

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Егоренкова Владимира Александровича на тему: «Многоэтапный итерационный процесс для реализации консервативных разностных схем при моделировании 2D и 3D полупроводниковой плазмы, индуцированной оптическим импульсом» по специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Взаимодействие оптического излучения с полупроводником является актуальной современной задачей нелинейной оптики и лазерной физики. Данный процесс сопровождается различными нелинейными явлениями, среди которых можно отметить оптическую бистабильность. На основе этого явления в последние десятилетия многими учеными ведутся исследования по построению оптических аналогов электронных устройств для передачи, обработки и хранения данных, а также сверхбыстрых оптических переключателей. Математическая модель, описывающая прохождение оптического импульса через полупроводник, представляет собой достаточно сложную систему нестационарных нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с заданными начальными и граничными условиями. Для ее решения необходимо использование эффективных численных методов и применение компьютерного моделирования. Диссертация В.А. Егоренкова посвящена уточнению математической модели описанного выше процесса и разработке нового эффективного и надежного численного метода для её математического моделирования.

Для задачи взаимодействия оптического импульса с полупроводником В.А. Егоренковым предложен оригинальный многостадийный итерационный процесс, позволяющий реализовывать экономичные консервативные разностные схемы и, в отличие от методов расщепления, обладающий асимптотической устойчивостью. Отметим, что основным подходом, при решении трехмерных нестационарных нелинейных уравнений или систем из таких уравнений в настоящее время является метод стабилизирующей поправки (схема Дугласа) и его модификации. Предложенный в диссертационной работе многоэтапный итерационный процесс представляет собой альтернативный подход к решению многомерных задач.

Важным результатом работы является демонстрация преимуществ итерационных методов перед прямыми (в том числе быстрым дискретном преобразовании Фурье, повсеместно используемом при решении различных задач в прямоугольных областях) для решения уравнения Пуассона с краевыми условиями Неймана в рамках рассматриваемой в работе задачи взаимодействия оптического импульса с

полупроводником. Показано, что использование прямых методов, в отличие от итерационных, приводит к нарушению условия разрешимости задачи Неймана и, как следствие, искажению численного решения. Предложена и обоснована новая математическая модель взаимодействия оптического импульса с полупроводником, учитывающая продольную дифракцию оптического пучка. Это позволило продемонстрировать отражение части падающей волны от индуцированной ею же контрастной структуры в полупроводнике.

С точки зрения практического применения разработка новых эффективных численных методов для решения нестационарных нелинейных многомерных задач является актуальным вопросом во многих научных областях. Численные методы, предложенные в работе, реализованы в виде программного комплекса, написанного на основе объектно-ориентированного подхода. Следует подчеркнуть, что расчеты проводились на высокопроизводительном сервере с применением методов распараллеливания. Полученные в работе результаты демонстрируют принципиальную важность учета дифракционных эффектов при математическом моделировании процесса прохождения оптического импульса через полупроводник. Эти данные могут играть важную роль в обеспечении надежности работы оптических аналогов электронных устройств.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, общий объем работы составляет 217 страниц. Список литературы содержит 221 наименование.

Во введении приводится обзор научной литературы по теме диссертации, демонстрирующий актуальность темы исследований, обсуждается цель работы, ее практическая значимость и научная новизна.

В первой главе предложена математическая модель рассматриваемого процесса (в двумерном случае), учитывающая дифракцию падающего оптического излучения вдоль координаты его распространения. В этом случае распространение оптического импульса описывается уравнением Шредингера для комплексной амплитуды оптического импульса. Проведены аналитические оценки его решения, в том числе на основе построенных интегральных соотношений для уравнения Шредингера. Показано, что энергия импульса уменьшается со временем, но всегда остается положительной.

Во второй главе описываются разностные схемы, применяемые в диссертации. Для их реализации автором предложен оригинальный многоэтапный итерационный процесс. Для двумерного случая проведены аналитические исследования разностного

решения, показана сходимость итерационного процесса. В этой главе также представлено описание программного комплекса для компьютерного моделирования задач распространения оптического импульса в полупроводнике, реализованного автором на языке C++.

В третьей главе проводится сравнение эффективности консервативной нелинейной разностной схемы, реализованной на основе многоэтапного итерационного процесса, со схемами, основанными на методе расщепления. На основе расчетов на сетках с разными шагами по времени продемонстрирована асимптотическая устойчивость предложенного многоэтапного итерационного процесса. Обсуждается эффективность использования прямого метода (быстрого дискретного преобразования Фурье) и итерационных методов решения задачи Неймана для уравнения Пуассона, входящего в систему нестационарных уравнений с нелинейной обратной связью. Результаты численных экспериментов демонстрируют, что использование прямого метода приводит к нарушению консервативности решения, что, в свою очередь, влечет за собой нарушение условий разрешимости задачи Неймана. Итерационные методы позволяют избежать влияния данных ошибок на условие разрешимости задачи Неймана.

В четвертой главе представлены результаты компьютерного моделирования, полученные при расчетах на основе многостадийного итерационного метода. Автором проведены широкомасштабные численные исследования и определены режимы распространения лазерного излучения в среде, приводящие к таким эффектам как формирование петли возможного гистерезиса для зависимости характеристик полупроводника от интенсивности падающего импульса. Отдельный интерес представляет демонстрация роли учета продольной дифракции при воздействии оптического импульса на полупроводник в условиях нелинейного возрастающего поглощения оптической энергии в полупроводнике. Полученные результаты демонстрируют как адекватность математической модели, так и надежность используемого численного метода ее анализа.

Заключение содержит выводы и основные результаты работы.

Научные положения, выносимые автором на защиту, являются обоснованными и оригинальными. Достоверность результатов обусловлена высокой степенью математической обоснованности, верификации предложенного многоэтапного итерационного процесса с помощью специальных критериев, адекватностью результатов компьютерного моделирования, а также апробацией в многочисленных публикациях и

докладах на конференциях. Для некоторых частных постановок задачи корректность модели подтверждена аналитическим исследованием.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

Несмотря на общее положительное впечатление от диссертационной работы, она не лишена ряда недостатков:

1. Основным недостатком работы является не очень аккуратные утверждения автора по поводу реализации режима оптической бистабильности. Появление неоднозначной зависимости между параметрами, характеризующими причину (поле) и ее следствие (концентрацию электронов), говорит лишь о том, что в некоторая область параметров падающего излучения перспективна для дальнейшего исследования оптической бистабильности. Однако окончательный вывод о возможности ее экспериментальной реализации в этом диапазоне параметров падающего излучения можно сделать только после того, как проведенное автором исследование будет дополнено анализом устойчивости найденных решений и динамики переключений между стационарными состояниями. Следовало бы также более подробно остановиться на соответствии параметров, входящих в исследуемую численными методами систему указаний, данным реальным физическим экспериментам.
2. В тексте имеются опечатки, не очень удачно сформулированные предложения, присутствует излишняя многословность, проявляющаяся в описании не существенных деталей. Все это затрудняет понимание полученных автором результатов. Редакция текста и его сокращение с целью более компактного изложения материала, а также малоинформативных рисунков, несомненно сделали бы текст лучше и более приятным для чтения.

Указанные замечания не ставят под сомнение значимость диссертационного исследования. Диссертация Егоренкова Владимира Александровича отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Считаю, что соискатель, Егоренков Владимир Александрович, несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой общей
физики и волновых процессов
физического факультета ФГБОУ ВО
«Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова»
Макаров Владимир Анатольевич

18.10.2023

Контактные данные:
тел.: +7 (495) 939-12-25, e-mail: vamakarov@phys.msu.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация: 01.04.21 – Лазерная физика

Адрес места работы:
119991, г. Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2,
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
физический факультет
Тел.: +7 (495) 939-16-82; e-mail: info@physics.msu.ru

Подпись сотрудника МГУ имени М.В. Ломоносова
В.А. Макарова удостоверяю:

Ученый секретарь Ученого Совета
физического факультета МГУ
имени М.В. Ломоносова
профессор



В.А. Карavaев

Считаю, что соискатель, Егоренков Владимир Александрович, несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой общей
физики и волновых процессов
физического факультета ФГБОУ ВО
«Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова»
Макаров Владимир Анатольевич

18.10.2023

Контактные данные:

тел.: +7 (495) 939-12-25, e-mail: vamakarov@phys.msu.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация: 01.04.21 – Лазерная физика

Адрес места работы:

119991, г. Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2,
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
физический факультет
Тел.: +7 (495) 939-16-82; e-mail: info@physics.msu.ru

Подпись сотрудника МГУ имени М.В. Ломоносова
В.А. Макарова удостоверяю:

Ученый секретарь Ученого Совета
физического факультета МГУ
имени М.В. Ломоносова
профессор



В.А. Караваев