

На правах рукописи



ЗЯБЛОВСКИЙ Александр Андреевич

**ОПТИКА И МАГНИТООПТИКА ЛАЗЕРОВ НА ОСНОВЕ ФОТОННЫХ
КРИСТАЛЛОВ И МЕТАМАТЕРИАЛОВ**

01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник
Пухов Александр Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
главный научный сотрудник Института
радиотехники и электроники РАН
Банков Сергей Евгеньевич

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник Физиче-
ского института РАН
Проценко Игорь Евгеньевич

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджет-
ное учреждение науки Институт спек-
троскопии Российской академии наук

Защита состоится " 28 " мая 2014 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании Диссертационного совета ДМ 002.262.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теоретической и прикладной электродинамики РАН при участии Объединенного института высоких температур РАН по адресу: г. Москва, ул. Ижорская, 13, экспозал ОИВТ РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института высоких температур РАН.

Автореферат разослан " __ " _____ 2014 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

 К.И. Кугель

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Развитие новых разделов электродинамики, таких как электродинамика метаматериалов и плазмоники, поставило во главу угла вопрос о применении усиливающих сред в композитных материалах. Действительно, наличие высоких потерь в метаматериалах и плазмонных композитах препятствует реализации многих схем и приборов на их основе. Одним из предложенных решений является фотонный кристалл, в котором чередуются слои метаматериала и активной среды [1].

Фотонные кристаллы – важный класс композитных материалов. Отличительной особенностью фотонных кристаллов является наличие запрещенных зон в спектре пропускания электромагнитных волн. Наличие широкополосных запрещенных зон позволяет создавать на основе фотонных кристаллов устройства, концентрирующие и преобразующие электромагнитные импульсы, с характерными размерами в несколько длин волн. Например, высокодобротные оптические резонаторы, волноводы, делители электромагнитных импульсов и т.п. Для практических применений бывает выгодно помещать внутрь композитных материалов усиливающие компоненты. Наличие усиления приводит к изменению электромагнитных свойств фотонных кристаллов и метаматериалов. В диссертации рассмотрены два примера усиливающих слоистых сред: *PT*-симметричные системы [2, 3] и фотонные кристаллы, содержащие усиливающие компоненты. В обоих случаях усиление принципиально меняет свойства электромагнитных структур.

В качестве альтернативы устройствам на основе фотонных кристаллов в последние годы рассматриваются их аналоги, включающих плазмонные наноструктуры [4-10]. В таких устройствах плазмонные наноструктуры играют роль резонаторов, наноантенн, концентраторов электромагнитных полей. Использование плазмонов открывает возможность управления электромагнитными полями на наномасштабе. В то же время, для плазмонных структур характерны высокие потери, поэтому задача о компенсации потерь крайне актуальна. Использование усиливающих компонент необходимо и для создания генераторов электромагнитного поля (спазеров) с характерными размерами, много меньшими длины волны испускаемого излучения, которые служат для генерации когерентных ближних полей.

В настоящее время теория композитов на основе усиливающих сред далека от своего завершения, и в литературе ведется дискуссия по поводу фундаментальных свойств таких композитов. 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 диссертационной работы

Целью диссертационной работы является теоретическое исследование электромагнитных свойств слоистых сред, метаматериалов и плазмонных композитов, содержащих усиливающие компоненты, по следующим направлениям.

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 явления самосинхронизации колебаний дипольных моментов в двумерной решетке спазеров.
4. Исследование влияния дисперсии диэлектрической проницаемости на свойства PT -симметричных и квази- PT -симметричных электродинамических 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. 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.
3. Обнаружен эффект подавления лазерной генерации в фарадеевском лазере с анизотропным резонатором при наложении внешнего статического магнитного поля.
4. Впервые показано, что в двумерной решетке спазеров взаимодействие наночастиц через квантовые точки соседних спазеров может приводить к синхронизации колебаний дипольных моментов отдельных наночастиц. Результатом синхронизации являются эффекты сверхизлучения и сужения диаграммы направленности.

5. Доказана невозможность наблюдения фазового перехода при изменении частоты электромагнитного поля в *PT*-симметричных и квази-*PT*-симметричных системах.

Достоверность результатов

Достоверность результатов, представленных в диссертации, подтверждается совпадением теоретических результатов с результатами численного моделирования, публикациями в ведущих мировых научных журналах и докладами на международных конференциях.

Научная и практическая значимость работы

Результаты данной диссертационной работы посвящены широко 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 [11]. В то же время, электромагнитная волна, распространяясь по усиливающей среде, экспоненциально возрастает. Вопрос о том, как будет распространяться электромагнитная волна в запрещенной зоне фотонного кристалла, содержащего усиливающие компоненты, до сих пор обсуждается. Всестороннему рассмотрению данной проблемы посвящена первая часть диссертационной работы. Также исследован вопрос об условиях лазерной генерации в запрещенной зоне фотонного кристалла и обнаружены качественные отличия этого режима от генерации в разрешенной зоне. Показано, что, несмотря на наличие усиливающей среды, свойство запрещенной зоны подавлять распространение излучения сохраняется. Кроме того, в работе решена задача о взаимодействии электромагнитной волны с однородным усиливающим слоем в условиях полного внутреннего отражения. Развитая теория может быть использована для разработки активных оптических устройств, обеспечивающих управление излучением с помощью запрещенных зон слоистых систем.

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 [12]. В диссертации пока-

зано, что в лазере с анизотропным резонатором генерация может подавляться внешним магнитным полем за время порядка 10^{-10} сек, что позволит использовать их в качестве источников когерентного излучения в оптических линиях передачи информации.

Для аналогичных целей может быть использовано излучение от двумерной решетки спазеров. На практике применение подобных систем ограничено низкой эффективностью преобразования энергии накачки в энергию электромагнитного поля и отсутствием направленности генерируемого излучения. В данной диссертационной работе показано, что в двумерной решетке спазеров взаимодействие наночастиц через квантовые точки соседних спазеров может приводить к синхронизации 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 спазеров в двумерной решетке связан с эффектом сверхизлучения Дике [13]. Сама синхронизация возникает из-за ближнепольного взаимодействия наночастиц с квантовыми точками соседних спазеров. Учитывая, что на расстояниях, меньших длины волны, ближнепольное взаимодействие гораздо сильнее взаимодействия через дальнее поле, описанный в работе механизм синхронизации открывает возможность экспериментального наблюдения сверхизлучения от наноразмерных систем.

Последняя глава диссертации посвящена исследованию влияния дисперсии диэлектрической проницаемости на свойства PT -симметричных систем. Подобные структуры сочетают в себе усиливающие и поглощающие среды [3, 14, 15]. В публикациях последних пяти лет предсказано большое количество новых эффектов в PT -симметричных системах, таких как фазовый переход с нарушением PT -симметрии решений [3, 14, 15]; было предложено несколько оптических устройств на основе PT -симметричных систем [16-19], в том числе, требующих для своей работы сохранения PT -симметрии в конечной полосе частот [2, 3]. Подобные системы могут применяться для создания более компактных линий связи и оптических переключателей, управляемых электрическим током. Однако возможность практической реализации PT -симметричных систем, особенно в диапазоне частот, до сих пор не исследовалась. 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 устройства не обладают заявленными свойствами. Результаты, полученные в данной главе, указывает на необходимость учета частотной дисперсии усиливающей среды при разработке волноводов и переключателей на основе PT -симметричных структур.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту

1. Разрешен парадокс о сверхусилении волн в запрещенной зоне фотонного кристалла, содержащего усиливающие слои. 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.
2. Предложена схема фарадеевского лазера с анизотропным резонатором, в котором с помощью внешнего статического магнитного поля можно включать и выключать лазерную генерацию.
3. В двумерной решетке спазеров взаимодействие наночастиц через квантовые точки соседних спазеров может приводить к синхронизации колебаний дипольных моментов отдельных наночастиц. Определены условия возникновения такой синхронизации с учетом радиационных потерь.
4. Синхронизация колебаний спазеров приводит к их сверхизлучению, то есть к увеличению интенсивности излучения. В результате спазеры из генераторов ближних полей превращаются в генераторы дальних полей. Широкоапертурные решетки спазеров можно использовать в качестве источников узконаправленного излучения.
5. Условие PT -симметрии электродинамической системы может выполняться только в дискретном наборе частот и не может выполняться в любом конечном интервале частот.
6. Невозможно наблюдать фазовый переход при изменении частоты электромагнитного поля в PT -симметричных и квази- PT -симметричных электродинамических системах.

Апробация результатов

Основные результаты работы докладывались на следующих международных и российских конференциях: 2nd IEEE International Workshop on THz Radiation (TERA'2010), Sevastopol, Ukraine, 10-14 September 2010; Международная конференция "Фундаментальные проблемы оптики - 2010". С.-Петербург, Россия, 18-22 октября 2010; 53-я научная конференция МФТИ, Москва, Россия, 25-26 ноября 2010; Двенадцатая ежегодная научная конференция ИТПЭ РАН, Москва, Россия, 4-7 апреля 2011; International Conference Days on Diffraction'2011

(DD'2011), St. Petersburg, Russia, May 30 – June 3, 2011; International Conference on Materials for Advanced Technologies'2011 (ICMAT 2011), Singapore, June 26-July 1 2011; Moscow International Symposium on Magnetism (MISM'2011), Moscow, Russia, 21–25 August, 2011; 54-я научная конференция МФТИ, Москва, Россия, 25-26 ноября 2011; Тринадцатая ежегодная научная конференция ИТПЭ РАН, Москва, Россия, 14-16 мая 2012; International Conference Days on Diffraction'2012 (DD'2012), St. Petersburg, Russia, May 30 – June 3, 2012; 12th International Conference on Near-Field Optics and Nanophotonics (NFO'12), San Sebastian, Spain, 3-7 September; Metamaterials 2012: The 6th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, St. Petersburg, Russia, 17-22 September, 2012; 55-я научная конференция МФТИ, Москва, Россия, 19-22 ноября 2012; Четырнадцатая ежегодная научная конференция ИТПЭ РАН, Москва, Россия, 4-7 апреля 2013; International Conference Days on Diffraction'2013 (DD'2013), St. Petersburg, Russia, May 27–31, 2013; International Conference on Materials for Advanced Technologies'2013 (ICMAT'2013), Singapore, June 30 – July 5; 56-я научная конференция МФТИ, Москва, Россия, 19-22 ноября 2013

Публикации

По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 9 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и других изданиях, включенных в список ВАК.

Личный вклад соискателя

Все изложенные в диссертации оригинальные результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Автор принимал непосредственное участие в выборе объектов исследования, постановке задач, разработке теоретических подходов, численном моделировании и обсуждении полученных результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 132 наименований. Общий объем 127 страниц, в том числе 32 рисунка.

Краткое содержание работы

Во **введении** обсуждается актуальность темы работы, научная новизна, указаны цели работы, а также положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** дан обзор литературы, относящейся к теме работы, приведены вспомогательные результаты.

В первом разделе обсуждается возможность описания усиливающих сред при помощи уравнений Максвелл-Блоха и диэлектрической проницаемости с отрицательной мнимой частью.

Во втором разделе дан обзор литературы по PT -симметричным квантовым и электродинамическим системам. Даны определения операторов пространственной инверсии \hat{P} и обращения времени \hat{T} . Обсуждаются условия наблюдения фазового перехода с изменением симметрии решений в PT -симметричных системах. Рассмотрена аналогия между уравнением Гельмгольца для двумерной электродинамической системы и стационарным уравнением Шредингера для одномерной квантово-механической системы.

Во **второй главе** исследуется прохождение электромагнитных волн через диэлектрический слой, содержащий усиливающую среду. В частности, решается задача об отражении волны от границы раздела двух сред, одна из которых является усиливающей. В литературе описано два подхода к решению данной проблемы. Во-первых, можно найти распределение поля в усиливающем слое конечной толщины, а затем сделать переход к полубесконечному слою [20]. Такой подход называют френелевским. В результате получается, что в полупространстве, заполненном усиливающей средой, распространяется только одна встречная волна, идущая из бесконечности и несущая энергию навстречу падающей волне, что находится в явном противоречии с принципом причинности. Второй подход основан на суммировании ряда парциальных волн Эйри, возникающих при последовательных отражениях от границ слоя [21, 22]. При достаточно большой толщине слоя $d = d_{cr}$ такой ряд перестает сходиться и решений не существует. Налицо явное противоречие: подход Френеля дает конечный результат, противоречащий принципу причинности, а ряд Эйри перестает сходиться. В тоже время, для диссипативных сред результат суммирования ряда Эйри всегда согласуется с предсказаниями подхода Френеля.

На самом деле, для решения задачи об отражении волны от границы раздела двух сред, одна из которых является усиливающей, вместо стационарной задачи необходимо рассматривать временную задачу о прохождении импульса [23]. Координату вдоль распространения импульса обозначим z , толщину слоя d . При падении электромагнитного импульса на систему зависимость распре-

деления поля в системе от времени находится обратным преобразованием Фурье:

$$E(z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} e_0(\omega) g(z, \omega) \exp(-i\omega t) d\omega, \quad (1)$$

где $e_0(\omega)$ – амплитуды Фурье разложения падающего импульса, $g(z, \omega)$ – передаточная функция слоя, определяемая выражением

$$g(z, \omega) = \begin{cases} \exp(ik_0 z) + r \exp(-ik_0 z), & z < 0 \\ a \exp(ik_0 z \sqrt{\varepsilon_{gain}}) + b \exp(-ik_0 z \sqrt{\varepsilon_{gain}}), & 0 < z < d \\ t \exp(ik_0(z-d)), & z > d \end{cases} \quad (2)$$

Амплитуды r , a , b , t находятся из сшивки тангенциальных компонент полей на границах слоя $z=0$ и $z=d$. Функция $g(z, \omega)$ имеет особенности в виде полюсов на плоскости комплексных частот в точках $\omega_j = \text{Re } \omega_j + i \text{Im } \omega_j$, $j=1, 2, \dots$, соответствующих собственным модам слоя как открытого резонатора [24, 25]. Передаточная функция, которая по своей природе является функцией отклика, должна быть аналитической в верхней полуплоскости комплексных частот [26]. При отсутствии усиления (диссипативный слой) все полюса функции $g(z, \omega)$ всегда располагаются в нижней полуплоскости комплексной частоты ω . В этом случае обратное преобразование Фурье (1) дает физически осмысленный результат. Однако оказывается, что при наличии усиления при $d > d_{las} \geq d_{cr}$ один из полюсов передаточной функции переходит в верхнюю полуплоскость. В результате, рассеянная на слое волна появляется до того как передний фронт импульса достигает слоя, т.е. имеется явное нарушение принципа причинности. Это нарушение указывает на необходимость модификации подхода Френеля (1).

Для того чтобы получить временное представление функции отклика $G(z, t) = (2\pi)^{-1} \int_C g(z, \omega) \exp(-i\omega t) d\omega$, удовлетворяющей принципу причинности ($G(z, t) = 0$ при $t < 0$), контур интегрирования C в обратном преобразовании Фурье нужно провести не по действительной оси, а выше всех имеющихся полюсов

$$E(z, t) = \int_C e_0(\omega) g(z, \omega) \exp(-i\omega t) d\omega, \quad (3)$$

Далее контур интегрирования может быть деформирован таким образом, что (3) принимает вид суммы интеграла по вещественной оси и всех вычетов в полюсах [23, 27]:

$$E(z, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e_0(\omega) g(z, \omega) \exp(-i\omega t) d\omega - 2\pi i \sum_j \operatorname{res}(g(\omega_j, z)) e_0(\omega_j) \exp(-i\omega_j t), \quad (4)$$

Интеграл по вещественной оси в (4) совпадает с результатом, полученным в рамках стандартного подхода Френеля (1). Само по себе первое слагаемое в (4) приводит к нарушению принципа причинности. Интегрирование же по новому контуру добавляет вычеты в дискретном наборе частот ω_j в виде растущих со временем слагаемых $\sim \exp(-i \operatorname{Re} \omega_j t) \exp(\operatorname{Im} \omega_j t)$ [23, 27, 28]. Добавление этих дискретных мод согласует схему расчета с принципом причинности, т.е. до момента достижения передним фронтом импульса границы слоя отраженная волна отсутствует. Конечно, такой подход справедлив лишь на малых временах развития генерации, когда нелинейными эффектами можно пренебречь.

Каждое собственное решение в (4), возникающее на частоте одного из полюсов, представляет собой экспоненциально возрастающее со временем поле, локализованное в слое. Экспоненциальное нарастание поле во времени связано с развитием лазерной генерации в слое. Полученный ответ корректно описывает поведение поля на линейной стадии развития генерации, когда можно не учитывать нелинейное продавливание усиливающей среды.

Интересной особенностью задачи является движение полюсов по комплексной плоскости с увеличением толщины слоя. Полюса двигаются вдоль кривой $d = d_{cr}(\omega)$, при этом они могут выходить в верхнюю полуплоскость и снова возвращаться в нижнюю полуплоскость. В результате, по мере увеличения d , генерация то возникает, то пропадает. Таким образом, может существовать целый набор толщин d_{las} , максимальное значение которых d_{th} . При толщинах больших d_{th} в верхней полуплоскости всегда оказывается не менее одного полюса, после этого генерация с возрастанием толщины слоя уже не исчезает.

Во второй части главы рассматривается случай наклонного падения волны на усиливающий слой, окруженный средой с диэлектрической проницаемостью ε_e . В отсутствие усиления поведение системы хорошо известно: 1) если слой окружен оптически менее плотной средой, то ситуация полностью аналогична случаю нормального падения; 2) если диэлектрический слой находится в оптически более плотном диэлектрике, то при углах падения, больших критического значения ϕ_{TIR} , наблюдается эффект полного внутреннего отражения, когда падающая волна экспоненциально затухает вглубь слоя. В то же время, электро-

магнитная волна, распространяясь по слою, содержащему усиливающую среду, должна экспоненциально возрастать. Возникает вопрос о том, как будет распространяться по усиливающему слою волна (возрастать/убывать) при углах падения больших угла полного внутреннего отражения ϕ_{TIR} .

Оказывается, что существует критический угол ϕ_{cr} , при значениях угла падения больших которого области сходимости и области расходимости ряда Эйри меняются местами. При $\phi > \phi_{cr}$ с увеличением толщины слоя область, где ряд Эйри по возрастающим волнам сходится, уменьшается, поэтому кривая $d = d_{cr}(\omega)$ с увеличением толщины слоя опускается в комплексной плоскости частот. Таким образом, при $\phi > \phi_{cr}$ лазерная генерация возможна лишь при малой толщине усиливающего слоя и исчезает с увеличением толщины слоя. Полюса, расположенные на кривой $d = d_{cr}(\omega)$, с увеличением угла падения движутся по ней по часовой стрелке, и при $\phi \rightarrow \phi_{TIR}$ оказываются вблизи частоты перехода ω_0 . Угол, при котором меняются местами области сходимости, в точности равен углу полного внутреннего отражения в отсутствие усиления: $\phi_{cr} = \phi_{TIR}$.

Таким образом, при $\phi < \phi_{cr}$ лазерная генерация возможна только при $d > d_{cr}(\omega)$, а при $\phi > \phi_{cr}$ лазерная генерация возможна только при $d < d_{cr}(\omega)$. Угол, при котором происходит переход от одного типа поведения к другому $\phi_{cr} = \phi_{TIR}$ определяется значением диэлектрической проницаемости без учета дисперсии [23].

Для верификации полученных результатов в работе проводился сравнительный анализ результатов, получаемых из модифицированного подхода Френеля и результатов численного решения уравнений Максвелла-Блоха методом FDTD. При аналитическом рассмотрении использовалось описание усиливающей среды при помощи диэлектрической проницаемости с мнимой частью, а при численном моделировании для того чтобы определить амплитуду лазерной генерации усиливающая среда описывалась при помощи уравнений Максвелла-Блоха.

В третьей главе исследуется прохождение электромагнитных волн через фотонный кристалл (ФК), содержащий усиливающую среду. Случай фотонного кристалла во многом аналогичен случаю наклонного падения волны на усиливающий слой. Действительно, в зависимости от частоты падающая волна либо полностью отражается от границы фотонного кристалла (запрещенная зона), либо частично проходит внутрь (разрешенная зона). В то же время, электромагнитная волна, распространяющаяся по усиливающей среде, экспоненциаль-

но возрастает. Запрещенные зоны в фотонном кристалле возникают из-за интерференции волн, отраженных от разных ячеек фотонного кристалла, а усиливающая среда приводит к росту амплитуды поля при распространении от ячейки к ячейке. Поэтому возникает вопрос, какая волна будет распространяться по фотонному кристаллу, содержащему усиливающую среду, в том числе на частотах запрещенной зоны. Известная формула Рытова предсказывает довольно неожиданный результат – сверхусиление в запрещенной зоне. Ошибочность этого результата связана с рассмотрением бесконечной задачи. Для ответа на поставленный вопрос рассмотрим временную задачу о падении электромагнитного импульса на фотонный кристалл, состоящий из N ячеек. В этом случае зависимость распределения поля в системе от времени находится при помощи модифицированного обратного преобразования Фурье (4), где передаточная функция находится методом Т-матриц [29], который применительно к ФК метод Т-матриц эквивалентен подходу Френеля для однородного слоя. Как и в случае диэлектрического слоя, переход полюсов передаточной функции в верхнюю полуплоскость комплексных частот соответствует началу лазерной генерации. Введем пороговое значение накачки $\alpha_{th}(N)$, при котором в фотонном кристалле начинается лазерная генерация (N – число ячеек ФК).

В разрешенной зоне ФК с ростом числа ячеек $\alpha_{th}(N)$ монотонно убывает. Действительно, чем больше число ячеек ФК, тем сильнее возрастает амплитуда волны за один проход через ФК. В запрещенной зоне ФК $\alpha_{th}(N)$ немонотонно зависит от числа ячеек. При малом числе ячеек $\alpha_{th}(N)$ убывает с ростом числа ячеек, при числе ячеек порядка 5 убывание $\alpha_{th}(N)$ сменяется ростом (рис. 1). В дальнейшем рост может вновь смениться убыванием (рис. 1) или же продолжаться неограниченно долго.

Возникновение лазерной генерации на частотах из запрещенной зоны нуждается в пояснении. Дело в

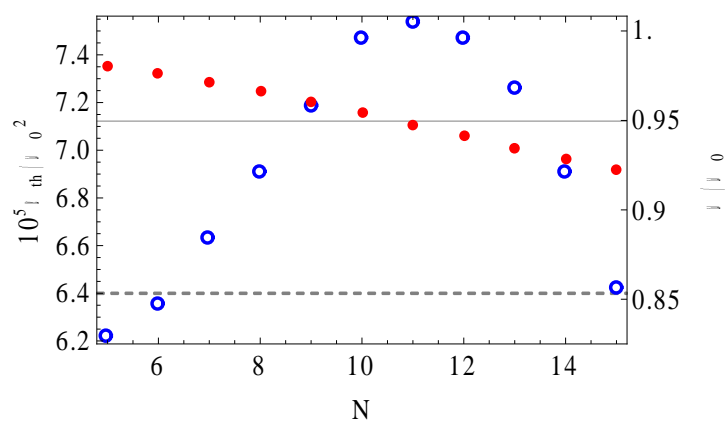


Рис. 1. Пороговое значение α_{th} (кольца) и частота генерации ω , нормированная на частоту центра запрещенной зоны ω_0 (кружки) в зависимости от числа ячеек фотонного кристалла N . Штриховой линией отмечена граница запрещенной зоны ФК, не содержащего усиливающей среды; сплошной линией обозначена граница запрещенной зоны ФК, содержащего усиливающую среду.

том, что в ФК без усиления и без диссипации не существует собственных мод системы, поэтому фазовые условия лазерной генерации никогда не выполняются. Добавление в ФК усиливающей среды приводит к изменению действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости материала, из которого изготовлены слои ФК. Таким образом, возникновение лазерной генерации на частотах из запрещенной зоны можно интерпретировать как изменение зонной структуры ФК. Действительно, если рассмотреть вспомогательный ФК, усиливающий слой, в котором заменен на слой с диэлектрической проницаемостью $\text{Re} \varepsilon(\alpha)$, то запрещенная зона этого вспомогательного ФК оказывается уже, чем у исходного ФК с $\alpha = 0$. При этом лазерная генерация возможна только на частотах из разрешенной зоны вспомогательного ФК. Тем не менее, зависимость $\alpha_{th}(N)$ от числа ячеек принципиально отличается на частотах из разрешенной зоны реального ФК и разрешенной зоны вспомогательного ФК. Подавление лазерной генерации с ростом числа ячеек ФК на частотах из разрешенной зоны вспомогательного ФК дает основания отнести эту область частот к запрещенной зоне ФК, содержащего усиливающую среду. В зависимости от того, увеличивается или уменьшается пороговое значение накачки $\alpha_{th}(N)$ для данной частоты с ростом числа ячеек ФК, будем относить частоту или к разрешенной или к запрещенной зоне ФК.

В четвертой главе исследуются режимы генерации лазера с анизотропным резонатором во внешнем магнитном поле.

Рассмотрен лазер на основе фотонного кристалла с дефектом из магнитооптической среды, диэлектрическая проницаемость слоев ФК предполагалась анизотропной. В качестве усиливающей среды рассматривались два слоя квантовых проволок с взаимно перпендикулярной ориентацией. Рассматривался случай полной анизотропии, когда один слой квантовых проволок взаимодействует только одной линейной поляризацией электрического поля, а другой слой с перпендикулярной к ней [30]. Для описания анизотропии слоев ФК вводились добротности для мод с двумя перпендикулярными линейными поляризациями – Q_x и Q_y . Добротность одной из мод фиксировалась выше порогового значения начала лазерной генерации $Q_y > Q_{th}$, и рассматривалось поведение системы в зависимости от Q_x и величины магнитооптического параметра – g . Собственные частоты для двух резонаторных мод считались одинаковыми – ω_r .

При аналитическом решении уравнений лазера с анизотропным резонатором во внешнем магнитном поле, было показано, что возможно три стационар-

ных режима работы рассматриваемого лазера (рис. 2). Области 1 и 3 на рис. 2 соответствуют слабому магнитооптическому взаимодействию мод анизотропного резонатора, при этом лазерное излучение имеет линейную поляризацию. В этом случае частота лазерной генерации совпадает с частотой резонаторной моды $\omega_{las} = \omega_r$. В области 2 сильное магнитооптическое взаимодействие отклоняет частоту генерации от частоты резонаторной моды $|\omega_{las} - \omega_r| \sim g$, а лазерное излучение эллиптически поляризовано. В области 4 сильное магнитооптическое взаимодействие надпороговой и подпороговой мод приводит к полному подавлению лазерной генерации для обеих линейных поляризаций.

С практической точки зрения особый интерес представляет возможность включения/выключения лазерной генерации внешним магнитным полем. Методом линейного анализа устойчивости решений системы были найдены характерные времена включения/выключения лазерной генерации, значения которых оказались порядка 10^{-10} сек.

Полученные оценки времен включения и выключения лазерной генерации, как правило, больше характерного времени изменения магнитооптической постоянной при включении/выключении магнитного поля и сравнимы со временами включения/выключения лазерной генерации при токовой модуляции оптического сигнала [12]. Поэтому предложенный магнитоуправляемый лазер является достаточно быстрым устройством, допускающим интеграцию в оптические схемы.

В пятой главе исследуются режимы генерации в двумерной решетке спазеров. Спазер – это наноразмерный квантовый генератор электромагнитного поля, состоящий из плазмонной наночастицы, играющей роль резонатора и дипольной наноантенны, и усиливающей среды [7]. В качестве модели двумерной

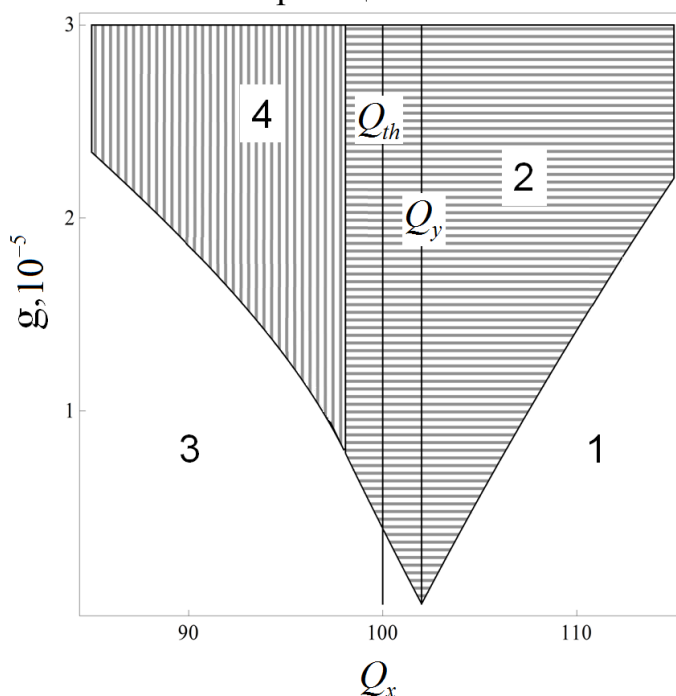


Рис. 2. Режимы генерации лазера с анизотропным резонатором. В области 1 наблюдается генерация двух линейно поляризованных мод, в области 2 излучение эллиптически поляризовано, в области 3 генерирует одна линейно поляризованная мода, в области 4 лазерная генерация подавлена.

решетки спазеров рассматривались инвертированные квантовые точки, расположенные вблизи эллипсоидальных металлических наночастиц. Для простоты предполагалось, что квантовая система является двухуровневой системой. Также считалось, что собственная частота моды с дипольным моментом, ориентированным вдоль главной оси эллипсоидальной наночастицы, совпадает с частотой перехода квантовой точки, а собственные частоты остальных мод наночастицы сильно отличаются от частоты перехода квантовой точки и при генерации не возбуждаются. В режиме генерации на каждой наночастице возбуждаются колебания дипольного момента, в результате, система спазеров начинает функционировать, как активная фазированная антенная решетка.

В работе решетка спазеров описывалась при помощи системы дифференциальных уравнений: на амплитуды дипольных моментов наночастиц, поляризацию и инверсию населенностей квантовых точек [31]. В уравнениях учитывалось взаимодействие между всеми парами наночастиц через полное поле излучения, а также, взаимодействие наночастиц с несколькими ближайшими квантовыми точками.

Численное моделирование решетки спазеров показало, что, благодаря взаимодействию наночастиц с квантовыми точками соседних спазеров, в системе возникает взаимная синхронизация колебаний дипольных моментов отдельных спазеров, которая сохраняется при учете радиационных потерь. Синхронизация колебаний приводит к росту суммарной интенсивности излучения пропорционально квадрату числа спазе-

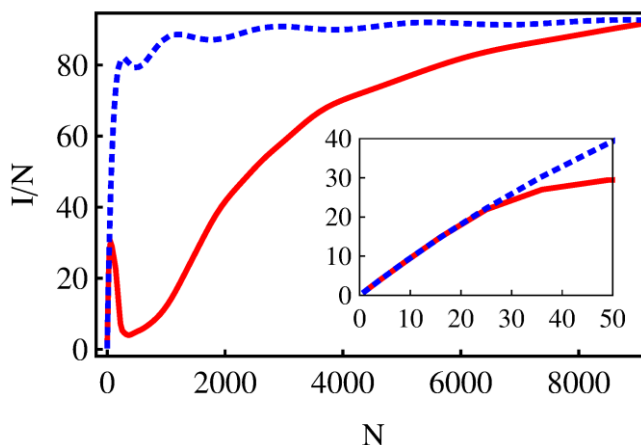


Рис. 3. Интенсивность излучения в расчете на один спазер, I / N , от числа спазеров в массиве N , вычисленная по результатам моделирования (сплошная линия) и для идеально синхронизированного массива (штриховая линия).

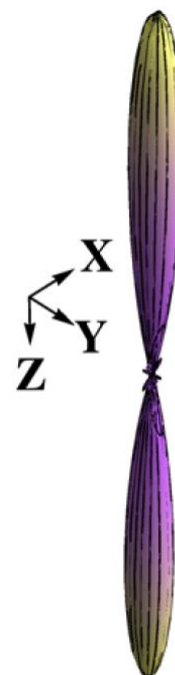


Рис. 4. Диаграмма направленности излучения для решетки 100 на 100 спазеров

ров вследствие эффекта сверхизлучения [13]. В результате суммарная интенсивность излучения в расчете на один спазер возрастает примерно на два порядка (рис. 3). Рост интенсивности излучения в расчете на один спазер происходит только при размерах массива порядка длины волны. В то же время, интенсивность излучения в телесный угол в направлении, перпендикулярном плоскости массива, в расчете на один спазер растет линейно с ростом числа спазеров при любом размере системы. При размерах системы, меньших длины волны, такой рост обусловлен увеличением суммарной интенсивности излучения вследствие эффекта сверхизлучения, а при больших размерах – сужением диаграммы направленности излучения из-за увеличения апертуры системы [32].

Таким образом, объединение единичных спазеров в двумерную систему позволяет создать на их основе фазированную антенную решетку с узкой диаграммой направленности (рис. 4).

Шестая глава посвящена исследованию влияния частотной дисперсии на свойства *PT*-симметричных систем. Электродинамическую систему называют *PT*-симметричной, если диэлектрическая проницаемость удовлетворяет условию [14]

$$\varepsilon(x) = \varepsilon^*(-x), \quad (5)$$

где x – пространственная координата. *PT*-симметричные электродинамические системы демонстрируют множество необычных свойств, например, фазовый переход с изменением симметрии решений [3, 14, 15]. В литературе было предложено несколько электродинамических устройств с необычными свойствами [16-19], в том числе, работающих в диапазоне частот [2, 3]. Подобные системы могут применяться для создания более компактных линий связи и управляемых током оптических переключателей. Для реализации *PT*-симметричных электродинамических устройств, сохраняющих свои свойства в диапазоне частот, необходимо выполнение условия (5) в соответствующем интервале частот. Однако, возможность практической реализации таких *PT*-симметричных систем, до сих пор не исследовалась.

В диссертации на основе соотношений Крамерса-Кронига [26] доказывается невозможность выполнения условий *PT*-симметрии в любом конечном интервале частот. В результате, оказывается невозможным наблюдать фазовый переход при варьировании по частоте в реальных *PT*-симметричных и квази-*PT*-симметричных электродинамических системах (квази-*PT*-симметричными системами называют структуры, которые могут быть сведены к *PT*-симметричным формальным преобразованием пространственных координат [33]). Соответственно, работы в которых предлагается наблюдать фазовый переход при изменении частоты [3] являются ошибочными.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты работы

1. Показано, что в фотонном кристалле, содержащем усиливающую среду, в запрещенной зоне лазерная генерация подавляется с увеличением числа ячеек фотонного кристалла, тогда как в разрешенной зоне фотонного кристалла имеется противоположная тенденция: рост числа слоев приводит к появлению генерации.
2. Определена частотная граница между разрешенной и запрещенной зоной фотонного кристалла, содержащего усиливающие компоненты. Граница совпадает с частотой, при которой пороговое значение накачки не зависит от числа ячеек фотонного кристалла.
3. Исследовано влияние внешнего магнитного поля на режимы генерации фарадеевского лазера с анизотропным резонатором. Показано, что изменение внешнего магнитного поля позволяет включать и выключать лазерную генерацию. Найдены соответствующие времена переключения.
4. Теоретически предсказан эффект синхронизации колебаний дипольных моментов отдельных наночастиц в двумерной решетке спазеров вследствие взаимодействия между наночастицей и квантовыми точками соседних спазеров. Синхронизация колебаний приводит к увеличению интенсивности излучения вследствие эффекта сверхизлучения.
5. Доказано, что электродинамическая система может удовлетворять условию PT -симметрии только при дискретном наборе. В результате, невозможно наблюдать фазовый переход при изменении частоты падающего поля в PT -симметричных и квази- PT -симметричных электродинамических системах.

Список публикаций

Статьи, опубликованные в реферируемых изданиях:

1. Dorofeenko A. V., Zyablovsky A. A., Pukhov A. A., Vinogradov A. P. Modified Fresnel approach to wave propagation in a gain slab // AIP Conference proceedings. 2010. Vol. 1291. P. 47.
2. Зябловский А. А., Дорофеев А. В., Пухов А. А. Магнитоуправляемый фарадеевский лазер на основе таммовского состояния в фотонном кристалле // Материаловедение. 2011. Т. 10. С. 25.
3. Zyablovsky A. A., Dorofeenko A. V., Vinogradov A. P., Pukhov A. A. Light propagation in photonic crystal with gain: applicability of the negative loss approxima-

- tion // *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*. 2011. Vol. 9. P. 398.
4. Зябловский А. А., Дорофеенко А. В., Пухов А. А., Виноградов А. П. Лазерная генерация в активном слое как следствие принципа причинности // *Радиотехника и электроника*. Т. 56. С. 1142. 2011.
 5. Vinogradov A. P., Zyablovsky A. A., Dorofeenko A. V., Pukhov A. A. Total internal reflection in gain medium slab // *Applied Physics A – Materials Science&Processing*. 2012. Vol. 107. P. 89.
 6. Zyablovsky A. A., Dorofeenko A. V., Vinogradov A. P., Andrianov E. S., Pukhov A. A., Lisyansky A. A. Superradiance and synchronization of 2D spaser array // *AIP Conference Proceedings*. 2012. Vol. 1475. P. 185.
 7. 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. С. 1157.
 8. 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. Vol. 21. P. 14539.
 9. 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. Vol. 89. P. 033808.

Труды конференций:

1. Dorofeenko A. V., Zyablovsky A. A., Pukhov A. A., Vinogradov A. P. // *Proc. 2nd IEEE International Workshop on THz Radiation (TERA'2010)*. 2010. P. 56
2. Виноградов А. П., Дорофеенко А. В., Зябловский А. А., Пухов А. А. // *Сборник трудов международной конференции "Фундаментальные проблемы оптики - 2010"*. 2010. С. 419
3. Зябловский А. А., Дорофеенко А. В., Пухов А. А., Виноградов А. П. // *Сборник трудов 53-й научной конференции МФТИ. Часть VIII*. С. 224. 2010.
4. Vinogradov A. P., Pukhov A. A., Dorofeenko A. V., Zyablovsky A. A. // *Proceedings ICMAT 2011*. 2011. P.43
5. Зябловский А. А., Дорофеенко А. В., Пухов А. А., Виноградов А. П., Грановский А. Б. // *Сборник трудов 54-й научной конференции МФТИ. Часть VIII*. 2011. С. 129
6. Zyablovsky A. A., Dorofeenko A. V., Vinogradov A. P., Pukhov A. A. // *Metamaterials 2012: The 6th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics*. 2012. P. 123

7. Зябловский А. А., Дорофеенко А. В., Виноградов А. П., Пухов А. А., Андрианов Е. С., Лисянский А. А. // Сборник трудов 55-й научной конференции МФТИ. Часть VIII. 2012. С. 14
8. Зябловский А. А., Виноградов А. П., Пухов А. А., Дорофеенко А. В. // Сборник трудов 56-й научной конференции МФТИ. Часть VIII. 2013. С. 110

Цитированная литература

1. Ramakrishna S., Pendry J. B. Removal of absorption and increase in resolution in a near-field lens via optical gain // *Physical Review B*. 2003. Vol. 67. P. 201101(R)
2. Longhi S. PT-symmetric laser absorber // *Physical Review A*. 2010. Vol. 82. P. 031801(R)
3. Chong Y. D., Ge L., Stone A. D. PT-symmetry breaking and laser-absorber modes in optical scattering systems // *Physical Review Letters* 2011. Vol. 106. P. 093902
4. Zheludev N. I. et al. Lasing spaser // *Nature Photonics*. 2008. Vol. 2. P. 351
5. Huang Y.-W. et al. Toroidal lasing spaser // *Scientific Reports*. 2013. Vol. 3. P. 1237
6. Suh J. Y. et al. Plasmonic bowtie nanolaser arrays // *Nano Letters*. 2012. Vol. 12. P. 5769
7. Beijnum F. et al. Surface plasmon lasing observed in metal hole arrays // *Physical Review Letters*. 2013. Vol. 110. P. 206802
8. Zhou W. et al. Lasing action in strongly coupled plasmonic nanocavity arrays // *Nature Nanotechnology*. 2013. Vol. 8. P. 506
9. Protsenko I. E. et al. Dipole nanolaser // *Physical Review A*. 2005. Vol. 71. P. 063812
10. Protsenko I. E. et al. Dipole nano-laser // *Journal of Physics: Conference Series*. 2008. Vol. 107. P. 012010
11. Банков С. Е. Электромагнитные кристаллы. М.: Физматлит, 2010. 352 с.
12. Леденцов Н. Н., Лотт Д. А. Новое поколение вертикально-излучающих лазеров как ключевой элемент компьютерно-коммуникационной эры // *Успехи Физических Наук*. 2011. Т. 181. С. 884
13. Dicke R. H. Coherence in spontaneous radiation processes // *Physical Review*. 1954. Vol. 93. P. 99
14. El-Ganainy R. et al. Theory of coupled optical PT-symmetric structures // *Optics Letters*. 2007. Vol. 32. P. 2632
15. Makris K G et al. Beam dynamics in PT symmetric optical lattices // *Physical Review Letters*. 2008. Vol. 100. P. 103904
16. Lin Z et al. Unidirectional invisibility induced by PT-symmetric periodic struc-

- tures // *Physical Review Letters*. 2011. Vol. 106. P. 213901
17. Yin X., Zhang X. Unidirectional light propagation at exceptional points // *Nature Materials*. 2013. Vol. 12. P. 175
18. Regensburger A. et al. Parity–time synthetic photonic lattices // *Nature*. 2012. Vol. 488. P. 167
19. Feng L. et al. Experimental demonstration of a unidirectional reflectionless parity-time metamaterial at optical frequencies // *Nature Materials*. 2013. Vol. 12. P. 108
20. Колоколов А. А. Отражение плоских волн от усиливающей среды // *Письма в ЖЭТФ*. 1975. Т. 21 С. 660
21. Airy G. B. On the phenomena of Newton's rings when formed between two transparent substances of different refractive powers // *Philosophical magazine*. 1833. Vol. 2. P. 20
22. Sturrock P. A. Kinematics of growing waves // *Physical Review*. 1958. Vol. 112. P. 1488.
23. Вайнштейн, Л.А., Распространение импульсов // *Успехи физических наук*. 1976. Т. 118. С. 339-367
24. Ваганов Р. Б., Каценеленбаум Б. З. Основы теории дифракции. Москва: Физматлит, 1982. 280 с.
25. Вайнштейн Л. А. Открытые резонаторы и открытые волноводы. Москва: Советское радио, 1966. 476 с.
26. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. Москва: Физматлит, 2003. 621 с.
27. Skaar J. Fresnel equations and the refractive index of active media // *Physical Review E*. 2006. Vol. 73. P. 026605
28. Bahlouli H et al. Electromagnetic wave propagation in an active medium and the equivalent Schrödinger equation with an energy-dependent complex potential // *Physical Review B*. 2005. Vol. 72. P. 094304
29. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Москва: Наука, 1970. 720 с.
30. Lamy J. M. et al. Characterization of InAs quantum wires on (001) InP: toward the realization of VCSEL structures with a stabilized polarization // *Physica Status Solidi (a)*. 2007. Vol. 204. P. 1672
31. Andrianov E. S. et al. Forced synchronization of spaser by an external optical wave // *Optics Express*. 2011. Vol. 19. P. 24849
32. Balanis C. A. Antenna theory - analysis and design, 3rd Ed. New York: Willey-Interscience, 2005. 1136 p.
33. Guo A. et al. Observation of PT-symmetry breaking in complex optical potentials // *Physical Review Letters*. 2009. Vol. 103. P. 093902

ДЛЯ ЗАМЕТОК:

ЗЯБЛОВСКИЙ Александр Андреевич

**ОПТИКА И МАГНИТООПТИКА ЛАЗЕРОВ НА ОСНОВЕ ФОТОННЫХ
КРИСТАЛЛОВ И МЕТАМАТЕРИАЛОВ**

Автореферат
