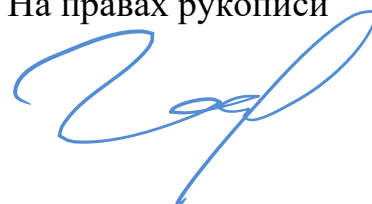


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Черепанов Владимир Владимирович

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЛАЗМОННЫХ
УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА
В ТГЦ И ИК ДИАПАЗОНЕ**

1.3.4. Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ростов-на-Дону – 2023

Работа выполнена на кафедре прикладной электродинамики и компьютерного моделирования физического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет».

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук, профессор
Лерер Александр Михайлович

Официальные оппоненты: Таран Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», факультет «Информационные технологии управления», кафедра "Связь на железнодорожном транспорте", профессор

Звездина Марина Юрьевна, доктор физико-математических наук, доцент, ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи» Федеральный научно-производственный центр, отдел подготовки кадров высшей квалификации, ведущий научный сотрудник

Защита состоится «29» сентября 2023 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета ЮФУ801.01.08 в Южном федеральном университете по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, д.5, Южный федеральный университет, физический факультет, ауд. 219.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. Ю.А. Жданова Южного федерального университета по адресу: Ростов-на-Дону, ул. Зорге, д. 21 Ж и на сайте: <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1318770/>

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Отзыв (в нем указывайте дату, а также полностью свои фамилию, имя, отчество, учёную степень со специальностью, звание, организацию, подразделение, должность, адрес, телефон, e-mail) с заверенной подписью рецензента и печатью учреждения просим направлять в 2 экз. ученому секретарю диссертационного совета ЮФУ801.01.08 по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, д.5, физический факультет ЮФУ, а также в формате pdf – на e-mail: ds@sfedu.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета ЮФУ801.01.08

Губский Д.С

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы. За последние два десятилетия наука и техника терагерцового (ТГц) диапазона частот значительно продвинулись вперед, и в настоящее время являются одними из самых исследуемых областей, поскольку имеют высокий потенциал практического применения. Намечен стремительный переход от научно – исследовательских работ к коммерческим приложениям.

Например, ТГц технологии открывают новые возможности для разработки безопасных неразрушающих систем дистанционного зондирования, спектроскопических систем, систем визуализации и других приложений с использованием периодических структур. Большая потребность наблюдается 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 ТГц частотах 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 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. Для возбуждения ППП широко применяются дифракционные решетки (ДР). При использовании ДР на основе графена (ДРГ) решаются сразу две задачи: ДРГ является замедляющей системой, обеспечивающей условие возбуждения ППП - равенство продольных составляющих волновых векторов падающей

электромагнитной волны (ЭМВ) и поверхностного плазмона; элементы ДРГ являются резонаторами ППП. Таким образом, графен особо актуален в качестве функционального плазмонного материала с управляемыми свойствами для ДР, применяемых при разработке поглотителей, поляризаторов, преобразователей частот, модуляторов, генераторов и других устройств необходимых для развития нового поколения электроники.

Однако для графеновой электроники не работает принцип масштабируемости - проводимость графена обладает высокой частотной дисперсией и при моделировании необходимо подбирать параметры элементарной ячейки, проводя большой объем вычислений. Большинство работ, посвященным расчетам плазмонных устройств ТГц и ИК диапазонов на основе графена, использует коммерческие пакеты электродинамического моделирования, основанные на сеточном разбиении пространства дифракционной задачи (метод конечных элементов, метод конечных разностей во временной и частотной области). Их основное преимущество – универсальность, однако по мере увеличения количества элементов ДР и слоев элементарной ячейки значительно возрастают требования к вычислительной мощности компьютера и время счета. Также требуется учет нелинейности материалов в задачах исследования генерации гармонических составляющих и смешения ЭМВ.

Поэтому **актуальной** задачей является разработка численно-аналитических методов расчета, которые:

- позволяют 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 диапазона;
- 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.

Предметом исследования являются одномерные и двумерно-периодические многослойные ДР графеновых лент квадратной и прямоугольной формы, в том числе содержащие сплошные графеновые слои.

Целью диссертационной работы является 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 ТГц и преобразователей частот.

Для достижения цели поставлены **задачи**:

- разработать и численно реализовать математические модели решения линейной и нелинейной задачи дифракции при падении одной и двух ЭМВ на ДРГ;
- исследовать радиофизические характеристики ДРГ в линейном и нелинейном режимах;
- определить способы усиления взаимодействия ЭМВ с ДРГ и увеличения генерируемой мощности на частоте ТГц и комбинационных частотах.

Научная новизна диссертационного исследования состоит в следующем.

1. Разработана новая 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. Получены новые 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.

3. Разработана новая математическая модель решения нелинейной задачи дифракции, основанная на методе возмущения.

4. Получены новые результаты расчетов нелинейных спектров генерации на частоте ТГц 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.

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

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Математическая модель решения линейной и нелинейной задачи дифракции ЭМВ для теоретического исследования радиофизических параметров бесконечных многослойных одномерных и двумерно-периодических дифракционных решеток на основе графена в ТГц и ИК диапазоне - линейных коэффициентов рассеяния падающей ЭМВ, уровня генерируемой мощности на частоте третьей гармоники и комбинационных частотах в задаче смешения двух ЭМВ.

2. Эффект усиления линейного и нелинейного взаимодействия ЭМВ с дифракционной решеткой на резонансных частотах основной и высших мод поверхностных плазмон-поляритонов, который проявляется в увеличении коэффициента поглощения падающего поля и уровня генерации на частоте третьей гармоники и комбинационных частотах.

3. Методы усиления взаимодействия ЭМВ с дифракционной решеткой и увеличения уровня генерируемой мощности в нелинейном режиме:

- увеличение количества графеновых лент и сплошных слоев в пределах одной элементарной ячейки;
- использование эффекта стоячих волн в диэлектрических разделительных слоях;
- применение металлических и многослойных диэлектрических зеркал.

4. Результаты моделирования плазмонных устройств на основе графена в ТГц и ИК диапазоне: поглотителей, генераторов ТГц и преобразователей частот с повышением и понижением частоты.

Практическая значимость. 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). Улучшены характеристики перечисленных устройств за счет выбора рабочей частоты возле резонанса ППП основной и высших мод; увеличения количества слоев графен – диэлектрик; оптимизации толщины разделительных диэлектриков и использования эффекта стоячих волн; применения металлических и многослойных диэлектрических зеркал.

Результаты исследований использованы при выполнении государственного задания в сфере научной деятельности научного проекта № (0852-2020-0032)/(БА30110/20-3-07ИФ) «Экологически чистые материалы для инновационных

мультифункциональных систем: от цифрового дизайна к производственным технологиям».

Обоснованность и достоверность результатов, полученных в диссертации, заключаются в строгой постановке электродинамической задачи, а также верификацией результатов расчета в линейном режиме с использованием ИГУ сравнением с методом на основе объемных интегро-дифференциальных уравнений (ОИДУ) для двумерного и одномерного случаев ДРГ. Для нелинейной дифракции приведена оценка погрешности метода возмущения.

Личный вклад автора. В ходе диссертационного исследования автором выполнены все представленные теоретические исследования многослойных ДРГ. На их основе проведен анализ полученных результатов, выявлены закономерности влияния параметров ДРГ на линейные и нелинейные спектры и предложены способы усиления взаимодействия ЭМВ с ДРГ и увеличения генерируемой мощности на частоте ТГ и комбинационных частотах. Автор принимал непосредственное участие в создании и модификации существующих программ для расчета характеристик ДРГ в нелинейном режиме.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.3.4. Радиофизика в результате проведенных исследований общезначимого характера в следующих 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». В диссертационной работе исследуются процессы генерации и преобразования колебаний и волн с целью разработки новых высокоэффективных источников когерентного излучения ТГц и ИК диапазона.

2. «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.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования были представлены и обсуждались на конференциях:

- «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;
- «XXV Annual Conference Saratov Fall Meeting 2021; and IX Symposium on Optics and Biophotonics», Saratov, 2021;
- «Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves RSEMW», Divnomorskoe, Russia, 2021;
- «2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)», Saratov, Russia, 2020;
- «2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC)», Moscow, Russia, 2020;
- «Saratov Fall Meeting SFM'20, VIII SYMPOSIUM ON OPTICS & BIOPHOTONICS», Saratov, Russia, 2020;
- «Математическое и компьютерное моделирование естественнонаучных и социальных проблем», Пенза, Россия, 2022;
- «Физика бессвинцовых пьезоактивных и родственных материалов. Моделирование эко-систем", Ростов-на-Дону, Россия, 2022;
- «Физика бессвинцовых пьезоактивных и родственных материалов. Моделирование эко-систем", Ростов-на-Дону, Россия, 2021;
- «Математическое и компьютерное моделирование естественно-научных и социальных проблем», Пенза, Россия, 2021;
- «Физика бессвинцовых пьезоактивных и родственных материалов. Моделирование эко-систем", Ростов-на-Дону, Россия, 2020;
- «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» Севастополь, Россия, 2020;
- «Аналитические и численные методы моделирования естественно-научных и социальных проблем», Пенза, Россия, 2020.

Публикации по результатам диссертационной работы. 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.

Структура диссертации. Основные разделы диссертации включают: введение, три главы, заключение и список литературы. Работа содержит 149 страниц, 78 рисунка, 2 таблицы и список литературы из 150 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, представлены цели и задачи диссертации, практическая значимость и новизна работы. На основании проведенных исследований сформулированы основные положения и результаты, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассмотрены оптические свойства графена. В линейном режиме поверхностная проводимость графена представлена в интегральной формулировке Кубо

$$\sigma^{(1)}(\omega, \mu_c, \tau, T) = \frac{ie^2(\omega - i\tau^{-1})}{\pi\hbar^2} \left[\frac{1}{(\omega - i\tau^{-1})^2} \int_0^\infty E \left(\frac{\partial f(E)}{\partial E} - \frac{\partial f(-E)}{\partial E} \right) dE - \int_0^\infty \frac{f(-E) - f(E)}{(\omega - i\tau^{-1})^2 - 4(E/\hbar)^2} dE \right], \quad (1)$$

где $f(E) = (1 + \exp[(E - \mu_c)/k_b T])^{-1}$, τ - время релаксации графена, e - заряд электрона, μ_c - химический потенциал графена, T - температура, k_b - постоянная Больцмана, ω - частота падающей электромагнитной волны (ЭМВ) волны, $\hbar$ - приведенная постоянная Планка. Приводятся аппроксимационные формулы для проводимости, в том числе для графена в магнитном поле.

Показано, что на поверхности графена может распространяться локализованный поверхностный плазмон-поляритон (ППП), возбуждение которого

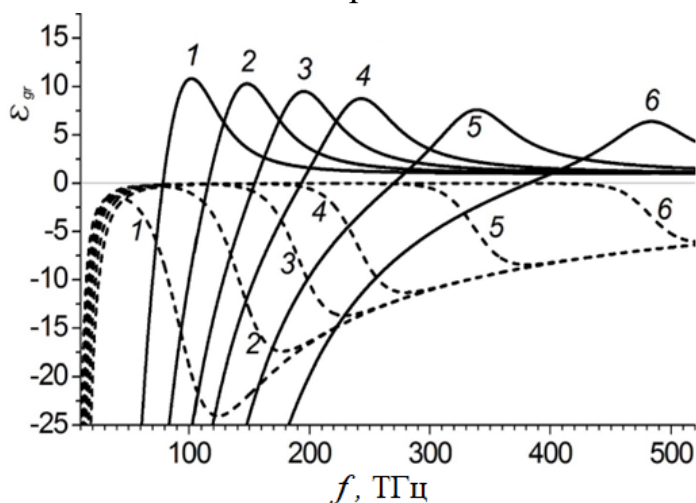


Рис 1. Спектр эквивалентной диэлектрической проницаемости графена. Сплошные – Re , штриховые – Im . (1) $\mu_c = 0.2$ эВ, (2) 0.3, (3) 0.4, (4) 0.5, (5) 0.7, (6) 1.

возможно от ТГц до ИК частот (рис. 1),

где действительная часть эквивалентной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{gr} = 1 + i\sigma^{(1)} / \omega\varepsilon_0 d_{gr}$

отрицательна (d_{gr} – толщина графена, ω – частота ЭМВ, ε_0 – электрическая постоянная). Благодаря безмассовым

свойствам носителей, графен обладает высокой подвижностью зарядов и высокой проводимостью.

Концентрация носителей может быть

изменена путем настройки химического потенциала μ_c (рис. 1). Это обеспечивает возможность управления амплитудно-частотными характеристиками устройств без изменения геометрии.

Теоретически предсказано и экспериментально доказано, что графен проявляет выраженный нелинейный отклик, который может проявляться в генерации на частоте третьей гармоники (ТГ) и комбинационных частотах при смешении двух ЭМВ (накачки и сигнала). В результате проведенного анализа моделей нелинейной проводимости третьего порядка $\sigma^{(3)}$ сделан вывод, что для ненулевых значений μ_c в ТГц – ИК диапазоне (области существования ППП) могут использоваться выражения

$$\sigma^{(3)} = \frac{e^4 V_F^2}{8\pi\mu_c \hbar^2 (\omega_1 + i\tau^{-1})^3}, \quad (2)$$

$$\sigma^{(3)} = \frac{e^4 V_F^2}{8\pi\mu_c \hbar^2 (\omega_1 + i\tau^{-1})^2 (\pm\omega_2 + i\tau^{-1})}, \quad (3)$$

где ω_1, ω_2 – частоты ЭМВ накачки и сигнала, $V_F = 10^6$ м/с - скорость Ферми, τ - время релаксации графена, $\hbar$ – приведенная постоянная Планка. Выражение (2) используется для расчетов эффекта генерации ТГ, (3) – преобразования частот.

Анализ актуальных научных исследований показал большой интерес в использовании ДРГ для проектирования поглотителей в ТГц диапазоне частот и нелинейных устройств (генераторов ТГ и преобразователей частот). Основные результаты главы опубликованы в работе [1].

Во второй главе решены линейная и нелинейная задачи дифракции ЭМВ на двумерно-периодических ДРГ. Структура элементарной ячейки представлена на рис. 2.

При решении *линейной краевой задачи дифракции* компоненты поля, рассеянного

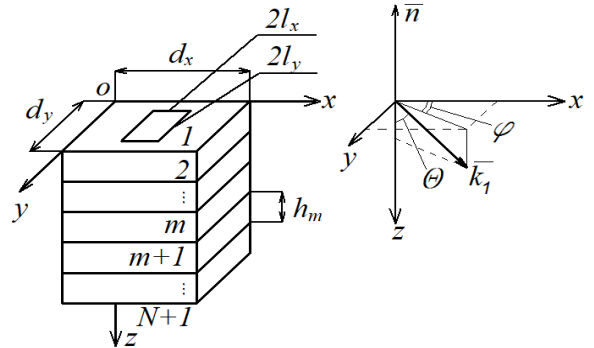


Рис. 2. Структура элементарной ячейки.

лентой, выражаются через векторы Герца P^E , P^M (электрический и магнитный), для которых известна z – компонента

$$E_x = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial^2 P^E}{\partial z \partial x} + ikZ_0 \frac{\partial P^M}{\partial y}, E_y = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial^2 P^E}{\partial z \partial y} - ikZ_0 \frac{\partial P^M}{\partial x}, H_x = \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 P^M}{\partial z \partial x} - i \frac{k}{Z_0} \frac{\partial P^E}{\partial y}, H_y = \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 P^M}{\partial z \partial y} + i \frac{k}{Z_0} \frac{\partial P^E}{\partial x}.$$

Для периодических структур справедливо разложение в ряд Флоке

$$P_m^{M,E}(x, y, z) = \sum_{p,q=-\infty}^{\infty} \tilde{P}_{m,pq}^{M,E}(z) e^{-i\chi_{pq}(x,y)}, \quad \text{где } \chi_{pq}(x,y) = \alpha_p x + \beta_q y \quad - \text{ волновые числа}$$

пространственных гармоник. Коэффициенты ряда

$$\tilde{P}_{m,pq}^M(z) = A_{m,pq}^M \begin{cases} M_{m,pq}^+(z) / M_{m,pq}^+(z_m), & z \geq z_m; \\ M_{m,pq}^-(z) / M_{m,pq}^-(z_m), & z \leq z_m; \end{cases} \quad \tilde{P}_{m,pq}^E(z) = A_{m,pq}^E \begin{cases} E_{m,pq}^+(z) / \hat{E}_{m,pq}^+(z_m), & z \geq z_m; \\ E_{m,pq}^-(z) / \hat{E}_{m,pq}^-(z_m), & z \leq z_m. \end{cases}$$

Выбор функций $M_{m,pq}^{\pm}(z), E_{m,pq}^{\pm}(z)$ обусловлен выполнением условий непрерывности $H_{x,y}$ на границах слоев кроме слоя $z=z_m$ и $E_{x,y}$ для всех границ. Для тока в лентах также справедливо разложение в ряд

$$j_{x,y,m}(x,y) = \sum_{p,q=-\infty}^{\infty} \tilde{j}_{x,y,m,pq} e^{-i\chi_{pq}(x,y)}, \quad (4)$$

тогда с учетом $j_{x,m} = H_y^+(x,y,z_m+0) - H_y^-(x,y,z_m-0)$, $j_{y,m} = -[H_x^+(x,y,z_m+0) - H_x^-(x,y,z_m-0)]$ можно найти поле, рассеянное лентой, расположенной на диэлектрическом слое с координатой z_m

$$E_{x,m}(x,y,z) = \frac{Z_0}{k} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \left[f_{m,pq}^{(11)}(z) \tilde{j}_{x,m,pq} + f_{m,pq}^{(12)}(z) \tilde{j}_{y,m,pq} \right] e^{-i\chi_{pq}(x,y)},$$

$$E_{y,m}(x,y,z) = \frac{Z_0}{k} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \left[f_{m,pq}^{(21)}(z) \tilde{j}_{x,m,pq} + f_{m,pq}^{(22)}(z) \tilde{j}_{y,m,pq} \right] e^{-i\chi_{pq}(x,y)},$$

где $f_{m,pq}^{(ij)}$ являются компонентами тензорной функции Грина.

Удовлетворяем ИГУ $j_{x,y,m}(x,y) = \sigma \left[E_{x,y}^{\text{внеш}}(x,y,z) + \sum_{m=1}^M E_{x,y,m}(x,y,z_m) \right]$, где $E_{x,y}^{\text{внеш}}(x,y,z)$

- поле, рассеянной решеткой без лент, $\sum_{m=1}^M E_{x,y,m}(x,y,z_m)$ - поле рассеянное лентами,

σ - проводимость графена (1). Считая, что токи вне лент равны нулю, приходим к системе векторных парных сумматорных уравнений (ПСУ)

$$\left. \begin{aligned} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \tilde{j}_{x,m,pq} e^{-i\chi_{pq}} &= \sigma \left[U_m e^{-ik_x x} \sin \phi + \sum_{m=1}^M \frac{Z_0}{k} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \left[f_{m,pq}^{(11)} \tilde{j}_{x,m,pq} + f_{m,pq}^{(12)} \tilde{j}_{y,m,pq} \right] e^{-i\chi_{pq}} \right], \\ \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \tilde{j}_{x,m,pq} e^{-i\chi_{pq}} &= 0, \\ \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \tilde{j}_{y,m,pq} e^{-i\chi_{pq}} &= \sigma \left[-U_m e^{-ik_x x} \cos \phi + \sum_{m=1}^M \frac{Z_0}{k} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \left[f_{m,pq}^{(21)} \tilde{j}_{x,m,pq} + f_{m,pq}^{(22)} \tilde{j}_{y,m,pq} \right] e^{-i\chi_{pq}} \right], \\ \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \tilde{j}_{y,m,pq} e^{-i\chi_{pq}} &= 0, \end{aligned} \right\}$$

где размерность системы равна числу лент. Коэффициенты ряда Флоке (4) -

$$\tilde{j}_{x,y,m,pq} = \frac{1}{d_x d_y} \int_{x_m-l_x}^{x_m+l_x} \int_{y_m-l_y}^{y_m+l_y} j_{x,y,m}(x,y) e^{i\chi_{pq}(x,y)} dx dy. \text{ Токи графеновых лент } j_{x,y,m} \text{ представим в}$$

виде ряда $j_{x,m} = \sum_{r=0}^{\infty} \sum_{s=0}^{\infty} X_{m,rs} \varphi_{m,rs}$, $j_{y,m} = \sum_{r=0}^{\infty} \sum_{s=0}^{\infty} Y_{m,rs} \psi_{m,rs}$ по известным базисным функциям

$$\varphi_{m,rs} = C_r^{3/2} \left(\frac{x-x_m}{l_{x,m}} \right) \left[1 - \left(\frac{x-x_m}{l_{x,m}} \right)^2 \right] P_s \left(\frac{y-y_m}{l_{y,m}} \right), \quad \psi_{m,rs} = P_r \left(\frac{x-x_m}{l_{x,m}} \right) C_s^{3/2} \left(\frac{y-y_m}{l_{y,m}} \right) \left[1 - \left(\frac{y-y_m}{l_{y,m}} \right)^2 \right],$$

где $X_{m,rs}, Y_{m,rs}$ - неизвестные коэффициенты, $P_r, C_r^{3/2}$ - полиномы Лежандра и Гегенбауэра. ПСУ решаются проекционным методом Галеркина – находятся коэффициенты $X_{m,rs}, Y_{m,rs}$, затем токи и поле $\vec{E}^{лин}(x, y, z)$, рассеянное лентой и всей ДРГ. Математическая модель допускает расчет решеток как из импедансных, так из идеально проводящих полосок, для которых в базисе используются взвешенные полиномы Чебышева первого и второго рода.

Следующий этап - решение *нелинейной краевой задачи дифракции* методом возмущения. Считаем, что предыдущий этап выполнен и известно поле рассеянное ДРГ в линейном режиме $\vec{E}^{лин}$. Пусть ДРГ проявляет нелинейный отклик и $\vec{j} = \vec{j}^{лин} + \left[\vec{j}^{нелин} \right] = \sigma \vec{E} + \left[\sigma^{(2)} \vec{E} \vec{E} + \sigma^{(3)} |\vec{E}|^2 \vec{E} + \dots \right]$, где $\vec{E}$ - поле, рассеянное решеткой в нелинейном режиме, $\sigma^{(2)}, \sigma^{(3)}, \dots$ - нелинейные проводимости высших порядков. Среди всех нелинейных слагаемых, член с $\sigma^{(3)}$ будет максимален, а все четные можно опустить, поскольку кристаллическая решетка графена центрально-симметрична.

Применим метод возмущения. Полагая, что параметр $\sigma^{(3)}$ малый, можем считать, что $\vec{E} \approx \vec{E}^{лин}$, тогда $\vec{j}^{нелин} \approx \sigma^{(3)} |\vec{E}^{лин}|^2 \vec{E}^{лин}$.

В случае смещения $\vec{E}^{лин} = \vec{E}_1^{лин} \cos \omega_1 t + \vec{E}_2^{лин} \cos \omega_2 t$. Индексу «1» соответствует волна накачки, «2» - волна сигнала, $E_1 \gg E_2$. После подстановки в выражение для тока и преобразований, получим нелинейных ток

$$\vec{j}^{нелин} \approx \sigma^{(3)} \left[\begin{aligned} & \frac{3}{4} |\vec{E}_1^{лин}|^2 \vec{E}_1^{лин} \cos \omega_1 t + \frac{1}{4} |\vec{E}_1^{лин}|^2 \vec{E}_1^{лин} \cos 3\omega_1 t + \frac{1}{2} |\vec{E}_1^{лин}|^2 \vec{E}_2^{лин} \cos \omega_2 t + \\ & + \frac{1}{4} |\vec{E}_1^{лин}|^2 \vec{E}_2^{лин} \cos 2(\omega_1 - \omega_2)t + \frac{1}{4} |\vec{E}_1^{лин}|^2 \vec{E}_2^{лин} \cos 2(\omega_1 + \omega_2)t \end{aligned} \right],$$

где первое слагаемое отвечает за самовоздействие, второе – генерацию ТГ, третье - кросс-модуляцию, четвертое и пятое – генерацию разностной и суммарной комбинационных частот. По найденным токам вычисляются поля на частоте ТГ (используется выражение (2) для $\sigma^{(3)}$) и комбинационных частотах (используется выражение (3) для $\sigma^{(3)}$). Разработанная математическая модель численно реализована в среде MS Visual Studio на языке C/C++.

Верификация результатов моделирования линейных спектров отражённой R и поглощенной мощности $P = 1 - R - T$ (T коэффициент прохождения) ЭМВ проведена сравнением с методом ОИДУ для одномерных ДРГ в магнитном поле $B = 0.5$ Тл (рис. 3) и двумерных многослойных ДРГ (рис. 5). ОИДУ позволяет представить ДРГ как решетку лент шириной $2l$, так и щелей размера $d - 2l$. При s – поляризации вектор

напряженности электрического поля падающей ЭМВ ориентирован вдоль длинной стороны лент l , при p – поляризации вдоль узкой w . Получено практически полное совпадение разработанного метода а основе ПСУ с методом ОИДУ как для одномерных, так и для двумерных ДРГ.

В третьей главе на основе разработанного пакета программ исследованы спектры ДРГ, показаны способы оптимизации характеристик в ТГц и ИК диапазоне с целью усиления взаимодействия с внешним полем в линейном режиме и увеличения уровня генерации на частоте ТГц и комбинационных частотах.

При исследовании линейных ТГц и ИК спектров отражения R , пропускания T и поглощения P падающей ЭМВ s - и p -поляризации (рис. 4) обнаружены резонансные области, удовлетворяющие условию возбуждения стоячих ППП в графеновых лентах. В этих областях происходит экстремальное увеличение поля вблизи графеновых лент и возрастание коэффициента поглощения P (по мощности). На основании полученных результатов проведено моделирование широкополосных ТГц поглотителей. Элементарная ячейка (рис. 5) имеет девять слоев сплошного графена, разделенных диэлектрическим слоем ($n_d=1.77$) толщиной $h_d = 25, 23$ и 20 мкм для химического потенциала графена $\mu_c = 0.25, 0.35$ и 0.4 эВ, соответственно, на полубесконечной подложке ($n_{sub}=1.45$). Для повышения ширины полосы

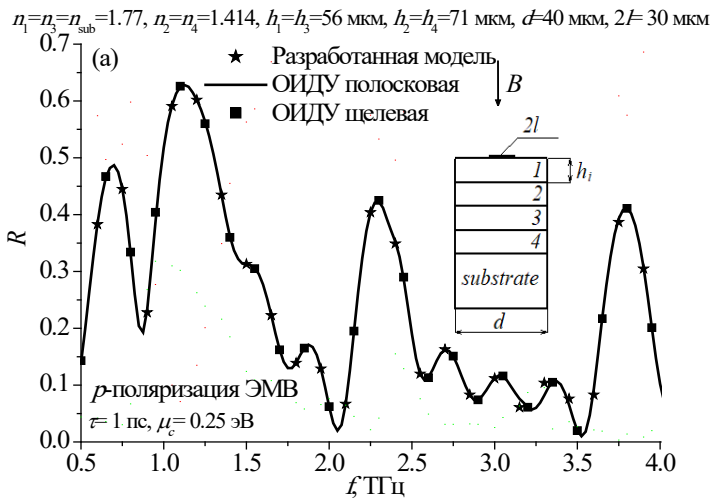


Рис. 3. Верификация результатов расчета.

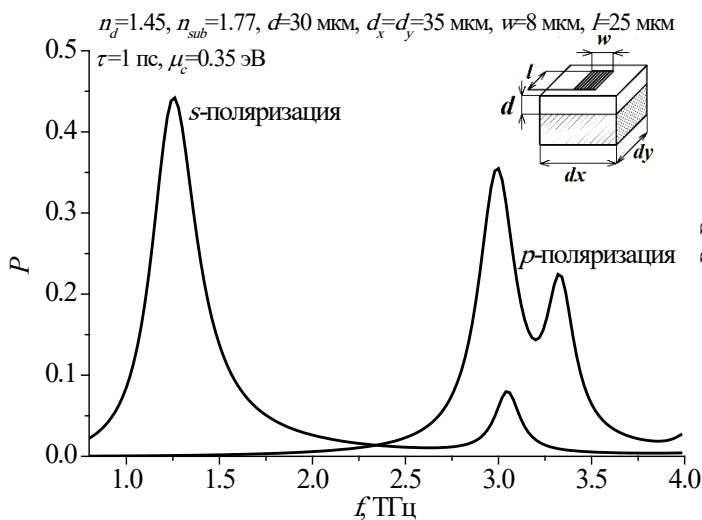


Рис. 4. Спектры поглощения однослойной ДРГ.

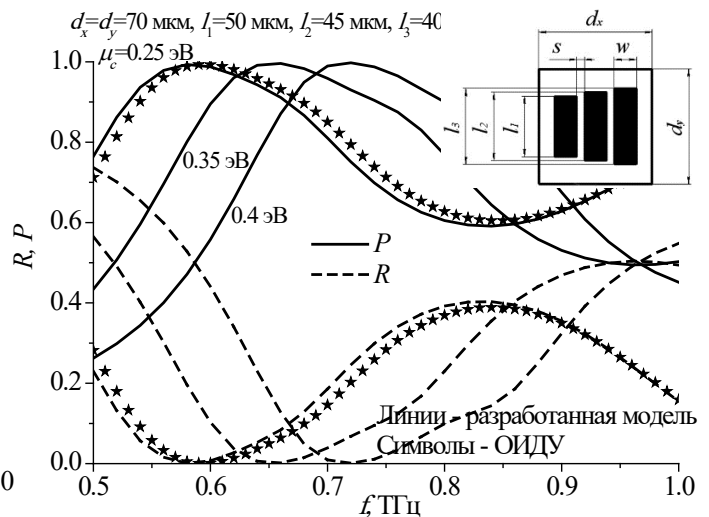


Рис. 5. Широкополосный ТГц поглотитель.

максимального поглощения на верхнем слое размещены несколько лент графена с близкими длинами (вставка рис.5). Получено поглощение (сплошные кривые) более 90% падающей энергии s - поляризованной ЭМВ с относительной шириной порядка 20% при угловой нечувствительности до 30° (рис. 5). Представленные поглотители могут также выступать в качестве поляризатора с развязкой по коэффициенту отражения $N = 10\lg(R_p/R_s)$, которая в данной конфигурации превышает значение 20 дБ (R_p , R_s – коэффициенты отражения ЭМВ p - и s – поляризации).

Далее проведено численное моделирование нелинейной дифракции - эффекта генерации ТГц. Рассчитаны нормированные (на плотность мощности P_1 падающей ЭМВ) спектры излучаемой мощности в прямом T_3 и обратном направлениях R_3 на утроенной частоте (ДРГ с параметрами рис. 4). Увеличение уровня генерации ТГц на несколько порядков наблюдается в условиях, когда частота падающей ЭМВ приближается к резонансной частоте ППП (основной и высших мод). Экстремальное усиление и локализация поля приводит к значительному увеличению нелинейности ДРГ и уровню генерации (рис. 6).

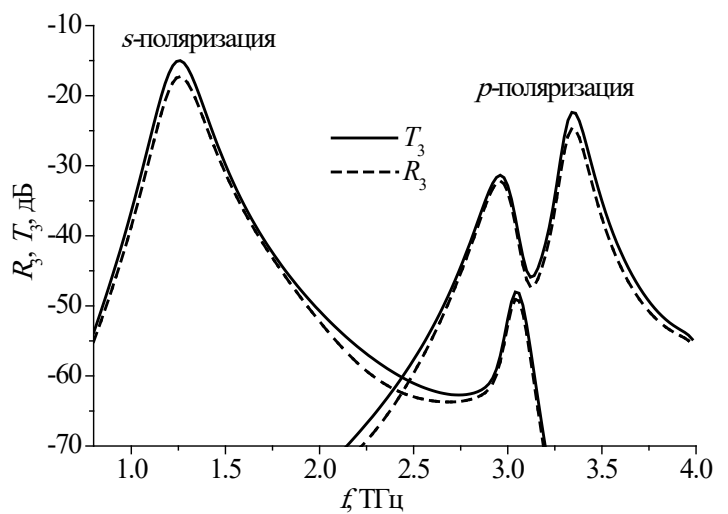


Рис. 6. Генерация третьей гармоники. $P_1=10$ мВт/мм².

Для моделирования процессов преобразования частот при воздействии на ДРГ полем двух ЭМВ (накачки с мощностью P_1 и сигнала) рассчитаны многомодовые линейные спектры (рис. 7) с помощью которых исследованы нелинейные процессы: генерации ТГц волн при смешении двух ЭМВ среднего ИК диапазона; повышающее преобразование частоты из ТГц в средний ИК и из среднего в ближний ИК; преобразование близких частот в ТГц и ИК диапазонах. На рис. 8 представлены результаты моделирования генераторов ТГц волн. Частоты накачки f_1 и сигнала f_2 выбираются вблизи резонансов основной и высших мод ППП. При частоте накачки $f_1 = 32.25$ ТГц, сигнала $f_2 = 65.5...67$ ТГц обеспечивается генерация ТГц волн в диапазоне $f_3 = 1...2.5$ ТГц и максимумом уровня на частоте 1.6 ТГц. Аналогичным образом решена обратная задача – перенос ТГц спектров в ИК диапазон (визуализация ТГц волн). При моделировании процесса преобразования близких частот в ТГц и ИК диапазонах частоты f_1 , f_2 выбираются возле одного резонанса. Во всех случаях

наблюдается значительное увеличение генерируемой мощности в резонансных условиях, когда частоты ЭМВ f_1, f_2 расположены в области резонансов основной или высших мод ППП.

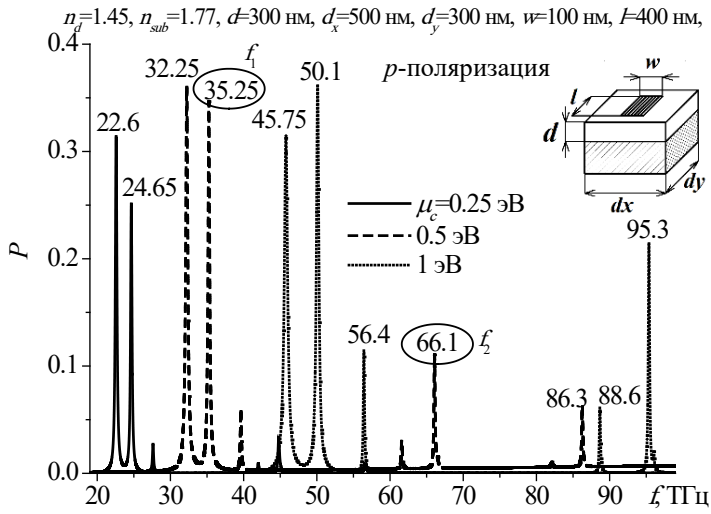


Рис. 7. Многомодовые спектры поглощения преобразователей частот.

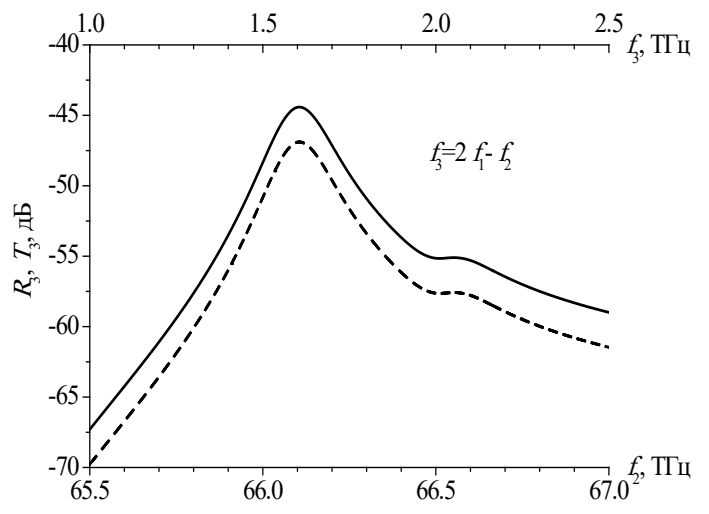


Рис. 8. Генерация ТГц волн при понижающем преобразовании частот. $P_1 = 10^{-5}$ мВт/мм².

Исследовано влияние параметров диэлектрика, графеновых лент и структуры элементарной ячейки на радиофизические параметры ДРГ в линейном режиме и при моделировании эффекта генерации ТГ. Продемонстрировано значительное увеличение коэффициента поглощения и уровня ГТГ при увеличении количества слоев графен – диэлектрик (рис. 9). Оптимизируя толщины диэлектрических слоев, можно добиться как синфазности, так и противофазности многократно отраженных волн, тем самым увеличив или уменьшив эффективность линейного и нелинейного отклика. При изменении химического потенциала графена, который может быть перестроен приложением внешнего электрического поля, возможно управлять резонансной частотой ДРГ и уровнем генерации ТГ (рис. 10).

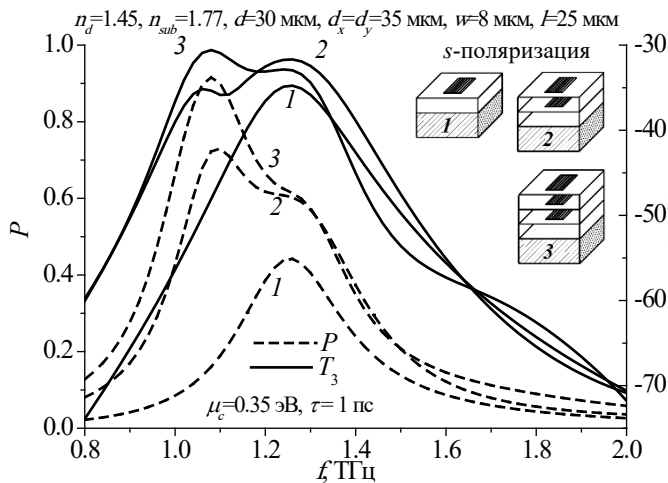


Рис. 9. Эффект многослойности. $P_1 = 1$ мВт/мм².

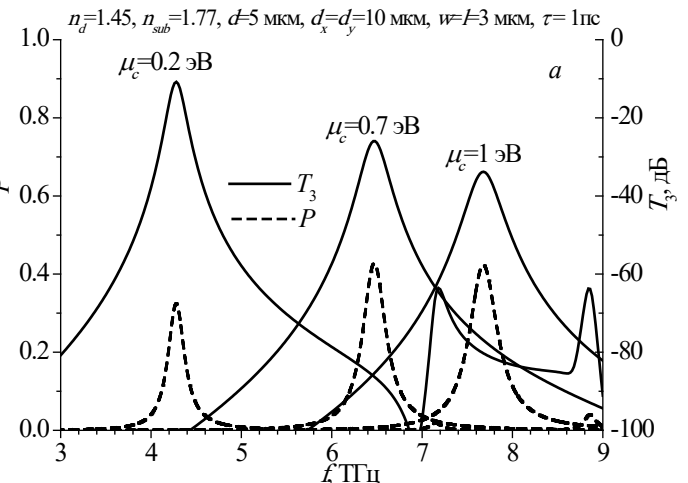


Рис. 10. Управляемость ДРГ. $P_1 = 10^{-5}$ мВт/мм².

Представлена дополнительная возможность усиления взаимодействия ЭМВ с ДРГ и уровня нелинейных эффектов – применение многослойных диэлектрических и металлических зеркал. Квазипериодическая диэлектрическая подложка может блокировать волну первой гармоники, и одновременно увеличить мощность ТГ (рис. 11). Применение МЗ позволяет значительно увеличить мощность ТГ, излучаемой в отраженном направлении R_3 (рис. 12) и получить эффект полного поглощения на резонансных частотах. Основные результаты второй и третьей глав опубликованы в работах [2-24].

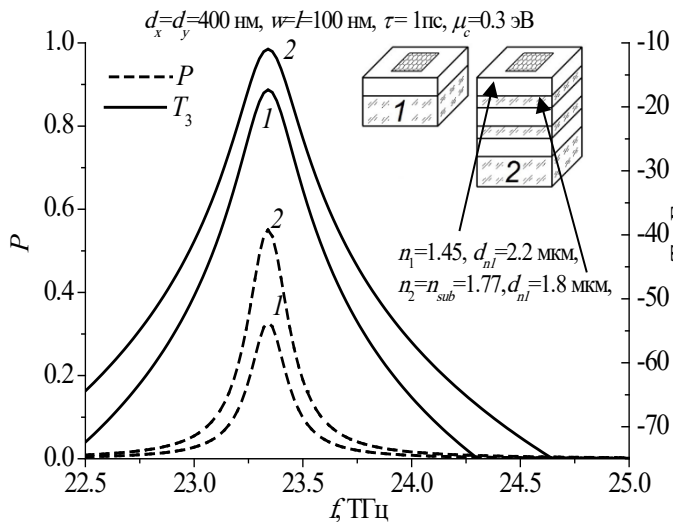


Рис. 11. Эффект применения диэлектрического зеркала. $P_1 = 10^{-7}$ мВт/мм².

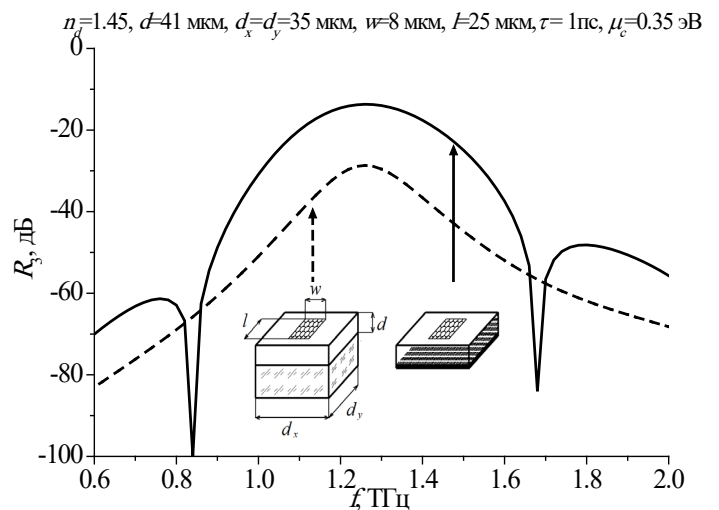


Рис. 12. Эффект применения металлического зеркала. $P_1 = 10^{-11}$ мВт/мм².

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель линейной и нелинейной дифракции ЭМВ на бесконечных ДРГ и получены на ее основе результаты моделирования плазмонных устройств в ТГц и ИК диапазоне. Разработанный пакет программ электродинамического анализа позволяет проводить исследования линейных спектров отражения, прохождения и поглощения ЭМВ, а также нелинейных спектров излучаемой мощности в прямом и отраженном направлении на частоте ТГ, суммарных и разностных комбинационных частотах в задаче смещения двух волн.

При исследовании оптических свойства графена продемонстрирована возможность взаимодействия с полем ЭМВ в широком диапазоне частот от ТГц до оптики. Показано, что концентрацией носителей в широких пределах можно управлять перестройкой химического потенциала, которая может осуществляться как допированием, так и электрическим управлением.

Для графена возможны условия, когда на границе раздела графен – диэлектрик распространяется локализованный ППП, который на порядки усиливает

взаимодействие поле падающей ЭМВ с ДРГ. Для легированного графена эта область занимает диапазон от ТГц до ИК.

Показано, что графен проявляет выраженный нелинейный отклик, который описывается нелинейной проводимостью третьего порядка. Представлены теоретические модели, формулы для проводимости третьего порядка и приведены экспериментальные подтверждения нелинейности графена на ТГц и ИК частотах.

Разработан и численно реализован алгоритм решения двумерной линейной краевой задачи дифракции, который использует ИГУ для электрического поля вблизи плазмонных неоднородностей (графеновых или других). В качестве базисных функций в разложении тока применяются полиномы Лежандра и Гегенбауэра, Чебышева, которые учитывают особенностей распределения тока на прямоугольных графеновых лентах. Полученная система ПСУ решается методом Галеркина. Проведена верификация результатов расчета представленной математической модели сравнением с результатами расчетов методом ОИДУ. Отклонение разработанного метода от ОИДУ составило значение около 5%.

Решена нелинейная краевая задача дифракции методом возмущения. Основной идеей метода является использование поля, полученного в линейном режиме и учет нелинейной проводимости третьего порядка графена на этапе удовлетворения ИГУ. Задача решена в случае падения одной ЭМВ и смещения двух ЭМВ для нахождения поля на утроенной, комбинационных суммарных и разностных частотах.

С помощью разработанного пакета программ электродинамического анализа исследованы радиофизические характеристики бесконечных одномерных и двумерно-периодических многослойных многоэлементных ДР при воздействии полем ЭМВ одной или двух частот. Линейные спектры отражения, прохождения и поглощения падающей ЭМВ демонстрируют резонансы в диапазоне от ТГц до ИК. Этот резонансный механизм приводит к увеличению ближнего поля вблизи графеновых лент и усилению взаимодействия с ЭМВ. Приведены новые результаты расчетов широкополосных ТГц поглотителей.

В нелинейных спектрах демонстрируется увеличение уровня генерации ТГц, когда частота падающей ЭМВ близка к резонансным частотам основной или высших мод ППП. Показаны способы усиления взаимодействия с внешним полем и увеличения уровня генерации частотных и комбинационных гармоник: применение графеновых лент конечных размеров в качестве резонаторов ППП; выбор рабочих частот ДР в области резонанса основной или высших мод ППП; увеличение количества слоев графен-диэлектрик для увеличения общей оптической

проводимости ДРГ; оптимизация толщины разделительного диэлектрического слоя для дополнительной частотной селекции; применение диэлектрических и металлических зеркал; увеличение плотности упаковки графеновых лент (уменьшение периода). Исследованы механизмы управления резонансной частотой ДРГ и уровнем нелинейных эффектов: изменением размера графеновой ленты и перестройкой химического потенциала графена.

Представлены результаты моделирования процесса преобразования частот в процессе смещения ЭМВ в диапазоне ТГц-ИК. Получено значительное увеличение мощности генерируемых ТГц, ИК ЭМВ, когда частота падающей волны (или волн при смещении) расположены вблизи резонансов ППП основного и высшего порядков. Приведены новые результаты расчетов генераторов ЭМВ ТГц диапазона, повышающих преобразователей частот из ТГц в ИК (визуализатор ТГц излучения) и из среднего ИК в ближний, а также преобразователей частот в пределах одного частотного диапазона.

Таким образом, предложенные ДРГ обеспечивают способ реализации эффективных управляемых плазмонных широкополосных линейных и нелинейных устройств будущего, таких как поглотители, поляризаторы, генераторы ТГц и ИК частот, преобразователи частот для нелинейной ТГц спектроскопии и неинвазивных ТГц процессоров, смесителей, модуляторов для применений в системах безопасности, обнаружения, телекоммуникации, оптической связи и обработке сигналов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Черепанов, В. В. Нелинейная поверхностная проводимость графена: формулы и экспериментальные данные / В. В. Черепанов // Физические основы приборостроения. – 2020. – Т. 9, № 4(38). – С. 2-17. – DOI 10.25210/jfor-2004-002017
2. Оптимизация параметров и характеристик широкополосных терагерцовых поглотителей на основе 2d-решеток графеновых лент на многослойных подложках / А. М. Лерер, И. Н. Иванова, Г. С. Макеева, В. В. Черепанов // Оптика и спектроскопия. – 2021. – Т. 129, № 3. – С. 342-349. – DOI 10.21883/OS.2021.03.50661.217-20
3. Лерер, А. М. Генерация третьей гармоники терагерцовых волн нелинейной графеновой многослойной метаповерхностью / А. М. Лерер, Г. С. Макеева, В. В. Черепанов // Оптика и спектроскопия. – 2021. – Т. 129, № 1. – С. 89-91. – DOI 10.21883/OS.2021.01.50444.173-20
4. Лерер, А. М. Нелинейное взаимодействие терагерцовых волн с наноструктурированным графеном в резонансных многослойных плазмонных

структурах / А. М. Лерер, Г. С. Макеева, В. В. Черепанов // Радиотехника и электроника. – 2021. – Т. 66, № 6. – С. 543-551. – DOI 10.31857/S0033849421060188

5. Лерер, А. М. Преобразователи частоты терагерцового и инфракрасного диапазонов на основе двумерно-периодических графеновых решеток / А. М. Лерер, Г. С. Макеева, В. В. Черепанов // Радиотехника и электроника. – 2023. – Т. 68, № 1. – С. 30-36.

6. Lerer, A. M. Numerical Simulation of Nonlinear Effects in Multilayer Graphene Metasurfaces in Terahertz and Infrared Ranges / A. M. Lerer, V. V. Cherepanov, G. S. Makeeva // Engineering World. – 2021. – Vol. 3. – P. 1-5 – Режим доступа: <https://wseas.com/journals/ew/2021/engw2021-001.pdf> (дата обращения 30.06.2023)

7. Лерер, А. М. Численно-аналитический метод математического моделирования периодических структур с нелинейными графеновыми включениями / А. М. Лерер, Г. С. Макеева, В. В. Черепанов // Аналитические и численные методы моделирования естественно-научных и социальных проблем : материалы XV Международной научно-технической конференции, г. Пенза, Россия, 1-4 декабря 2020 г. – Пенза : ПГУ, 2020. – С. 177-183.

8. Лерер, А. М. Генерация третьей гармоники многослойной плазмонной графеновой структурой в дальнем инфракрасном диапазоне / А. М. Лерер, В. В. Черепанов // Физика бессвинцовых пьезоактивных и родственных материалов. Моделирование эко-систем (анализ современного состояния и перспективы развития) : сборник трудов Девятого Международного междисциплинарного молодежного симпозиума, (Ростов-на-Дону, 28-30 декабря 2020 г.) : в двух томах. Т. 2. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2020. – С. 253-259

9. Lerer, A. M. Electronically tunable broadband THz frequency multipliers based on multilayer nonlinear graphene metasurfaces / A. M. Lerer, V. V. Cherepanov, G. S. Makeeva // 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2020, Saratov, Russia. – 2020. – P. 269-273. – DOI 10.1109/APEDE48864.2020.9255492

10. Efficiency of the Third Harmonic Generation in Multilayer Graphene Plasmon THz Structures / A. M. Lerer, I. N. Ivanova, V. V. Cherepanov, G. S. Makeeva // 2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russia. – 2020. – P. 196-199. – DOI 10.1109/RMC50626.2020.9312253

11. Makeeva, G. S. Efficient tunable THz frequency converters based on multilayer graphene metasurfaces / G. S. Makeeva, V. V. Cherepanov // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia. – 2021. – P. 103-106. – DOI 10.1109/RSEMW52378.2021.9494130

12. Makeeva, G. S. Multiband nonlinear mid-infrared wave mixing by multilayer graphene plasmonic structures / G. S. Makeeva, V. V. Cherepanov // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia. – 2021. – P. 39-42. – DOI 10.1109/RSEMW52378.2021.9494134

13. Электрически перестраиваемые ТГц умножители частоты на основе многослойных решеток графеновых микролент / А. М. Лерер, Г. С. Макеева, В. В. Черепанов, И. Н. Иванова // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2020. – № 1-2. – С. 286-287

14. Лерер, А. М. Математическое моделирование нелинейных явлений в графеновых метаповерхностях в терагерцовом и инфракрасном диапазонах частот / А. М. Лерер, Г. С. Макеева, В. В. Черепанов // Математическое и компьютерное моделирование естественно-научных и социальных проблем : материалы XV Международной научно-технической конференции молодых специалистов, аспирантов и студентов, Россия, г. Пенза, 1-4 июня 2021 г. – Пенза : ПГУ, 2021. – С. 65-74

15. Electrically Controllable Infrared Frequency Conversion in Nonlinear Multilayer Graphene Ribbon Arrays / A. M. Lerer, V. V. Cherepanov, S. V. Krutiev [et al.] // 2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Hangzhou, China, 22 November. – 2021. – P. 663-669. – DOI 10.1109/PIERS53385.2021.9695092

16. Лерер, А. М. Нелинейное преобразование частот терагерцового и инфракрасного диапазонов плазмонными метаповерхностями на основе графена / А. М. Лерер, Г. С. Макеева, В. В. Черепанов // Физика бессвинцовых пьезоактивных и родственных материалов. Моделирование эко-систем (анализ современного состояния и перспективы развития) : труды Десятого Международного междисциплинарного молодежного симпозиума, г. Ростов-на-Дону, 27-28 декабря 2021 года : [в двух томах]. Т. 1. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2021. – С. 266-269

17. Lerer, A. M. Broadband Generation of Terahertz Waves via Infrared Frequency Nondegenerate Parametric Down-Conversion by Nonlinear Graphene Arrays / A. M. Lerer, V. V. Cherepanov, G. S. Makeeva // Proceedings of SPIE : Laser Physics, Photonic Technologies, and Molecular Modeling. – 2022. – Vol. 12193. – P. 121930B. – P. 64-68. – DOI 10.1117/12.2624276

18. Lerer, A. M. Terahertz-to-Infrared Up-Conversion by Plasmonic-Enhanced Sum Frequency Generation in Graphene Gratings / A. M. Lerer, G. S. Makeeva, V. V. Cherepanov // 2022 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), Saratov, Russian Federation. – 2022. – P. 96-100. – DOI 10.1109/APEDE53724.2022.9913020

19. Lerer, A. M. Optimization of Characteristics of Reconfigurable Nonlinear THz and IR Devices Based on 1D Reflective Graphene Gratings / A. M. Lerer, G. S. Makeeva, V. V. Cherepanov // 2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russian Federation. – 2022. – P. 56-59. – DOI 10.1109/RMC55984.2022.10079450

20. Lerer, A. M. Reconfigurable Parametric Mid-Infrared Frequency Up/Down Conversion Using Multimode Plasmon Resonances in Graphene Ribbon Metasurfaces / A. M. Lerer, G. S. Makeeva, V. V. Cherepanov // 2022 52nd European Microwave Conference (EuMC), Milan, Italy. – 2022. – P. 266-269. – DOI 10.23919/EuMC54642.2022.9924359

21. Лерер, А. М. Математическое моделирование нелинейно-оптических процессов смешения терагерцовых волн в графеновых метаповерхностях / А. М. Лерер, Г. С. Макеева, В. В. Черепанов // Математическое и компьютерное моделирование естественно-научных и социальных проблем : материалы XVI Всероссийской с международным участием научно-технической конференции молодых специалистов, аспирантов и студентов, Россия, г. Пенза, 1-4 июня 2022 г. – Пенза : ПГУ, 2022. – С. 30-40

22. Лерер, А. М. Математическое моделирование реконфигурируемых конвертеров частоты инфракрасного диапазона на основе графеновых решеток / А. М. Лерер, Г. С. Макеева, В. В. Черепанов // Математическое и компьютерное моделирование естественно-научных и социальных проблем : материалы XVI Всероссийской с международным участием научно-технической конференции молодых специалистов, аспирантов и студентов, Россия, г. Пенза, 1-4 июня 2022 г. – Пенза : ПГУ, 2022. – С. 41-52

23. Дифракция электромагнитных волн терагерцового диапазона на графеновой щелевой решетке / А. М. Лерер, В. В. Черепанов, О. В. Крестьянинова, Я. А. Рейзенкинд // Физика бессвинцовых пьезоактивных и родственных материалов. Моделирование эко-систем (анализ современного состояния и перспективы развития): труды Одиннадцатого Международного междисциплинарного молодежного симпозиума, Ростов-на-Дону, 26-28 декабря 2022 года : в двух томах. Т. 2. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2022. – С. 141-144

24. Lerer, A. M. Reconfigurable broadband terahertz perfect absorbers and generators based on multilayer graphene ribbon plasmonic structures / A. M. Lerer, G. S. Makeeva, V. V. Cherepanov, I. N. Ivanova // Saratov Fall Meeting 2020: Laser Physics, Photonic Technologies, and Molecular Modeling. – 2021. – Vol. 11846. – P. 50-55. – DOI 10.1117/12.2585702