

**ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**  
по диссертации Новицкого Дениса Викторовича  
«Динамика взаимодействия света с резонансными средами и активными  
многослойными структурами»,  
представленной к присуждению ученой степени  
доктора физико-математических наук  
по специальности 01.04.05 - оптика

**Соответствие диссертации специальностям и отрасли науки,  
по которым она представлена к защите**

Положения и выводы представленной диссертации полностью соответствуют паспорту специальности 01.04.05 - оптика по физико-математическим наукам, поскольку в ней представлены результаты исследования динамики взаимодействия света с веществом и распространения лазерных импульсов в пространственно структурированных средах с нелинейным откликом. Области исследований:

Волновая и квантовая оптика. Интерференция.

Физическая оптика. Методы управления оптическим излучением, в том числе лазерным.

Нелинейная оптика. Оптика лазерных сред. Нелинейная динамика оптических систем.

**Актуальность темы диссертации**

Основной тенденцией современной микрооптики и нанофотоники является поиск технологических процессов и материалов, обеспечивающих возможность продвижения из микронной в нанометровую область размеров элементов. Современный уровень в этом направлении характеризуется поиском новых форм и конфигураций оптических элементов и развитием теоретических методов исследования структур с произвольным распределением диэлектрической проницаемости. Особое место в ряду разрабатываемых процессов занимают методы получения одно-, двух- и трехмерных пространственно структурированных элементов, включая многослойные оптические элементы и фотонные кристаллы. Разработка дизайна не возможна без предварительного компьютерного моделирования свойств фотонных структур с демонстрацией эффектов распространения и взаимодействия световых пучков. Поэтому рассмотренные в диссертации вопросы взаимодействия и распространения оптического излучения и импульсов в резонансных средах, нелинейных фотонных кристаллах и активных многослойных структурах, безусловно, является актуальной задачей.

**Степень новизны результатов диссертации и научных положений,  
выносимых на защиту**

Основные положения, выносимые на защиту, содержат новые обоснованные результаты, среди которых можно выделить следующие:



1. Исследовано распространение и взаимодействие попутно и встречно распространяющихся световых импульсов в однородно и неоднородно уширенных двухуровневых резонансных средах на масштабах времен релаксации поляризации  $T_2$  и населенностей  $T_1$  и установлена зависимость эффекта локального поля от длительности импульса. Показано, что при взаимодействии встречных солитонных импульсов вследствие перекачки энергии между импульсами возможна реализация эффекта невзаимности, проявляющегося в формировании локально возбужденного состояния среды, при котором пробный импульс проходит среду в одном направлении и поглощается при распространении в обратном направлении.

2. Исследовано распространение фемтосекундных импульсов в одномерных нелинейных фотонных кристаллах и определены условия формирования связанного состояния электромагнитного поля и нелинейного показателя преломления, так называемая фотоиндуцированная «ловушка» внутри фотонного кристалла, приводящая к эффекту самозахвата фемтосекундных импульсов, при котором суммарная энергия прошедшего и отраженного импульсов существенно (в несколько раз) уменьшается. Показано, что место локализации «ловушки» определяется интенсивностью импульса накачки, при этом прохождение зондирующего импульса зависит от положения «ловушки», приводя к асимметрии пропускания света нелинейным фотонным кристаллом.

3. Исследована динамика распространения и взаимодействия света с нелинейными разупорядоченными структурами на основе одномерного фотонного кристалла со случайным образом изменяемой толщиной слоев и двухуровневых резонансных сред с хаотически изменяемой концентрацией. Определены условия наблюдения явления андерсоновской локализации световых импульсов, при которой распространение бегущих волн становится невозможным из-за многократного рассеяния и интерференции рассеянных волн, в результате чего колебания приобретают характер стоячей волны, локализованной в ограниченной области пространства. Показано, что с увеличением параметра беспорядка происходит переход от режима самоиндуцированной прозрачности к режиму пространственной локализации светового импульса. Проанализировано поведение сверхкоротких импульсов в разупорядоченных усиливающих средах и показано, что с увеличением параметра беспорядка наблюдаются три режима распространения: режим самоиндуцированной прозрачности переходит в режим локализации, который при высоком уровне беспорядка переходит в режим усиления света, причем каждому режиму отвечают различные скорости распространения световых сигналов и коэффициенты отражения и пропускания.

4. Исследованы оптические свойства многослойных систем, состоящих из чередующихся слоев металла (прозрачный проводящий оксид) и усиливающего диэлектрика, которые в определенном диапазоне частот могут выступать в качестве метаматериалов. Выявлены условия усиления резонансных мод и показано, что при коэффициенте усиления выше порогового происходит переход в режим генерации мощных импульсов излучения.

5. Изучена динамика распространения света через симметричные структуры с чередующимися поглощающими и усиливающими слоями с использованием



понятия неэрмитовых систем, для которых характерно появление так называемых исключительных точек – набора параметров, при которых совпадают частоты и амплитуды мод и система вырождена. Показан переход системы в режим квазигенерации, в котором испускаются мощные лазерные импульсы асимметрично в прямом и обратном направлениях. Рассчитанный эффект объяснен нарушением  $PT$ -симметрии в условиях насыщающейся нелинейности. Определены условия наблюдения эффекта лазера – поглотителя, при котором в зависимости от разности фаз между двумя когерентными возбуждающими волнами периодическая структура может выступать в качестве усилителя или поглотителя.

6. Построена теоретическая модель лазера с распределенной обратной связью (РОС) на светоиндуцированных поляризационных решетках, сформированных двумя пучками с ортогональными поляризациями. Показано, что зависимость энергии генерации от энергии накачки имеет перегибы, связанные с генерацией импульсов с  $s$ - и  $p$ -поляризациями. Проведенные численные расчеты показали возможность генерации импульсов длительностью в несколько десятков пикосекунд с  $s$ - и  $p$ -поляризациями.

#### **Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Достоверность полученных результатов достигнута корректным применением развитых теоретических методов и математического аппарата для решения поставленных задач, всесторонней обоснованностью математических моделей расчета и их физической непротиворечивостью, количественным и качественным соответствием расчетов имеющимся экспериментальным данным. Результаты проведенного исследования достоверны, выводы диссертации обоснованы путем тщательного рассмотрения и анализа результатов исследований, что подтверждается также апробацией научных работ по теме диссертации.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, определяется применением апробированных алгоритмов численного решения уравнений Максвелла-Блоха и волнового уравнения во временной области, а также метода матрицы переноса для расчета стационарного отклика многослойных структур. Результаты, представленные в диссертации апробированы на международных конференциях и опубликованы в ведущих международных журналах: «Physical Review A» (10 статей), «Physical Review B» (4 статьи), «Journal of the Optical Society of America B» (2 статьи), «Optics Letters» (2 статьи), «Optics Communications» (2 статьи), «Journal of Optics» (2 статьи), «Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials», «Laser Physics Letters» и др.

#### **Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию**

Докторская диссертация Новицкого Д.В. посвящена развитию актуального и перспективного направления современной фотоники и содержит принципиально новые результаты, включающие установление физических



закономерностей динамики взаимодействия света с резонансными средами и многослойными структурами. Разработанные методики численного счета системы уравнений Максвелла-Блоха и волнового уравнения во временной области представляют практический интерес для расчета распространения излучения в пространственно структурированных нелинейных средах, включая фотонные кристаллы и метаматериалы, и могут быть использованы для оптимизации параметров и предсказания свойств разрабатываемых фотонных структур.

Результаты диссертации нашли применение и были использованы в научной работе лаборатории контролируемых оптических наноструктур Московского физико-технического института, а также используются в образовательном процессе Белорусского государственного университета на кафедре физической оптики и прикладной информатики.

### **Опубликованность результатов диссертации в научной печати**

Основные результаты диссертации опубликованы в 55 научных работах, включая 31 статью в иностранных научных изданиях, признанных ВАК РФ, 20 статей в сборниках материалов научных конференций. Результаты исследований прошли апробацию на 20 научных конференциях, включая международные профильные конференции, проводимые в России и Республике Беларусь.

### **Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК**

Тексты диссертации и автореферата оформлены в соответствии с требованиями ВАК и Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации) на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, автореферата и публикаций по теме диссертации. В диссертационной работе должным образом соблюдено требование о правилах использования научных материалов других авторов. Ссылки на материалы, которые используются в диссертации, оформлены в соответствии с требованиями, изложенными в указанной инструкции.

### **Замечания по диссертации**

1. В диссертации рассмотрена динамика преобразования световых полей в резонансных средах и многослойных структурах без учета пространственного распределения световых полей. Как изменятся выявленные закономерности, например, для гауссовых световых пучков?

2. Хотя диссертация теоретическая, желательно было бы больше внимания уделить оценке реальных экспериментальных ситуаций. Понятно, что удобно работать с безразмерными величинами, в то же время с практической точки зрения важны оценки условий реализации рассматриваемых эффектов, включая значения интенсивностей. Могут ли в этих случаях проявляться другие нелинейные эффекты, например, самофокусировка светового пучка, которая может привести к резкому увеличению интенсивности?

3. На рисунке 1.13 зависимость пиковой интенсивности прошедшего импульса от толщины слоя резонансной среды имеет вначале периодические, а потом хаотические пульсации. Желательно было бы пояснить такое поведение.



4. На рисунке 5.3 представлены теоретическая и экспериментальная зависимости энергии генерации РОС лазера на поляризационных решетках от энергии накачки и на основании перегибов зависимостей делается вывод о хорошем качественном соответствии. Однако перегибы на экспериментальной зависимости не столь ярко выражены, особенно с учетом погрешностей эксперимента. Желательно было бы показать в эксперименте увеличение количества импульсов с увеличением накачки и как при этом меняется поляризация генерируемого излучения.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и могут рассматриваться в качестве пожеланий для дальнейшей практической реализации предсказанных эффектов.

#### **Соответствие (несоответствие) научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует**

Анализ содержания диссертации и полученных результатов в актуальном научном направлении, апробация результатов исследований на международных конференциях, публикации в ведущих научных журналах (14 статей в журналах серии «Physical Review») указывают на то, что Новицкий Денис Викторович является специалистом высокой научной квалификации, способен самостоятельно ставить и решать фундаментальные и прикладные научные задачи, владеет современными методами теоретических исследований и компьютерного моделирования сложных физических процессов. У оппонента нет сомнений, что научная квалификация Новицкого Д. В. соответствует ученой степени доктора физико-математических наук.

#### **Выводы**

Диссертация Д. В. Новицкого «Динамика взаимодействия света с резонансными средами и активными многослойными структурами», представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, содержит принципиально новые результаты, совокупность которых является крупным достижением в нанофотонике применительно к исследованиям динамики взаимодействия света с фотонными структурами, содержащими нелинейные, поглощающие и усиливающие среды.

Новицкому Денису Викторовичу может быть присуждена ученая степень доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 - оптика за :

– выявление основных закономерностей взаимодействия встречных световых импульсов в однородно и неоднородно уширенных двухуровневых резонансных средах и предсказание эффекта асимметричного пропускания, проявляющегося в формировании локально возбужденного состояния среды, при котором пробный импульс проходит среду в одном направлении и поглощается при распространении в обратном направлении;

– выявление механизма формирования связанного состояния электромагнитного поля и нелинейного показателя преломления (фотоиндуцированной «ловушки») внутри одномерного нелинейного фотонного



кристалла, приводящего к эффекту самозахвата фемтосекундных импульсов и асимметрии пропускания света нелинейным фотонным кристаллом;

– определение условий проявления андерсоновской локализации световых импульсов в резонансных средах с хаотически распределенными центрами, при которой формируются волны, локализованные в ограниченной области пространства, а распространение бегущих волн становится невозможным из-за многократного рассеяния и интерференции;

– построение теоретической модели распространения световых импульсов в симметричных структурах с чередующимися поглощающими и усиливающими слоями с использованием понятия неэрмитовых систем и предсказание эффекта нарушения  $PT$ -симметрии в условиях насыщающейся нелинейности, при котором испускаются мощные лазерные импульсы асимметрично в прямом и обратном направлениях, а также реализуется режим лазера – поглотителя, когда периодическая структура может выступать в качестве усилителя или поглотителя.

*Я, Толстик Алексей Леонидович, даю согласие на публикацию данного отзыва в открытом доступе на официальном сайте Института физики НАН Беларуси.*

Официальный оппонент  
заведующий кафедрой лазерной физики и спектроскопии  
Белорусского государственного университета  
доктор физико-математических наук профессор

А.Л. Толстик

02.04.2024

