

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор МФТИ

д.т.н., профессор

О.А. Горшков

«16» марта 2014 г.



по диссертационной работе Зябловского Александра Андреевича «Оптика и магнитооптика лазеров на основе фотонных кристаллов и метаматериалов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.13 – «Электрофизика, электрофизические установки».

ВЫПИСКА ИЗ ПРОТОКОЛА заседания кафедры «Электродинамики сложных систем и нанофотоники» МФТИ от 14 марта 2014 года.

Присутствовали: академик РАН А.Н. Лагерьков (зав. кафедры), д.ф.-м.н. А.В. Николаев (зам. зав. каф.), д.ф.-м.н. А.А. Пухов, д.ф.-м.н. И.Т. Якубов, д.ф.-м.н. А.П. Виноградов, к.ф.-м.н. А.Т. Кунавин, к.т.н. И.А. Рыжиков, д.ф.-м.н. В.Н. Кисель, д.т.н. А.И. Федоренко, к.т.н. Н.П. Балабуха, к.ф.-м.н. А.М. Мерзликин, д.ф.-м.н. А.С. Антонов, к.ф.-м.н. И.В. Быков

С докладом по диссертационной работе выступил А.А. Зябловский.

В обсуждении диссертации приняли участие: д.ф.-м.н. В.Н. Кисель, д.ф.-м.н. А.П. Виноградов, к.т.н. И.А. Рыжиков, д.ф.-м.н. А.С. Антонов, к.ф.-м.н. И.В. Быков.

Диссертационная работа А.А. Зябловского «Оптика и магнитооптика лазеров на основе фотонных кристаллов и метаматериалов» выполнена на кафедре «Электродинамики сложных систем и нанофотоники» и в секторе теоретической электродинамики конденсированного состояния ИТПЭ РАН.

Актуальность темы

Работа А.А. Зябловского посвящена исследованию электродинамики фотонных кристаллов и метаматериалов, содержащих усиливающие компоненты. Актуальность задачи связана с развитием современных вычислительных устройств. Дело в том, что современные микросхемы производят вычисления при помощи электрических сигналов, в тоже время для быстрой и надежной передачи данных на большие расстояния используют оптоволоконные линии. Таким образом, для того, чтобы передать информацию от одного "компьютера" к другому, а также, между отдельными процессорами внутри современных суперкомпьютеров, необходимо преобразовать электрический сигнал в оптический, передать его по оптоволоконной линии, а затем преобразовать обратно оптический сигнал

в электрический. Поэтому от скорости преобразования электрического сигнала в оптический (и обратно) напрямую зависит быстродействие многопроцессорных компьютеров. Для преобразования электрического сигнала в оптический применяют лазеры, излучение которых модулируют, изменяя интенсивность токовой накачки усиливающей среды [Леденцов Н Н, Лотт Д А *Успехи Физических Наук* **181** 884 (2011)]. Для достижения максимальной скорости преобразования сигналов необходимо использовать лазеры с наименьшим временем отклика, которое зависит, как от конструкции самого лазера, так и свойств материалов из которых он изготовлен. В связи с этим, в настоящее время активно исследуются лазеры с резонаторами на основе композитных материалов (фотонных кристаллов и метаматериалов). Интерес к источникам когерентного излучения на основе композитных сред связан с большим числом полезных свойств, которыми обладают композитные материалы и которые не встречаются у природных материалов.

Важным классом композитных материалов являются фотонные кристаллы. Отличительной особенностью фотонных кристаллов является наличие запрещенных зон в спектре пропускания электромагнитных волн, на частотах которых свет не может распространяться по фотонным кристаллам. Наличие широкополосных запрещенных зон позволяет создавать на основе фотонных кристаллов высокодобротные оптические резонаторы. В настоящее время лазеры с резонаторами на основе фотонных кристаллов повсеместно применяются в оптических линиях передачи информации, в качестве преобразователей электрических сигналов в оптические и обратно. В линиях передачи информация кодируется амплитудой оптического сигнала, которую модулируют, изменяя интенсивность токовой накачки лазеров. Однако, как показано в диссертационной работе, лазерную генерацию можно включать/выключать не только за счет изменения накачки, но и помещая лазер с анизотропным резонатором на основе фотонного кристалла во внешнее магнитное поле. Время включения/выключения лазерной генерации при таком способе оказываются меньше времен включения/выключения лазерной генерации при токовой модуляции.

В качестве альтернативы лазерам с резонаторами на основе фотонных кристаллов в последние годы рассматривают источники когерентного излучения на основе композитных материалов, включающих плазмонные наноструктуры [Protsenko I E et al. *Phys. Rev. A* **71** 063812 (2005); Zheludev N I et al. *Nature Photonics* **2** 351 (2008); Huang Y-W et al. *Scientific Reports* **3** 1237 (2013)]. В таких устройствах плазмонные наноструктуры играют роль резонаторов и nanoантенн. Их использование позволяет создавать

генераторы электромагнитного поля (спазеры и нанолазеры) с характерными размерами много меньшими длины волны испускаемого излучения. Благодаря малому размеру спазеры обладают гораздо меньшим временем отклика, чем обычные лазеры, что делает их крайне перспективными устройствами для оптоэлектроники. В тоже время, спазеры обладают рядом недостатков, например, слишком широкой диаграммой направленности, что мешает заводить генерируемое ими излучение в оптоволоконные линии связи. В работе было показано, что объединение спазеров в двумерную систему позволяет создать на их основе фазированную антенную решетку с узкой диаграммой направленности, благодаря чему упрощается ввод излучения спазеров в оптоволоконные линии связи.

В лазерах на основе композитных материалов усиливающая среда и композитные материалы выполняют разные функции и обычно пространственно разделены. Однако в некоторых случаях бывает выгодно поместить усиливающую среду внутрь композитного материала. Добавление усиливающей среды приводит к изменению электромагнитных свойств фотонных кристаллов и метаматериалов. В диссертации рассмотрены два примера композитных структур, содержащих усиливающую среду, которые могут применяться при создании лазеров: слоистые среды с чередующимися усиливающими и поглощающими слоями - PT -симметричные системы [E-Ganainy R et al. *Optics Letters* 32 2632 (2007)] и фотонные кристаллы, содержащие усиливающие компоненты.

В настоящее время теория лазеров с резонаторами на основе композитных материалов далека от своего завершения, поэтому исследование взаимодействия электромагнитных волн с различными композитными структурами и изучение режимов генерации лазеров с резонаторами на основе композитных материалов является **актуальной задачей**, решение которой поможет в решении проблемы увеличения быстродействия вычислительных устройств.

Цели работы

1. Исследование прохождения электромагнитных волн через слоистые среды, содержащие усиливающие компоненты.
2. Изучение режимов генерации лазера с анизотропным резонатором во внешнем магнитном поле.
3. Численное и теоретическое исследование режимов лазерной генерации в двумерной решетке спазеров.
4. Исследование влияния дисперсии диэлектрической проницаемости на свойства PT -симметричных и квази- PT -симметричных оптических систем.

Научная новизна

1. Впервые найдены критерии формирования запрещенной зоны в фотонном кристалле, содержащем усиливающие слои. Определена граница между разрешенной и запрещенной зонами фотонного кристалла, содержащего усиливающие слои.
2. Найдены условия лазерной генерации на частотах, лежащих в запрещенной зоне фотонного кристалла. Показано, что они принципиально отличаются от условий лазерной генерации на частотах из разрешенной зоны фотонного кристалла.
3. Обнаружен эффект подавления лазерной генерации в лазере с анизотропным резонатором при наложении внешнего магнитного поля.
4. Впервые показана возможность самосинхронизации колебаний дипольных моментов отдельных наночастиц в двумерной решетке спазеров, взаимодействующих через общую усиливающую среду и поле излучения. Синхронизация колебаний приводит к росту интенсивности излучения от системы вследствие эффекта сверхизлучения.
5. Найденный в работе механизм синхронизации, приводящий к сверхизлучению от системы, принципиально отличается от известных ранее механизмов синхронизации при сверхизлучении.
6. Доказана невозможность наблюдения фазового перехода при изменении частоты падающего поля в PT -симметричных и квази- PT -симметричных электродинамических системах.

Научная и практическая ценность

Результаты данной диссертационной работы посвящены обсуждаемым научным проблемам, и все они имеют перспективные практические применения. Так, проблема взаимодействия излучения с усиливающими средами, которая до недавних пор казалась решенной, недавно получила новое развитие благодаря появлению новых видов композитных сред (метаматериалов) и фотонных кристаллов. В частности, известно, что электромагнитная волна с частотой из запрещенной зоны фотонного кристалла экспоненциально затухает при распространении вглубь такой слоистой структуры. В тоже время, электромагнитная волна, распространяясь по среде, включающей усиливающие компоненты, экспоненциально возрастает. Вопрос о том, как будет распространяться электромагнитная волна в запрещенной зоне фотонного кристалла, содержащего усиливающие компоненты, до сих пор обсуждается. Все стороннему рассмотрению данной проблемы посвящена первая часть диссертационной работы. Также

исследован вопрос об условиях лазерной генерации в запрещенной зоне фотонного кристалла, обнаружены качественные отличия этого режима от генерации в разрешенной зоне. Открытие подобных отличий позволяет лучше понять природу взаимодействия электромагнитного поля с усиливающей средой. Также в работе решена задача о взаимодействии электромагнитной волны с однородным усиливающим слоем в условиях полного внутреннего отражения. Развита теория может быть использована для разработки активных оптических устройств, преобразователей электрического сигнала в оптический (и обратно).

В современных вычислительных устройствах обработка информации обычно осуществляется электронными компонентами схем, а её передача происходит по оптическим каналам. Для преобразования электрического сигнала в оптический (и обратно) используют лазеры с токовой накачкой. Информация кодируется интенсивностью лазерного излучения, поэтому очень важно уметь быстро включать и выключать лазерную генерацию. В диссертации показано, что в лазере с анизотропным резонатором генерация может подавляться внешним магнитным полем за время порядка 10^{-10} сек, что позволит использовать такие лазеры в качестве источников когерентного излучения в оптических линиях передачи информации.

Для аналогичных целей может быть использовано излучение от двумерной решетки спазеров (нанолазеров). На практике применение подобных систем ограничено низкой эффективностью преобразования энергии накачки в энергию электромагнитного поля и не направленностью генерируемого излучения. В данной диссертационной работе предсказан новый эффект, наблюдаемый в решетке спазеров, – синхронизация колебаний дипольных моментов отдельных наночастиц. В результате излучение от системы становится узконаправленным, а его суммарная интенсивность повышается на два порядка. Предложенное устройство чрезвычайно интересно для применений в открытой оптической связи и, в частности, есть перспектива создания на его основе первой оптической фазированной решетки.

Рост интенсивности излучения при синхронизации связан с эффектом сверхизлучения Дике [Dicke R H *Phys. Rev.* 93 99 (1954)]. Сама синхронизация возникает из-за диполь-дипольного взаимодействия соседних наночастиц через общую усиливающую среду. Подобный механизм синхронизации принципиально отличается от всех описанных ранее. Обычно диполь-дипольное взаимодействие между источниками приводит к рассинхронизации колебаний и к снижению суммарной интенсивности излучения, а синхронизация возникает из-за взаимодействия через общее

поле излучения. В нашем случае ситуация оказывается противоположной. Учитывая, что на расстояниях меньших длины волны диполь-дипольное взаимодействие гораздо сильнее взаимодействия через дальнее поле, описанный в работе механизм синхронизации открывает возможность экспериментального наблюдения сверхизлучения от систем меньших длины волны.

Последняя глава диссертации посвящена исследованию влияния дисперсии диэлектрической проницаемости на свойства PT -симметричных систем [El-Ganainy R et al. *Optics Letters* **32** 2632 (2007)]. Считается, что в таких системах может наблюдаться большое число новых неописанных ранее явлений, например, фазовый переход с нарушением PT -симметрии решений [Makris K G et al. *Physical Review Letters* **100** 103904 (2008)]. В литературе было предложено несколько оптических устройств с необычными свойствами, в том числе, работающих в диапазоне частот [Longhi S *Phys. Rev. A* **82** (2010); Chong Y D, Ge L, Stone A D *Phys. Rev. Lett.* **106** (2011)]. Подобные системы могут применяться для создания более компактных линий оптической связи и управляемых током оптических переключателей. В диссертационной работе показано, что выполнение условия PT -симметрии в любом конечном интервале частот противоречит принципу причинности, из-за чего многие из предсказанных эффектов в реальных системах наблюдаться не могут, а предложенные оптические устройства не обладают заявленными свойствами. Результаты, полученные в данной главе, указывают на необходимость учета частотной дисперсии усиливающей среды при разработке волноводов и оптических переключателей на основе PT -симметричных структур.

Основные положения, выносимые на защиту

1. В фотонном кристалле, содержащем усиливающую среду, в запрещенной зоне лазерная генерация подавляется с увеличением числа ячеек фотонного кристалла.
2. Частота, при которой пороговое значение накачки не зависит от числа ячеек фотонного кристалла, является границей разрешенной и запрещенной зоны фотонного кристалла, содержащего усиливающую среду.
3. Изменяя величину внешнего магнитного поля можно управлять режимами генерации лазера с анизотропным резонатором. В том числе, включать и выключать лазерную генерацию.
4. Взаимодействие между наночастицей и квантовыми точками соседних спазеров приводит к синхронизации колебаний дипольных моментов

отдельных наночастиц в решетке спазеров, которая сохраняется при учете радиационных потерь. Синхронизация колебаний приводит к увеличению интенсивности излучения вследствие эффекта сверхизлучения.

5. Условие *PT*-симметрии электродинамической системы может выполняться только в дискретном наборе частот и не может выполняться в любом конечном интервале частот.
6. Из-за этого невозможно наблюдать фазовый переход при изменении частоты падающего поля в *PT*-симметричных и квази-*PT*-симметричных электродинамических системах.

Апробация результатов

Результаты докладывались на следующих международных и российских конференциях:

1. 2nd IEEE International Workshop on THz Radiation (TERA'2010), Sevastopol, Ukraine, 10-14 September 2010;
2. Международная конференция "Фундаментальные проблемы оптики - 2010". С.-Петербург, Россия, 18-22 октября 2010;
3. 53-я научная конференция МФТИ, Москва, Россия, 25-26 ноября 2010;
4. Двенадцатая ежегодная научная конференция ИТПЭ РАН, Москва, Россия, 4-7 апреля 2011;
5. International Conference Days on Diffraction'2011 (DD'2011), St. Petersburg, Russia, May 30 – June 3, 2011;
6. International Conference on Materials for Advanced Technologies'2011 (ICMAT 2011), Singapore, June 26 - July 1 2011;
7. Moscow International Symposium on Magnetism (MISM'2011), Moscow, Russia, 21–25 August, 2011;
8. 54-я научная конференция МФТИ, Москва, Россия, 25-26 ноября 2011;
9. Тринадцатая ежегодная научная конференция ИТПЭ РАН, Москва, Россия, 14-16 мая 2012;
10. International Conference Days on Diffraction'2012 (DD'2012), St. Petersburg, Russia, May 30 – June 3, 2012;
11. 12th International Conference on Near-Field Optics and Nanophotonics (NFO'12), San Sebastian, Spain, 3-7 September;
12. Metamaterials 2012: The 6th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, St. Petersburg, Russia, 17-22 September, 2012;
13. 55-я научная конференция МФТИ, Москва, Россия, 19-22 ноября 2012;
14. Четырнадцатая ежегодная научная конференция ИТПЭ РАН, Москва, Россия, 4-7 апреля 2013;
15. International Conference Days on Diffraction'2013 (DD'2013), St. Petersburg, Russia, May 27–31, 2013;

16. International Conference on Materials for Advanced Technologies'2013 (ICMAT'2013), Singapore, June 30 – July 5;
17. 56-я научная конференция МФТИ, Москва, Россия, 19-22 ноября 2013

Публикации

По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 9 статей в реферируемых журналах из списка ВАК и 8 публикаций в сборниках трудов конференций.

На основании обсуждения сделанного доклада было принято решение:

1. Работа удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук и может быть рекомендована к защите на Диссертационном совете ДМ 002.262.01 при Институте теоретической и прикладной электродинамики РАН при участии Объединенного института высоких температур РАН по специальности 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки.

2. В качестве ведущей организации рекомендуется Институт спектроскопии РАН, г. Троицк Московской области.

3. В качестве официальных оппонентов рекомендуются:

д.т.н., гл.н.с. Банков С.Е., гражданин РФ, Институт радиотехники и электроники РАН, г. Москва;

к.ф.-м.н., с.н.с. Проценко И.Е., гражданин РФ, Физический институт РАН, г. Москва.

Тема кандидатской диссертации Зябловского А.А. утверждена Ученым советом ФПФЭ МФТИ (протокол № 141 от 19 октября 2011 года)

Зав. кафедрой
«Электродинамики сложных
систем и нанофотоники»,
академик РАН



А.Н. Лагарьков

Секретарь семинара кафедры,
д.ф.-м.н.

А. Пухов

А.А. Пухов