

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА**

На правах рукописи

Вы Кирилл Тхе Чуенович

**Преобразование терагерцового излучения
в электрический ток**

Специальность:

1.3.4 — радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре фотоники и физики микроволн физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный
руководитель:

Саввин Владимир Леонидович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры фотоники и физики микроволн физического
факультета Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова

Официальные
оппоненты:

Корженевский Александр Владимирович,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории математических
методов в радиофизике и биомедицине Института
радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова
Российской академии наук (ИРЭ РАН)

Шешин Евгений Павлович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заместитель заведующего кафедрой вакуумной электроники
факультета физической и квантовой электроники
Московского физико-технического института
(национального исследовательского университета)

Макаров Валерий Николаевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры биокибернетических систем и
технологий Института искусственного интеллекта
МИРЭА — Российского технологического университета

Защита состоится «10» ноября 2022 года в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.013.6(МГУ.01.08) на физическом факультете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физическая аудитория имени Р.В. Хохлова.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций Научной библиотеки Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (119192, г. Москва, Ломоносовский пр-т, д. 27) и в сети Интернет:
<https://istina.msu.ru/dissertations/428079051/>

Автореферат разослан «___» октября 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.013.6(МГУ.01.08)
доктор физико-математических наук, доцент
kosareva@physics.msu.ru

О.Г. Косарева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Границы терагерцового излучения в самом широком случае определяются как 0,1 – 30 ТГц. Исследованию терагерцового и преобразованию терагерцового излучения в электрический ток ректеннами (выпрямляющими антеннами) посвящено значительное количество современных исследований. Терагерцовый диапазон представляет интерес в силу многочисленных потенциальных применений и наличия ряда примечательных свойств. Использование для детектирования терагерцового излучения именно ректенн стало перспективно благодаря современному развитию технологий производства наноструктур.

К достоинствам ректенн обычно относят возможность получить практически любую заданную частотную характеристику и диаграмму направленности при помощи подбора подходящей антенны. Некоторые работы также отмечают низкую токсичность материалов, обычно предлагаемых для использования в терагерцовых ректеннах.

В настоящее время терагерцовые ректенны как устройства существуют исключительно в виде экспериментальных образцов. Демонстрируемые в многочисленных экспериментальных работах характеристики пока еще недостаточны для практического применения.

Основные проблемы использования ректенн как детекторов терагерцового излучения можно разделить на следующие группы.

Во-первых, проблемы построения подходящих антенных структур. Короткие длины волн, характерные для терагерцового диапазона, диктуют малые размеры требуемых для приема терагерцового излучения антенн. Более того, в этом диапазоне становятся заметны отклонения от классической теории антенн, обусловленные конечной проводимостью металлов.

Во-вторых, проблемы разработки выпрямляющих элементов. Микроволновые ректенны традиционно используют диоды с барьером Шоттки и добиваются больших значений КПД (до 90%). Однако характеристики таких диодов резко ухудшаются при их применении на частотах, больших 1 ТГц. Разработке выпрямляющих элементов, способных работать в терагерцовом диапазоне, посвящено множество современных исследований.

В-третьих, проблемы согласования антенны и выпрямляющего элемента. Эта группа проблем возникает из первых двух и лишь усугубляется сложностью создания согласующих структур на терагерцовых частотах.

В-четвертых, технологические проблемы изготовления собственно ректенн. Экспериментальные образцы часто изготавливаются при помощи фокусируемого ионного луча и атомно-слоевого осаждения. Эти методы не подходят для массового производства.

В настоящий момент все из перечисленных групп проблем представляют собой актуальные направления исследований.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы являлось исследование физических основ приема и преобразования терагерцового излучения при помощи ректенн. В рамках указанной цели решались следующие задачи:

1. Анализ различных вариантов антенн терагерцового диапазона, в частности антенн с круговой диаграммой направленности
2. Исследование различных топологий антенной решётки для увеличения напряжения, подаваемого на выпрямляющий элемент ректенны в условиях работы в терагерцовом диапазоне
3. Изучение физических основ преобразования сигналов терагерцовых частот в постоянный ток при помощи нелинейных элементов

Объект и предмет исследования

Предметом рассмотрения диссертационной работы является преобразование терагерцового излучения в электрический ток. Объектом исследования были выбраны ректенны терагерцового диапазона с круговой диаграммой направленности, выпрямляющим элементом которых является диод типа металл-диэлектрик-металл.

Методология исследования

Проведенные в диссертационной работе исследования опираются на численные модели, используемые в современном программном обеспечении, предназначенном в том

числе для разработки и анализа антенн, а также численные модели, валидированные в ходе самой работы на тестовых задачах.

Научная новизна

1. Впервые изучены физические характеристики терагерцовой антенны в виде квадратной спирали, обладающей несколькими узкими резонансами, подходящими для использования в качестве рабочих частот, и высокой степенью равномерности диаграммы направленности на этих резонансах.
2. Впервые исследована схема построения антенной решетки для терагерцовой ректенны с объединением элементов в плоскости решетки с минимальным расстоянием между элементами, а также альтернативная схема построения антенной решетки с объединением элементов вне плоскости решетки за металлическим экраном-отражателем; произведено сравнение исследованных схем.
3. Впервые предложено использовать для определения положения пиков распределения по энергии плотности тока через МДМ-диод при помощи собственных значений гамильтониана расчетной области, получающегося при применении метода конечных элементов в формализме неравновесной функции Грина для расчета характеристик МДМ-диола.

Практическая значимость

1. Характеристики разработанной терагерцовой антенны в виде квадратной спирали хорошо подходят для ее применения в устройствах сбора энергии ввиду высокой равномерности диаграммы направленности. Она также может быть использована для изготовления узкополосных детекторов.
2. Разработанные схемы построения антенной решетки могут быть использованы для достижения большего общего КПД терагерцовой ректенны.
3. Схема с соединением элементов антенной решетки в плоскости самой решетки может использоваться в случаях, когда необходимо минимизировать влияние потерь в металле.
4. Схема с соединением элементов антенной решетки вне плоскости решетки позволяет единообразно добавлять элементы с хорошо предсказуемым

изменением характеристик решетки и может применяться в условиях, когда влияние потерь в металлах мало.

5. Предложенная модель выпрямляющего элемента может использоваться для расчета одномерных диодов типа металл-диэлектрик-металл и структур со сходным механизмом переноса заряда. Эта модель также может быть расширена для описания более сложных структур, например, МДМ-диодов со сложной формой электродов.

Положения, выносимые на защиту

1. Использование в терагерцовых ректеннах антенн в виде квадратной спирали позволяет добиться на рабочей частоте, выбранной 20,54 ТГц, узкой ширины резонанса ($\Delta f/f = 2,34 \cdot 10^{-6}$) и высокой равномерности диаграммы направленности (перепад не более 0,2 дБ на низшей моде).
2. Решетки антенн с соединением элементов в плоскости решетки с минимизацией длин соединительных дорожек позволяет достичь увеличения напряжения на выходе антенной решетки не хуже кратного числу антенных элементов в решетке. При добавлении в решетку антенных элементов можно добиться сохранения рабочей частоты и равномерности диаграммы направленности при помощи оптимизации длин соединительных дорожек.
3. Расположение соединительных проводников вне плоскости антенны позволяет единообразно добавлять элементы в антенную решетку, независимо от их количества. Использование такого способа построения решетки также ведет к более предсказуемому поведению характеристик получаемой структуры.
4. Решения задачи на собственные значения, возникающей при моделировании МДМ-диодов методом конечных элементов в формализме неравновесной функции Грина, близко соответствуют пикам зависимости коэффициента пропускания от энергии, что может быть использовано при расчете вольт-амперной характеристики МДМ-диодов при проведении численного интегрирования по энергии.

Достоверность результатов работы

Достоверность результатов, представленных в диссертационной работе, подтверждается численными и модельными экспериментами, а также соответствием полученных результатов априорной информации, теоретическим расчетам и данным, полученным в работах других авторов.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях: Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» имени профессора А.П. Сухорукова (Красновидово, 2018, 2020), Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» имени профессора А.П. Сухорукова (Красновидово, 2015, 2017, 2019), Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015 (Москва, 2015), Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2020» (Москва, 2020), 4-я Межвузовская студенческая конференция «Научная сессия — современная радиоэлектроника» (Москва, 2015), научный семинар лаборатории акустооптики кафедры колебаний физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова 16 мая 2022 г.

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в 16 печатных работах, в том числе в 7 статьях в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова, 2 статьях в других рецензируемых научных журналах и 7 публикациях в сборниках трудов и тезисов конференций. Список работ автора приведен в конце автореферата перед списком литературы.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертационной работе результаты получены лично автором либо при его определяющем участии. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. В работах, опубликованных в соавторстве, основополагающий вклад принадлежит диссертанту.

Структура и объем диссертации

Диссертация включает в себя введение, четыре главы, заключение и список литературы. Работа содержит 124 страницы, включает 63 рисунка, 5 таблиц и 149 библиографических ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** содержится обоснование актуальности темы исследований, сформулированы предмет исследования, цель и задачи диссертационной работы, приводится краткое содержание, отмечается научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, формулируются основные положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации результатов работы.

В **первой главе** диссертации проводится обзор современного состояния преобразования терагерцового излучения в электрический ток как области исследований, а также приводится краткая история развития технологии передачи энергии при помощи электромагнитных волн в целом. В этой главе обосновывается актуальность исследования методов преобразования терагерцового излучения при помощи выпрямляющих антенн, за которыми закрепилось название “ректенны”. Также описываются основные сложности и задачи, которые возникают при применении ректенн в указанном диапазоне.

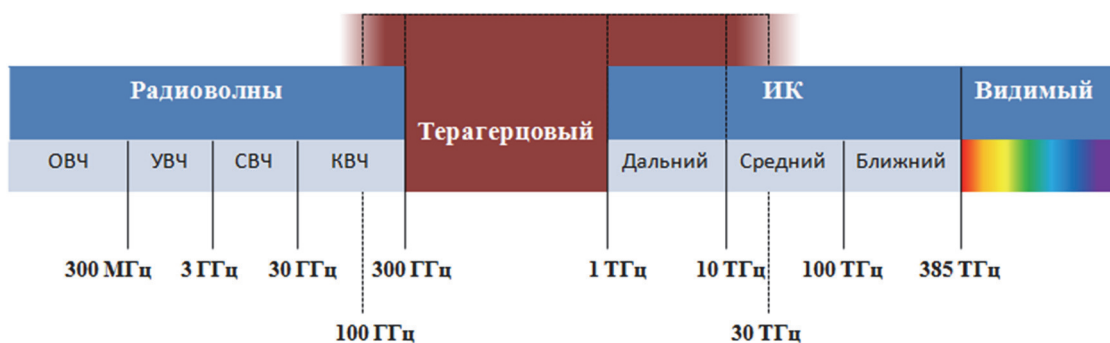


Рис. 1. Терагерцовый диапазон на шкале частот электромагнитного излучения согласно различным определениям.

Терагерцовый диапазон занимает положение между относительно хорошо изученными микроволновым и инфракрасным диапазонами. Его границы обычно определяются как 0,3 – 3,0 ТГц, но некоторые источники используют в качестве верхней границы другие значения, например, 10 ТГц или даже 30 ТГц, а нижнюю границу иногда устанавливают равной 0,1 ТГц. Стоит заметить, что при включении в терагерцовый

больших из указанных величин частот, он перекрывается с диапазонами дальнего и среднего инфракрасного диапазонов (Рис. 1)

Изучение методов детектирования терагерцового излучения является активной областью современных исследований. Интерес к терагерцовому диапазону можно объяснить его многочисленными возможными применениями.

Использование для целей детектирования терагерцового излучения ректенн является относительно новым направлением, которое стало значительно более активным с развитием технологий производства наноструктур.

Основные сложности, которые возникают при разработке ректенн для терагерцового диапазона, заключаются в следующем.

Во-первых, электрическая проводимость металлов падает с увеличением частоты тока. Для терагерцового диапазона этот факт проявляется в том, что кратное уменьшение всех размеров микроволновых антенн, разработанных для работы на частотах порядка 10 ТГц, не приводит к такому же кратному изменению частотных характеристик [1]. Влияние этих эффектов приводит к необходимости поиска новых вариантов антенн.

Во-вторых, характеристики типично используемых полупроводниковых диодов и диодов с барьером Шоттки похожим образом ухудшаются с увеличением рабочей частоты. Лучшие диоды с барьером Шоттки имеют частоту отсечки порядка единиц ТГц [2]. Поэтому особое внимание исследователей в этой области уделяется поиску и изучению новых нелинейных элементов, способных эффективно использоваться на частотах от 10 ТГц и выше.

В-третьих, для ректенны как составного устройства нельзя игнорировать проблему согласования ее элементов. В качестве оценочного выражения для общего КПД ректенны можно использовать [3]

$$\eta = \eta_a \eta_s \eta_c \eta_j, \quad (1)$$

где η_a — доля энергии падающего излучения, принятого антенной, η_s — доля принятой энергии, переданной антенной на выход, η_c — коэффициент связи между антенной и выпрямляющим элементом, η_j — КПД выпрямляющего элемента. Величина η_a определяется характеристиками антенны: диаграммой направленности, полосой рабочих частот. Множитель η_s зависит, в основном, от потерь при передаче энергии от антенны к

выпрямляющему элементу. Коэффициент связи η_c зависит как от свойств, присущих антенне ректенны, так и от параметров диода.

Несмотря на значительные сложности, применение ректенн считается перспективным методом преобразования излучения терагерцового диапазона в электрический ток. Экспериментальные работы показали, что в микроволновом диапазоне ректенны могут достигнуть эффективности преобразования, близкой к 90% [4,5].

Наиболее оптимистичные теоретические работы предсказывают, что ректенны способны достигать такой же эффективности на частотах вплоть до оптических, если это позволяют характеристики элементов ректенны и условия использования [6].

Наряду с этим существуют гораздо более скромные оценки, согласно которым эффективность преобразования терагерцовых ректенн окажется в лучшем случае сравнима с фотоэлементами, но в худшем случае составляет менее 1% [1]. Такая большая разница между минимальной и максимальной оценкой свидетельствует о необходимости проведения дальнейших исследований.

Во **второй главе** подробно рассматриваются характеристики перспективной для использования в составе ректенны антенны в виде квадратной спирали. Приводится краткий обзор современных методов численного моделирования антенных структур. Представляются два гигагерцовых прототипа антенн, и показывается, что среди них антенна в виде квадратной спирали обладает лучшими характеристиками, в частности по S-параметрам и диаграмме направленности. Параметры этой антенны затем изменяются так, чтобы она работала в терагерцовом диапазоне. Ее характеристики исследуются методами численного моделирования. Также проводится моделирование взаимодействия представленной антенны с плоской электромагнитной волной для оценки величины собираемой ею мощности.

В моделях предполагалось, что под антенной будет расположен отражатель для улучшения приемных характеристик конструкции. Между антенной и отражателем располагался слой диэлектрического материала.

Основой для исследования стали антенны, представленные в работах [A1, A8–A10], в которых свойства этих антенн были изучены при помощи численного моделирования и экспериментальных измерений. Изначально они были рассчитаны на работу в диапазоне более низких частот, в гигагерцовом диапазоне. В этом случае было намного легче исследовать их свойства экспериментально. На этом этапе больше всего внимания было уделено поиску геометрической структуры антенны, которая обеспечивала бы круговую

диаграмму направленности. Рабочую частоту затем планировалось перевести в необходимую область масштабированием геометрических размеров антенны..

Численное моделирование показало, что рассмотренная антенна в виде квадратной спирали (Рис. 2) имеет резонанс на частоте 2,8 ГГц. При этом диаграмма направленности такой антенны на этой частоте обладает неравномерностью диаграммы направленности примерно в 3 дБ при угле места 45° .

Характеристики этих антенн также были исследованы экспериментально. Результаты этого исследования также были изложены в работе [А1].

Для дальнейшего изучения была выбрана модифицированная модель антенны в виде квадратной спирали. Данный выбор обоснован тем, что такая антенна геометрически проще другой рассмотренной антенны, что, возможно, позволит облегчить изготовление данных устройств в необходимом масштабе [А13].

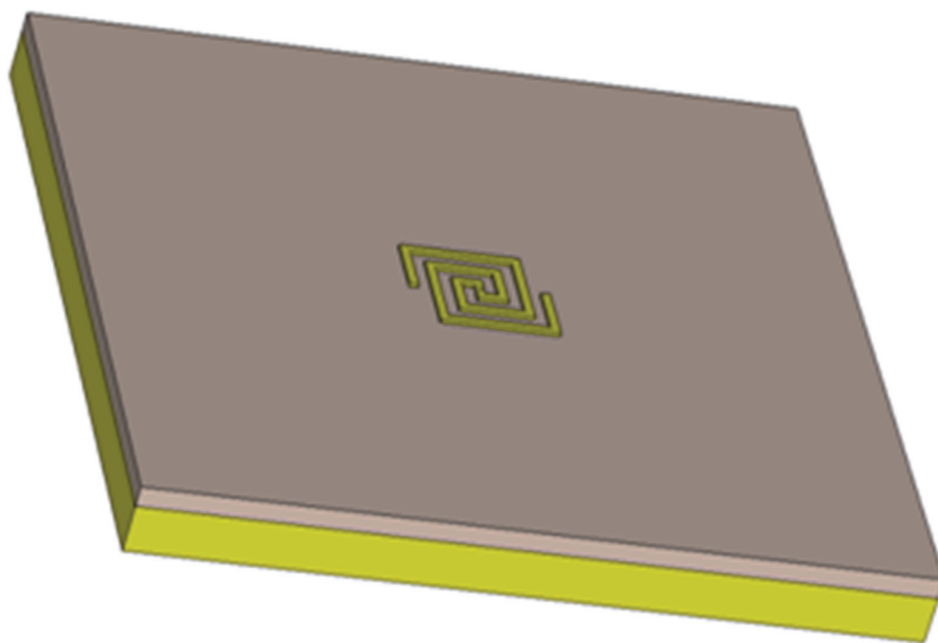


Рис. 2. Общий вид модели терагерцовой антенны.

В модели предполагается, что в качестве металла используется золото, а в качестве диэлектрика – тефлон.

При рассмотрении частотных характеристик видно, что антенна имеет несколько резонансов, в частности, при данных размерах они наблюдаются на частотах приблизительно 24 ГГц, 37 ГГц, 50 ГГц, 66 ГГц и 88 ГГц (Рис. 3). Большое количество резонансных частот, возможно, окажется полезным, если удастся обеспечить выпрямление тока на нескольких частотах одновременно.

Вместе с частотными характеристиками также были получены распределения полей вблизи антенны и диаграммы направленности. На низших модах диаграмма направленности обладает высокой степенью равномерности (перепад не более 0,2 дБ при угле места 30°) (Рис. 4).

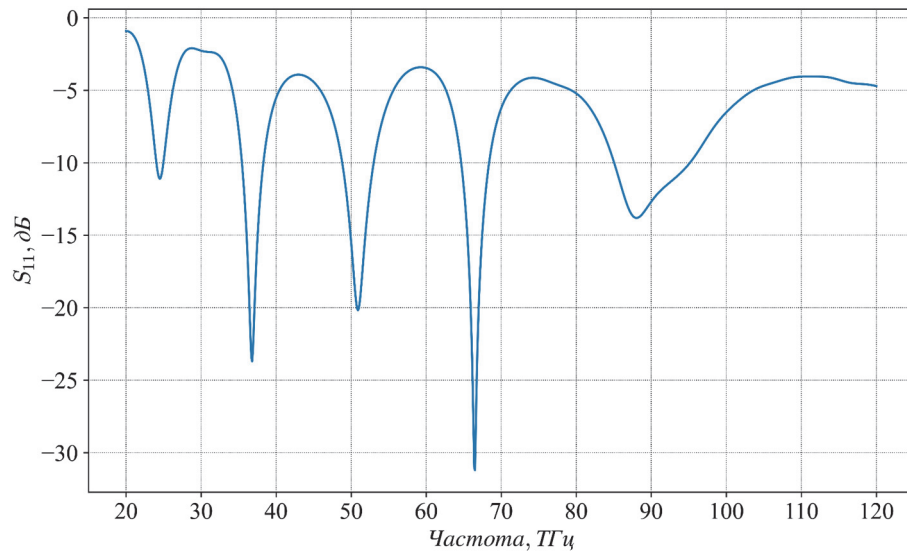


Рис. 3. Коэффициент отражения S_{11} одиночной терагерцовой антенны в виде квадратной спирали.

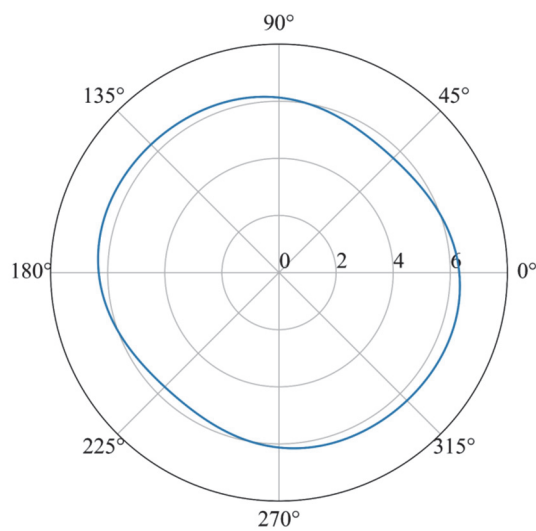


Рис. 4. Диаграмма направленности одиночной антенны на частоте 24 ТГц при угле места 30°, дБи/°.

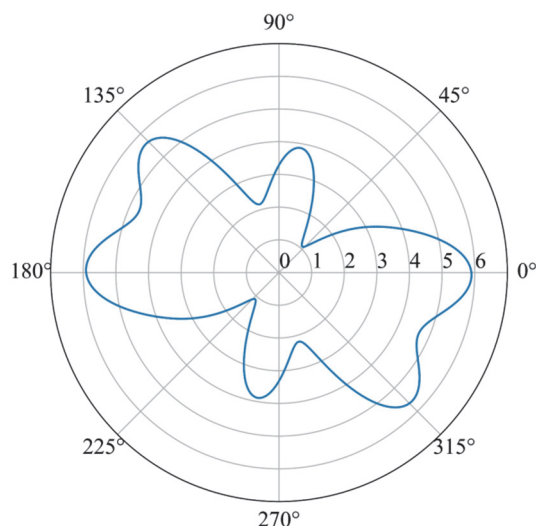


Рис. 5. Диаграмма направленности одиночной антенны на частоте 88 ТГц при угле места 30° , дБи/°.

Диаграмма данной антенны направленности становится менее равномерной с увеличением частоты излучения. Для частоты 88 ТГц при том же угле места 30° перепад между максимальным и минимальным значениями диаграммы направленности составляет приблизительно 6 дБ (Рис. 5).

Из полученных результатов следует вывод о том, что представленная антенна обладает требуемыми характеристиками, причем для достижения круговой диаграммы направленности следует использовать низкочастотные резонансы.

Анализ взаимодействия антенны с электромагнитной волной проводился при помощи численного моделирования [А3]. В модели предполагалось, что плоская электромагнитная волна падает нормально (параллельно оси Oz) на поверхность решетки антенн, состоящей из 16 элементов (Рис. 6). Напряженность электрического поля была задана равной 1 В/м, причем оно имело линейную поляризацию, ориентированную вдоль оси Ox. Частота соответствовала резонансной – 36,67 ТГц.

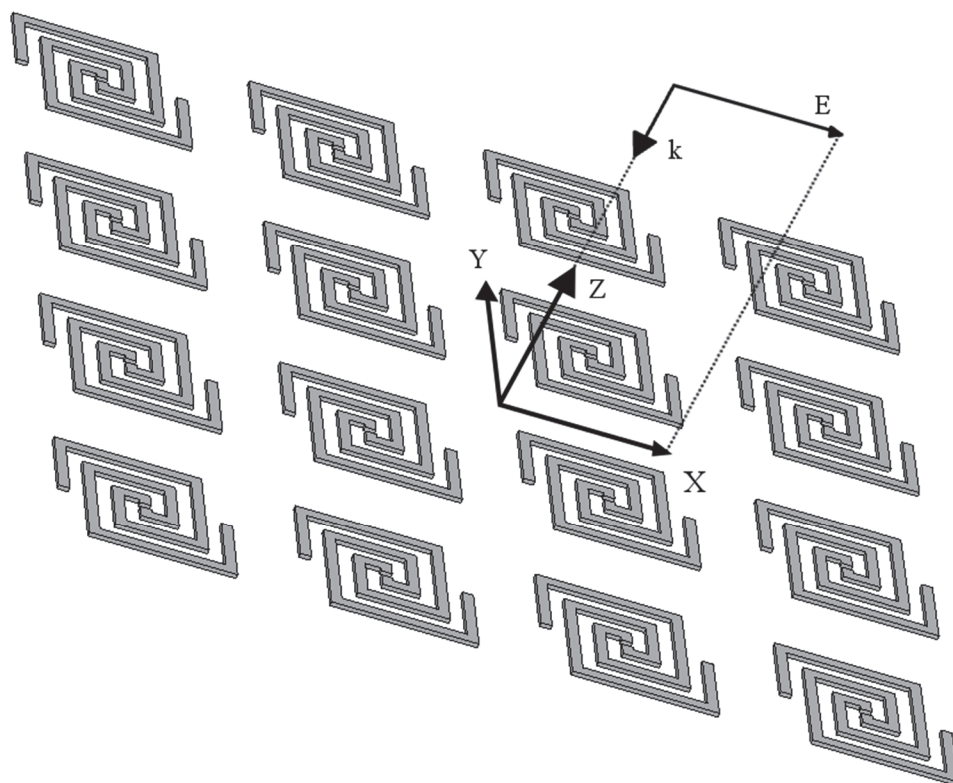


Рис. 6. Схема модели падения электромагнитной волны с координатными осями. Показано направление распространения электромагнитной волны — вектор k и ее поляризация — вектор E .

В результате моделирования было выяснено, что на одну антенну падает мощность $19,49 \cdot 10^{-15}$ Вт. Мощность на выходе антенны можно получить, умножив напряжение на силу тока, таким образом получая значение $8,75 \cdot 10^{-15}$ Вт. Деление мощности на выходе антенны на падающую мощность дает значение, примерно равное 45%.

Полученная с одной антенны мощность весьма мала. Если диод выпрямляющего элемента имеет ненулевое напряжение открытия, то к нему понадобится подключить последовательно достаточно много антенн. Конкретное число антенн в значительной степени зависит от характеристик диода. Такое подключение также составляет проблему для успешного преобразования электромагнитных волн терагерцового диапазона в электрический ток при помощи ректенн.

Третья глава изучает различные способы объединения антенн в решетку в контексте использования такой решетки антенн в составе ректенны. Приведен краткий обзор использованных численных методов. Представлены и изучены два возможных способа соединения планарных антенн: в плоскости и вне плоскости решетки. Отмечены их преимущества и недостатки.

Конечное напряжение открытия диодов может составлять существенную проблему для ректенн терагерцового диапазона в зависимости от конкретных целей, для которых эти ректенны предполагается использовать. Вдобавок к этому работа терагерцовой ректенны в классическом режиме теоретически позволяет достигнуть КПД сравнимых с аналогичным показателем микроволновых ректенн, однако для этого большие напряжения, а именно необходимо, чтобы выполнялось соотношение

$$V_D \gg \frac{\hbar\omega}{q}, \quad (2)$$

где V_D – амплитуда переменного напряжения на диоде, $\hbar\omega$ — энергия кванта излучения, а q – величина элементарного электрического заряда. Согласно [6], в этом случае при приеме широкополосного излучения допускается поглощение электроном нескольких низкоэнергетических квантов. Этот эффект отсутствует в квантовом режиме работы ректенны, то есть при низких напряжениях на диоде, что приводит к пределу эффективности выпрямления 44% (предел Тривича-Флинна). Важно отметить, что в случае монохроматического облучения максимальное значение КПД выше именно для квантового режима работы [6], однако даже при работе в этом режиме имеет смысл предпринимать меры по увеличению напряжения на диоде, если это излучение обладает малой мощностью [3, 6].

Напряжение на диоде можно повысить при помощи применения антенной решетки, хотя такой подход и обладает своими ограничениями. Как было отмечено выше, потери в металлах при приеме электромагнитного излучения растут с увеличением частоты, поэтому целесообразно разрабатывать решетки с минимальной длиной металлических элементов, в частности, соединительных дорожек.

В качестве базового антенного элемента была выбрана антенна, рассмотренная в работе [A13]. Она представляет собой квадратную спираль, расположенную на диэлектрической подложке с металлическим покрытием.

Антенная решетка составлялась последовательно. Вначале были получены характеристики одного антенного элемента, чьи параметры были подобраны таким образом, чтобы рабочая частота равнялась 20,54 ТГц. Также было рассчитано распределение электрического поля внутри расчетной области.

Число элементов удваивалось на каждом шаге путем отражения через плоскость, перпендикулярную поверхности подложки (Рис. 7). Базовые элементы соединялись на продолжении плеч антенн. На последующих шагах металлическими дорожками

соединялись выходы антенн. На каждом этапе производилась оптимизация длин только что добавленных соединительных дорожек с целью получения минимума на частоте 20,54 ТГц. Для решетки из 8 элементов также пришлось дополнительно варьировать длину дорожки, добавленной на предыдущем шаге, и перемещать выход антенны.

Применение описанного метода к уже упомянутой исходной антенне привело к следующим результатам [А6]. Одиночная антенна была настроена на частоту 20,54 ТГц путем изменения масштаба. Были получены ее характеристики: S-параметры, диаграмма направленности, импеданс и величина напряженности электрического поля в зазоре (Табл. 1, 2).

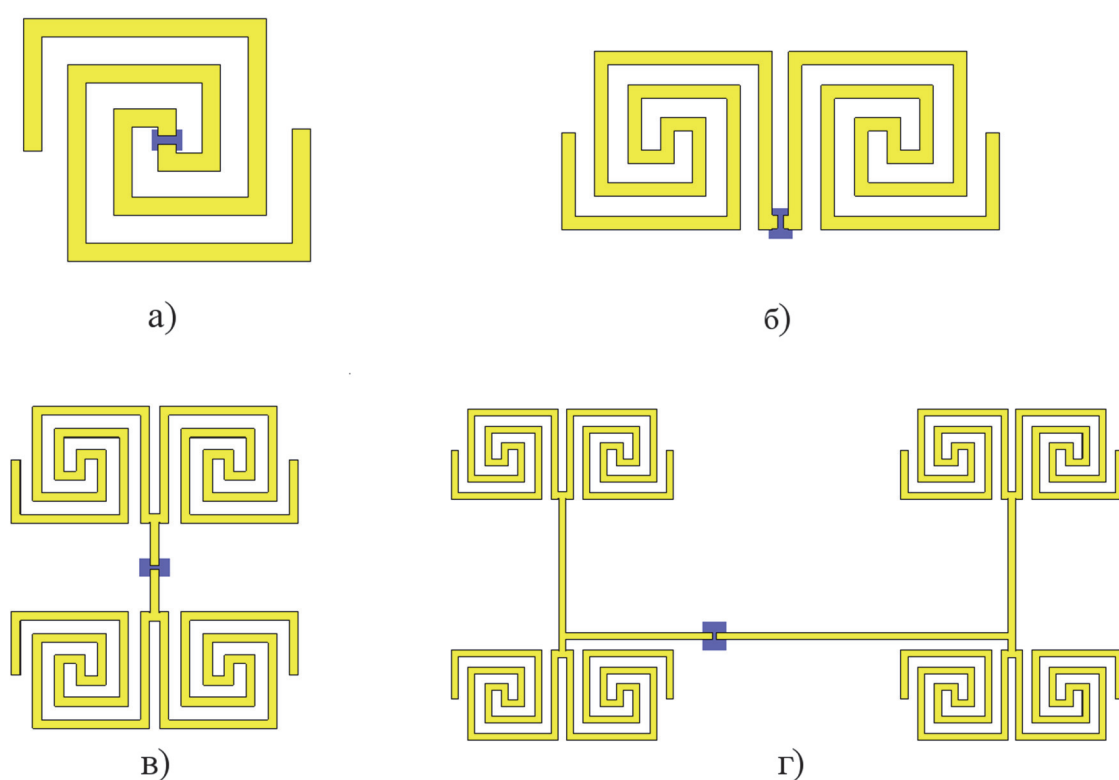


Рис. 7. Внешний вид исследуемых антенных решеток, состоящих из 1 элемента (а), 2 элементов (б), 4 элементов (в) и 8 элементов (г). Выходы решеток отмечены синими фоновыми прямоугольниками.

Для каждой решетки также была рассчитана максимальная абсолютная величина продольной компоненты напряженности электрического поля в зазоре выхода антенны при нормальном падении циркулярно поляризованной плоской электромагнитной волны. Под продольной компонентой имеется в виду компонента, параллельная дорожке, идущей к выходу данной антенной решетке. Полученные результаты приведены в табл. 1. Из этих

результатов можно заключить, что можно добиться увеличения значения напряженности, приблизительно пропорционального количеству используемых антенных элементов. При этом величина импеданса антенны принимает значения, которые также указаны в таблице. Эти значения необходимо учитывать при согласовании антенной решетки с остальной частью устройства.

Таблица 1

<i>Число элементов</i>	<i>Напряженность, В/м</i>	<i>Re(Z), Ом</i>	<i>Im(Z), Ом</i>
1	26.57	50.78	– 0.62
2	55.09	193.48	– 78.67
4	107.78	94.19	– 3.10
8	158.24	504.41	– 40.84

Таблица 2

<i>Число элементов</i>	<i>Рабочая частота, ТГц</i>	<i>Ширина полосы, МГц</i>	<i>S₁₁, дБ</i>
1	20.54	48	– 40.15
2	20.22	640	– 17.13
4	20.58	31	– 45.12
8	20.48	22	– 42.31

В табл. 2 приведены полученные значения рабочих частот и ширины рабочих полос частот для построенных решеток, а также значение коэффициента отражения S_{11} на рабочей частоте. Рабочей считалась частота, для которой минимум коэффициента S_{11} ближе всего находился к значению 20,54 ТГц. Рабочая полоса частот определялась по

уровню 3 дБ от минимума коэффициента отражения, соответствующего рабочей частоте. Для полученных решеток характерно уменьшение ширины рабочей полосы с увеличением числа элементов, кроме двухэлементной решетки. Для двухэлементной решетки резонанс на рабочей частоте также не является самым глубоким в рассматриваемой частотной области. Такое исключение, скорее всего, объясняется расположением выхода антенны на ее внешней стороне, в отличие от остальных решеток, у которых выход расположен ближе к геометрическому центру.

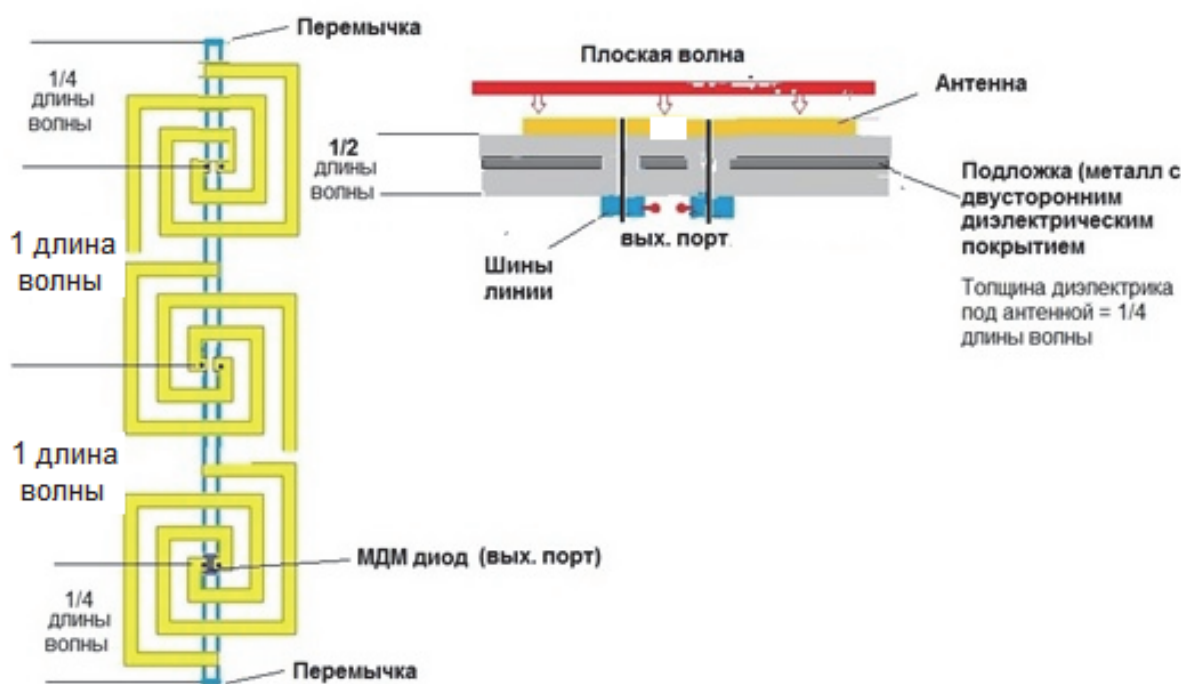


Рис. 8. Внешний вид и сечение исследуемой многоэлементной антенны

В случаях, когда допустимы более длинные соединительные проводники, возможно применение альтернативного варианта объединения антенн в решетку, а именно с объединением элементов по высокой частоте вне плоскости решетки [A7]. Выходы квадратных спиралевидных антенных элементов соединяются с микрополосковой линией, расположенной над слоем диэлектрика, нанесенного на тыльную сторону металлического экрана (Рис. 8). Микрополосковая линия замыкается с обоих концов короткозамыкающими перемычками, в результате чего создается резонатор, настроенный на частоту принимаемого терагерцового сигнала. Выходные сигналы от нескольких антенных элементов суммируются в месте расположения выходного порта, к которому подключается диод.

Предлагаемая схема многоэлементной антенны позволяет унифицировать методику расчета для произвольного числа элементов и определения необходимых параметров диодов.

Четвертая глава посвящена изучению выпрямляющих элементов ректенн. Приводится краткая теоретическая справка о туннельном эффекте как основном механизме переноса зарядов в диодах, которые обычно предлагаются для использования в терагерцовых ректеннах. Также обозреваются существующие способы моделирования диодов типа металл-диэлектрик-металл (МДМ-диодов) и подобных структур. Подробно описывается метод конечных элементов в формализме неравновесной функции Грина, с помощью которого производится моделирование структуры с известными характеристиками.

Расчеты производились с использованием вычислительной платформы FEniCS. С ее помощью решалась задача для потенциала и получались матричные выражения для нахождения функции Грина. Описание компонентов платформы можно найти в работах [8-13].

Примененный метод неравновесной функции Грина разрешает в области расчета следующую задачу

$$(E - H^0 - \Sigma)G(\vec{r}, \vec{r}'; E) = \delta(\vec{r} - \vec{r}'), \quad \vec{r}, \vec{r}' \in \Omega_D, \quad (3)$$

$$H^0 = \frac{\hbar^2}{2} \nabla \left(\frac{1}{m(\vec{r})} \nabla \right) + V(\vec{r}), \quad \vec{r} \in \Omega_D \quad (4)$$

где H^0 – гамильтониан расчетной области, а собственные энергии Σ в данной задаче описывают взаимодействие проводников и диэлектрической подобласти. Эта задача затем была дискретизирована, переведена в матричный вид и решена методом конечных элементов. Полученная функция Грина затем используется для расчета всех интересующих характеристик, в частности величины тока при заданном значении напряжения.

Для гамильтониана расчетной области можно также поставить задачу на собственные значения в виде

$$\begin{cases} H^0 \psi(\vec{r}) = E \psi(\vec{r}), & \vec{r} \in \Omega_D \\ \psi(\vec{r}) = 0, & \vec{r} \in \Omega_D \end{cases} \quad (5)$$

Ее решение дает дополнительную информацию об исследуемой структуре, а именно получаемые собственные значения близко соответствуют пикам коэффициента пропускания.

Модель была протестирована на двух задачах, имеющих хорошо известное решение: задача о туннелировании через прямоугольный потенциальный барьер и задача о туннелировании через барьер-ступеньку [A5]. Полученный при моделировании коэффициент прохождения сравнивался с точными выражениями при одних и тех же значениях энергии. Для оценки ошибки вычислений используется следующая формула [14]:

$$er(N) = \max_E |T(E) - T_0(E)| \quad (6)$$

где N – число узлов в сетке, $T(E)$ – полученный при моделировании коэффициент прохождения, $T_0(E)$ – точное выражение для коэффициента прохождения для данного барьера, а значение энергии E ограничено величинами, использованными при моделировании (Рис. 9).

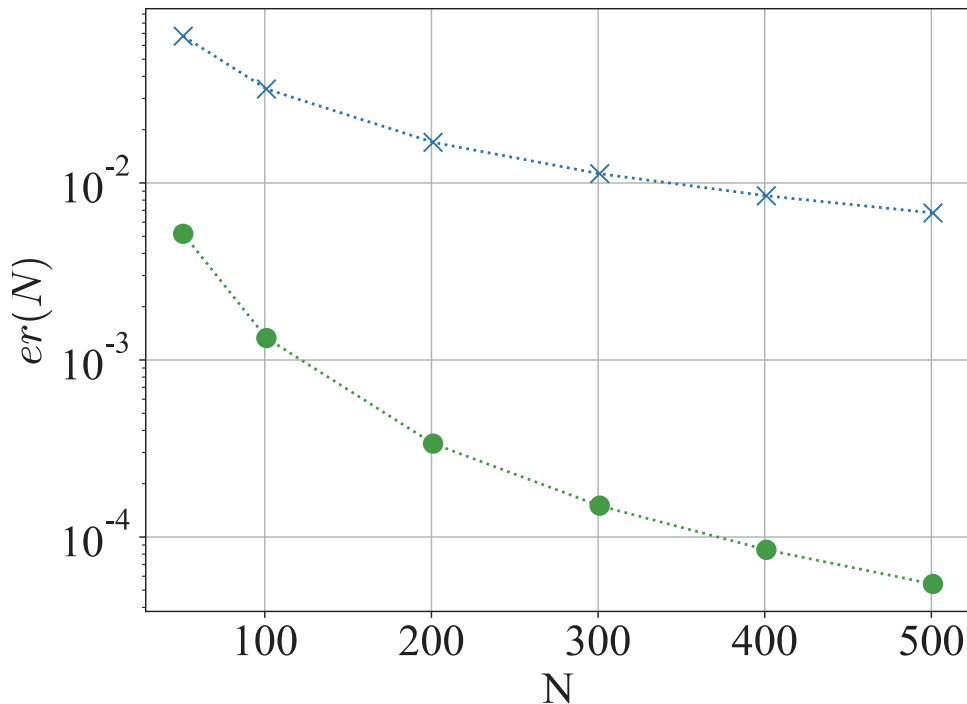


Рис. 9. Зависимость метрики ошибки $er(N)$ от числа узлов в сетке пространственного разбиения N для тестовых задач: прямоугольный потенциальный барьер (крестики), барьер-ступенька (кружки).

Также было проведено сравнение между результатами, полученными от данной модели, и данными работы [15] для структур W - Nb₂O₅ (1 нм) - Ta₂O₅ - (1 нм) - W и W - Nb₂O₅ (3 нм) - Ta₂O₅ (1 нм) - W. Последняя структура называется «резонансной», потому что при указанных параметрах профиль потенциала при приложении положительного напряжения смещения образует потенциальную яму с шириной, достаточной для образования энергетического уровня. Полученные для этих структур вольт-амперные характеристики хорошо согласуются с данными, известными из [15] (Рис. 10).

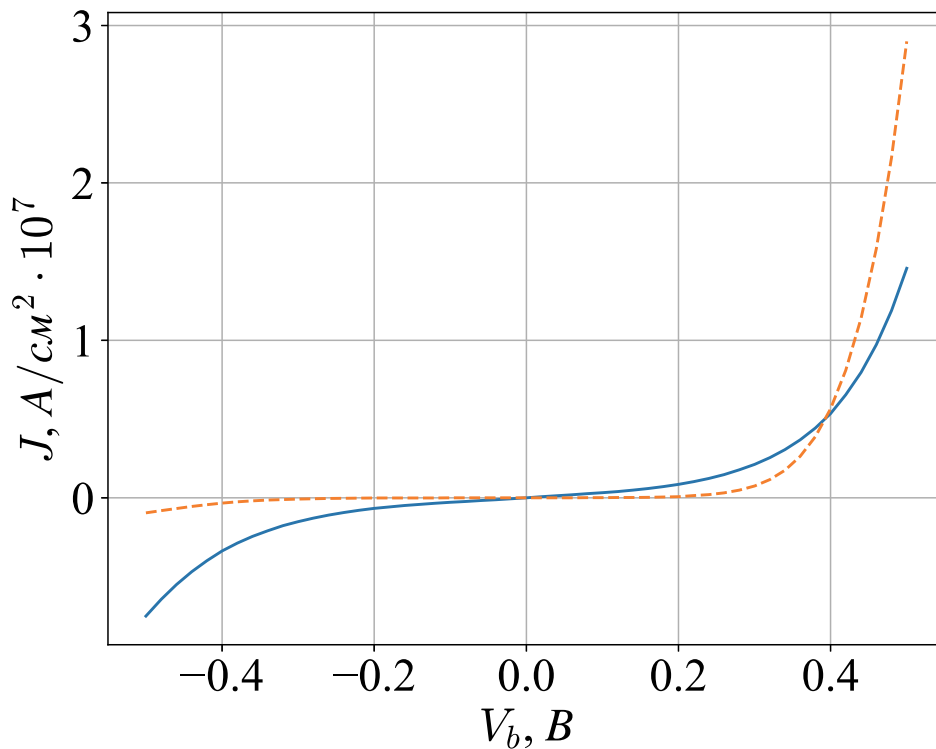


Рис. 10. Полученные зависимости плотности тока J от приложенного напряжения V_b для структур металл–диэлектрик–металл с учетом потенциала зарядов изображений. Сплошная линия – структура W – Nb₂O₅ (1 нм) – Ta₂O₅ – (1 нм) – W, пунктирная – W – Nb₂O₅ (3 нм) – Ta₂O₅ – (1 нм) – W.

Согласно результатам, полученным при моделировании, пики зависимости плотности тока от энергии для резонансной структуры соответствует собственным значениям задачи (5). В представленном примере основной вклад в общий ток туннелирования вносится энергиями, находящимися вблизи первого пика (Рис. 11).

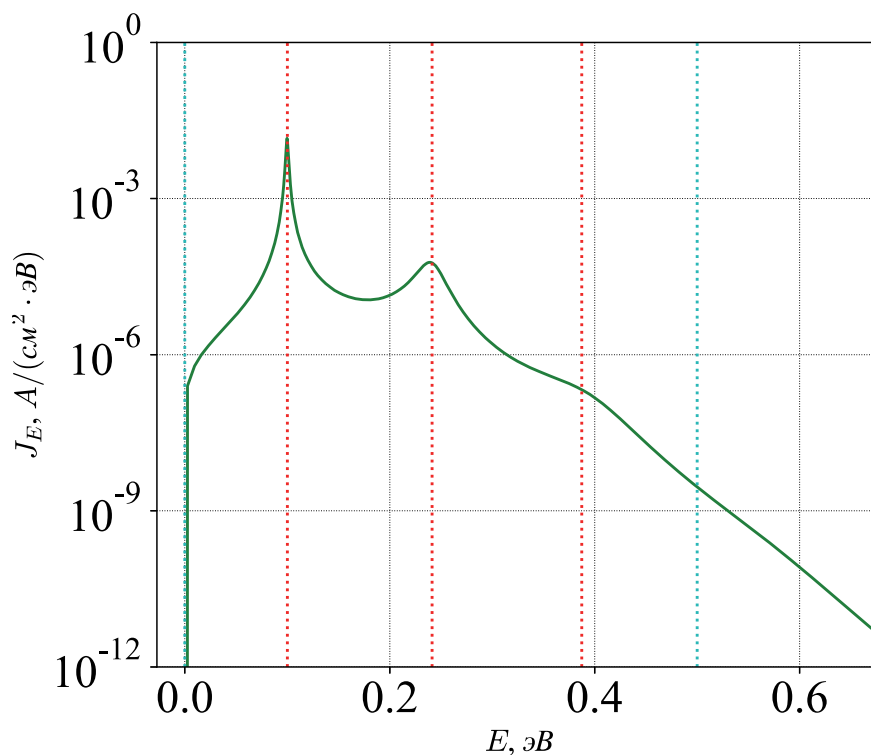


Рис. 11. Абсолютная величина распределения электрического тока по энергии E для резонансной структуры при фиксированном напряжении смещения 0,5 В. Красные вертикальные пунктирные линии отмечают собственные значения гамильтониана расчетной области.

В **выводах** сформулированы **основные результаты** диссертации, которые состоят в следующем:

1. Применение ректенн в качестве приёмников-преобразователей терагерцового излучения возможно и перспективно. Область исследований находится на раннем этапе развития.

2. Предложен и изучен вариант антенны для терагерцовой ректенны в виде квадратной спирали. Представленная антенна обладает узкими глубокими резонансами на нескольких частотах, пригодных для использования в качестве рабочих. Отмечено, что диаграмма направленности на этих резонансах проявляет высокую степень равномерности.

3. В ходе изучения методики построения терагерцовой антенной решетки с минимальной возможной длиной соединительных дорожек показано, что возможно достигнуть увеличения напряжения в точке питания в число раз, не меньшее числа используемых антенных элементов. Импеданс получающейся при этом структуры

оказывается выше, чем у одиночного элемента, что может оказаться полезным при ее согласовании с терагерцовыми диодами.

4. Рассмотрен альтернативный вариант построения антенной решётки для терагерцовой ректенны с объединением элементов вне плоскости решётки, за металлическим экраном. Этот метод позволяет единообразно добавлять элементы в решётку вне зависимости от их количества. При этом получаемые характеристики решётки изменяются предсказуемым образом.

5. Предложена методика численного моделирования МДМ-диодов при помощи метода конечных элементов в формализме неравновесной функции Грина. Показано, что решения, полученные с помощью данной методики, хорошо согласуются с результатами, известными из теоретических моделей и литературы.

6. При моделировании МДМ-диодов при помощи метода конечных элементов также было выяснено, что собственные значения гамильтониана расчетной области, которые соответствуют задаче о потенциальной яме с бесконечно высокими стенками, дно которой имеет вид профиля потенциала исходной задачи, хорошо соответствуют пикам зависимости коэффициента пропускания структуры от энергии. Эту информацию можно использовать в расчетах при проведении численного интегрирования по энергии.

Список публикаций автора по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих

Положению о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова

A1. **Ву К.Т.Ч.**, Егоров Р.В., Михеев Д.А., Саввин В.Л., *Модель решетки спиралеобразных ректенн, обладающих круговой диаграммой направленности* // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2015. — Т. 79, № 12. — С. 1687–1690. **IF = 0,628 (РИНЦ)**

A2. Казарян Г.М., **Ву К.Т.Ч.**, Саввин В.Л., Пеклевский А.В., *Перспективы преобразования солнечного излучения в терагерцовом и инфракрасном диапазонах* // Космонавтика и ракетостроение. — 2017. — № 2 (95). — С. 70–77. **IF = 0,269 (РИНЦ)**

A3. **Ву К.Т.Ч.**, Казарян Г.М., Саввин В.Л., *Процессы при преобразовании терагерцового излучения в электрический ток* // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2019. — Т. 83, № 1. — С. 46–49. **IF = 0,628 (РИНЦ)**

A4. **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. **IF = 0,628 (РИНЦ)**

A5. **Ву К.Т.Ч.**, Казарян Г.М., Саввин В.Л., *Моделирование структур типа металл–диэлектрик–металл для детектирования терагерцового излучения* // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2021. — Т. 85, № 1. — С. 85–90. **IF = 0,628 (РИНЦ)**

A6. **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. DOI: 10.30898/1684-1719.2021.2.5. **IF = 0,368 (РИНЦ)**

A7. **Ву К.Т.Ч.**, Зиненко А.С., Казарян Г.М., Саввин В.Л., *Терагерцовая ректенная решетка с объединением элементов вне плоскости расположения антенн* // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. — 2021. — № 5. DOI: 10.30898/1684-1719.2021.5.3. **IF = 0,368 (РИНЦ)**

Публикации в других рецензируемых научных журналах

A8. **Ву К.Т.Ч.**, Егоров Р.В., Саввин В.Л., Михеев Д.А., *Изучение электродинамических характеристик спиралеобразной микроволновой ректенны* // Ученые записки физического факультета Московского Университета. — 2014. — Т. 144301, № 4. — С. 144301–1–144301–3 **IF = 0,094 (РИНЦ)**

A9. **Ву К.Т.Ч.**, Егоров Р.В., Саввин В.Л. и др., *Модель решетки спиралеобразных ректенн, обладающей круговой диаграммой направленности* // Ученые записки физического факультета Московского Университета. — 2016. — № 5. 165503. — С. 165503–1–165503–2 **IF = 0, 094 (РИНЦ)**

Публикации в сборниках и тезисы докладов

A10. Егоров Р.В., **Ву К.Т.Ч.**, *Беспроводная передача энергии на беспилотные летательные аппараты* // Сборник докладов Четвертой межвузовской студенческой конференции «Научная сессия — современная радиоэлектроника». — ОАО ГСКБ Алмаз-Антей, Москва, 2015. — С. 34–41.

A11. **Ву К.Т.Ч.**, Егоров Р.В., Михеев Д.А., *Модель решетки спиралеобразных ректенн* // Труды научной сессии НИЯУ МИФИ-2015. — Москва, 2015. — С. 212.

A12. **Ву К.Т.Ч.**, Егоров Р.В., Михеев Д.А. и др., *Применение решетки ректенн для сбора солнечной энергии* // Сборник трудов XV Всероссийской школы-семинара Волновые

явления в неоднородных средах имени А.П. Сухорукова (Волны-2016). — Секция 6. Физика и применение микроволн. Электродинамика. — Москва, 2016. — С. 26–27.

A13. **Ву К.Т.Ч.**, Казарян Г.М., Саввин В.Л., *Преобразование солнечной энергии в электрический ток решеткой ректенн* // XVI Всероссийская школа-семинар Физика и применение микроволн имени А.П. Сухорукова (Волны-2017). Программа конференции. — Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет Москва, 2017.

A14. **Ву К.Т.Ч.**, Казарян Г.М., Саввин В.Л., *Процессы при преобразовании терагерцового излучения в электрический ток* // 16 Всероссийская школа-семинар Волновые явления в неоднородных средах имени профессора А.П. Сухорукова.

A15. **Ву К.Т.Ч.**, Казарян Г.М., Саввин В.Л., *Перспективы применения ректенн в качестве приемно-преобразующего устройства в системе беспроводной передачи информации и энергии* // XVII Всероссийская школа-семинар Физика и применение микроволн имени профессора А.П. Сухорукова. — г. Можайск, 2019.

A16. **Ву К.Т.Ч.**, Саввин В.Л., Казарян Г.М., *Детектирование терагерцового излучения при помощи ректенн* // Сборник трудов XVII Всероссийской школы-семинара Физика и применение микроволн имени А.П. Сухорукова (Волны-2019). — Секция 9. Акустика и акустооптика. — г. Можайск, 2019.

Список цитируемой литературы

1. Donchev E. et al. The rectenna device: From theory to practice (a review) // MRS Energy & Sustainability. Cambridge University Press, 2014. Vol. 1. P. E1.

2. Kazemi H. et al. First THz and IR characterization of nanometer-scaled antenna-coupled InGaAs/InP Schottky-diode detectors for room temperature infrared imaging // Infrared Technology and Applications XXXIII. International Society for Optics and Photonics, 2007. Vol. 6542. P. 65421J.

3. Rectenna Solar Cells. 2013th edition / ed. Moddel G., Grover S. New York: Springer, 2013. 405 p.

4. Williams W.A. History of power transmission // Journal of the Franklin Institute. 1949. Vol. 248, № 1. P. 1–14.

5. McSpadden J.O., Fan L., Chang K. Design and experiments of a high-conversion-efficiency 5.8-GHz rectenna // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1998. Vol. 46, № 12. P. 2053–2060.

6. Joshi S., Moddel G. Optical rectenna operation: where Maxwell meets Einstein // *J. Phys. D: Appl. Phys.* IOP Publishing, 2016. Vol. 49, № 26. P. 265602.
7. Schwaab G., Sebastiani F., Havenith M. Ion Hydration and Ion Pairing as Probed by THz Spectroscopy // *Angewandte Chemie International Edition*. 2019. Vol. 58, № 10. P. 3000–3013.
8. Alnæs M. et al. The FEniCS Project Version 1.5: 100 // *ans*. 2015. Vol. 3, № 100.
9. Kirby R.C. Algorithm 839: FIAT, a new paradigm for computing finite element basis functions // *ACM Trans. Math. Softw.* 2004. Vol. 30, № 4. P. 502–516.
10. Kirby R.C., Logg A. A compiler for variational forms // *ACM Trans. Math. Softw.* 2006. Vol. 32, № 3. P. 417–444.
11. Alnaes M.S. et al. Unified framework for finite element assembly // *Int. J. Comput. Sci. Eng.* 2009. Vol. 4, № 4. P. 231–244.
12. Alnæs M.S. et al. Unified form language: A domain-specific language for weak formulations of partial differential equations // *ACM Trans. Math. Softw.* 2014. Vol. 40, № 2. P. 9:1-9:37.
13. Automated Solution of Differential Equations by the Finite Element Method: The FEniCS Book / ed. Logg A., Mardal K.-A., Wells G. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.
14. Abdolkader T.M., Shaker A., Alahmadi A.N.M. Numerical simulation of tunneling through arbitrary potential barriers applied on MIM and MIIM rectenna diodes // *Eur. J. Phys.* IOP Publishing, 2018. Vol. 39, № 4. P. 045402.
15. Grover S., Moddel G. Engineering the current–voltage characteristics of metal–insulator–metal diodes using double-insulator tunnel barriers // *Solid-State Electronics*. 2012. Vol. 67. P. 94–99.