пренебрежимо мала. С точки зрения повышения болометрической эффективности СИНИС детекторов минимизируют объём нормального металла абсорбера – используют тонкие пленки толщиной 10-20 нм и сравнительно узкие поглотители шириной 100 нм – 2 мкм. Типичное сопротивление такого поглотителя при рабочих температурах СИНИС детектора составляет 10-70 Ом, что подходит для согласования с исследуемыми планарными антеннами. Фотографии в оптическом микроскопе изготовленных тестовых структур логопериодической и двойной щелевой антенны, а также СИНИС детектора, приведены на рисунке 16. Образцы изготавливаются на кремниевых оксидированных подложках (обычно используются подложки толщиной 280, 380 и 500 мкм). Антенны располагается по центру чипа (часто используемый размер чипа 7 на 7 мм с 16 контактами площадками по периметру), подключение к антенне может осуществляется по 2 или 4-х зондовой схеме подключения. Считывание сигнала с СИНИС детектора, интегрированного в планарные антенны, осуществляется на постоянном токе, как правило, в режиме задания тока.

ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ, eISSN 1684-1719, №4, 2025



Рис. 16. Фотографии изготовленных структур: а) – двойная-щелевая антенна; б) – логопериодическая антенна; в) – СИНИС детектор.

Заключение

Ранее для первоначальной оценки параметров исследуемых планарных антенн с СИНИС детекторами использовалось измерение масштабных моделей антенн. Достоинство таких моделей заключается в том, что не требуется сложных и дорогостоящих технологий для их изготовления, которые были описаны в предыдущем разделе. Также, такие структуры можно быстро изготовить, протестировать и сделать первичные выводы для корректировки параметров. В настоящие время доступны коммерческие пакеты 3D электромагнитного моделирования, позволяющие достаточно точно предсказать характеристики исследуемых структур.

В статье рассмотрены различные особенности численного моделирования планарных антенн в программном пакете CST STUDIO SUITE. Использование металлизации планарной антенны и определение оптимальных параметров расчетной сетки могут значительно снизить время моделирования. Были рассчитаны основные характеристики субтерагерцовых планарных антенн различной топологии: широкополосных логопериодической и синусной антенны диапазона 100-1000 ГГц и узкополосной двойной-щелевой антенны, спроектированной на частоту 350 ГГц. S11-параметр модифицированной логопериодической антенны был улучшен с -3 до -10 дБ в диапазоне частот 400-800 ГГц за счет более равномерного распределения «секций» антенны. Дополнительно характеристики диаграммы направленности таких планарных антенн могут быть значительно улучшены за счет использования гиперполусферической линзы. Амплитуда главного лепестка диаграммы направленности была увеличена с 3 до 17 дБ для логопериодической антенны на частоте 550 ГГц и с 7 до 17 дБ для двойной-щелевой антенны на частоте 350 ГГц. Представлена технология изготовления таких антенн И рассмотрены особенности интеграции с СИНИС детекторами.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №23-79-10262, https://rscf.ru/project/23-79-10262/

Литература

- A. A. Gunbina, M. A. Tarasov, M. Yu. Fominskii, A. M. Chekushkin, R. A. Yusupov and D. V. Nagirnaya. Fabrication of Aluminium Nanostructures for Microwave Detectors Based on Tunnel Junctions. . *Chapter 7 in Book: Advances in Microelectronics: Reviews, Vol. 3.* 2021 г.
- 2. J. Federici, and L. Moeller. Review of terahertz and subterahertz wireless communications. *Journal of Applied Physics*. 2010 г., Т. 107, 11.
- S.F. Likhachev, A.G.Rudnitskiy, A.S. Andrianov, et al. Subterahertz Astronomy in the Russian Federation: Prospects and Directions. *Cosmic Res.* 2024 г., Т. 62, стр. 117–131.

- Y. Balega, G. Bubnov, A. Chekushkin, V. Dubrovich, V. Edelman, A. Gunbina, S. Kapustin, T. Khabarova, D. Kukushkin, I. Lapkin, et al. Microwave Receiving System Based on Cryogenic Sensors for the Optical Big Telescope Alt-Azimuth. *Sensors*. 2024 Γ., T. 24, 2.
- I.D. Novikov, S.F.Likhachev, Y.A. Shchekinov, A.S. Andrianov, A.M. Baryshev, A.I. Vasyunin, D.Z. Wiebe, T. de Graauw, A.G. Doroshkevich, I.I. Zinchenko, et al. Objectives of the Millimetron Space Observatory science program and technical capabilitie of its realization. *Phys. Usp.* 2021 г., Т. 64, стр. 386-419.
- 6. Y. He, Y. Chen, L. Zhang, S.-W. Wong, and Z. N. Chen. An overview of terahertz antennas. *China Commun.* 2020 Γ., Τ. 17, 7, ctp. 124–165.
- M. Tarasov, A. Gunbina, A. Chekushkin, R. Yusupov, V. Edelman, and V. Koshelets. Microwave SINIS Detectors. *Applied Sciences*. 2022 Γ., T. 12, 20.
- 8. M. Tarasov, A. Gunbina, A. Chekushkin, V. Vdovin, and A. Kalaboukhov. Arrays of Sub-Terahertz Cryogenic Metamaterial. *Applied Sciences*. 2021 г., Т. 11, 20.
- А.А. Артеменко, А.А. Мальцев, Р.О. Масленников, А.Г. Севастьянов, В.Н. Ссорин. Исследование кремниевых интегрированных линзовых антенн для систем радиосвязи частотного диапазона 60 ГГц. Известия вузов. Радиофизика. 2012 г., Т. 55, 8, стр. 565-575.
- 10. К. М. Р. Aghdam, R. Faraji-Dana, and J. Rashed-Mohassel. The sinuous antenna
 A dual polarized feed for reflector-based searching systems. *Int. J. Electron. Commun.* 2005 г., Т. 59, стр. 392–400.
- D. A. Crocker and W. R. Scott, Jr., On the design of sinuous antennas for UWB radar applications. *IEEE Antennas Wireless Prop. Lett.* 2019 г., Т. 18, 7, стр. 1347– 1351.
- 12. N. Steenkamp, D.I.L. de Villiers, and N. Mutonkole. Wideband pyramidal sinuous antenna for reflector antenna applications. *in Proc. 11th Eur. Conf. Antennas Propag. (EUCAP).* 2017 г., стр. 2291–2295.
- 13. Rebeiz, G. M. Millimeter-wave and terahertz integrated circuit antennas. *Proc. IEEE*. 1992 г., Т. 80, 11, стр. 1748–1770.

- 14. Filipovic D. F., Gearhart S. S., Rebeiz G. M. Double-slot antennas on extended hemispherical and elliptical silicon dielectric lenses. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*. 1993 г., Т. 41, 10, стр. 1738-1749.
- 15. M. Tarasov, A. Shul'man, O. Polyansky, A. Vystavkin. Quasioptical integrated HTS direct detector for Hilbert spectroscopy in 350-850 GHz band. *The Far Infrared and Submillimetre Universe*. 1997 г., Т. 401, стр. 445.
- 16. Tarasov, M., Kuzmin, L., Stepantsov, E., & Kidiyarova-Shevchenko, A. quasioptical terahertz spectrometer based on a josephson oscillator and a cold electron nanobolometer. [авт. книги] R., Sidorenko, A., Tagirov, L., Gross. 2006, стр. 325-335.
- 17. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарёв Л.И. *Устройства СВЧ и антенны*. Москва : Радиотехника, 2006. стр. 376 с.
- Bradley, R. Gawande and R. Towards an ultra wideband low noise active sinus feed for next generation radio telescopes. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*. 2011 г., Т. 59, 6, стр. 1945-1953.

Для цитирования:

Гунбина А.А., Тарасов М.А., Чекушкин А.М., Юсупов Р.А. Проектирование планарных антенн субтерагерцового диапазона с СИНИС детекторами. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 4. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.4.16