

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора

Кузнецова Павла Константиновича

на диссертацию Кривошеевой Юлианы Юрьевны

«Моделирование и оптимизация одного класса
пространственно-вариантных структур»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность темы диссертации

Актуальность выбранной области исследований обусловлена широким применением пространственно-вариантных структур – конструкций, в которых варьируются геометрия, состав материала и т.п., что дает возможность разрабатывать сложные системы, способные, например, формировать и направлять поток энергии нужным способом. Такие структуры, в том числе кристаллические решетки, находят применение в оптике, акустике, машиностроении и вычислительной морфологии. Существующие методы моделирования подобных структур не позволяют синтезировать компоненты с дефектами. Поэтому актуальной задачей является создание математической модели, способной учитывать как геометрию узлов кристаллической решетки и ее материал, так и возможные дефекты структуры.

Так же последнее время значительно расширилось использование метода FDTD для моделирования структур на оптических длинах волн, что связано с развитием оптических коммуникаций. Элементы цифровой фотоники обладают преимуществами перед электроникой: высокой скоростью обработки, устойчивостью к электромагнитным помехам и широкими возможностями шифрования, но при этом имеют и недостаток –

низкую эффективность. В связи с этим актуальным становится разработка вышеупомянутых устройств с высокой эффективностью. Для повышения эффективности традиционно принято использовать различные методы оптимизации, в том числе и генетические алгоритмы.

В этой связи применение математической модели пространственно-вариантных структур для описания и оптимизации фотонных кристаллов, с учетом дефектов, является очень актуальным направлением.

Общая характеристика диссертационной работы

Построение диссертации и манера изложения материала вполне соответствуют цели исследования – моделированию и оптимизации одного класса пространственно-вариантных структур, относящегося к описанию кристаллических решеток, с разработкой соответствующего программного комплекса и его применением для случая фотонно-кристаллических волноведущих структур.

Диссертация включает четыре главы. В первой главе описаны три математические модели: авторская модель кристаллической решётки с дефектами (на основе решётки Браве и теории множеств), модель генетического алгоритма (используемая для прогнозирования оптимальных параметров, в частности численности популяции) и уравнения Максвелла в дифференциальной форме (для решения прямой задачи дифракции). Во второй главе обоснован выбор FDTD-метода и пакета Ansys Lumerical, а также представлен способ согласования FDTD-метода с генетическим алгоритмом через особое условие дискретизации сетки. Третья и четвёртая главы посвящены применению ранее описанных моделей для расчёта фотонно-кристаллических элементов (изгибы, пересечения, узел ввода, логический элемент «НЕ»). В результате применения получены структуры с высокой эффективностью. В четвёртой главе также описан авторский программный комплекс для оптимизации кристаллических решёток с помощью генетического алгоритма.

Оценка новизны проведенных исследований и полученных результатов

Научная новизна результатов и положений диссертации Ю.Ю. Кривошеевой проявляется в трёх направлениях: математическое моделирование, численные методы и программные комплексы.

В области математического моделирования:

Разработана новая математическая модель класса пространственно-вариантных структур (кристаллических решёток). В отличие от классической модели решётки Браве, предложенная модель учитывает размер узлов, материал заполнения, а также линейные и локальные дефекты. Это позволяет применять её, в частности, для расчёта фотонно-кристаллических элементов.

В области численных методов:

Предложен способ согласования генетического алгоритма с FDTD-методом для оптимизации структур с дефектами. Согласование достигается путём адаптации сеточной области, параметры которой зависят от радиусов узлов решётки, полученных в генетическом алгоритме. Дополнительно вводится ограничение на размер узлов, связанное с технологическими возможностями изготовления.

В области программных комплексов:

Создан программный комплекс для оптимизации кристаллических решёток с помощью генетического алгоритма. В отличие от аналогов, где встроенный оптимизационный блок использует топологический метод, в данном комплексе реализован генетический алгоритм. Такой подход позволяет учитывать особенности конкретного элемента и получать структуры, пригодные для практического изготовления.

Обоснованность методов исследования и достоверность результатов

При решении прямой задачи использовалась модель строгой теории дифракции, тогда как решение обратной задачи потребовало многократного обращения к прямой задаче. Достоверность также подтверждается учётом технологических ограничений при изготовлении фотонно-кристаллических элементов и особенностей численного метода, что стало возможным

благодаря согласованию генетического алгоритма с FDTD-методом. Такое согласование гарантирует, с одной стороны, устойчивость решения, а с другой — технологическую реализуемость элемента.

Научная и практическая значимость результатов

Теоретическая значимость работы (несомненная в области математического моделирования) заключается в разработке математической модели класса кристаллических решёток с дефектами.

Практическая значимость диссертации состоит в применении этой модели для создания инструмента расчёта фотонно-кристаллических оптических элементов на основе совместного использования генетического алгоритма и FDTD-метода. Полученные с помощью этого инструмента элементы отличаются не только высокой эффективностью, но и технологичностью, то есть возможностью их реального изготовления.

Замечания по работе

1. В работе подробно описана модель распространения электромагнитного излучения, основанная на уравнениях Максвелла, которая допускает изучение распространения импульса. Для его, в частности, подробно описана дисперсия материала с применением модели Лоренца. Однако, в главах 3 и 4 рассматривается исключительно монохроматическое излучение.
2. Существуют стандартные методы проектирования программных комплексов (например, использование диаграммы потока данных (DFD) или UML диаграммы), однако автор не использовал данные приемы в своей работе.
3. В качестве замечания следует отметить также, что физическую верификацию метода конечных разностей во временной области (FDTD) следовало бы раскрыть подробнее. Желалось бы увидеть исследование сходимости по пространственной сетке, контроль числа ячеек на минимальный радиус каверны, проверку влияния поглощающих слоев по краям расчётной области (PML-слоёв), времени установления режима и

энергетического баланса. Тогда с уверенностью можно было бы утверждать, что найденные топологии обусловлены физическими свойствами фотонно-кристаллических структур, а не особенностями численной дискретизации.

4. Кроме того, для фотонно-кристаллических логических элементов одной эффективности недостаточно. Соискатель определяет эффективность как отношение интенсивностей на выходе и на входе, но для фотонно-кристаллических элементов желательно уточнить место расчета интенсивности — по сечению волновода, по монитору, интегрально по порту; учитывается ли обратное отражение; отделяется ли полезная мощность в нужной моде от рассеянной энергии; нормируется ли результат на входную мощность с учетом потерь в поглощающем слое (PLM) и переходных процессов. Желательно дополнить расчёты оценкой энергетического баланса - учесть полезное прохождение, отражение, боковое рассеяние и поглощение. В работе говорится только про эффективность $\eta = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$, и не всегда ясно, куда делась остальная энергия. Для волноводных элементов это особенно важно, т.к. высокий выход может сочетаться с сильными паразитными модами или отражениями.
5. Для метода конечных разностей во временной области (FDTD) важно продемонстрировать выполнение условия устойчивости Куранта; сходимость по шагу сетки; достаточное число ячеек на минимальный радиус каверны; влияние PML и размера расчетной области; следовало провести сравнение хотя бы для одного элемента с более тонкой сеткой или альтернативной постановкой.
6. Более подробно для логического элемента необходимо оценивать не только эффективность, но и контраст между уровнями логического нуля и единицы.
7. Такие показатели, как коэффициент подавления, порог принятия логического решения, паразитная мощность в нецелевых каналах, рабочая спектральная полоса и чувствительность к технологическим ошибкам

важны для оценки не только энергетической эффективности, но и корректности работы элемента именно как логического устройства. Для элементов «НЕ» желательно привести коэффициент подавления (ER), поскольку он напрямую характеризует различимость логических состояний. Нужно определить, какая мощность считается логическим нулём, а какая — единице, то есть нужно определить величину порога мощности, без этого трудно понять, насколько надёжно элемент переключается.

8. Стоит яснее обосновать физическую реализуемость оптимизированных структур. Проведенный учет минимального радиуса каверн — сильный момент, но желательно дополнить его ограничениями на минимальное расстояние между кавернами; допустимые отклонения при изготовлении; чувствительность эффективности к технологическим ошибкам; диапазон длин волн, на котором сохраняется работоспособность элемента. Более строгая физическая верификация расчетов по методу конечных разностей во временной области служила бы доказательством того, что полученные распределения полей и эффективности обусловлены именно физикой фотонно-кристаллической структуры, а не артефактами численной сетки, граничных условий или параметров расчёта.

Заключение о соответствии рецензируемой работы критериям Положения о присуждении ученых степеней

Представленная диссертация является завершённым исследованием, выполненным в соответствии с требованиями паспорта научной специальности 1.2.2. Апробация подтверждается наличием публикаций в 4-ех реферируемых журналах из перечня ВАК РФ (три статьи в журнале из списка Scopus), семью посещенными научными конференциями, свидетельствами о государственной регистрации программных комплексов и актами внедрения.

Опубликованные в реферируемых изданиях работы и автореферат полностью раскрывают содержание диссертации, которая удовлетворяет

требованиям Положения о присуждения ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., № 842, к опубликованию результатов диссертаций в реферируемых изданиях.

Диссертация соответствует п.9 действующего положения о присуждении ученых степеней и является завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержатся результаты моделирования и оптимизации выбранного класса пространственно-вариантных структур (кристаллических решеток), и соответствующий программный комплекс, который применен для случая фотонно-кристаллических волноведущих структур. Данные результаты могут использоваться и в других прикладных областях, где такие вычисления востребованы.

Автор Кривошеева Ю.Ю., несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент, профессор кафедры
"Электромеханика и автомобильное электрооборудование"
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
доктор технических наук, профессор

 Кузнецов Павел Константинович
04.06.2026

Подпись д.т.н., профессора Кузнецова

Павла Константиновича заверяю:

Главный ученый секретарь ФГБОУ ВО
«СамГТУ», д.т.н.



Малиновская Ю.А.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244; тел. 89277830313, e-mail: kurnesov@mail.ru