

## **Отзыв официального оппонента**

доктора физико-математических наук, профессора

Смирнова Юрия Геннадьевича

на диссертационную работу Вареница Виталия Викторовича

«Математическое моделирование взаимодействия электромагнитных волн терагерцового диапазона частот с наноструктурированными объектами на основе графена», на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

### **Актуальность избранной темы.**

Диссертационная работа посвящена проблемам математического моделирования взаимодействия электромагнитных волн терагерцового диапазона частот с наноструктурированными объектами на основе графена. В основе математического моделирования лежит краевая задача для системы уравнений Максвелла с эффективной комплексной диэлектрической проницаемостью графена в форме Кубо и условиями неасимптотического излучения на входных сечениях наноструктурированного объекта, который в диссертации называется волноводным трансформатором. Неасимптотические условия излучения рассматриваются в виде оператора импеданса, который позволяет сформулировать краевую задачу, эквивалентную задаче дифракции.

Результаты математического моделирования наноструктурированных объектов на основе графена в отечественных и зарубежных работах получены исключительно конечно-разностным методом во временной области (FDTD). Шаг сетки в методе FDTD должен быть значительно меньше длины волны и геометрических размеров графеновых нановключений. Это предполагает использование сетки с меньшим шагом, что требует больших затрат памяти и времени на выполнение расчетных процедур. В методе FDTD не используются условия неасимптотического излучения, входные сечения от объекта дифракции необходимо выносить в регулярную область, где выполняются условия асимптотического излучения на бесконечности. Это приводит к дополнительной памяти и времени расчетов за счет увеличения счетной области.

Графен является перспективным материалом для создания нового поколения устройств и приборов терагерцового диапазона электромагнитных волн. Ввиду значительных затрат на экспериментальные исследования графеновых приборов, сопряженных с разработкой и построением специального технологического и измерительного оборудования основным методом исследования и проверки технических решений представляется метод компьютерного моделирования. Новые технические решения приводят к усложнению конструкций наноструктурированных объектов на основе графена, а это требует развития новых подходов к математическому моделированию, опирающихся на мощные вычислительные методы.

Тема диссертационной работы актуальна – она посвящена разработке метода математического моделирования наноструктурированных объектов на основе графена, базирующегося на декомпозиции объекта дифракции на базовые элементы (автономные блоки), и применением аналитических и численных решений краевых задач электродинамики для автономных блоков. Диссертационные исследования базируются на отечественной школе математического моделирования в области электродинамике (Свешников А.Г., Ильинский А. С., Дмитриев В.И., Каценеленбаум Б.З., Никольский В.В.) и являются ее дальнейшим развитием.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, трех приложений и списка литературы.

Первая глава диссертации посвящена выбору и обоснованию математических методов исследования наноструктурированных объектов на основе графена и постановке задачи на математическое моделирование. Целью работы является построение математических моделей наноструктурированных объектов на основе графена, разработка численного метода решения краевых задач на основе проекционных моделей в интегральной форме, реализации численных методов и алгоритмов в виде комплексов программ и исследование проблем создания устройств терагерцового диапазона частот с применением технологии вычислительного эксперимента.

Вторая глава посвящена математической формализации прикладных задач электродинамики. Объектами исследований являются нерегулярные структуры, продольно-регулярные структуры, резонаторные структуры, периодические структуры. Сформулированы краевые задачи на исследование периодических структур (определение фазы поля вдоль ячейки структуры), резонаторов (определение собственных частот и полей), для волноводов (определение постоянных распространения волн), для нерегулярных структур (определение матриц рассеяния).

Третья глава посвящена методам математического моделирования наноструктурированных объектов на основе графена и численным методам решения краевых задач дифракции электромагнитных волн в наноструктурах. Разработаны методы математического моделирования: многослойных структур графен-диэлектрик, двумерных периодических структур из нанолент графена конечной длины, параметрических явлений в многослойных структурах графен-диэлектрик.

Четвертая глава посвящена разработке комплекса программ и исследованию проблем создания устройств терагерцового диапазона частот электромагнитных волн на основе графена (управляемые фильтры и поляризаторы, параметрические усилители и генераторы) с применением технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается использованием фундаментальных уравнений Максвелла, краевые задачи**

дифракции для которых сформулированы и решены без упрощений уравнений и краевых условий. Использованием передовых идей математического моделирования, базирующихся на практике использования вычислительных методов прикладной электродинамики, разработанных отечественной школой ученых.

**Достоверность результатов** подтверждается использованием фундаментальных уравнений Максвелла, краевые задачи которых сформулированы и решены без упрощения уравнений и краевых условий; совпадением результатов математического моделирования с результатами, полученными ранее методом FDTD.

**Научная новизна полученных результатов их научная ценность** заключается в том, что впервые получены результаты математического моделирования:

- многослойной структуры графен-диэлектрик с поверхностной проводимостью графена, являющейся случайной величиной распределенной по нормальному закону;
- двумерной периодической структуры из нанолент графена конечной длины;
- параметрических явлений усиления и генерации электромагнитных волн в многослойных структурах графен-диэлектрик.

Также новыми являются предложенные подходы по выбору базисных функций с однородно-периодическими краевыми условиями в проекционном методе Бубнова-Галеркина.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что доказана перспективность совместного использования проекционных методов с декомпозиционными алгоритмами. Применительно к проблематике диссертации результативно использовались методы вычислительной математики (метод Бубнова-Галеркина, метод Трэфтца).

**Практическая значимость** диссертации заключается в использовании пакета программ для исследования графеновых устройств и приборов терагерцового диапазона частот электромагнитных волн на этапах проектирования с применением технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

**К недостаткам диссертации** можно отнести следующее:

- в работе мало уделено внимания подходам реализации декомпозиционного алгоритма на основе автономных блоков в многопроцессорных вычислительных комплексах;
- не достаточно наглядно показано преимущество условий неасимптотического излучения в реализации декомпозиционного подхода математического моделирования на основе автономных блоков;
- в тексте диссертации используется достаточно сложная система индексов, затрудняющая чтение диссертации.

Отмеченные недостатки принципиально не снижают ценность работы.

**Диссертация соответствует п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней»**, то есть представляет собой законченную научно-

