

ОТЗЫВ

*на автореферат
диссертации Черепанова Владимира Владимировича
«Электродинамический анализ плазмонных устройств
на основе графена в ТГц и ИК диапазоне»,
представленной к защите на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по научной специальности 1.3.4 Радиофизика*

Диссертационная работа **В.В. Черепанова** направлена на исследование процессов взаимодействия электромагнитных волн терагерцового и инфракрасного частотных диапазонов с бесконечными одномерными и двумерно-периодическими многослойными дифракционными решётками на основе графеновых лент квадратной и прямоугольной формы, содержащими сплошные графеновые слои, в линейном и нелинейном режимах, для моделирования плазмонных частотно-селективных поверхностей, поглотителей, генераторов 3-й гармоники и преобразователей частот.

Известно, что терагерцовые технологии открывают новые возможности для разработки систем дистанционного зондирования, спектроскопических систем, систем визуализации и др. систем с использованием периодических структур. Высокий интерес к ним наблюдается в телекоммуникационных системах, где объём передаваемых данных увеличивается год от года, что вызывает насущную необходимость перехода на сверхвысокие скорости обработки. Для этого перехода требуется использование новых материалов, способных работать на ТГц-частотах и выше, на ИК-частотах, где большинство обычных электронных материалов уже не работают. В технике СВЧ такими материалами являются благородные металлы и кремний, однако с ростом частоты их применение затруднительно, из-за увеличения потерь в проводящих линиях, и высокой стоимости. Актуальна также тенденция перехода к полностью оптической обработке сигналов, и использования технологий радиофотоники. Одним из наиболее перспективных материалов, способным работать на частотах от ТГц до оптических частот, является графен. Как считают разработчики сетей нового поколения 6G, графен способен заменить всю кремниевую электронику.

Основными преимуществами графена является высокая подвижность и отсутствие массы электронов, что приводит к его высокой проводимости на ТГц частотах. Известно, что графен обладает исключительно высокой нелинейностью, самой сильной из всех известных материалов радиоэлектронной техники. Проводимостью и нелинейностью графена можно управлять, прикладывая к материалу невысокое внешнее электрическое поле, что невозможно в металлах.

Графен способен поддерживать распространение сверхлокализованного поверхностного плазмон–поляритона вдоль поверхности, в ТГц и ИК диапазонах частот, тем самым увеличивая эффективность взаимодействия с внешним полем.

Для возбуждения поверхностного плазмон–поляритона широко применяются дифракционные решётки, при использовании которых, на основе графена, можно решить две задачи: 1) получить замедляющую систему, выполняющую условие возбуждения поверхностного плазмон–поляритона, и 2) сформировать элементы дифракционной решётки на основе графена, являющиеся резонаторами для сверхлокализованного поверхностного плазмон–поляритона. Так, именно графен является очень актуальным материалом, в качестве функционального плазмонного материала с управляемыми свойствами, для создания дифракционных решёток, применяемых при разработке аппаратуры ТГц и ИК диапазонов – поглотителей, поляризаторов, преобразователей частот, модуляторов, генераторов и других устройств необходимых для развития нового поколения электроники.

Однако для графеновой электроники не работает принцип масштабируемости, так как проводимость графена обладает высокой частотной дисперсией. При моделировании необходимо тщательно подбирать параметры элементарной ячейки, проводя большой объём вычислений. Большинство работ, посвящённым расчётам плазмонных устройств ТГц и ИК диапазонов на основе графена, использует коммерческие пакеты электродинамического моделирования, основанные на сеточном разбиении пространства дифракционной задачи. Их преимущество – универсальность, однако по мере увеличения количества элементов дифракционной решётки и слоев элементарной ячейки значительно возрастают требования к вычислительной мощности компьютера и времени расчёта. Кроме того, требуется учёт сильной нелинейности материалов при генерации гармонических составляющих и смещения электромагнитных волн, что дополнительно усложняет задачу.

Исходя из сказанного выше, разработка численно-аналитических методов расчёта представляется весьма **актуальной** задачей. Её решение позволяет:

- исследовать процесс рассеяния электромагнитных волн в линейном режиме,
- исследовать эффект генерации электромагнитных колебаний на частоте третьей гармоники и комбинационных частотах, в задаче смещения двух ЭМВ;
- провести моделирование линейных и нелинейных плазмонных устройств терагерцового и инфракрасного диапазонов для аппаратуры нового поколения;
- учитывать особенности распределения электромагнитного поля вблизи неоднородностей (металлических, графеновых, плазмонных материалов);
- сократить время расчёта характеристик сложных многослойных конфигураций дифракционных решёток на основе графена, и провести верификацию расчётов, выполненных другими методами, и выполнить оценку погрешности.

Наиболее значимые *новые научные результаты*, полученные *В.В. Черепановым*, заключаются в: разработке новой математической модели решения линейной задачи дифракции электромагнитных волн на одномерных и двумерно-периодических дифракционных решётках на основе графена; получении новых результатов расчётов линейных спектров рассеяния электромагнитных волн в диапазоне частот от ТГц до ИК; демонстрации возможности использования дифракционных решёток на основе графена, в качестве широкополосных терагерцовых поглотителей с угловой нечувствительностью в широком диапазоне углов падения электромагнитных волн; разработке новой математической модели решения нелинейной задачи дифракции, основанной на методе возмущения; получении новых результатов расчётов нелинейных спектров генерации на частоте 3-й гармоники и комбинационных частотах в задаче смешения двух электромагнитных волн в ТГц и ИК диапазоне; демонстрации возможности использования дифракционных решёток на основе графена в качестве генераторов третьей гармоники, источников и систем визуализации ТГц волн, преобразователей частот ТГц и ИК диапазонов; исследовании влияния параметров дифракционных решёток на основе графена на линейную и нелинейную дифракцию, разработке механизмов усиления взаимодействия электромагнитных волн с дифракционной решёткой на основе графена и увеличения генерируемой мощности на частоте 3-й гармоники и комбинационных частотах.

Исследования, выполненные в диссертации *В.В. Черепанова*, несомненно, имеют высокую *практическую значимость*. Разработанные математические модели численно реализованы в среде MS Visual Studio и позволяют моделировать процессы линейной и нелинейной дифракции электромагнитных волн терагерцового и инфракрасного диапазонов на бесконечных дифракционных решётках прямоугольной формы, содержащих графен и другие плазмонные материалы. Ключевым преимуществом разработанного импортозамещающего программного обеспечения является высокое быстродействие, в сравнении с коммерческими пакетами на основе сеточного разбиения пространства электродинамической задачи, что обеспечивает возможность быстрого расчёта параметров дифракционных решёток с большим количеством элементов и слоев: линейных спектров рассеяния электромагнитных волн для разработки поглотителей и поляризаторов, нелинейных спектров генерации на частоте 3-й гармоники и на комбинационных частотах для разработки генераторов 3-й гармоники и преобразователей частот (смесителей, устройств визуализации ТГц излучения, генераторов ТГц волн, модуляторов). Улучшены характеристики перечисленных устройств, за счёт выбора рабочей частоты возле резонанса основной и высших мод сверхлокализованного поверхностного плазмон-поляритона, а также увеличения количества слоёв материала «графен-диэлектрик» и оптимизации толщины разделительных диэлектриков, использования эффекта стоячих волн; применения металлических и многослойных диэлектрических зеркал.

E-mail: chia2002@inbox.ru