

## ОТЗЫВ

**официального оппонента кандидата физико-математических наук Безуса Евгения Анатольевича на диссертационную работу Шестакова Павла Юрьевича «Туннелирование световых волновых пакетов в плоскостных диэлектрических периодических структурах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 — радиофизика.**

Диссертация Шестакова Павла Юрьевича посвящена исследованию эффектов взаимодействия электромагнитного излучения с диэлектрическими структурами с одномерной периодичностью. Содержание работы затрагивает вопросы распространения электромагнитного излучения в периодических средах с постоянным периодом, квазипериодических структурах с линейным изменением периода и средах с РТ- (parity-time) симметричной диэлектрической проницаемостью, что соответствует паспорту специальности 01.04.03 — радиофизика. Особое внимание автор уделяет исследованию линейных и нелинейных эффектов прохождения электромагнитного излучения в запрещенной полосе периодических структур, что актуально в связи с активным применением периодических структур в интегральной оптике и лазерной технике. Наиболее перспективным объектом исследования в работе представляются РТ-симметричные периодические структуры, изучение которых в последнее время привело к обнаружению ряда новых интересных эффектов при распространении и генерации электромагнитного излучения.

Объем диссертационной работы составляет 103 страницы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 95 источников, и включает 43 рисунка.

Во **введении** сформулированы цель и актуальность работы, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, изложены защищаемые положения.

**Первая глава** является обзорной. В первых трех параграфах обсуждается состояние исследований, касающихся изучения прохождения световых импульсов и пучков в запрещенной зоне периодических структур. В частности, в *первом параграфе* рассмотрены результаты, связанные с периодическими средами, обладающими малым диэлектрическим контрастом и постоянным периодом; *второй параграф* посвящен т.н. чирпированным диэлектрическим структурам, в которых период изменяется линейно вдоль направления распространения; *третий параграф* касается результатов, связанных с периодическими средами, обладающими РТ-симметрией. В *последних двух параграфах* автор приводит вывод основных уравнений и обсуждает используемые в работе методы численного моделирования распространения оптического излучения в периодических средах.

Во **второй главе** описываются результаты исследования прохождения оптического излучения в запрещенной полосе периодических сред. Главным объектом изучения в этой главе являются время прохождения импульсов и боковые сдвиги световых пучков. В *первом параграфе* построена картина туннелирования световых импульсов различной длительности в периодической структуре и показаны границы режима прохождения излучения, при котором время прохождения не зависит от размера среды. При этом

отмечено, что присутствие керровской нелинейности не влияет на времена туннелирования. Во *втором параграфе* автор обобщает уже полученные результаты на случай туннелирования пучков и демонстрирует, что аналогичный эффект «насыщения» времени прохождения имеет место для бокового смещения прошедших и отраженных пучков при угловом падении на периодическую структуру. Вместе с этим подробно изучено прохождение пучков с фазовой модуляцией их пространственного спектра и установлено, что туннелирование таких волновых пакетов зависит от суммарной фазы коэффициента прохождения и самого падающего пучка. В частности, когда спектр входного пучка сравним или больше ширины запрещенной полосы, имеет место распад пучка на два «субпучка», один из которых обладает отрицательным боковым сдвигом.

В следующей, **третьей главе** исследуется взаимодействие световых пучков с чирпированными объемными периодическими структурами. Особенность чирпированных периодических структур состоит в линейном изменении периода структуры. Такая зависимость диэлектрической проницаемости сопровождается тем, что условие брэгговского резонанса выполняется для разных как частотных, так и угловых спектральных компонент оптического излучения в разных точках структуры. В результате спектральные компоненты отраженного пучка имеют характерное линейное боковое смещение, а его волновой фронт является сходящимся или расходящимся. В *первом параграфе*, исследуя данное явление, диссертант установил, что полный боковой сдвиг спектральных компонент складывается из сдвига, связанного с прохождением электромагнитного излучения в области прозрачности периодической среды, и сдвига Гуса–Хенхен, возникающего при брэгговском отражении пучка. Во *втором параграфе* данной главы автор с помощью численного расчета исследовал фокусировку и дефокусировку отраженного излучения вне и внутри квазипериодической среды. Получены приближенные формулы, позволяющие оценить величину суммарного бокового смещения спектральных компонент пучка и фазовую модуляцию его спектральных компонент. В завершении главы было отмечено, что вследствие нелинейной зависимости спектральных характеристик периодической структуры от угла падения для фокусировки наиболее эффективно использовать световые пучки с широкой апертурой.

**Четвертая глава** посвящена изучению в линейном приближении свойств РТ-симметричных периодических структур, которые характеризуются тем, что вещественная часть диэлектрической проницаемости описывается четной гармонической функцией, а мнимая часть — нечетной. В этом случае в среде вместе с изменением показателя преломления чередуются области с усилением и поглощением. В *первом параграфе* данной главы аналитически и численно исследовано распространение плоских волн в РТ-симметричных периодических структурах при разных уровнях усиления и поглощения, что позволило автору выявить механизмы несимметричного прохождения, определить порог самовозбуждения и установить зависимость времени прохождения от уровня поглощения и усиления. Во *втором параграфе* с помощью численного моделирования исследуется прохождение оптических импульсов через периодическую структуру, обладающую квази-РТ-симметрией. Численный расчет позволил выявить основные особенности прохождения длинных и коротких импульсов в подобных активных периодических структурах. В *третьем параграфе* теоретически изучена возможность одновременного усиления и сжатия (или растяжения) профиля падающего светового излучения на квазипериодическую структуру, в которой происходит чередование активных слоев с усилением и поглощением.

Также с помощью численных методов рассчитаны основные характеристики такой структуры и установлено, что благодаря равномерному усилению разных спектральных компонент отраженного излучения в среде профиль импульса и его модуляция сохраняются. Это дает возможность производить усиление отраженного сигнала, как на этапе сжатия, так и растяжения. Данный результат представляется одним из наиболее интересных результатов работы.

В **пятой главе** автором изучаются эффекты, возникающие при прохождении оптического излучения в РТ-симметричных структурах, обладающих кубичным нелинейным откликом. Особенностью этой главы является рассмотрение не обсуждавшейся ранее модели РТ-симметричной периодической структуры с модуляцией керровской нелинейности. В таких структурах наряду с изменением показателя преломления имеет место изменение величины керровской нелинейности вдоль координаты распространения. В *первом параграфе* аналитически показана возможность переходов рассматриваемой нелинейной системы между состояниями РТ-симметрии под действием оптического излучения большой мощности. *Второй параграф* посвящен подробному изучению свойств оптической бистабильности как в структурах с модуляцией нелинейности, так и без нее. Здесь автором было отмечено, что с характеристики бистабильности существенно зависят от уровня усиления и поглощения, а также от направления распространения светового излучения в среде. В основном эффект РТ-симметричной зависимости показателя преломления структуры на свойства бистабильности состоит в несимметричном изменении обратной связи между прямой и обратной волнами. Также интересным является тот факт, что кривые бистабильности позволяют наблюдать переходы между состояниями РТ-симметрии. В *третьем параграфе* данной главы рассмотрено оптическое переключение в нелинейных РТ – симметричных ПС в нестационарном режиме. Как установил автор, данный режим также позволяет наблюдать за переходами между состояниями РТ-симметрии. При прохождении излучения через нелинейную структуру без модуляции нелинейности наиболее интересен случай т.н. конвективной неустойчивости, при котором имеет место пороговое усиление прошедшего излучения.

В **заключении** диссертантом сформулированы основные результаты работы.

Несмотря на общую положительную оценку работы, к ней имеется ряд замечаний:

1. На стр. 5 сказано: «на момент начала работы над диссертацией в литературе отсутствовало объяснение механизма несимметричного прохождения...». В дальнейшем тексте работы отсутствует обсуждение, появилось ли оно у других авторов в процессе выполнения работы, и, если да, совпадает ли оно с результатами, представленными в работе.
2. В разделе 1.4 основные уравнения получаются для случая гармонически меняющейся диэлектрической проницаемости. Очевидно, что, как и говорится в тексте работы, такой подход применим для реальных (слоистых) структур в случае, когда оптический контраст мал, однако границы применимости в дальнейшем явно не обсуждаются. Такое обсуждение было бы особенно уместным в связи с тем, что большая часть примеров в дальнейшем рассматривается с указанием лишь нормированного параметра брэгговской связи, а параметры конкретных слоистых структур не приводятся.

3. На стр. 26 говорится: «... изложенные выше методы комбинировались. В некоторых случаях результаты расчетов, полученные на основе этих методов, совпадали, что служило дополнительной проверкой». Неясно, что происходило в остальных случаях. Кроме того, на рис. 1.5 (стр. 27) показано сравнение результатов, полученных на основе решения уравнений связанных волн и ММП, однако оно приведено только для одного конкретного («тестового») примера, и не обсуждается, насколько это совпадение сохраняется для примеров, рассмотренных в дальнейшей части работы.
4. Насколько можно понять из текста главы 2, все результаты, приведенные в ней, были получены на основе решения уравнений связанных волн. Из текста работы неясно, проводилось ли сравнение этих результатов с результатами строгого численного моделирования конкретных слоистых структур (структур с кусочно-постоянным показателем преломления). Аналогично, неясно, какие структуры рассматривались в главе 3 (только структуры с гармонически изменяющимся показателем преломления или также структуры с кусочно-постоянным показателем преломления).
5. В начале раздела 4.3 говорится про структуру с гармонической зависимостью диэлектрической проницаемости от координаты (формула (4.18)), однако затем на рис. 4.8 рассматривается случай падения излучения на структуру с кусочно-постоянной диэлектрической проницаемостью. Явно не обсуждается, каким выражением она описывается и как связана с формулой (4.18).
6. На стр. 73 приводятся параметры примера чирпированной квази-РТ-симметричной структуры. Не обсуждается, насколько такие структуры являются реалистичными (практически реализуемыми). Аналогичный вопрос, касающийся практической реализуемости, можно отнести к нелинейной РТ-симметричной структуре с показателем преломления, описываемым выражением (5.1) (стр. 75).

Отдельно следует отметить ряд недостатков, связанных с представлением и оформлением материала работы:

1. Присутствует довольно большое количество грамматических и орфографических ошибок и опечаток, затрудняющих чтение (например: «периодических сред», стр. 4; «тонокопленочных», стр. 4; «отраженного пучка», стр. 18; «более подробнее», стр. 63; «при падании», подписи к рис. 5.3-5.7 и 5.9 и т. п.).
2. В подписи к рисунку 3.2 указан размер пучка  $a/\lambda=15$ , а в тексте при обсуждении этого рисунка говорится про размер  $a/\lambda=30$ . Не сразу удается понять, какое значение является верным.
3. В подписи к рис. 4.2 говорится про «распределение ... поля ... оптического излучения с комплексной диэлектрической проницаемостью». Очевидно, имеется в виду распределение поля в структуре с комплексной диэлектрической проницаемостью.
4. В подписи к рис. 5.3 говорится про «зависимость интенсивности отраженного излучения от интенсивности прошедшего», однако подписи осей рисунка —  $I_{\text{пад}}$  и  $I_{\text{пр}}$  и, по-видимому, имеется в виду зависимость интенсивности прошедшего излучения от интенсивности падающего.
5. В диссертации отсутствуют выводы к главам, что несколько затрудняет восприятие материала при чтении работы.

Тем не менее, указанные замечания и недостатки не меняют общего положительного впечатления от диссертации и не снижают ценности полученных результатов. Диссертационная работа П.Ю. Шестакова представляет собой законченный научный труд, обладающий несомненной научной новизной, основные результаты которого опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, в том числе в журналах "Physical Review E" и «Квантовая электроника». Полученный теоретический материал был представлен и обсуждался на нескольких международных конференциях, в том числе ведущих конференциях по оптике и фотонике "SPIE Photonics Europe", "SPIE Optics + Optoelectronics", "ICONO/LAT". Автореферат в полной мере отражает содержание выполненной работы.

Представленная к защите диссертационная работа «Туннелирование световых волновых пакетов в плоскостойких диэлектрических периодических структурах» по актуальности, новизне и уровню практической значимости полностью удовлетворяет всем критериям, установленным в Положении о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Содержание работы соответствует паспорту специальности 01.04.03 – радиофизика (по физико-математическим наукам). Работа оформлена в соответствии с требованиями приложений № 5 и 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Таким образом, на основании вышесказанного считаю, что автор диссертационной работы П.Ю. Шестаков заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 — «Радиофизика».

Официальный оппонент:

научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики  
Института систем обработки изображений РАН — филиала  
Федерального государственного учреждения  
«Федеральный научно-исследовательский центр  
«Кристаллография и фотоника» Российской академии наук»  
кандидат физико-математических наук

Е.А. Безус

443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151  
Телефон: +7 (846) 337-80-84, E-mail: [bezus.ssau@gmail.com](mailto:bezus.ssau@gmail.com)  
Специальность, по которой защищена диссертация:  
01.04.05 – «Оптика»

Подпись Безуса Евгения Анатольевича УДОСТОВЕРЯЮ:

Специалист по кадрам



Т.В. Ашихмина

10 сентября 2019 года