

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. Радиофизика

До недавнего времени терагерцовый (субмиллиметровый) диапазон представлял собой одну из слабоизученных областей электромагнитного спектра. Основной причиной этого являлось отсутствие компактных и достаточно мощных (более мВт средней мощности) твердотельных источников когерентного терагерцового излучения, а также чувствительных приемников для его регистрации. Терагерцовая область находится между микроволновым диапазоном и инфракрасной областью спектра электромагнитных волн, для каждой из которых существуют хорошо развитые полупроводниковые источники излучения. Однако принципы построения этих приборов совершенно различны. В основе построения приборов микроволновой электроники (например, СВЧ транзисторы и диоды Ганна) лежат принципы электронного транспорта носителей заряда. Поэтому верхняя рабочая частота классических электронных устройств обусловлена временем пролета носителя заряда между электродами и постоянной времени, определяемой паразитными RC-параметрами. При этом уровень мощности классических микроволновых устройств уменьшается с частотой излучения, когда частота превышает 1 ТГц. С другой стороны, работа приборов в видимом и инфракрасном диапазоне (лазеров) основана на квантово-механических принципах переходах между активными энергетическими уровнями и явлении стимулированного излучения. Необходимым условием для работы лазера является обеспечение инверсной населенности энергетических уровней. При этом низкая энергия кванта терагерцового излучения сравнима с тепловым воздействием, которое приводит к выравниванию населенностей в инверсной среде. Это делает проблематичным использование принципов фотоники для построения твердотельных (полупроводниковых) ТГц систем, которые могли бы функционировать при комнатной температуре. Что касается создания квантового детектора ТГц излучения, работающего при комнатной температуре, то здесь существует не менее серьезная проблема, связанная с тепловым фоном окружающей среды, который в значительной степени будет ограничивать пороговые характеристики детектора. Другие источники ТГц излучения, использующие движение электронов в электрических и магнитных полях (приборы типа ламп обратной волны, гиротронов), требуют высоковольтных источников питания, имеют заметные габариты и не обладают требуемыми спектральными характеристиками и возможностью плавной перестройки в ТГц диапазоне частот. В то же время такие уникальные устройства, как лазер на свободных электронах или синхротрон, основанные на переносе заряда, позволяют получить достаточно мощное ТГц излучение, однако являются очень дорогими и громоздкими, что не позволяет их использовать для решения обсуждаемых задач.

Актуальность темы. В настоящее время терагерцовые ректенны (антенна и выпрямляющий элемент) существуют исключительно в виде экспериментальных образцов. Основные проблемы использования ректенн связаны с малым размером антенных структур для приема терагерцового излучения, что затрудняет выбор возможных конструкций и отсутствием выпрямляющих элементов.

Цель диссертационной работы. Целью диссертационной работы являлось общее рассмотрение проблемы преобразования терагерцового излучения в электрический ток при помощи ректенн. Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка антенны терагерцового диапазона с круговой диаграммой направленности и изучение ее характеристик.
2. Рассмотрение различных способов объединения антенн в составе ректенны.
3. Построение модели и анализ физических процессов в выпрямляющем элементе.

Научная новизна и практическая ценность работы. В ходе работы впервые разработаны: конструкция терагерцовой антенны; схема построения антенной решетки для терагерцовой ректенны; альтернативная схема построения антенной решетки с объединением элементов вне плоскости решетки за металлическим экраном-отражателем; предложена модель расчета выпрямляющего элемента терагерцовой ректенны. Схема с соединением элементов антенной решетки в плоскости самой решетки может использоваться в случаях, когда необходимо минимизировать влияние потерь в металле. 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. Предложенная модель выпрямляющего элемента может использоваться для расчета одномерных диодов типа металл-диэлектрик-металл и структур со сходным механизмом переноса заряда. Эта же модель может быть расширена для описания более сложных структур, например, МДМ-диодов со сложной формой электродов.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов. Достоверность результатов, представленных в диссертационной работе, подтверждается численными экспериментами, а также соответствие полученных результатов теоретическим расчетам и данным, полученным в работах других авторов.

Краткая характеристика основного содержания диссертации.

Работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 124 страницы и включает в себя 63 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 149 библиографических ссылок.

Введение содержит формулировку целей и задач диссертации. В нем обосновывается актуальность и научная новизна работы, а также представляются положения, выносимые на защиту. Во введении также приводятся данные об апробации работы.

В **первой главе** дается обзор современного состояния проблемы и основных положений по теме исследования. Приводятся доводы в пользу актуальности использования ректенн в терагерцовом диапазоне. В рамках проводимого обзора также рассматривается история развития микроволновых ректенн, проводятся параллели с нынешним уровнем развития терагерцовых ректенн.

Вторая глава посвящена исследованию антенн терагерцового диапазона. Диссертант предлагает использовать антенну в виде квадратной спирали. При помощи численного моделирования для нее получены диаграммы направленности и зависимость коэффициента отражения от частоты. В качестве метода используется численное решение уравнений Максвелла методом конечных интегралов.

В **третьей главе** в качестве способа увеличения напряжения на нелинейном элементе рассматривается использование антенных решеток. Автор предлагает и рассматривает два способа объединения антенн в антенную решетку.

Первый способ заключается в соединении антенн металлическими дорожками в той же плоскости, в которой эти антенны находятся. Длина дорожек оптимизируется методом доверительной области. Представленные результаты показывают, что при падении на полученные решетки плоской электромагнитной волны напряженность электрического поля в зазоре пропорциональна количеству антенных элементов в решетке.

Второй способ представляется в качестве альтернативного подхода. Предлагается располагать антенны относительно далеко друг от друга, а их соединение осуществлять металлическими дорожками, проходящими вне плоскости расположения решетки. В предлагаемом способе между антенной решеткой и соединительными дорожками также располагается слой металла.

Четвертая глава начинается с обзора методов моделирования нелинейных элементов терагерцовых ректенн. Из них выделяется метод неравновесной функции Грина и отмечается, что он является наиболее общим и мощным из рассмотренных. Автор диссертационной работы реализует этот метод и с его помощью проводит моделирование нескольких тестовых задач. Полученные результаты согласуются с результатами, полученными из аналитических формул, и известными данными, опубликованными в работах других авторов.

Заключение содержит список основных результатов исследования, повторяющий структуру диссертации. Также приведен список публикаций диссертанта по теме исследования и список цитируемой литературы.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Рекомендации по использованию результатов диссертации. Результаты работы могут быть использованы в области конструирования антенн. Предложенные в работе решения позволят увеличить КПД терагерцовой ректенны и уменьшить потери в металле. Модель выпрямляющего элемента может быть доработана для описания более сложных систем.

Замечания по работе. 1. Название работы слишком широкое и может вводить в заблуждение. 2. Ожидаемые в работе КПД порядка 90-100%, ничем не подтверждены. 3. Недостаточен объем экспериментальных данных.

Общее заключение. 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.

Высказанные замечания не уменьшают ценности результатов диссертации. Общая оценка диссертационной работы положительная.

Полученные в работе результаты и выводы являются существенными для дальнейшего освоения терагерцового диапазона и развития технологий детектирования излучения в этом диапазоне.

Диссертация «Преобразование терагерцового излучения в электрический ток» является завершённой научно-квалификационной работой и полностью 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, профессор,
профессор кафедры биокибернетических систем и технологий Института искусственного интеллекта МИРЭА — Российского технологического университета

Макаров Валерий Николаевич

119454, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78

Телефон: +7 (499) 215-65-65

E-mail: makarov@mirea.ru

Подпись профессора В.Н. Макарова заверяю: