

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА НА ДИССЕРТАЦИЮ

ЧЕРЕПАНОВА Владимира Владимировича

на тему: «**Электродинамический анализ плазмонных устройств на основе**

графена в ТГц и ИК диапазоне»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика

Актуальность темы

Развитие современных технологий существенно расширило области возможного использования терагерцового (ТГц) диапазона длин волн. Однако данный процесс обусловил и необходимость поиска новых материалов для построения устройств приемо-передающих узлов, поскольку традиционные в СВЧ и миллиметровом диапазонах длин волн материалы являются неприемлемыми в ТГц диапазоне. Одним из перспективных материалов в ТГц и в инфракрасном (ИК) диапазонах частот является графен. Данный материал имеет регулируемую сравнительно невысоким внешним электрическим полем высокую проводимость. Его особенностью, как известно, является способ переноса энергии в виде поверхностного плазмон-поляритона (ППП). В практическом плане это означает необходимость проведения большого объема вычислений для выбора параметров элементов дифракционных решеток на основе графена (ДРГ), являющихся резонаторами ППП. Сказанное выше делает цель диссертационной работы, заключающейся в теоретическом исследовании процессов взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) ТГц и ИК диапазонов с бесконечными одномерными и двумерно-периодическими многослойными дифракционными решетками из графена в линейном и нелинейном режимах для моделирования плазмонных частотно-селективных поверхностей, поглотителей, генераторов ТГц и преобразователей частот, актуальной.

Решение сформулированной в диссертации научной задачи – разработки численно-аналитических методов расчета, включающей разработку и численную реализацию математических моделей решения линейной и нелинейной задач дифракции при падении одной и двух ЭМВ на ДРГ, исследование радиофизических характеристик ДРГ в линейном и нелинейном режимах, а также определение способов усиления и взаимодействия ЭМВ с ДРГ и увеличения генерируемой мощности на частоте ТГц и комбинационных частотах - позволяет исследовать процесс рассеяния ЭМВ в линейном режиме, эффект

генерации на частоте третьей гармоники (ТГ) и комбинационных частотах в задаче смешения двух ЭМВ; предоставляют возможность моделирования новых линейных и нелинейных плазмонных устройств ТГц и ИК диапазонов; являются универсальными и учитывают особенности распределения поля вблизи неоднородностей (металлических, графеновых, плазмонных материалов); сокращают время счета для сложных многослойных конфигураций ДРГ и позволяют проводить верификацию расчетов, выполненных другими методами.

Таким образом, можно утверждать, что тематика диссертации Черепанова В.В. соответствует паспорту специальности 1.3.4 – Радиофизика в следующих областях:

- «Разработка физических основ генерации, усиления и преобразования колебаний и волн различной природы (электромагнитных, акустических, плазменных, механических), а также автоволн в неравновесных химических и биологических системах. Поиски путей создания высокоэффективных источников когерентного излучения миллиметрового, субмиллиметрового и оптических диапазонов, техническое освоение новых диапазонов частот и мощностей». В диссертационной работе исследуются процессы генерации и преобразования колебаний и волн с целью разработки новых высокоэффективных источников когерентного излучения ТГц и ИК диапазонов.

- «Изучение линейных и нелинейных процессов излучения, распространения, дифракции, рассеяния, взаимодействия и трансформации волн в естественных и искусственных средах». В диссертационной работе изучаются как линейные, так и нелинейные процессы рассеяния и взаимодействия волн в таких искусственных средах как многослойная дифракционная решетка графеновых лент с разделительными диэлектрическими слоями.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Автор достаточно корректно использует известные научные методы для обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций. Им изучены и критически проанализированы оптические свойства графена, а также модели, описывающие его линейную и нелинейную проводимости. Список использованной для обзора литературы содержит 150 наименований, включая и зарубежные издания в профильном направлении.

В целях получения результатов автором использовалась строгая постановка электродинамической модели. Достоверность получаемых результатов оценивалась в линейном режиме с использованием импедансных граничных условий (ИГУ) верификацией с данными, получаемыми на основе использо-

вания метода объемных интегро-дифференциальных уравнений для двумерного и одномерного случаев ДРГ, а для нелинейной дифракции – оценкой погрешности метода возмущений.

Оценка новизны и достоверности

Научная новизна диссертационной работы заключается

1. В разработке новой математической модели решения линейной задачи дифракции ЭМВ на одномерных и двумерно-периодических ДРГ, основанной на применении ИГУ и базиса, учитывающего особенности распределения тока в тонких плазмонных лентах.
2. В получении новых результатов расчетов линейных спектров рассеяния ЭМВ в диапазоне частот от ТГц до ИК, демонстрации возможности использования ДРГ в качестве широкополосных ТГц поглотителей с угловой нечувствительностью в широком диапазоне углов падения ЭМВ.
3. В разработке новой математической модели решения нелинейной задачи дифракции, основанной на методе возмущения.
4. В получении новых результатов расчетов нелинейных спектров генерации на частоте ТГц и комбинационных частотах в задаче смешения двух ЭМВ в ТГц и ИК диапазонах, демонстрации возможности использования ДРГ в качестве генераторов третьей гармоники, источников и систем визуализации ТГц волн преобразователей частот ТГц и ИК диапазонов.
5. В исследовании влияния параметров ДРГ на линейную и нелинейную дифракцию и предложении механизмов усиления взаимодействия ЭМВ с дифракционной решеткой и увеличения генерируемой мощности на частоте ТГц и комбинационных частотах.

Практическая значимость работы заключается в использовании численной реализации в среде MS Visual Studio разработанных математических моделей для моделирования процессов линейной и нелинейной дифракции ЭМВ ТГц и ИК диапазонов на бесконечных решетках прямоугольной формы, содержащих графен и другие плазмонные материалы. Получаемая при этом высокая по сравнению с известными коммерческими пакетами скорость вычисления позволила за счет выбора конструктивных параметров улучшить характеристики дифракционных решеток с большим количеством элементов и слоев.

Полученные в диссертационной работе результаты исследований использованы при выполнении государственного задания в сфере научной деятельности научного проекта № 0852-2020-0032/БА30110/20-3-07ИФ «Эколо-

гически чистые материалы для инновационных мультифункциональных систем: от цифрового дизайна к производственным технологиям».

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе результатов обеспечивается строгой постановкой электродинамической задачи, а также верификацией результатов расчета в линейном режиме с использованием ИГУ сравнением с методом на основе объемных интегродифференциальных уравнений для двумерного и одномерного случаев ДРГ. Для нелинейной дифракции приведена оценка погрешности метода возмущения.

Основные материалы диссертационной работы опубликованы в 24 научных работах, из них 5 работ в научных статьях, входящих в перечень ВАК и список диссертационного совета по радиофизике Южного федерального университета, 19 работ – в тезисах докладов на всероссийских и международных конференциях, 14 работ автора включены в международную библиографическую и реферативную базу данных Scopus.

Замечания по диссертационной работе в целом

Однако работа не свободна и от недостатков. В частности, к ним можно отнести следующие:

1. Как правомерно показал автор, проводимость графена зависит от ряда факторов, в том числе и от температуры, что определяет, в свою очередь, рабочий диапазон предлагаемых устройств. Однако автор в работе не привел результаты исследований его определяющих. Все исследования проводились для фиксированной температуры $300^\circ K$.
2. В тексте работы автор неправомерно большое внимание уделяет описанию программы, с помощью которой они были получены. Программа, реализующая предложенный автором алгоритм, может свидетельствовать только о его квалификации как программиста. Кроме того, в списке литературы должно быть указано свидетельство о регистрации программы для ЭВМ в ФИПС.
3. В разделе 3 результаты приводятся для фиксированных параметров ДРГ, однако обоснование данного выбора не приводится.
4. Выводы по разделам носят описательный характер, в котором отсутствует количественная оценка разработанных автором моделей по сравнению с известными.
5. Имеет большое число стилистических ошибок. Так, в первом разделе работы автор использует множественное описание одних и тех же параметров, входящих в формулы. Неудачно двойное использование одних и тех же символов для обозначения различных пере-

менных, что затрудняет анализ получаемых результатов. В частности, температуры (T) и коэффициента прохождения Френеля, функции Хэвисайда и пространственного угла (θ). В подписи к рисунку 3.4 фигурирует ссылка на рисунок 1, который в принципе отсутствует в работе.

Следует отметить, что указанные недостатки в целом не снижают общего положительного впечатления о диссертации, отличающейся логичностью и ясностью изложения материала.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации. В нем в лаконичной форме ясно изложены основные идеи и выводы по работе, показаны определяющих вклад соискателя в проведенные исследования, степень новизны и практическую значимость результатов.

Заключение

В целом представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, содержащей решение задачи, имеющей существенное значение для развития теории электродинамики – задачи исследования радиофизических характеристик перспективных материалов (графена), способных работать на частотах от ТГц до оптики.

Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты, свидетельствующие о вкладе автора в науку, соответствуют паспорту специальности 1.3.4 «Радиофизика» в областях:

1. Разработка физических основ генерации, усиления и преобразования колебаний и волн различной природы (электромагнитных, акустических, плазменных, механических), а также автоволн в неравновесных химических и биологических системах. Поиски путей создания высокоэффективных источников когерентного излучения миллиметрового, субмиллиметрового и оптического диапазонов, техническое освоение новых диапазонов частот и мощностей.
2. Излучение линейных и нелинейных процессов излучения, распространения, дифракции, рассеяния, взаимодействия и трансформации в естественных и искусственных средах.

Предложенные соискателем решения строго аргументированы и оценены в сравнении с известными аналогами.

Диссертационная работа соответствует всем требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО ЮФУ (приказ ЮФУ № 260-ОД от 30 ноября 2021), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, ЧЕРЕПАНОВ Владимир Владимирович, заслужи-

вает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – «Радиофизика».

28.08.2023 г.

Согласен на обработку персональных данных



М.Ю. Звездина

доктор физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика», доцент,
ведущий научный сотрудник отдела подготовки кадров высшей квалификации ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи»

Официальный оппонент

Нансена, 130, г. Ростов-на-Дону, 344038

тел. +7 (928) 142-24-72

e-mail: zvezdina_m@mail.ru

Подпись официального оппонента Звездиной Марины Юрьевны удостоверяю.

Начальник отдела кадров ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи»



Е.С. Букарева