

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Объединенного диссертационного совета ДМ 002.262.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной электродинамики РАН при участии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур РАН по диссертационной работе на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки.

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 28.05.2014 года протокол № 2

О присуждении ученой степени кандидата физико-математических наук Зябловскому Александру Андреевичу, гражданину Российской Федерации.

Диссертация на тему: «**Оптика и магнитооптика лазеров на основе фотонных кристаллов и метаматериалов**» по специальности **01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки** принята к защите **26.03.2014г.**, протокол № **1** Объединенным диссертационным советом ДМ 002.262.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной электродинамики РАН при участии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур РАН (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, [www.itae.ru](http://www.itae.ru), +7 (495) 484-2383), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 11.04.2012г. № 105/нк.

Соискатель **Зябловский Александр Андреевич** 1988 года рождения.

В 2011 году соискатель окончил Московский физико-технический институт (государственный университет) (141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9).

В настоящее время является аспирантом Московского физико-технического института (государственного университета) (с 01.09.2011г. по 31.08.2014г.)

Научный руководитель - доктор физико-математических наук **Пухов Александр Александрович**, главный научный сотрудник лаборатории теоретической электродинамики конденсированного состояния (№ 1) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной электродинамики РАН (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, [www.itae.ru](http://www.itae.ru), +7 (495) 484-2383).

Официальные оппоненты:

**Банков Сергей Евгеньевич** - доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории электродинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, (125009, Москва, ул. Моховая 11, корп.7, [ire@cplire.ru](mailto:ire@cplire.ru), +7 (495) 629-3574) дал положительный отзыв на диссертацию.



Выбор Банкова Сергея Евгеньевича в качестве оппонента по диссертации обоснован тем, что он является специалистом по физике электромагнитных (фотонных) кристаллов [Банков С.Е. Электромагнитные кристаллы. М.: Физматлит. 2011. - 349 стр.] и антенным решеткам [Банков С.Е., Пангонис Л.И., Фролова Е.В. Проектирование и экспериментальное исследование антенной решетки на ЕВГ волноводах // РЭ. 2010. Т. 55. - №11. - С. 1296-1310.]. Исследованию аналогичных систем посвящены третья и пятая главы диссертации, соответственно.

**Проценко Игорь Евгеньевич** - кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник сектора теоретической радиофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н.Лебедева РАН (119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53, postmaster@lebedev.ru, +7 (495) 135-4264), дал положительный отзыв на диссертацию.

Выбор Проценко Игоря Евгеньевича в качестве оппонента по диссертации обоснован тем, что он является специалистом по лазерной физике, теории усиливающих сред и наноплазмонике, исследованию которых посвящена большая часть диссертации. В частности, он является одним из родоначальников исследований по физике нанолазеров и спазеров [Protsenko I.E. et al., Phys. Rev. A. 2005. V. 73. - P. 063812.], фазированная решетка на основе которых рассматривается в пятой главе диссертационной работы, а вторая, третья и шестая главы связаны с исследованием слоистых усиливающих сред.

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт спектроскопии РАН** (142190 г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5, isan@isan.troitsk.ru, +7 (495) 851-0221), дала положительное заключение на диссертацию, подписанное директором, членом-корреспондентом РАН, доктором физико-математических наук Виноградовым Евгением Александровичем.

Выбор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института спектроскопии РАН в качестве ведущей организации обоснован тем, что одними из основных направлений научных исследований Института являются: оптика ближнего поля, нанооптика, квантовая электродинамика микрополости [<http://isan.troitsk.ru/ru/index.php?page=science>], которым посвящена большая часть диссертационной работы.

Диссертационный совет отмечает, что представленная диссертационная работа полностью соответствует пункту 9, действующего Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ, предъявляемых к кандидатским диссертациям. Результаты диссертационной работы могут применяться в Институте теоретической и прикладной электродинамики РАН, Физическом институте им. П.Н.Лебедева РАН, Институте спектроскопии РАН. На основании выполненных соискателем исследований опубликовано 9 работ по теме диссертации в рецензируемых журналах из списка ВАК. В том числе:

1. Zyablovsky A.A., Dorofeenko A.V., Vinogradov A.P., Pukhov A.A. Light propagation in photonic crystal with gain: applicability of the negative loss approximation // Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications. 2011. V. 9. - P. 398.



2. Дорофеенко А.В., Зябловский А.А., Пухов А.А., Лисянский А.А., Виноградов А.П. Прохождение света через композитные материалы, содержащие усиливающие слои // Успехи физических наук. 2012. Т. 182. - № 11. - С. 1157.
3. Dorofeenko A.V., Zyablovsky A.A., Vinogradov A.P., Andrianov E.S., Pukhov A.A., Lisyansky A.A. Steady state superradiance of a 2D-spaser array // Optics Express. 2013. V. 21. - P. 14539.
4. Zyablovsky A.A., Vinogradov A.P., Dorofeenko A.V., Pukhov A.A., Lisyansky A.A. Causality and phase transitions in PT-symmetric optical systems // Phys. Rev. A. 2014. V. 89. - P. 033808.

На автореферат поступили отзывы:

1. Заведующий лабораторией магнитных материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, д.ф.-м.н., профессор В.Г. Веселаго - отзыв положительный, с замечаниями:

"Из текста автореферата не ясен механизм возникновения синхронизации колебаний в решетке спазеров."

2. Ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, к.ф.-м.н. А.М. Мерзликин - отзыв положительный, без замечаний.

3. Заместитель директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, член - корреспондент РАН, д.ф.-м.н. С.А. Никитов - отзыв положительный, без замечаний.

4. Aalto University, School of Electrical Engineering, д.ф.-м.н., профессор К.Р. Симовский - отзыв положительный, без замечаний.

5. Научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина Российской академии наук, к.ф.-м.н. Н.М. Щелкачев - отзыв положительный, с замечаниями:

"К недостаткам автореферата можно отнести излишнюю краткость изложения материала диссертации, из-за чего многие результаты просто декларируются."

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**Разработана** научная концепция фазированной решетки спазеров.

**Предложен** метод управления режимами работы лазера с анизотропным резонатором при помощи внешнего статического магнитного поля. В том числе, метод включения/выключения лазерной генерации в лазере с анизотропным резонатором.

**Предложен** метод определения границы между разрешенной и запрещенной зонами фотонного кристалла, содержащего усиливающие слои, путем анализа



аналитических свойств передаточной функции, рассматриваемой слоистой структуры. (Снят парадокс о сверхусилении в запрещенной зоне, следующий из формального решения Рытова). Введено новое определение запрещенной зоны для фотонного кристалла, содержащего усиливающие слои, связанное с возможной генерацией.

**Доказано, что** с ростом числа ячеек фотонного кристалла, содержащего усиливающие слои, лазерная генерация на частотах из вновь определенной запрещенной зоны фотонного кристалла подавляется. В то же время, на частотах из разрешенной зоны с ростом числа ячеек лазерная генерация возможна в образцах с толщинами, превышающими некую критическую величину, определяемую свойствами фотонного кристалла и уровнем накачки.

**Доказано, что** в фазированной решетке спазеров взаимодействие между наночастицами и квантовыми точками соседних спазеров может приводить к синхронизации колебаний дипольных моментов отдельных наночастиц. Результатом синхронизации являются эффекты сверхизлучения и возможное сужения диаграммы направленности при увеличении апертуры системы.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что

**Доказано, что** условия РТ-симметрии оптической системы не могут выполняться в любом конечном интервале частот, а могут выполняться только для дискретного набора частот, как следствие в РТ-симметричных и квази-РТ-симметричных оптических системах спонтанное нарушение симметрии собственных решений не может наблюдаться при варьировании частоты падающего электромагнитного поля, что во многом закрывает существующие в литературе направления исследований.

**Применительно к проблематике диссертации результативно** использован подход с рассмотрением зависимости положения полюсов передаточной функции электродинамических систем от параметров этих систем. На основе проведенного анализа установлены границы применимости линейного описания систем, содержащих усиливающие элементы, и найдена зависимость порогового значения накачки, необходимого для начала лазерной генерации, от числа ячеек фотонного кристалла для частот из разрешенной и запрещенной зоны фотонного кристалла.

**Использована** численная разностная схема Адамса для моделирования распространения электромагнитных волн через слоистые среды, содержащие усиливающие компоненты и для моделирования динамики поля в фазированной решетке спазеров. Проведен анализ устойчивости, который доказал применимость численной схемы Адамса для данных задач.

**Изложены условия** формирования запрещенной зоны в фотонном кристалле, содержащем усиливающие слои. Определена граница между разрешенной и запрещенной зонами фотонного кристалла, содержащего усиливающие слои.

**Изложены условия** возникновения синхронизации колебаний дипольных моментов отдельных спазеров в фазированной решетке спазеров.



**Раскрыт** парадокс о сверхусилении волн в запрещенной зоне фотонного кристалла, содержащего усиливающие слои. Показано, что волна, проходящая через достаточно толстый образец такого кристалла, ослабляется. В частности, если частота перехода усиливающей среды принадлежит запрещенной зоне, то лазерная генерация подавляется с увеличением числа слоев в системе.

**Изучена** связь между аналитическими свойствами передаточной функции электродинамической системы и условиями начала лазерной генерации в электродинамической системе.

**Проведена модернизация** численной схемы расчета электрического поля, поляризации и инверсии населенности при моделировании фазированной решетки спазеров для оптимизации времени счета.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем что:

**Разработана** модель фазированной решетки спазеров, в которой в результате взаимодействия между наночастицами и квантовыми точками соседних спазеров колебания дипольных моментов отдельных спазеров взаимно синхронизируются, что приводит к увеличению интенсивности излучения отдельного спазера на два порядка. В результате открывается возможность для практического использования спазеров в качестве источников когерентного излучения в оптоэлектронных вычислительных устройствах и линиях связи. В диссертационной работе построена теоретическая модель и проведено численное моделирование динамики электромагнитного поля в фазированной решетке спазеров. Определены область параметров в которой наблюдается эффект синхронизации колебаний дипольных моментов спазеров.

**Разработана** модель лазера с анизотропным резонатором, управляемым внешним магнитным полем. Показано, что в такой системе можно включать и выключать лазерную генерацию изменяя приложенное к системе внешнее магнитное поле. Определены параметры и характерные времена включения/выключения лазерной генерации. В диссертационной работе построена теоретическая модель лазера с анизотропным резонатором.

**Определена** область применимости френелевского подхода для расчета распределения поля в фотонном кристалле, содержащем усиливающие слои. Показано, что френелевский подход применим при малом числе ячеек фотонного кристалла на частотах из разрешенной зоны и при большом числе ячеек на частотах из запрещенной зоны.

Снят парадокс «набегающей волны» в задаче о падении электромагнитной волны на полупространство, занимаемое усиливающей средой. **Определено**, что действительная часть импеданса конечного слоя усиливающей среды может быть отрицательной даже в условиях отсутствия генерации. Данное явление может оказаться важным при экспериментальном исследовании и проектировании метаматериалов, содержащих усиливающие среды.



**Создана** система практических рекомендаций для достижения синхронизованного режима колебаний в фазированной решетке спазеров.

**Представлены** рекомендации по возможности практического создания *PT*-симметричных электродинамических устройств с принципиально новыми свойствами.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

Представленное в работе **теоретическое** описание усиливающей среды базируется на полуклассической системе уравнений Максвелла-Блоха [Хакен Г. Лазерная светодинамика. М: Мир, 1988, - 352 стр.].

Представленная в диссертационной работе **теория** для слоистых сред, содержащих усиливающие элементы, базируется на исследовании аналитических свойств передаточной функции такой системы. В настоящее время подобный подход широко применяется в теории лазеров для анализа модовой структуры резонаторов [Y.D. Chong et al., Phys. Rev. Lett., 2011. V. 106, - P. 093902.; M. Liertzer et al., Phys. Rev. Lett., 2012. V. 108, - P. 173901.].

Представленная в диссертационной работе **теория** для лазера с анизотропным резонатором и фазированной решетки спазеров построены на основе полуклассической теории лазеров [Хакен Г. Лазерная светодинамика. М: Мир, 1988, - 352 стр.].

Для определения области параметров, в которой наблюдается синхронизация колебаний дипольных моментов спазеров в фазированной решетке спазеров, находилась мода с наименьшим пороговым значениям накачки, необходимым для начала лазерной генерации, что является стандартным методов в **теории** многомодовых лазеров [Хакен Г. Лазерная светодинамика. М: Мир, 1988, - 352 стр.].

**Идея** создания фазированной решетки спазеров **базируется** на объединении концепций сверхизлучения, спазерной генерации и конкуренции мод в многомодовых лазерных системах. В настоящее время проводятся первые эксперименты по исследованию спазерной генерации в двумерных плазмонных структурах [Suh J.Y. et al., Nano Lett. 2012. V. 3030. – P. 86.; Beijnum F. et al., Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. – P. 206802.; Zhou W. et al. Nature Nanotechnology. 2013. V. 8. – P. 506.].

В задачах о распространении электромагнитных волн через слоистые среды, содержащие усиливающие компоненты, о лазере с анизотропным резонатором во внешнем магнитном поле и о фазированной решетки спазеров для верификации полученных результатов **использовалось** сравнение результатов аналитического исследования и результатов численного моделирования.

**Установлено**, что результаты аналитического исследования лазера с анизотропным резонатором в отсутствие внешнего поля совпадают с результатами теоретических и экспериментальных исследований, проведенных ранее [Choquette K.D. et al., IEEE Photonics Technology Letters, 1994. V. 6. - P. 40.; Panajotov K. et al., Applied Physics Letters, 2000. V. 77. - P. 1590.].

В работе **использованы** численные методы для нахождения положения полюсов передаточной в комплексной плоскости частот. На основе информации о положении

поллюсов передаточной функции был сделан вывод о возможности применения линейного приближения для описания усиливающей среды.

Для определения порогового значения накачки, необходимого для начала лазерной генерации в работе **использовались** численные алгоритмы для нахождения наименьшего значения мнимой части диэлектрической проницаемости при которой один из полюсов передаточной функции пересекает действительную ось частот в комплексной плоскости.

**Личный вклад соискателя состоит** в непосредственном участие в выборе объектов исследования, постановке задач, разработке теоретических подходов, численном моделировании и обсуждении полученных результатов. Все изложенные в диссертации оригинальные результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии.

На заседании от 28.05.2014 г. Объединенный диссертационный совет ДМ 002.262.01 принял решение присудить Зябловскому Александру Андреевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них докторов наук - 17 по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного совета  
академик РАН, д.ф.-м.н., профессор



А.Н. Лагарьков

Ученый секретарь диссертационного совета  
к.ф.-м.н.

 К.И. Кугель