

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе
Бу Кирилла Тхе Чуеновича «Преобразование терагерцового излучения в электрический ток», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. Радиоп физика

Диссертация посвящена исследованию возможностей применения ректенн для приема терагерцового излучения и его преобразования в электрический ток. Под ректеннами понимаются приемные устройства, нашедшие применение в микроволновом диапазоне электромагнитного излучения, и состоящие из нелинейного выпрямляющего элемента и антенны. Ректенны демонстрируют высокие значения КПД при работе в микроволновом диапазоне, но их применение на более высоких частотах, в том числе терагерцовых, пока недостаточно исследовано.

Актуальность исследования терагерцового диапазона электромагнитного излучения объясняется существованием востребованной ниши для его практического использования и сложностью проведения самих исследовательских работ. Существенные продвижения в этой области в последнее время связаны в первую очередь с развитием и разработкой новых типов источников излучения. Терагерцовый диапазон расположен на границе между инфракрасным диапазоном и областью миллиметровых длин волн. Среди свойств этого излучения можно выделить его неионизирующий характер, сильное поглощение одними материалами и высокую прозрачность для других. Эти свойства делают терагерцовое излучение полезным для задач спектроскопии как органических, так и неорганических веществ. В силу высокой пропускной способности и скрытности данный диапазон также часто предлагают для использования в различного вида системах связи.

Хорошо разработанные способы исследования соседних диапазонов электромагнитного спектра оказываются плохо применимыми для самого терагерцового диапазона. Поэтому для данного диапазона актуальными являются также задачи по разработке новых методов детектирования, приема и преобразования в подходящий для наблюдения сигнал.

Содержание диссертационного исследования

Диссертационная работа содержит введение, четыре главы и заключение. Объем диссертации составляет 124 страницы и включает в себя 63 рисунка и 5 таблиц. Библиография включает в себя 149 наименований.

Во **введении** приводится обоснование актуальности самого исследования, а также формулируются цели, задачи и научная новизна работы. Здесь же описывается практическая значимость полученных результатов, и перечисляются положения, выносимые на защиту. В завершение введения представлены сведения об апробации.

Первая глава носит обзорный характер. В ней рассматриваются основы применения ректенн в терагерцовом диапазоне. В этой же главе представлена короткая историческая справка появления и развития устройств, называемых ректеннами. Из истории развития микроволновых ректенн делается вывод о критической важности разработки подходящего выпрямляющего элемента, причем этот вывод, дополненный анализом актуальной научной литературы, также относится и к ректеннам терагерцового диапазона.

Вторая глава посвящена исследованию антенны, которую автор диссертации разработал и предлагает для использования в терагерцовом диапазоне. В главе опи-

сывается методика проведения исследования, основу которой составляет численное решение уравнений Максвелла. Для предложенной антенны определены рабочие частоты, а также изучены и охарактеризованы диаграммы направленности. В этой же главе рассматривается задача о падении плоской электромагнитной волны на предлагаемую антенну. На основании полученных результатов делается вывод об актуальности использования решетки антенн для увеличения выходного напряжения устройства.

Третья глава посвящена исследованию методов составления антенных решеток из антенн, рассмотренных в предыдущей главе. В начале главы приводятся теоретические обоснования целесообразности использования антенных решеток для терагерцовых ректенн. Затем автор предлагает метод составления такой решетки из близко расположенных антенн, соединяемых между собой в той же плоскости, в которой лежат эти антенны. Расстояние между антеннами оптимизируется методом доверительной области. Для построенных этим методом решеток были получены частотные характеристики, диаграммы направленности, а также импеданс и напряжение на выходе решетки.

В диссертационной работе отмечается, что использование указанного метода не позволяет контролировать импеданс получающейся решетки. В качестве альтернативного метода предлагается располагать антенны на расстоянии порядка половины длины волны друг от друга, а их соединение производить в плоскости, расположенной за металлическим экраном. Оба метода позволяют увеличивать напряжение на выходе решетки пропорционально количеству используемых элементов.

Четвертая глава посвящена исследованию диодов типа металл-диэлектрик-металл в качестве выпрямляющих элементов для терагерцовых ректенн. В научной литературе предложения по улучшению характеристик терагерцовых выпрямляющих элементов часто связаны с их усложнением. Этим автор мотивирует выбор метода неравновесной функции Грина, одного из наиболее общих методов моделирования таких устройств, для дальнейших исследований. В этой главе метод, разработанный автором, проверяется на тестовых задачах. Представленные результаты моделирования согласуются с аналитическими теоретическими расчетами, а также с результатами, известными из работ других авторов.

Автором рассмотрена задача на собственные значения для гамильтониана расчетной области, то есть области пространства, заполненной диэлектриком и ограниченной металлическими контактами. В данной главе демонстрируется, что значения энергий, соответствующие полученным собственным значениям, соответствуют максимумам распределения плотности тока. Этот результат автор предлагает использовать для оптимизации расчетов.

Заключение диссертации перечисляет основные результаты работы, после чего следует список публикаций автора по теме диссертационной работы и список цитируемых источников.

Сформулированные в диссертационной работе положения и сделанные выводы обоснованы в достаточной мере. По теме диссертационной работы автором опубликовано 16 печатных работ, 7 из которых в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова. Полученные результаты обладают новизной и вносят существенный вклад в освоение электромагнитного излучения терагерцового диапазона. Среди достоинств работы можно отметить следующие:

– комплексность подхода, заключающаяся в исследовании всех элементов системы от отдельной антенны до нелинейного выпрямляющего элемента на выходе антенной решетки;

– использование современных методов численного моделирования, позволившее получить новые полезные результаты при исследовании сложных электродинамических систем и микроэлектронных элементов;

– направленность исследований на освоение труднодоступной коротковолновой части терагерцового диапазона.

Однако диссертационная работа не свободна от недостатков.

1. Имеется небольшая терминологическая небрежность. Вместо «численного моделирования» уравнений следовало бы использовать «численное решение», поскольку моделируют процессы и системы (в т.ч. с помощью уравнений), а сами уравнения решают тем или иным методом.

2. Во вводной части главы 3 не хватает описания и ссылок на известные работы по синтезу антенных решеток, которые позволили бы лучше оценить результаты и вклад диссертанта в решение проблемы.

3. В четвертой главе желательно было бы продемонстрировать моделирование разработанным методом простейшего МДМ диода в комбинации с параметрами сигнала, соответствующими исследованным в диссертации антеннам.

Приведенные выше замечания не снижают заслуг соискателя в получении важных результатов, равно как и их высокой оценки, и не влияют на общее положительное впечатление от диссертации.

Основные результаты диссертации представлены в опубликованных работах. Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

Диссертация «Преобразование терагерцового излучения в электрический ток» соответствует специальности 1.3.4. «Радиофизика» и требованиям «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор — Ву Кирилл Тхе Чуенович — заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. «Радиофизика».

Официальный оппонент,
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 им. В.А. Котельникова РАН)

Корженевский Александр Владимирович

26.10.2022

125009, г. Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7

Телефон: +7 (495) 629-35-74

E-mail: korjenevsky@cplire.ru

Подпись в.н.с. Корженевского А.В. заверяю:
учёный секретарь ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,
к.ф.-м.н.

Чусов И.И.