

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

Диссертационная работа К.Т.Ч. Бу посвящена исследованию вопросов, связанных с преобразованием терагерцового излучения в электрический ток с применением ректенн, которые являются устройствами, состоящими из антенны и выпрямляющего элемента. Современный интерес к электромагнитному излучению терагерцового диапазона обусловлен, с одной стороны, наличием большого числа его возможных применений, а с другой стороны, исследование данного диапазона даже в наши дни является нетривиальной задачей. Применять излучение этого диапазона в современной научной литературе часто предлагается в медицинских целях, а также спектроскопии. Такие предложения часто апеллируют к тому, что электромагнитное излучение в терагерцовом диапазоне не обладает достаточной энергией для ионизации живых тканей, и к тому, что такое излучение свободно проходит сквозь твердые диэлектрики, но сильно поглощается полярными молекулами. В дополнение к этому, можно также заметить, что в научной литературе также встречаются предложения по использованию терагерцового излучения в системах неразрушающего контроля, а также системах связи и устройствах сбора энергии.

Вместе с тем современные технологии генерации и приема терагерцового излучения еще очень далеки от совершенства. Существующие технические средства, обычно, обладают низким КПД, особенно при комнатной температуре, или же представляют собой штучные экспериментальные образцы. Среди основных нерешенных проблем, присущих применению ректенн в терагерцовом диапазоне часто цитируют увеличение потерь в металлах при увеличении частоты излучения, а также ухудшение с увеличением частоты характеристик имеющихся на сегодняшний день нелинейных элементов, способных быть использованными в качестве выпрямляющих элементов ректенн. Перечисленные проблемы являются актуальными темами исследований.

Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, результатов и выводов диссертационной работы. Объем диссертации составляет 124 страницы и включает в себя 63 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 149 библиографических ссылок.

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи работы, научная новизна диссертационной работы и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации диссертационной работы.

Первая глава посвящена обзору основных вопросов, связанных с приемом и преобразованием терагерцового излучения, в частности с помощью ректенн. В этой главе также приводится краткая историческая справка, в которой проводится аналогия между применением ректенн в микроволновом диапазоне в 1970х годах и применением ректенн с терагерцовым диапазоне в наше время. На основании этого сравнения, а также анализе современной научной литературы, делается вывод об актуальности исследования новых типов нелинейных элементов, которые могли бы использоваться в терагерцовых ректеннах.

Во **второй главе** диссертации автор представляет разработанную им антенну терагерцового диапазона с круговой диаграммой направленности, которую предлагается использовать в составе терагерцовой ректенны. В этой главе также приводится краткое описание и обоснование использованных методов, среди которых заметно преобладает численное моделирование. Выводы о положении рабочих частот полученной антенны производятся на основе изучения частотной зависимости коэффициента отражения предлагаемой антенны. Для неё также приводятся диаграммы направленности на обнаруженных рабочих частотах, причем отмечается высокая равномерность этих диаграмм для низких рабочих частот.

Глава завершается представлением результатов численного моделирования взаимодействия предлагаемой антенны с плоской электромагнитной волной, с помощью которых демонстрируется обоснованность задачи об увеличении напряжения, создаваемого излучением на выходе антенны терагерцовой ректенны.

В **третьей главе** обсуждается проблема напряжения на выпрямляющем элементе ректенны. Приведены теоретические доводы в пользу поиска способов его увеличения, в частности, при помощи применения антенных решеток. В этой главе автором диссертации предложены и исследованы два способа построения антенных решёток, которые предполагается использовать в составе терагерцовой ректенны.

В первом из предложенных способов решетка составляется из близко расположенных антенн, расстояние между которыми оптимизируется с целью получения желаемых характеристик.

Второй предложенный способ состоит в применении микрополосковых линий, сравнимых по длине с длиной волны. Микрополосковые линии предлагается замыкать накоротко на расстоянии четверти длины волны от выхода ближайшей антенны. Между микрополосковыми линиями и антеннами предложено размещать металлический экран-отражатель, который уменьшает влияние упомянутых линий на характеристики антенных элементов. Этот способ позволяет единообразно добавлять элементы в решетку, но отмечается, что большая длина получающихся при этом металлических дорожек может стать причиной недопустимо высоких потерь на терагерцовых частотах.

Четвертая глава выделена для рассмотрения вопросов, касающихся выпрямляющих элементов терагерцовых ректенн. Здесь приведен краткий обзор существующих моделей подобных устройств, в итоге которого выделяется метод неравновесной функции Грина как наиболее общий из них. Автор работы затем описывает использованную им реализацию данного метода, которую он затем проверяет на тестовых задачах, а также данных, известных из научной литературы. Результаты моделирования согласуются с ожидаемыми по теоретическим моделям результатами, а также с результатами, полученными в работах других авторов.

В этой главе также предлагается использование собственных значений гамильтониана расчетной области устройства для определения положения пиков распределения по энергии плотности тока через структуру.

В **заключении** приводятся основные результаты диссертации, список работ автора по материалам диссертации и список цитируемой литературы.

Диссертационная работа выполнена на хорошем научном уровне, хорошо апробирована публикациями в авторитетных журналах и докладами на российских и международных конференциях. В качестве основных **достоинств работы** можно выделить следующие:

- Предложенная в работе антенна в виде квадратной спирали тщательно и всесторонне исследована и охарактеризована.
- Подробно обоснована перспективность применения антенных решеток для терагерцовых ректенн.
- Рассмотрена задача на собственные значения для гамильтониана расчетной области, редко упоминаемая в исследованиях терагерцовых ректенн.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

В то же время к работе имеется ряд замечаний:

- Недостаточно раскрыта область применения терагерцовых ректенн.
- В диссертации не освещен алгоритм подхода к оптимизации соединения антенных элементов в плоскую ректенную систему. Алгоритм может оказаться неоптимальным.
- Теоретически полученные результаты для терагерцовых ректенн не подтверждены экспериментально.

Указанные замечания не умаляют заслуг соискателя в получении важных и интересных результатов, равно как и их высокой оценки и не влияют на общее впечатление от диссертации.

Таким образом, результаты, представленные в диссертационной работе, вносят существенный вклад в исследование терагерцового излучения в общем и в развитие технологии терагерцовых ректенн в частности.

Общее впечатление о диссертационной работе К.Т.Ч. Ву положительное. 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, профессор, заместитель заведующего кафедрой вакуумной электроники факультета физической и квантовой электроники Московского физико-технического института (национального исследовательского университета)

Шешин Евгений Павлович

24.10.2022

141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9
Телефон: +7 (495) 408-45-54, e-mail: sheshin.ep@mipt.ru

Подпись профессора Е.П. Шешина заверяю:
учёный секретарь МФТИ, к.ф.-м.н.

Е.Г. Евсеев