

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.8.12>

УДК: 535.215, 621.396.67

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РЕКТЕННЫХ СИСТЕМ

Д.Р. Сюняев, К.Т.Ч. Ву, Г.М. Казарян, В.Л. Саввин

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, стр.2, физический факультет

Статья поступила в редакцию 14 июня 2022 г.

Аннотация. В статье описана возможность применения ректенн для приема и преобразования солнечного излучения в инфракрасном диапазоне. В ходе выполнения работы была смоделирована нанометровая антенна (наноантенна) и ректенная решетка с резонансной частотой частоте 300 ТГц. Разработанная численная модели ректенной системы позволяет оценить изменения диаграмма направленности, эффективности в зависимости от размеров, количества ячеек наноантенн в решетке и от материала подложки ректенны. Также оценены параметры МИМ диода необходимого в выпрямляющей цепи ректенны, получены численные значения емкости необходимые для получения высокоэффективной ректенны.

Ключевые слова: ректенна, диаграмма направленности.

Автор для переписки: Сюняев Дамир Рафаилович, damirsyunyaev@mail.ru

Введение

В настоящее время, вследствие растущей глобальной энергетической потребности активно развиваются нетрадиционные способы получения энергии, например: солнечная энергетика. Для преобразования энергии солнечного излучения в электрическую энергию используются полупроводниковые фотоэлементы. До недавнего времени развитие солнечной энергетики в

основном было связано с неорганическими полупроводниковыми фотоэлементами. КПД на основе таких систем не превышает 46%. Однако, стоимость электроэнергии, полученной с помощью таких фотоэлементов, в несколько раз дороже электроэнергии, произведенной традиционными способами и производственные процессы являются сложными. В связи с этим, активно разрабатываются новые фотовольтаические материалы и технологии для создания конкурентоспособных устройств. В качестве таких фотовольтаических материалов нового поколения рассматривают органические полупроводники. Свойства, присущие органическим солнечным фотоэлементам, позволяют их использовать везде, где требуются механическая гибкость, малый вес и большая площадь. Однако эффективность преобразования энергии органических солнечных фотоэлементов на данный момент невысока: КПД составляет не более 12%. Решением проблемы низкого КПД могут быть оптические ректенны – устройства преобразования солнечной энергии в электрический ток, работающие в оптическом диапазоне. Классические выпрямители могут выпрямлять широкий диапазон частот с эффективностью, близкой к 100%. Если оптические ректенны работают таким же образом, то должны быть достигнуты очень высокие эффективности в широком спектре. Материалы, используемые в ректеннах, могут быть недорогими и широкодоступными, состоящими из тонкопленочных металлов и изоляторов на различных подложках.

1. Принципиальная схема ректенны

Ректенна представляет собой устройство резонансного типа для сбора энергии электромагнитных волн. Она состоит из антенны, которая принимает сигнал, и выпрямителя тока, в роли которого используют диоды (рис. 1). Основным достоинством ректенны является то, что ее рабочая частота может быть настроена выбором геометрических параметров антенны, что позволяет использовать ее в широком диапазоне частот.

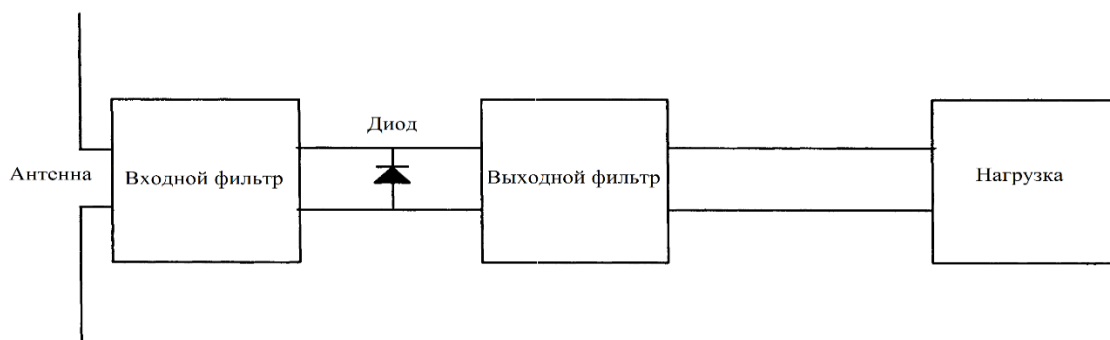


Рис. 1. Принципиальная схема ректенны

В качестве выпрямительного элемента в ректеннах используются различные виды диодов. Оптимальным выбором для нашей задачи является МИМ диод, так как он является более эффективным в терагерцовом диапазоне частот. Диод металл-изолятор-металл (МИМ) – это устройство, которое может достигать выпрямления на высоких частотах и представляет из себя тонкий слой изолятора, зажатый между двумя металлами. Квантово-механическая частица может туннелировать через барьер, что невозможно в классической механике. Туннелирование становится более значительным, когда барьер находится в наноразмерном масштабе. Считается, что в МИМ-диодах потенциальный барьер создается за счет свойств слоя изолятора. Толщина потенциального барьера должна быть менее 10 нм для достижения туннелирования. Важными параметрами, которые показывают производительность диода, являются вольт-амперная характеристика, асимметрия и нелинейность. Эти параметры изменяются в зависимости от работы выхода металлов, электронного сродства изолятора, толщины изолятора и т. д.

В данной работе была вычислена емкость диода в зависимости от выбора материала подложки. Емкость диода вычисляется по формуле [1]:

$$C_d = \frac{1}{\omega} \left(\frac{R_a + R_d}{R_a R_d} \right) \cdot \sqrt{\left(4 \frac{R_a R_d}{(R_a + R_d)^2} - \eta_c \right) / \eta_c} . \quad (1)$$

Вычисления были проведены на языке python 3.0.

R_a , R_d – сопротивления антенны и диода соответственно $\omega = 2\pi \cdot f$ [ТГц], рабочая частота. C_d – емкость диода, η_c – КПД согласования антенны и диода.

При этом мы знаем $R_d = 50 \text{ Ом}$, $R_a = \rho \frac{l}{S}$, где ρ – удельное сопротивление золота, l – длина антенны, S – площадь поперечного сечения антенны.

Таблица 1. Значения емкостей МИМ диода
для различных материалов подложки

Материал	Емкость, Ф
Бумага	$1,22 \times 10^{-16}$
Поликарбонат	$1,27 \times 10^{-16}$
Галлий Арсенид	$1,11 \times 10^{-16}$
Полиимид	$1,32 \times 10^{-16}$

2. Постановка задачи и решение

При моделировании антенны необходимо понимать, на какой частоте она должна работать. Поскольку данная работа посвящена моделированию ректенн, в частности применяемых в задачах приема и преобразования солнечного излучения, то необходимо выбрать частоту (или частоты), включенные в спектр излучения солнца

При выборе диапазона частот будем учитывать несколько факторов:

- Технологические ограничения – производство очень маленьких антенн является очень непростой задачей, что делает использование ультрафиолетового и видимого диапазона частот затруднительным.
- Интенсивность излучения солнца в заданном диапазоне – частоты, на которых солнце излучает более интенсивно, являются более приоритетными для использования (видимый диапазон, коротковолновая часть инфракрасного диапазона).
- Также, мы видим, что волны из ИК-диапазона меньше рассеиваются в атмосфере Земли, а значит этот диапазон наиболее интересен в рамках данной задачи.

Получаем, что наиболее оптимальным диапазоном частот для использования является коротковолновая часть инфракрасного диапазона.

При выборе конкретной частоты в диапазоне необходимо сконцентрироваться на максимумах интенсивности излучения солнца и избегать провалов интенсивности. Поэтому, оптимальными частотами могут быть частоты, соответствующие длинам волн 800 нм, 1000 нм, 1250 нм, а частоты, соответствующие длинам волн 950 нм или 1150 нм являются нежелательными.

Для моделирования наноантен использовалась программа CST MICROWAVE STUDIO (студенческая версия), которая позволяет численно моделировать высокочастотные устройства, в т.ч. ректенны. Вычисления проводились с помощью вычислителя в частотной области (Frequency Domain Solver).

2.1. Численное моделирование и результаты расчетов массива ректенн для детектирования в ИК диапазоне длин волн

Основной целью данного исследования является реализация численной модели и оценка возможности реализации ректенны эффективно работающего на частоте 300 ТГц.

Для достижения этой цели необходимо реализовать численную модель и как оптимизировать геометрию, так и оценить возможность и рациональность реализации ректенны на разных материалах подложки. Вид готовой модели ректенны представлен на рис. 2.

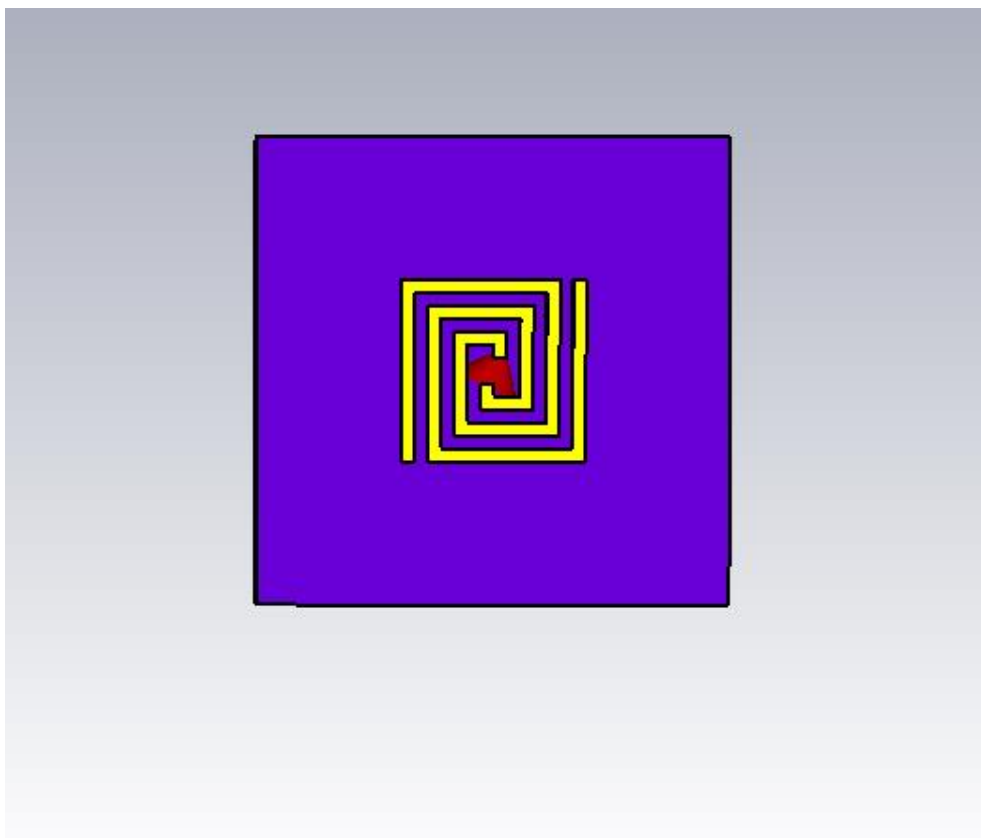


Рис. 2(а). Вид излучателя

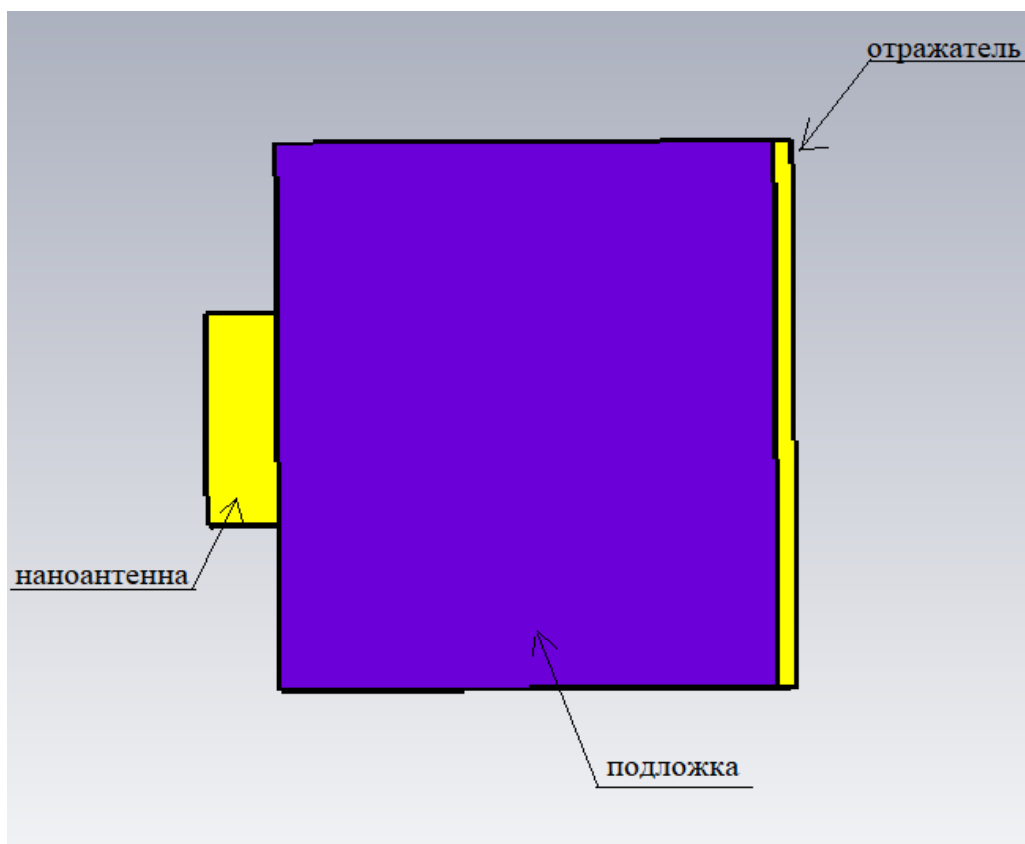


Рис. 2(б). Антенна в разрезе

Формула для расчета КПД согласования антенны и диода:

$$\eta_c = \frac{4 \frac{(R_a R_d)}{(R_a + R_d)^2}}{1 + (\omega \frac{R_a R_d}{(R_a + R_d)} C_d)^2}, \quad (2)$$

R_a , R_d – сопротивления антенны и диода соответственно, $\omega = 2\pi \cdot f$ [ТГц] – рабочая частота, C_d – емкость диода. Получаем емкость диода

$$C_d = \frac{1}{\omega} \left(\frac{R_a + R_d}{R_a R_d} \right) \cdot \sqrt{\left(4 \frac{R_a R_d}{(R_a + R_d)^2} - \eta_c \right) / \eta_c}, \quad (3)$$

где $\eta_c = 0,99$.

2.2. Определение геометрических размеров наноантенны, подложки и отражателя

Анализируя формулу для емкости диода, получим условие на положительные значения емкости. Проведя численные расчеты, приходим к выводу, что толщина наноантенны должны быть не менее 35 нм. При моделировании подложки разумным является нанесение дополнительного отражающего слоя, который позволит увеличить интенсивность солнечного излучения, попадающего на наноантенну. Для максимально эффективного приема такую поверхность необходимо установить на расстоянии четверти длины волны от антенны. Линейные размеры такой поверхности должны покрывать все задействованные ячейки наноантенн. Толщина слоя должна быть достаточной для того, чтобы исключить прохождения света сквозь отражающий слой. Пространство между отражающей поверхностью и наноантенной можно заполнить диэлектриком, который будет иметь те же линейные размеры, что и отражающая поверхность, а толщина такого слоя, очевидно, составит четверть длины волны в соответствующей среде. Для определения толщины отражателя исследуется вид кривой s-параметра в зависимости от толщины золотого отражателя. Графики представлены для значений: 1 нм, 5 нм, 10 нм, 15 нм, 20 нм (рис. 3). Исследование было проведено с подложкой из GaAs.

А) 1 нм

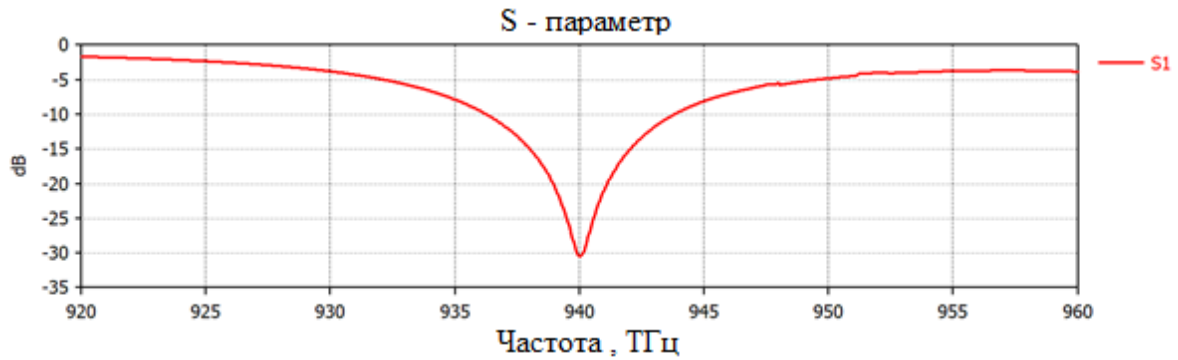


Рис. 3(а). График s11-параметра от частоты при толщине отражателя 1 нм

Б) 5 нм

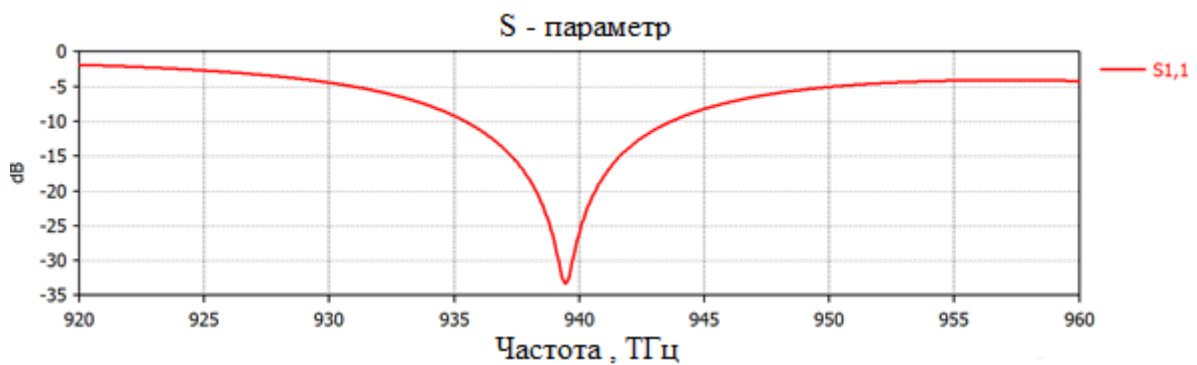


Рис. 3(б). График s11-параметра от частоты при толщине отражателя 5 нм

В) 10 нм

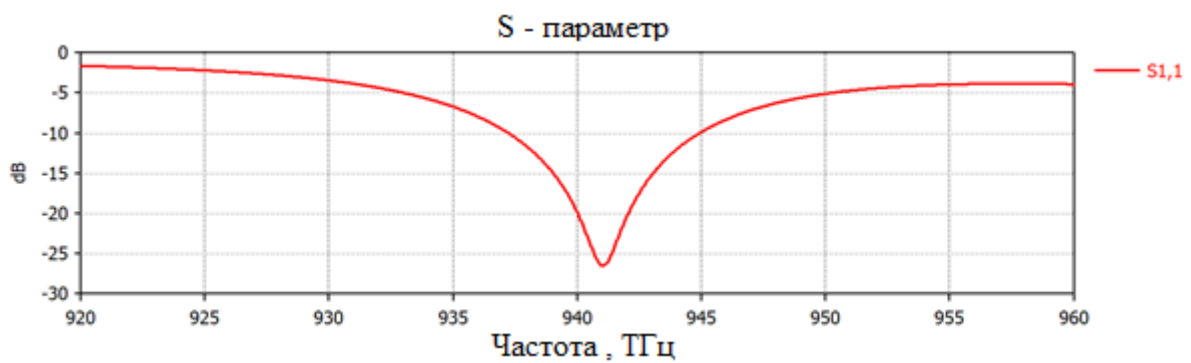
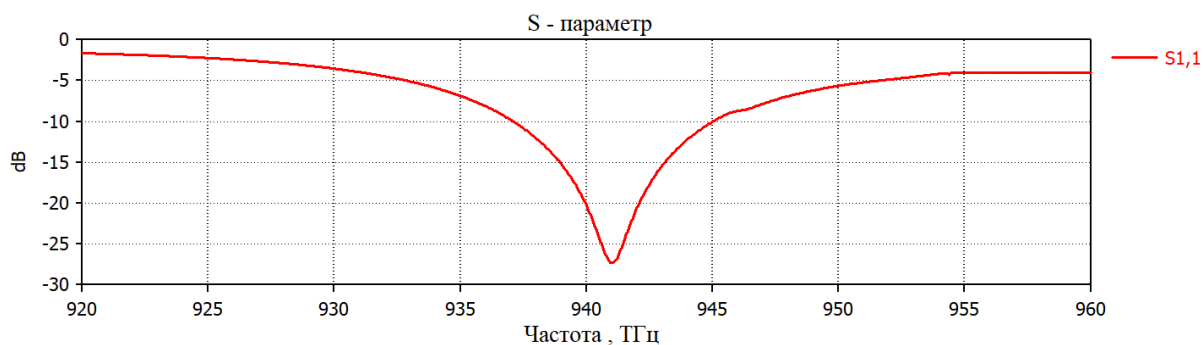
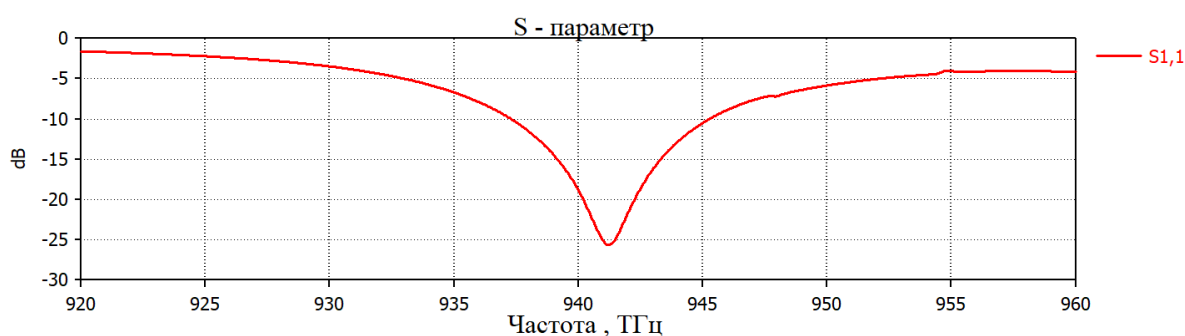


Рис. 3(в). График s11-параметра от частоты при толщине отражателя 10 нм

Г) 15 нм

Рис. 3(г). График s₁₁-параметра от частоты при толщине отражателя 15 нм

Д) 20 нм

Рис. 3(д). График s₁₁-параметра от частоты при толщине отражателя 20 нм

Из этих графиков мы делаем вывод что оптимальная толщина отражателя 10 нм, так как этот случай имеет самую узкую полосу пропускания и наибольшую амплитуду по модулю.

Установлено, что при одинаковых геометрических размерах наноантенны резонансная частота ректенны сдвигается при изменении толщины отражателя от 1 нм до 20 нм на 1-2%, что позволит предъявлять менее жесткие требования при нанесении отражающего слоя подложки.

2.3. Выбор материала подложки

1) Полиамид

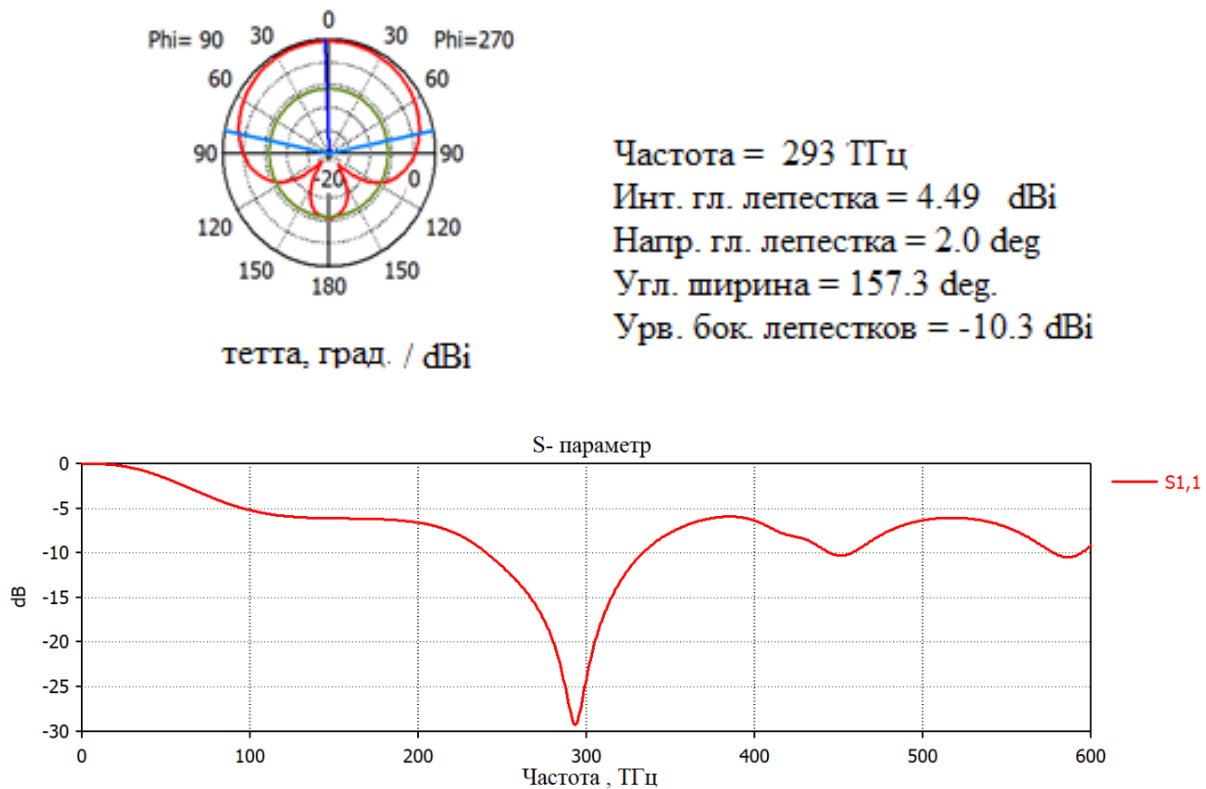


Рис. 4(а). Диаграмма направленности и зависимость параметра S_{11} от частоты, если материал подложки полиамид

2) Арсенид галия

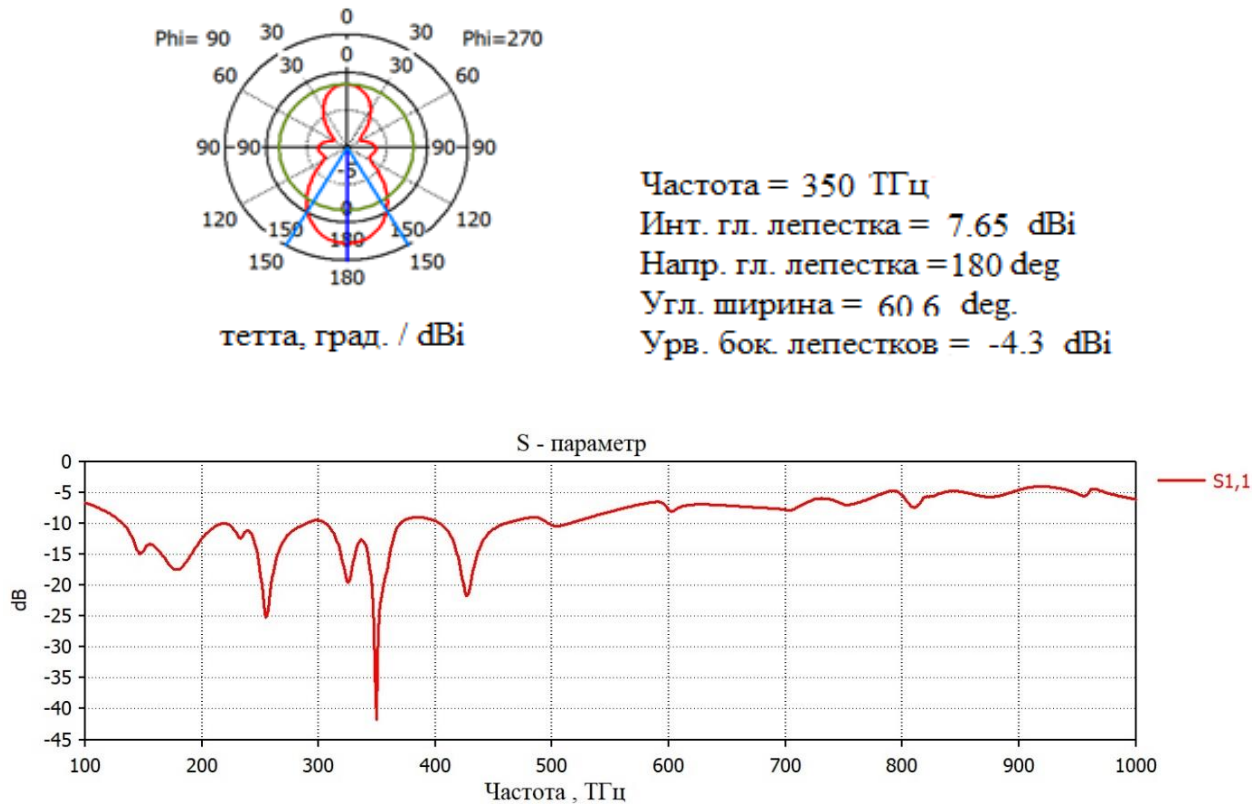


Рис. 4(б). Диаграмма направленности и зависимость параметра S_{11} от частоты, если материал подложки GaAs

3) Бумага

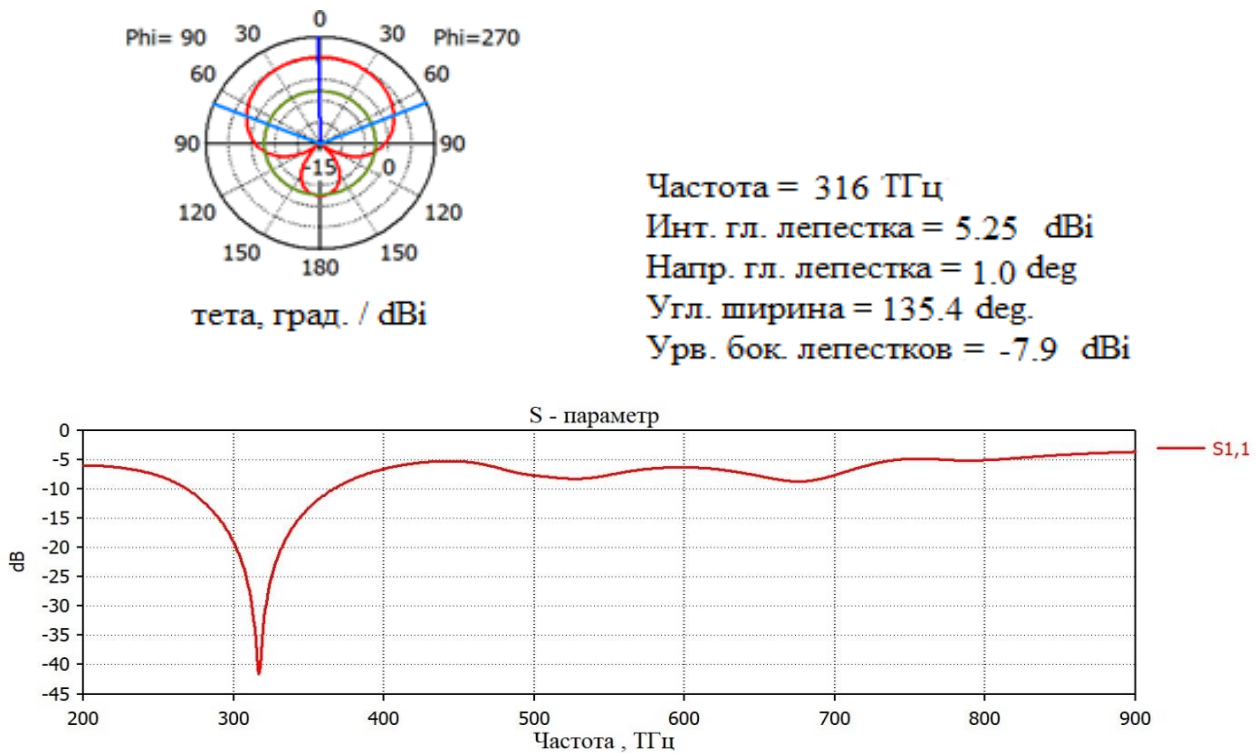


Рис. 4(в). Диаграмма направленности и зависимость параметра S_{11} от частоты, если материал подложки бумага

4) Поликарбонат

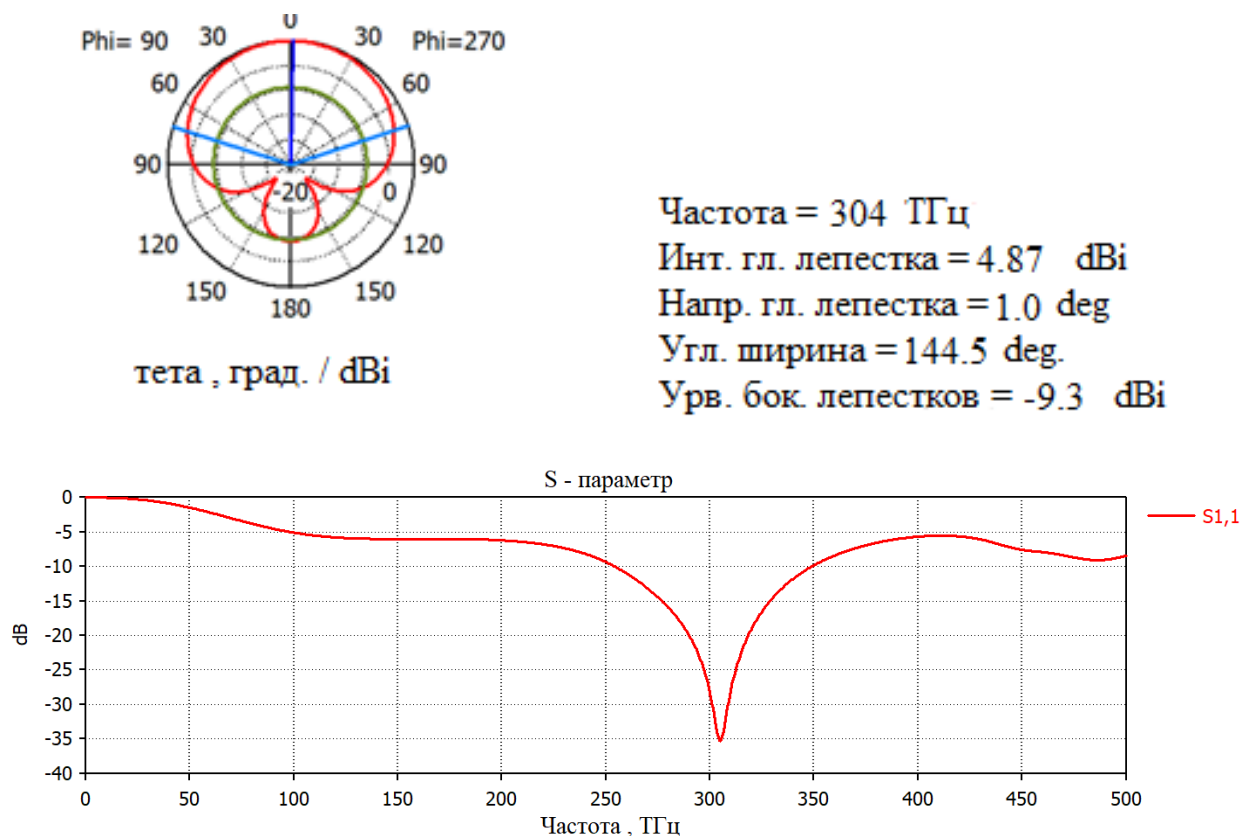


Рис. 4(г). Диаграмма направленности и зависимость параметра S_{11} от частоты, если материал подложки поликарбонат

Выбор данных материалов обосновывается тем, что они являются эластичными и достаточно распространенными.

Таблица 2. Свойства материалов используемых в данном моделировании

Материал	ϵ	μ	$\rho, \text{кг/м}^3$
Бумага	2.31	1	800
Полимид	3.5	1	1400
Поликарбонат	2.9	1	1200
Галлий Арсенид	12.94	1	5320

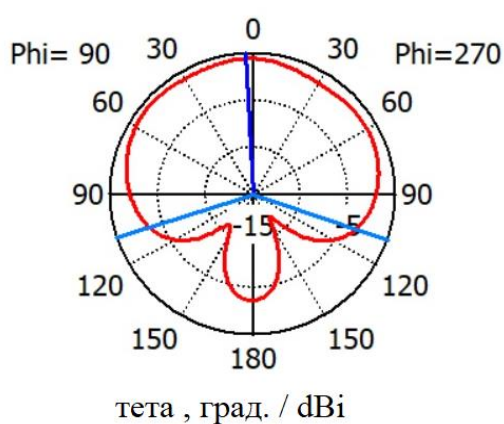
При анализе результатов численного эксперимента установлено, что при одинаковых геометрических размерах наноантенны, при изменении материала подложки на пластичные виды резонансная частота ректенны может изменяться от 2% до 16%. Наиболее эффективными оказались материалы подложки из

бумаги и поликарбоната, что даст технологическую возможность реализации ректенн с помощью печати на пластиковые подложки.

2.4. Расчет физических характеристик массива ректенн состоящих из 4-х, 16-и, 25-и элементов

Была исследована зависимость диаграммы направленности от количества антенн в решетке. Материал подложки: бумага.

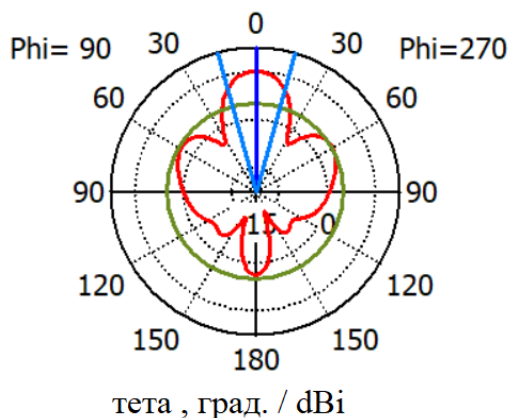
А) Решетка из 4 ректенн



Частота = 316 ТГц
Ин-ть гл. леп. = -0.593 dBi
Напр. гл. леп. = 3.0 гр.
Углов. ширина = 217.3 гр.

Рис. 5(а). Диаграмма направленности решетки из 4 антенн

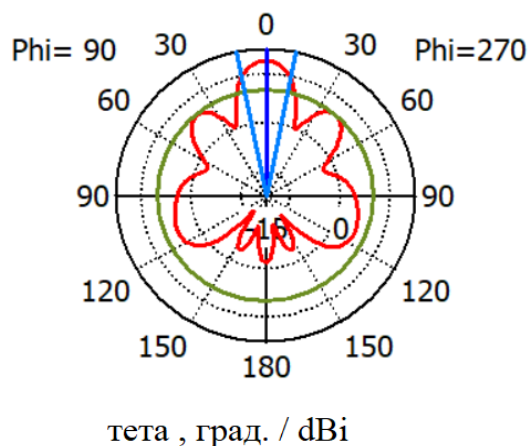
Б) Решетка из 16 ректенн



Частота = 316 ТГц
Ин-ть глав. лепестка = 10.1 dBi
Напр-ть гл. лепестка = 0.0 гр.
Угловая ширина = 31.0 гр.
Ур-нь бок. лепестков = - 6.8 dB

Рис. 5(б). Диаграмма направленности решетки из 16 антенн

В) Решетка из 25 ректенн



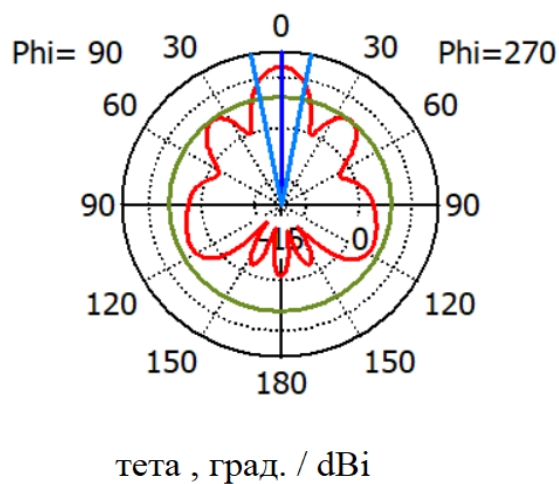
Частота = 316 ТГц
 Ин-ть глав. лепестка = 12.6 dBi
 Напр-ть глав. лепестка = 0.0 гр.
 Угловая ширина = 22.6 гр.
 Ур-нь боков. лепестков = -6.0 dB

Рис. 5(в). Диаграмма направленности решетки из 25 антенн

Все эксперименты проведены для антенны с материалом подложки бумага.

2.5. Зависимость диаграммы направленности и эффективности решетки из 25 антенн от ее растяжения на 5%, 10% и 30%

А) Растяжение на 5%

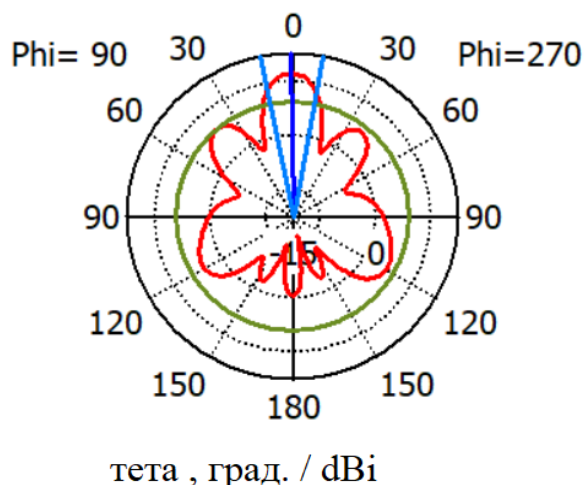


Частота = 316 ТГц
 Ин-ть глав. лепестка = 12 dBi
 Напр-ть глав. лепестка = 0.0 гр.
 Углов. ширина = 21.9 гр.
 Ур-нь боков. лепест. = - 5.9 dB

Рис. 6(а). Диаграмма направленности антенны при растяжении на 5%

КПД при таком растяжении 50.143%.

Б) Растяжение на 10%

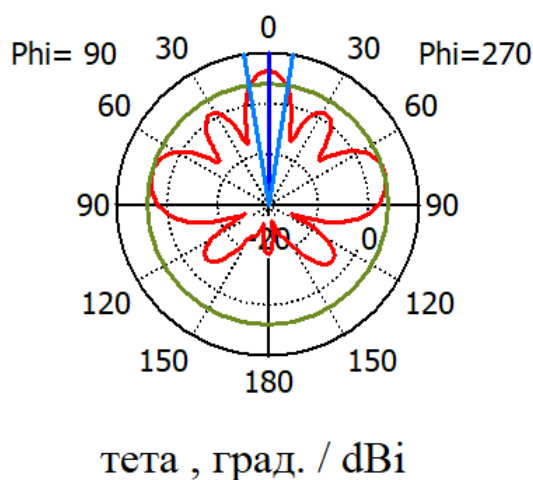


Частота = 316 ТГц
 Инт-ть глав. лепестка = 12 dBi
 Напр-ть глав. лепестка = 0.0 гр.
 Углов. ширина = 21.0 гр.
 Ур-нь боков. лепестков = -5.2 dB

Рис. 6(б). Диаграмма направленности антенны при растяжении на 10%

КПД при таком растяжении 50.377%.

В) Растяжение на 30%



Частота = 316 ТГц
 Инт-ть глав. лепестка = 6.36 dBi
 Напр-ть глав. лепестка = 0.0 гр.
 Углов. ширина = 18.4 гр.
 Ур-нь боков. лепестков = -2.5 dB

Рис. 6(в). Диаграмма направленности антенны при растяжении на 30%

КПД при таком растяжении 51.781%.

Все данные получены для ректенны с материалом подложки-бумага.

Было показано, что при деформации ректенной решетки из двадцати пяти наноантенн диаграмма направленности становится узконаправленной, а эффективность меняется не более чем на 2%. Также было установлено, что при увеличении расстояния между элементами решетки, от $\lambda/4$ до λ уровень

боковых лепестков увеличивается, а оптимальным является расстояние между элементами решетки равное $\lambda/4$.

Заключение

В данной работе была исследована возможность применения ректенн для приема и преобразования солнечного излучения в инфракрасном диапазоне. В ходе выполнения работы была смоделирована наноантенна и решетка из наноантенн, эффективно принимающих на частоте 300 ТГц. Были достигнуты следующие результаты:

- 1) Исходя из соображений возможности технологической реализации, а также настройки на конкретную длину волны подобраны геометрические параметры антенны.
- 2) Для разных видов материалов подложки получены диаграммы направленности, а также эффективности ректенного элемента с целью оценки возможности реализации ректенн на пластичных подложках.
- 3) Оценены параметры МИМ диода, необходимого в выпрямляющей цепи ректенны, получены численные значения емкости, необходимые для получения высокоэффективной ректенны.
- 4) Смоделированы ректенные решетки из разного количества наноантенн и получены диаграммы направленности, а также изучено их изменение в зависимости от растяжения решетки и расстояния между отдельными элементами решетки.

Идея ректенны является перспективной так, как ее КПД больше, чем КПД полупроводниковых элементов и из-за своих размеров, порядка сотни нанометров, может быть применима в широкой области.

Литература

1. Moddel G., Grover S. *Rectenna Solar Cells*. New York, Springer. 2013. 399 p.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3716-1>

2. Ву К.Т.Ч., Казарян Г.М., Саввин В.Л. Детектирование терагерцового излучения при помощи ректенн. *Известия Российской Академии Наук. Серия Физическая*. 2020. Т.84. №1. С.73-76.
<https://doi.org/10.31857/S0367676520010330>
3. Ву К.Т.Ч., Казарян Г.М., Саввин В.Л. Планарные антенные решетки со спиралевидными элементами для терагерцовой ректенны. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №2.
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.2.5>
4. Wang Y., Zhao Z., Chen Z., Wang L. Characterization of Golay detector for the absolute power measurement of terahertz radiation. *37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2012. P.1-2.
<https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2012.6380076>
5. Brown W.C. The History of Power Transmission by Radio Waves. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1984. V.32. №9. P.1230-1242.
<https://doi.org/10.1109/TMTT.1984.1132833>

Для цитирования:

Сюняев Д.Р., Ву К.Т.Ч., Казарян Г.М., Саввин В.Л. Оптимизация элементов ректенных систем. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.8.12>