

УТВЕРЖДАЮ

Врио генерального директора,

К.Т.Н.

Б.М. Боташев

«15» 09 2023г.

**ОТЗЫВ**

на автореферат диссертации Черепанова Владимира Владимировича «Электродинамический анализ плазменных устройств на основе графена в ТГц и ИК диапазоне» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.4. Радиофизика

1. Актуальность исследования. В настоящее время наблюдается большая потребность в телекоммуникационных системах, в которых объем передаваемых данных постоянно растет. С этим связана необходимость перехода на сверхвысокие скорости обработки и использование материалов, способных работать на технологии и технике терагерцового (ТГц) диапазона частот и выше, где большинство обычных электронных материалов не работают. В технике сверхвысоких частот такими материалами являются благородные металлы и кремний, однако с ростом частоты их применение затруднительно из-за значительного увеличения потерь в проводящих линиях. Актуальна также тенденция перехода к полностью оптической обработке сигналов и использование технологий фотоники. Одним из наиболее перспективных материалов, способным работать на частотах от ТГц до оптики, является графен, который, как считают разработчики нового поколения сетей 6G, должен заменить кремниевую электронику.

Ключевыми преимуществами графена перед другими широко применяемыми материалами является высокая подвижность и «безмассовость» электронов, что приводит к высокой проводимости на ТГц частотах. Отмечается, что графен обладает исключительно высокой нелинейностью, которая на сегодняшний день является самой сильной из всех известных электронных материалов. Проводимостью и, как следствие, нелинейностью графена можно легко управлять, прикладывая к материалу сравнительно невысокое внешнее электрическое поле, что невозможно в металлах. Помимо всего, графен способен

поддерживать распространение вдоль поверхности сверхлокализованного поверхностного плазмон-поляритона (ППП) в ТГц и инфракрасном (ИК) диапазоне частот, увеличивая эффективность взаимодействия с внешним полем.

В связи с тем, что проводимость графена обладает высокой частотной дисперсией, для графеновой электроники не работает принцип масштабируемости и при моделировании необходимо подбирать параметры элементарной ячейки, проводя большой объем вычислений, а также требуется учет нелинейности материалов в задачах исследования генерации гармонических составляющих и смешения электромагнитной волны (ЭМВ), что обуславливает **актуальность научной задачи** исследования процессов взаимодействия ЭМВ ТГц и ИК диапазона.

Рассмотрение автореферата показывает, что диссертационное исследование Черепанова В.В. посвящено решению **актуальной** задачи по разработке численно-аналитических методов расчета, которые позволяют исследовать процесс рассеяния ЭМВ в линейном режиме, эффект генерации на частоте третьей гармоники (ТГ), комбинационных частотах в задаче смешения двух ЭМВ и предоставляют возможность моделирования новых линейных и нелинейных плазмонных устройств ТГц и ИК диапазона с учетом сокращения времени счета для сложных многослойных конфигураций дифракционных решеток на основе графена (ДРГ) и позволяющих проводить верификацию расчетов, выполненных другими методами.

2. Цель работы, объект исследования, предмет и методы исследований, научная новизна результатов исследования, представленные в автореферате.

2.1. Цель работы – теоретическое исследование процессов взаимодействия ЭМВ ТГц и ИК диапазона с бесконечными одномерными и двумерно-периодическими многослойными ДРГ в линейном и нелинейном режимах для моделирования плазмонных частотно-селективных поверхностей, поглотителей, генераторов ТГ и преобразователей частот.

2.2. Объектом исследования диссертационной работы являются пакеты электродинамического моделирования, основанные на сеточном разбиении пространства дифракционной задачи (метод конечных элементов, метод конечных разностей во временной и частотной области), а **предметом исследования** – одномерные и двумерно-периодические многослойные дифракционные решетки (ДР) графеновых лент квадратной и прямоугольной формы, в том числе содержащие сплошные графеновые слои.

2.3. Методы исследования

При выполнении задач, поставленных в диссертации, применялись теоретический анализ и численное моделирование, при этом рассмотрены оптические свойства графена. На основе разработанного пакета программ исследованы спектры ДРГ и показаны способы оптимизации характеристик в ТГц и ИК диапазоне, а в результате проведенного анализа моделей нелинейной проводимости третьего порядка сделан вывод, что для ненулевых значений химического потенциала графена в ТГц и ИК диапазоне (области существования ППП) могут использоваться выражения для расчетов эффективности генерации ТГ и преобразования частот.

2.4. Из рассмотрения автореферата диссертации В.В. Черепанова следует, что к числу **наиболее значимых результатов работы**, обладающих **научной новизной**, могут быть отнесены.

2.4.1. Математическая модель решения линейной задачи дифракции ЭМВ на одномерных и двумерно-периодических ДРГ, основанная на применении импедансных граничных условий (ИГУ) и базиса, учитывающего особенности распределения тока в тонких плазмонных лентах.

2.4.2. Результаты расчетов линейных спектров рассеяния ЭМВ в диапазоне частот от ТГц до ИК. Продемонстрирована возможность использования ДРГ в качестве широкополосных ТГц поглотителей с угловой нечувствительностью в широком диапазоне углов падения ЭМВ.

2.4.3. Математическая модель решения нелинейной задачи дифракции, основанная на методе возмущения.

2.4.4. Результаты расчетов нелинейных спектров генерации на частоте ТГ и комбинационных частотах в задаче смешения двух ЭМВ в ТГц и ИК диапазоне. Продемонстрирована возможность использования ДРГ в качестве генераторов третьей гармоники, источников и систем визуализации ТГц волн, преобразователей частот ТГц и ИК диапазонов.

2.4.5. Исследовано влияние параметров ДРГ на линейную и нелинейную дифракцию и предложены механизмы усиления взаимодействия ЭМВ с ДР увеличения генерируемой мощности на частоте ТГ и комбинационных частотах.

3. Достоверность научных положений, выводов и заключений, сформулированных в автореферате диссертации. Теоретическая и практическая значимость работы.

3.1. **Достоверность и обоснованность** полученных в диссертационной работе результатов заключаются в строгой постановке электродинамической

задачи, а также верификацией результатов расчета в линейном режиме с использованием ИГУ, сравнением с методом на основе объемных интегродифференциальных уравнений (ОИДУ) для двумерного и одномерного случаев ДРГ. Для нелинейной дифракции приведена оценка погрешности метода возмущения.

Результаты диссертации докладывались и обсуждались на всероссийских научно-технических конференциях, где соискатель выступал с докладами по данной проблематике и получил положительный отзыв научной общественности.

3.2. Теоретическая значимость исследования заключается в том, что теоретически предсказано и экспериментально доказано, что графен проявляет выраженный нелинейный отклик, который может проявляться в генерации на частоте третьей гармоники и комбинационных частотах при смешении двух ЭМВ (накачки и сигнала), решены линейная и нелинейная задачи дифракции ЭМВ на двумерно-периодических ДРГ. Результаты, полученные в ходе работы над диссертацией, являются важными в области расчетов линейных спектров рассеяния ЭМВ в диапазоне частот от ТГц до ИК.

3.3. Практическая ценность работы.

Разработанные математические модели численно реализованы в среде MS Visual Studio и позволяют моделировать процессы линейной и нелинейной дифракции ЭМВ ТГц и ИК диапазона на бесконечных решетках прямоугольной формы, содержащих графен и другие плазмонные материалы. Ключевым преимуществом разработанных программ является возможность быстрого расчета (в сравнении с коммерческими пакетами на основе сеточного разбиения пространства электродинамической задачи) параметров ДР с больших количеством элементов и слоев: линейных спектров рассеяния ЭМВ для разработки поглотителей и поляризаторов, нелинейных спектров генерации на частоте третьей гармоники и на комбинационных частотах для разработки генераторов ТГц и преобразователей частот (смесителей, устройств визуализации ТГц излучения, генераторов ТГц волн, модуляторов).

4. Значимость для науки и производства результатов диссертации.

4.1. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 24 научных работах: 5 работ в журналах из перечня ВАК, 19 работ в сборнике докладов всероссийских и международных конференций, 14 работ индексируются в Scopus, в том числе:

- «52nd European Microwave Conference (EuMC)», Milan, Italy, 2022;
- «8th All-Russian Microwave Conference (RMC)», Moscow, Russia, 2022;

- «2022 7th All-Russian Microwave Conference (RMC)», Moscow, Russia, 2022;
- «2022 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)», Saratov, Russia, 2022;
- 5th European Conference on Electrical Engineering & Computer Science (ELECS 2021) Bern, Switzerland, 2021;
- «Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS)», Hangzhou, China, 2021;
- «Математическое и компьютерное моделирование естественнонаучных и социальных проблем», Пенза, Россия, 2021, 2022;
- «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» Севастополь, Россия, 2020.

5. Недостатки и замечания к автореферату.

Анализ материалов автореферата дает основание отметить следующие **недостатки и замечания.**

5.1. Рассмотрение автореферата показало, что в нем отсутствует описание возможности практической реализации разработанных структур.

5.2. К отдельным замечаниям автореферата можно отнести орфографические и стилистические погрешности (стр. 4, 13).

Сформулированные замечания в определенной мере снижают качество диссертации, однако не влияют на общую положительную оценку работы и практическую ценность полученных результатов.

6. Заключение.

6.1. В целом автореферат и научные публикации автора позволяют сделать вывод, что диссертация Черепанова В.В. «Электродинамический анализ плазменных устройств на основе графена в ТГц и ИК диапазоне», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, соответствует специальности 1.3.4. Радиофизика и является цельным, завершенным научным исследованием, посвященным актуальной научной проблеме, содержит признаки научной новизны, отвечает принятым критериям достоверности и имеет важное научно-практическое значение.

6.2. По содержанию научной новизны и квалификационной компоненты диссертация соответствует требованиям п.п. 9-11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 и требованиям, установленным Положением «О присуждении ученых степеней в федеральном

государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет», предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Черепанов Владимир Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 1.3.4. Радиофизика.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании НТС АО «ВНИИ «Градиент», протокол № 12/09/04 от 12 сентября 2023 года.

Ведущий научный сотрудник аспирантуры
АО «ВНИИ «Градиент»,
доктор технических наук, профессор



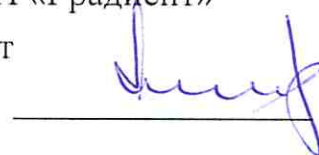
Ю.Г. Булычев

Ведущий научный сотрудник аспирантуры
кандидат технических наук, доцент



А.Г. Стуров

Ученый секретарь НТС АО «ВНИИ «Градиент»
кандидат технических наук, доцент



М.И. Макарович

Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт «Градиент» (АО «ВНИИ «Градиент»)

Почтовый адрес: 344000, г. Ростов-на-Дону, пр. Соколова, 96

Тел.: +7 (863) 204-20-31,

Факс: +7 (863) 232-03-45,

Сайт: <http://www.gradient.kret.com>

Электронная почта: rostov@gradient-rnd.ru