

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный
исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

**«Эффекты неоднородности инверсии населенностей уровней активной среды в динамике
сверхизлучающих лазеров с низкодобротными резонаторами»**

Аспирант: Мишин Алексей Викторович

(подпись аспиранта)

Научный руководитель:

Кочаровский Владимир Владиленович, д.ф.-м.н.,
проф., чл.-корр. РАН, зав. отд. 130 ИПФ РАН

(подпись научного руководителя)

Направление подготовки:

03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки:

01.04.03 Радиофизика

Форма обучения: очная

Нижний Новгород

2021

Актуальность темы исследования

В настоящей аспирантской работе основное внимание уделяется необычным для лазерной динамики режимам и механизмам генерации излучения, связанным с существенно неоднородными распределениями инверсии населённостей уровней активной среды и амплитуды и фазы полуволновой решётки этой инверсии, обусловленной взаимодействием встречных волн, амплитуды и фазы которых также являются неоднородными и согласованными с указанными распределениями. Ожидаемые исследованные режимы установившейся генерации, как стационарной, так и существенно нестационарной, имеющей развитый динамический спектр, являются многомодовыми с точки зрения мод лазерного резонатора, поскольку определяются взаимодействием (нелинейным усилением и брэгговским переотражением) поля встречных волн с неоднородным и, как правило, нестационарным распределением инверсии населённостей уровней активной среды и существуют благодаря наличию самосогласованных когерентных дипольных колебаний активных центров.

Именно данное новое обстоятельство, имеющее место в условиях большого времени жизни указанных дипольных колебаний по сравнению со временем жизни фотонов в низкодобротном резонаторе и поэтому неизбежно связанное с достаточно свободным выходом излучения из резонатора, а следовательно, с неоднородными структурами поля, поляризации и инверсии населённостей уровней активной среды, является ключевым в проблеме создания и изучения уникальных режимов генерации сверхизлучающих лазеров. Присутствие долговременной, непрерывной накачки делает эти режимы, включая обусловленные импульсным высвечиванием сверхизлучательных мод, качественно отличными от хорошо исследованных ранее процессов высвечивания импульсов суперфлюоресценции, т.е. коллективного спонтанного излучения Дике, из ансамблей активных центров, инвертированных коротким импульсом накачки (в том числе при наличии открытого резонатора). Вместе с тем среди решаемых фундаментальных задач определённый ряд имеет практическую направленность, например, в отношении разработки новых методов синхронизации лазерных мод и получения различных, в том числе кратных, гребёнок спектра непрерывной генерации.

В работе изучаются вполне определённые режимы указанной сверхизлучательной лазерной генерации, о существовании, грубости, физической значимости и перспективности которых позволяют судить имеющийся научный задел и уже проведённые аспирантом предварительные исследования. Поэтапное выполнение заявленного плана работы и получение соответствующих ожидаемых научных результатов, перечисленных ниже, основаны на проведённом глубоком качественном анализе происходящих в рассматриваемой системе физических явлений и выявленных механизмах когерентного взаимодействия электромагнитного поля с активными центрами. Последние распределены в пространстве вдоль

резонатора (для определённости однородно) и по частоте рабочего перехода (для определённости согласно профилю Лоренца) и находятся под действием непрерывной накачки, обеспечивающей квазистационарное поддержание или постоянное возобновление тех или иных пространственно-временных и/или частотно-временных структур в активной среде. С учётом сложности разнообразных процессов, происходящих в подобной системе, сформулированные в работе задачи и представленные результаты касаются только тех структур, которые в настоящее время являются надёжно установленными физически и могут быть с уверенностью исследованы имеющимися численными и аналитическими методами. Эти методы были апробированы многочисленными расчетами с использованием ряда программ, написанных в различных компьютерных средах для физически близких моделей ансамблей активных центров.

Степень разработанности темы исследования

Современное состояние исследований в области динамики рассматриваемых, так называемых сверхизлучающих лазеров представлено в недавнем обзоре [1], подготовленном (с соавторами) научным руководителем аспиранта А. В. Мишина. Если само явление сверхизлучения было предсказано более полувека тому назад (коллективное спонтанное излучение Дике [2]) и реализовано в виде импульсов суперфлюоресценции при импульсной накачке открытых ансамблей атомов и молекул в 70-е годы прошлого века (см., например, [3–5], а о современных экспериментах - [6–14]), то сверхизлучательная лазерная генерация при непрерывной накачке продемонстрирована только недавно и пока лишь в простейшем стационарном одномодовом режиме [15–18], а экспериментальное изучение сверхизлучательных фазовых переходов в резонаторах только начинается (см., например, [19–21]). Следует отметить, что уже около 30 лет известна возможность использования низкодобротных резонаторов (почти не препятствующих выходу излучения, но делающих важным взаимодействие встречных волн) для ослабления требований к реализации импульсов суперфлюоресценции и значительного обогащения их спектрально-временных и корреляционных свойств (см., например, [22–29]). При этом согласованная пространственно неоднородная динамика инверсии населённостей уровней первоначально возбуждённых активных центров в процессе формирования встречных импульсов коллективного спонтанного излучения хорошо изучена и по существу предопределена известным законом сохранения длины вектора Блоха.

Вместе с тем нестационарные режимы генерации сверхизлучающих лазеров и возможные пространственно неоднородные структуры самосогласованных состояний электромагнитного поля и активной среды в низкодобротных резонаторах при непрерывной накачке только ожидают своего теоретического изучения, а экспериментально ещё так и не реализованы. Дело в том, что поляризация активной среды в данной задаче, в отличие от обычных лазеров, не может быть

адиабатически исключена из уравнений Максвелла-Блоха вследствие её слабой релаксации и является независимой динамической степенью свободы, а следовательно, качественно меняет динамику лазера, преобразуя присущие ему моды резонатора в так называемые горячие моды и приводя к новым многомодовым режимам генерации, в которых под действием постоянной накачки возникает сложно устроенная, долговременная когерентность поля и поляризации. Практическая реализация подобных режимов сверхизлучательной генерации требует использования специальных схем накачки и активных сред, обладающих большой пространственной и спектральной плотностью активных центров с малым временем некогерентной релаксации колебаний их оптических дипольных моментов, что в настоящее время становится реальным (см., например, статьи [1, 14, 30] и приведённую там литературу) благодаря успехам современных технологий, особенно в области полупроводниковых многослойных гетероструктур, например, квантово-каскадных или с субмонослойными квантовыми точками или яма-точками.

Рассматриваемые в работе режимы генерации сверхизлучающих лазеров с низкодобротными резонаторами упоминались в общих чертах в недавних работах научного руководителя аспиранта А. В. Мишина, в том числе совместных (см. список работ научного руководителя и аспиранта), однако детально не изучались ни аналитически, ни численно. Такой анализ представляется чрезвычайно важным как для предстоящих попыток экспериментальной реализации новых режимов сверхизлучательной генерации, так и для решения ряда проблем фундаментальной физики многочастичных систем с радиационным взаимодействием и осуществления приложений ожидаемых уникальных режимов лазерной динамики в информационной оптике и широкополосной спектроскопии различных сред.

Цели диссертационного исследования

Диссертация нацелена на выявление путём детального исследования результатов численного моделирования и на качественный теоретический анализ новых режимов генерации сверхизлучающих лазеров и новых когерентных состояний ансамблей активных центров в них, которые возникают благодаря согласованным неоднородным распределениям инверсии населённостей уровней активной среды и полуволновой решётки этой населённости. Немаловажной целью является также исследование возможностей реализации и управления уникальными коллективными состояниями активных центров и внутррезонаторного поля, а следовательно, спектрально-динамическими свойствами выходящего излучения для различных активных сред, прежде всего полупроводниковых гетероструктур. Именно с использованием последних в дальнейшем планируется осуществить реализацию рассматриваемых режимов сверхизлучательной генерации, установить конкретные физические механизмы их

функционирования и выяснить степень их зависимости от характера и особенно неоднородного профиля накачки, а также от тех или иных параметров гетероструктур, прежде всего, от скоростей некогерентных релаксационных процессов и неоднородного уширения резонансных рабочих частот активных центров.

Задачи диссертационного исследования

В задачи диссертационного исследования входит выявление и анализ новых когерентных состояний ансамблей активных центров в низкодобротных резонаторах и связанных с этими состояниями оригинальных режимов генерации:

1. квазистационарных в форме независимых сильно неоднородных горячих мод с согласованной динамикой поля и поляризации активной среды при фиксированных спектральном и пространственном распределениях инверсии населённостей её рабочих уровней;

2. асимметричных – стационарного, автомодуляционного, метастабильного –, обусловленных спонтанным нарушением симметрии генерации в симметричном резонаторе как Фабри-Перо, так и комбинированном с распределённой обратной связью встречных волн;

3. двухпериодных с совместным существованием (благодаря параметрической и нелинейной взаимосвязи) квазипериодической импульсной динамики сверхизлучательных мод и квазистационарной динамики синхронизованных между собой квазиэквидистантных мод, обеспечивающих формирование солитоноподобного импульса когерентных поля и поляризации активной среды и его периодическую циркуляцию в резонаторе;

4. высококогерентных состояний поля и активной среды и соответствующих режимов генерации в условиях двойного резонанса – параметрического (основного) с двукратным превышением разности частот определённых компонент двух сверхизлучательных мод над межмодовым интервалом квазиэквидистантных мод и временного (вынужденного) с целочисленным отношением периодов последовательностей сверхизлучательных и солитоноподобных импульсов лазерного поля.

Научная новизна работы

1. Будут найдены спектральные свойства и пространственная структура горячих мод в лазерах класса C и D с низкодобротными комбинированными резонаторами Фабри-Перо при наличии распределённой обратной связи встречных волн.

2. На основе численного моделирования будет обнаружено и качественно объяснено спонтанное нарушение симметрии генерации встречных волн в симметричном резонаторе Фабри-Перо (в том числе при наличии распределённой обратной связи волн); будут определена область параметров лазера и накачки, необходимых для подобной асимметричной генерации, в

том числе в условиях её автомодуляции, и выявлены пространственная неоднородность и физические особенности создаваемой встречными волнами решётки инверсии населённостей уровней активной среды с однородным уширением спектральной линии рабочего перехода.

3. Будут установлены происхождение и свойства метастабильности указанной асимметричной генерации в определённой области параметров лазера и накачки, при которых после каждого длительного периода такой генерации, возможно с автомодуляцией, происходит самопроизвольный переход к зеркально симметричной структуре внутрирезонаторного поля и поляризации активной среды с соответствующим зеркальным изменением неоднородных профилей инверсии населённостей уровней и динамической решётки этой населённости.

4. Будут найдены режимы генерации с сосуществующими квазипериодическими последовательностями когерентных импульсов сверхизлучения, создаваемых одной или несколькими нестационарными сверхизлучательными модами, и обходящих резонатор импульсов, создаваемых самосинхронизованными квазистационарными почти эквидистантными модами, в условиях большого неоднородного уширения спектральной линии активной среды, находящейся под действием непрерывной накачки; будут развиты методы управления пространственно-временными характеристиками, динамическим спектром и когерентными свойствами указанных импульсных последовательностей за счёт изменения лазерных параметров, в том числе с переходом к условиям кратности периодов следования сверхизлучательных и солитоноподобных импульсов двух указанных последовательностей.

5. Будет разработан когерентный параметрический механизм возбуждения сфазированных колебаний пар синхронизованных квазистационарных мод за счёт нелинейных биений определённых компонент двух сверхизлучательных мод на частоте, вдвое превышающей межмодовый интервал этих синхронизованных квазиэквидистантных мод, а также выявлена параметрическая и нелинейная связь между различными модами на основе анализа особенностей неоднородной пространственно-временной структуры, спектрально-динамических и корреляционных свойств поля, поляризации и инверсии населённостей уровней активной среды в указанных режимах генерации в отсутствие какого-либо дополнительного насыщающегося поглотителя или какой-либо внешней модуляции элементов лазера; будут определены возможности повышения стабильности подобной самосинхронизации мод и устойчивости формируемых ими солитоноподобных структур в условиях двойного резонанса, когда исходный (основной) параметрический резонанс дополняется временным резонансом, отвечающим кратности периодов следования сверхизлучательных и солитоноподобных импульсов.

Теоретическая значимость работы

Теоретическую значимость настоящих исследований определяет фундаментальный характер впервые детально проанализированных свойств самосогласованных когерентных состояний электромагнитного поля, поляризации и инверсии населённостей ансамбля активных центров в низкодобротном резонаторе в присутствии постоянной некогерентной накачки.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы связана с нахождением необычных физических механизмов и оригинальных режимов лазерной генерации, которые не характерны для сложившейся физики лазеров и позволяют рассчитывать на разработку новых методов создания когерентного импульсного излучения с уникальными спектрально-временными свойствами в простейших условиях помещения в однородный низкодобротный резонатор однородной активной среды под действием однородной некогерентной непрерывной накачки, включая разработку новых механизмов самосинхронизации лазерных мод и получение когерентного излучения, содержащего компоненты с двумя кратными спектральными гребёнками.

Методология и методы исследования

Основными методами исследования в данной работе являются качественный и количественный анализ результатов численного моделирования динамики 2-уровневой модели 1-мерного сверхизлучающего лазера, полученных на основе полуклассических нелинейных уравнений Максвелла – Блоха с соответствующими начальными и граничными условиями, и аналитическое и численное решение характеристических уравнений, полученных линеаризацией указанных исходных уравнений применительно к одно- и двухсекционному вариантам лазера.

Положения, выносимые на защиту

1. Выявленные широкие возможности управления неэквидистантностью, инкрементами/декрементами и неоднородностью структуры горячих мод сверхизлучающих лазеров, образованных активной средой с неоднородным уширением спектральной линии и низкодобротным комбинированным резонатором Фабри-Перо с распределённой обратной связью встречных волн, позволяют реализовать уникальные когерентные состояния ансамбля активных центров и их собственного поля излучения с разнообразной неоднородной структурой в координатном и частотном пространстве и согласованной нелинейной динамикой мод при наличии непрерывной некогерентной накачки.

2. В однородном сверхизлучающем лазере класса D с почти однородным уширением спектральной линии и низкодобротным симметричным резонатором существуют

самосогласованные асимметричные состояния поля, поляризации и инверсии населённостей активной среды, которые характеризуются значительно различающимися интенсивностями излучения, выходящего из противоположных торцов лазера, и могут быть как стационарными, так и подверженными автомодуляции и метастабильным переходам между двумя зеркально симметричными структурами.

3. В лазере класса С с неоднородным уширением спектральной линии и низкодобротным комбинированным резонатором Фабри-Перо с распределённой обратной связью встречных волн возможна самосинхронизация части квазимонохроматических мод на крыльях спектра генерации в условиях параметрического резонанса их биений с биениями двух существенно нестационарных (сверхизлучательных) мод на краях запрещённой фотонной зоны в центре спектра генерации, причём действие такого параметрического когерентного механизма во многом определяет формирование солитоноподобного импульса, периодически обходящего резонатор, в отсутствие внешних воздействий или дополнительных нелинейных элементов в лазере.

4. В спектре многомодового сверхизлучающего лазера класса С, имеющего симметричный низкодобротный комбинированный резонатор Фабри-Перо с распределённой обратной связью встречных волн, при определённых условиях происходит спонтанное формирование двух кратных гребёнок, одна из которых образована частично самосинхронизованными квазимонохроматическими модами, создающими циркулирующий по резонатору солитоноподобный импульс, а другая – двумя сверхизлучательными модами, обуславливающими генерацию периодической последовательности когерентных импульсов, интервал между которыми в целое число раз превышает период обхода резонатора светом.

Степень достоверности полученных результатов

Достоверность результатов проведенных в работе исследований обеспечивается адекватным выбором использованных физических моделей рассматриваемых явлений, проверенной корректностью описывающих их уравнений и численных методов решения последних, согласованностью найденных решений с известными в ряде частных случаев и непротиворечивой интерпретацией всей совокупности выясненных свойств изученных физических систем.

Апробация результатов работы

Изложенные в диссертации результаты были представлены на следующих конференциях:
— XXIII – XXV Международных симпозиумах «Нанофизика и нанoeлектроника» (гор. Нижний Новгород, 2019 – 2021 гг.);

— Международных конференциях по лазерам, элетрооптике и квантовой электронике CLEO/Europe-EQEC 2019, CLEO/Europe-EQEC 2021 (Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference) (Мюнхен, Германия, 23 июня – 27 июня 2019 г.; виртуальная конференция, 21 июня – 25 июня 2021 г.)

— 29-я Международной Крымской конференция “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2019) (г. Севастополь, 8 сентября – 14 сентября 2019 г.);

— Международном симпозиума по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (КОИПСС-2019) (г. Москва, ФИАН, НИЯУ МИФИ, 18 ноября – 20 ноября 2019 г.);

— XIX Научной школе «Нелинейные волны – 2020» (г. Нижний Новгород, 29 февраля – 6 марта 2020 г.);

— 23-й Международной виртуальной конференции по фотонике Photonics North 2021 (31 мая – 2 июня 2021 г.)

Личный вклад автора в получение результатов

Автор внес весомый вклад в получение основных результатов научно-квалификационной работы на ряде ее этапов, включая обзор возможных параметров реальных активных сред и выбор надлежащих параметров сверхизлучающего лазера для последующего численного моделирования при помощи описывающих его нелинейных интегро-дифференциальных уравнений, расчёт и анализ свойств горячих мод для различных параметров лазерной модели, статистический анализ характеристик сверхизлучательных и солитоноподобных импульсов и свойств их последовательностей для различных временных интервалов и режимов лазерной генерации, сравнительный анализ динамических спектров и пространственно-временных структур внутрирезонаторных самосогласованных состояний поля, поляризации и инверсии населённостей активной среды, а также физическую интерпретацию выявленных динамических закономерностей и пространственно-спектральных структур в сверхизлучающем лазере.

Публикации

Оригинальные результаты по теме диссертационного исследования представлены в 15 публикациях, из которых 6 – в рецензируемых научных изданиях [A1–A6], в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 1 – публикация по материалам конференций [A9], 8 – тезисы по результатам научных конференций [A7–A8, A10–A15].

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, благодарностей, списка работ автора по теме диссертации, содержащего 15 наименований и списка литературы, содержащего 193 источника. Общий объем диссертации составляет 149 страниц, включая 54 рисунка и 4 таблицы.

Содержание работы

Глава 1 посвящена основным уравнениям исследуемой модели сверхизлучающего лазера – нелинейным и линеаризованным, их общей характеристике и краткому описанию некоторых известных и ожидаемых физических явлений, моделирование которых возможно с использованием представленных уравнений и на ряде примеров будет проведено в следующих главах. Особое внимание уделяется отличиям предложенного описания от принятого в физике обычных лазеров класса В, а также возможности генерации так называемых поляритонных мод, отсутствующих в этих лазерах. Ранее поляритонные моды в основном исследовались для поглощающей среды с отрицательной инверсией населённостей уровней, тогда как для данной работы существенны поляритонные моды в инвертированной, активной среде (например гетеролазеров, в которых поляритон формирует экситон и фотон), где дисперсия оказывается качественно иной и наряду с инкрементами мод в существенной мере зависит от соотношения величины кооперативной частоты в среде с положительной инверсией населённостей и ширины запрещённой фотонной зоны частот резонатора Фабри-Перо с распределённой обратной связью встречных волн (ФП-РОС). В ходе проведённой работы начато детальное изучение поляритонных мод в сверхизлучающих лазерах с подобными комбинированными резонаторами.

Результаты, представленные в первой главе, опубликованы в [A1, A3, A7 – A9].

В **Главе 2** исследовано явление спонтанного нарушения симметрии пространственных профилей встречных волн электромагнитного поля, а также поляризации и инверсии населённостей уровней активной среды в сверхизлучающем лазере с симметричным низкодобротным резонатором, происходящее благодаря создаваемой этими волнами полуволновой модуляции колебаний поляризации и связанной с ней нелинейной решётке инверсии населённостей. Проведён качественный анализ результатов численного моделирования с целью выяснения условий существования и областей устойчивости асимметричной генерации, нахождения пространственной структуры самосогласованных полей, установления характера их автомодуляции и изучения метастабильности - самопроизвольного переключения между

зеркально симметричными состояниями. Найденное явление асимметричной генерации, сопровождающееся устойчивым (стационарным или автомодуляционным) смещением к одному из торцов лазера профилей распределения поля, поляризации и инверсии населённостей активной среды, имеет характер неравновесного (динамического) фазового перехода и существенно отличается от структурного фазового перехода Дике, наблюдавшегося для ансамбля атомов, находящихся в резонаторе под действием внешнего когерентного излучения в отсутствие непрерывной некогерентной накачки.

Результаты, представленные во второй главе, опубликованы в [A9, A10, A14].

В **Главе 3** анализируются эффективное нелинейное (параметрическое) возбуждение и одновременное фазирование значительной части квазиэквидистантных мод, имеющие место, если межмодовое расстояние для последних примерно в целое число раз меньше разности частот двух наиболее добротных центральных мод лазерного спектра, расположенных по краям запрещённой фотонной зоны и обладающих наибольшими амплитудами. Данное явление связано с когерентными биениями двух указанных мод, которые могут быть сверхизлучательными, автомодуляционными или квазистационарными, но в любом случае оказывают существенное влияние на четырёхволновое взаимодействие синхронизирующихся мод посредством резонансной нелинейной модуляции пространственно-временной динамики поляризации и инверсии населённостей активной среды. Согласно сделанным оценкам, в частности, для лазерных многослойных гетероструктур с субмонослойными квантовыми точками или яма-точками можно ожидать получения вполне стабильных последовательностей из сотен субпикосекундных импульсов без использования дополнительных устройств типа насыщающегося поглотителя или линзы Керра.

Проводится качественный анализ результатов численного моделирования одновременной генерации различных квазипериодических последовательностей импульсов в многомодовом сверхизлучающем лазере с непрерывной накачкой и самосинхронизацией части мод. Для типичных параметров сверхизлучающей активной среды с сильным неоднородным уширением спектральной линии на ряде характерных примеров комбинированных низкодобротных резонаторов Фабри-Перо с распределённой обратной связью волн (ФП-РОС) выясняются основные свойства динамических спектров генерируемых мод и особенности статистики формируемых ими импульсов. Рассмотрены лазеры как с существенно асимметричным, так и с почти симметричным спектром мод, который в наиболее интересном случае умеренного превышения порога генерации состоит из двух сверхизлучательных и большого числа квазистационарных мод и отвечает сравнимым по мощности последовательностям (i) цугов сверхизлучательных импульсов и (ii) солитоноподобных импульсов синхронизованных мод.

Результаты, представленные в третьей главе, опубликованы в [A4 – A6, A11, A12].

В **Главе 4** изучаются условия и области лазерных параметров, при которых спектр одной или двух сверхизлучательных мод, в общем случае квазинепрерывный, становится квазидискретным, т.е. они создают практически периодическую последовательность когерентных импульсов (цугов импульсов). Выясняется, что если период следования последних кратен периоду циркуляции внутрирезонаторного солитона, т.е. имеет место второй, временной резонанс, дополнительный к рассмотренному выше параметрическому резонансу, то возможна самосинхронизация большей части квазиэквидистантных квазистационарных мод и она оказывается более устойчивой. Соответствующий режим генерации в условиях двойного резонанса отвечает наличию двух частотных гребёнок, причём квазимонохроматические моды имеют межмодовый интервал в два раза меньше, чем разность частот между некоторыми дискретными компонентами двух сверхизлучательных мод, и в целое число раз больше, чем интервал между некоторыми из этих дискретных компонент в одной и другой сверхизлучательной моде. Фактически излагаемые ниже, во многом предварительные результаты являются детализацией ряда изученных в главе 3 режимов генерации сверхизлучающих лазеров применительно к проблеме реализации указанного эффекта двойного резонанса.

Результаты, представленные в четвертой главе, опубликованы в [A2, A13, A15].

Основные результаты работы

1. На основе сравнительного анализа спектральных характеристик (инкрементов/декрементов и пространственных структур) горячих мод сверхизлучающих лазеров класса C, D с сильным и слабым неоднородным уширением рабочего перехода активной среды и низкодобротным комбинированным резонатором Фабри-Перо с распределённой обратной связью встречных волн указаны области лазерных параметров, позволяющие реализовать предложенные уникальные режимы генерации, включая спонтанное нарушение зеркальной симметрии, параметрическую когерентную самосинхронизацию мод, формирование двух кратных спектральных гребёнок, двухпериодную генерацию в условиях двойного резонанса и др.

2. Показана возможность спонтанного нарушения симметрии пространственных профилей встречных волн электромагнитного поля, а также поляризации и инверсии населённостей уровней активной среды в установившемся монохроматическом режиме генерации сверхизлучающего лазера с симметричным низкодобротным резонатором,

происходящего благодаря создаваемой этими волнами нелинейной решётке инверсии населённостей.

3. Установлены особенности автомодуляции и метастабильных переходов между двумя зеркально симметричными структурами самосогласованных асимметричных состояний поля, поляризации и инверсии населённостей активной среды, которые характеризуются существенно различным излучением, выходящим из противоположных торцов сверхизлучающего лазера класса D с почти однородным уширением спектральной линии и низкодобротным симметричным резонатором.

4. Разработаны основные представления и выяснены общие качественные свойства параметрического когерентного механизма самосинхронизации части квазимонохроматических мод на крыльях спектра генерации сверхизлучающего лазера класса C, в общем случае несимметричного, с неоднородным уширением спектральной линии и низкодобротным комбинированным резонатором Фабри-Перо с распределённой обратной связью встречных волн, действующего при наличии параметрической связи между биениями двух существенно нестационарных (сверхизлучательных) мод на краях запрещённой фотонной зоны в центре спектра генерации и биениями каждой из пар синхронизованных мод.

5. Для сверхизлучающего лазера класса C с симметричным низкодобротным комбинированным резонатором Фабри-Перо с распределённой обратной связью встречных волн выявлены особенности, преимущества и недостатки реализации параметрического когерентного механизма синхронизации части квазимонохроматических мод на крыльях спектра генерации, обуславливающего образование и конкуренцию солитоноподобных импульсов, циркулирующих по резонатору, в отсутствие сторонних воздействий и дополнительных нелинейных элементов в лазере.

6. Для указанного многомодового сверхизлучающего лазера класса C с симметричным низкодобротным комбинированным резонатором определены условия, при которых происходит спонтанное формирование двух кратных спектральных гребёнок, состоящих из частично самосинхронизованных квазимонохроматических мод на крыльях спектра генерации и дискретных компонент двух сверхизлучательных мод на краях запрещённой фотонной зоны в центре спектра генерации и согласованных с когерентным периодическим излучением соответствующих солитоноподобных и сверхизлучательных импульсов (цугов импульсов), интервалы следования которых отличаются в целое число раз.

7. Найдены характерные свойства и необходимые условия генерации двух квазипериодических разнопериодных последовательностей когерентных импульсов сверхизлучающим лазером класса C с низкодобротным комбинированным резонатором, не обязательно симметричным, при наличии явления двойного резонанса – параметрического, когда

разность частот определённых спектральных компонент двух нестационарных мод на краях запрещённой фотонной зоны примерно вдвое превышает межмодовый интервал квазимонохроматических мод вдали от этой зоны, и временного, когда период следования импульсов (цугов импульсов) сверхизлучения одной или двух указанных нестационарных мод примерно кратен периоду обхода резонатора солитоноподобным импульсом (не обязательно единственным), образованным частично синхронизованными квазистационарными модами.

Список литературы

1. Кочаровский, Вл. В. Сверхизлучение: принципы генерации и реализация в лазерах / Вл. В. Кочаровский, В. В. Железняков, Е. Р. Кочаровская, В. В. Кочаровский // Успехи физических наук. – 2017. – Т. 187, № 4. – С. 367–410.
2. Dicke, R. H. Coherence in Spontaneous Radiation Processes / R. H. Dicke // Physical Review. – 1954. – Vol. 93, No. 1. – P. 99.
3. Observation of Dicke Superradiance in Optically Pumped HF Gas / N. Skribanowitz, I. P. Herman, J. C. MacGillivray, M. S. Feld // Physical Review Letters. – 1973. – Vol. 30, No. 8. – P. 309.
4. MacGillivray, J. C. Theory of superradiance in an extended, optically thick medium / J. C. MacGillivray, M. S. Feld // Physical Review A. – 1976. – Vol. 14, No. 3. – P. 1169.
5. Gibbs, H. M. Single-Pulse Superfluorescence in Cesium / H. M. Gibbs, Q. H. F. Vrehen, H. M. J. Hikspoors // Physical Review Letters. – 1977. – Vol. 39, No. 9. – P. 547.
6. Cooperative recombination of electron-hole pairs in semiconductor quantum wells under quantizing magnetic fields / Y. D. Jho, X. Wang, D. H. Reitze, J. Kono, A. A. Belyanin, V. V. Kocharovskiy, V. V. Kocharovskiy, G. S. Solomon // Physical Review B. – 2010. – Vol. 81, No. 15. – P. 155314.
7. Fermi-edge superfluorescence from a quantum-degenerate electron-hole gas / J.-H. Kim, G. T. Noe II, S. A. McGill, Y. Wang, A. K. Wójcik, A. A. Belyanin, J. Kono // Scientific Reports. – 2013. – Vol. 3, No. 1. – P. 3283.
8. Super-radiant mode in InAs-monolayer-based Bragg structures / G. Pozina, M. A. Kaliteevski, E. V. Nikitina, D. V. Denisov, N. K. Polyakov, E. V. Pirogov, L. I. Goray, A. R. Gubaydullin, K. A. Ivanov, N. A. Kaliteevskaya, A. Yu. Egorov, S. J. Clark // Scientific Reports. – 2015. – Vol. 5, No. 1. – P. 14911.
9. Superradiance of quantum dots / M. Scheibner, T. Schmidt, L. Worschech, A. Forchel, G. Bacher, T. Passow, D. Hommel // Nature Physics. – 2007. – Vol. 3, No. 2. – P. 106–110.

10. Transitions from spontaneous emission to stimulated emission and superfluorescence of biexcitons confined in CuCl quantum dots / L. Q. Phuong, K. Miyajima, K. Maeno, T. Itoh, M. Ashida // *Journal of Luminescence*. – 2013. – Vol. 133. – P. 77–80.
11. Quantum fluctuations of superfluorescence delay observed with ultrashort optical excitations / G. O. Ariunbold, V. A. Sautenkov, M. O. Scully // *Physics Letters A*. – 2012. – Vol. 376, No. 4. – P. 335–338.
12. Long-range order in a high-density electron-hole system at room temperature during superradiant phase transition / P. P. Vasil'ev, V. Olle, R. V. Penty, I. H. White // *Europhysics Letters*. – 2013. – Vol. 104, No. 4. – P. 40003.
13. Coherence in Spontaneous Radiation Processes / A. Ishikawa, K. Miyajima, M. Ashida, T. Itoh, H. Ishihara // *Journal of the Physical Society of Japan*. – 2016. – Vol. 85, No. 3. – P. 034703.
14. Dicke superradiance in solids / K. Cong, Q. Zhang, Y. Wang, G. T. Noe, A. Belyanin, J. Kono // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2016. – Vol. 33, No. 7. – P. C80–C101.
15. A steady-state superradiant laser with less than one intracavity photon / J. G. Bohnet, Z. Chen, J. M. Weiner, D. Meiser, M. J. Holland, J. K. Thompson // *Nature*. – 2012. – Vol. 484, No. 2810. – P. 78–81.
16. Phase synchronization inside a superradiant laser / J. M. Weiner, K. C. Cox, J. G. Bohnet, J. K. Thompson // *Physical Review A*. – 2017. – Vol. 95, No. 3. – P. 033808.
17. Superradiance on the millihertz linewidth strontium clock transition / M. A. Norcia, M. N. Winchester, J. R. K. Cline, J. K. Thompson // *Science Advances*. – 2016. – Vol. 2, No. 10. – P. e1601231.
18. Norcia, M. A. Cold-Strontium Laser in the Superradiant Crossover Regime / M. A. Norcia, J. K. Thompson // *Physical Review X*. – 2016. – Vol. 6, No. 1. – P. 011025.
19. Dicke quantum phase transition with a superfluid gas in an optical cavity / K. Baumann, C. Guerlin, F. Brennecke, T. Esslinger // *Physical Review X*. – 2010. – Vol. 464, No. 4505. – P. 1301–1306.
20. Guerin, W. Subradiance in a Large Cloud of Cold Atoms / W. Guerin, M. O. Araújo, R. Kaiser // *Physical Review Letters*. – 2016. – Vol. 116, No. 8. – P. 083601.
21. Exploring Symmetry Breaking at the Dicke Quantum Phase Transition / K. Baumann, R. Mottl, F. Brennecke, T. Esslinger // *Physical Review Letters*. – 2011. – Vol. 107, No. 14. – P. 140402.
22. Florian, R. Time-resolving experiments on Dicke superfluorescence of O_2^- centers in KCl. Two-color superfluorescence / R. Florian, L. O. Schwan, D. Schmid // *Physical Review A*. – 1984. – Vol. 29, No. 5. – P. 2709.
23. Schiller, A. Spatial coherence in large-sample superfluorescence of O_2^- centers in KCl / A. Schiller, L. O. Schwan, H. D. Schmid // *Journal of Luminescence*. – 1988. – Vol. 40–41. – P. 541–542.

24. Dynamics of superradiant media in a resonator / A. M. Basharov, G. G. Grigoryan, N. V. Znamenskiy, Yu. V. Orlov, A. Yu. Shashkov, T. G. Yukina // *Quantum Electronics*. – 2009. – Vol. 39, No. 3. – P. 251–255.
25. Железняков, В. В. Сверхизлучение и диссипативная неустойчивость в инвертированной двухуровневой системе / В. В. Железняков, В. В. Кочаровский, Вл. В. Кочаровский // *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики*. – 1984. – Т. 87, № 5. – С. 1565.
26. Андреев, А. В. Оптическое сверхизлучение: новые идеи и новые эксперименты / А. В. Андреев // *Успехи физических наук*. – 1990. – Т. 160, № 12. – С. 1–46.
27. Gross, M. Superradiance: An essay on the theory of collective spontaneous emission / M. Gross, S. Haroche // *Physics Reports*. – 1982. – Vol. 93, No. 5. – P. 301–396.
28. Kocharovsky, V. V. Mode instability and nonlinear superradiance phenomena in open Fabry-Perot cavity / V. V. Kocharovsky, Vl. V. Kocharovsky, E. R. Golubyatnikova // *Computers and Mathematics with Applications*. – 1997. – Vol. 34, No. 7–8. – P. 773–793.
29. Железняков, В. В. Волны поляризации и сверхизлучение в активных средах / В. В. Железняков, В. В. Кочаровский, Вл. В. Кочаровский // *Успехи физических наук*. – 1989. – Т. 159, № 4. – С. 194–260.
30. Vuković, N. N. Low-Threshold RNGH Instabilities in Quantum Cascade Lasers / N. N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović, D. L. Boiko // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2017. – Vol. 23, No. 6. – P. 1200616.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Comparative analysis of the dynamical spectra of a polarization of an active medium and an electromagnetic field in the superradiant heterolasers / Vl. V. Kocharovsky, A. S. Gavrillov, E. R. Kocharovskaya, A. V. Mishin, I. S. Ryabinin, A. F. Selezhev, V. V. Kocharovsky // *Breakthrough directions of scientific research at MEPHI. KnE Engineering: Conference Paper*. – 2018. – Vol. 3, No. 6. – P. 160–173.
- A2. Спектрально-динамические особенности поляризации активной среды и пространственно-временные эмпирические моды лазера с низкодобротным резонатором / Е. Р. Кочаровская, А. С. Гаврилов, В. В. Кочаровский, Е. М. Лоскутов, А. В. Мишин, Д. Н. Мухин, А. Ф. Селезнев, Вл. В. Кочаровский // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. – 2018. – Т. 61, № 11. – С. 906–936.

А3. Особенности одновременной генерации низко- и высокочастотных мод в гетеролазерах на квантовых точках с большим временем некогерентной релаксации оптических дипольных колебаний / Е. Р. Кочаровская, А. В. Мишин, И. С. Рябинин, В. В. Кочаровский // Физика и техника полупроводников. – 2019. – Т. 53, № 10. – С. 1329–1337.

А4. Параметрический эффект в сверхизлучающем лазере с самосинхронизацией мод / Вл. В. Кочаровский, А. В. Мишин, А. Ф. Селезнёв, Е. Р. Кочаровская, В. В. Кочаровский // Теоретическая и математическая физика. – 2020. – Т. 203, № 1. – С. 56–77.

А5. Существование когерентных импульсов сверхизлучательных и квазистационарных мод в лазере с низкочастотным резонатором / Е. Р. Кочаровская, А. В. Мишин, А. Ф. Селезнев, В. В. Кочаровский, Вл. В. Кочаровский // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2020. – Т. 63, № 11. – С. 985–1007.

А6. Зависимость спектра генерации и синхронизации мод от ширины запрещённой фотонной зоны в гетеролазерах класса С с распределённой обратной связью волн в резонаторе Фабри-Перо / Е. Р. Кочаровская, В. А. Кукушкин, А. В. Мишин, Вл. В. Кочаровский, В. В. Кочаровский // Физика и техника полупроводников. – 2021 (принята к печати).

А7. Е. Р. Кочаровская, А. В. Мишин, И. С. Рябинин «Одновременная генерация низко- и высокочастотных мод в гетеролазерах на квантовых точках: спектрально-корреляционный анализ» // Тезисы докладов XXIII Международного симпозиума "Нанопизика и нанозлектроника" (г. Нижний Новгород (Нижегородская обл.), 11 – 14 марта 2019 г.), Т.2, С. 722 – 723 (2019).

А8. Vladimir Kocharovsky, Alexey Mishin, Vitaly Kocharovsky, Ekaterina Kocharovskaya, Alexey Seleznev "Superradiance as a Way to the Steady-State Multimode and Ultrashort Pulsed Lasing in CW Quantum-Dot Heterolasers" // CLEO/Europe-EQEC 2019 abstracts, (23 - 27 June 2019, Munich, Germany).

А9. Ekaterina Kocharovskaya, Alexey Mishin and Ivan Ryabinin "Features of mode selection in a combined Fabry-Perot cavity with distributed feedback of counter-propagating waves" // ITM Web Conf. | 29th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2019) | Conference Paper, Vol. 30, 2019, 08009 (2019) (doi.org/10.1051/itmconf/20193008009).

А10. А. В. Мишин, Е. Р. Кочаровская, И. В. Корюкин, Вл. В. Кочаровский, В. В. Кочаровский «Эффект спонтанного нарушения симметрии излучения сверхизлучающего гетеролазера с симметричным низкочастотным резонатором» // Сборник тезисов докладов VII Международного симпозиума по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (КОИПСС-2019) (г. Москва, ФИАН, НИЯУ МИФИ, 18 ноября – 20 ноября 2019 г.), С. 63 – 64 (2019).

A11. А. В. Мишин «Параметрическое взаимодействие и самосинхронизация мод в сверхизлучающем лазере» // Тезисы докладов XIX научной школы «Нелинейные волны – 2020» (г. Нижний Новгород, 29 февраля – 6 марта 2020 г.), С. 174 (2020).

A12. А. В. Мишин, А. Ф. Селезнев, Е. Р. Кочаровская, И. В. Корюкин, В. В. Кочаровский, Вл. В. Кочаровский «Биения сверхизлучательных мод как параметрический механизм синхронизации квазиэквидистантных мод гетеролазера: Анализ спектра горячих мод и динамического спектре генерации» // Тезисы докладов XXIV Международного симпозиума "Нанопфизика и наноэлектроника" (г. Нижний Новгород (Нижегородская обл.), 10 – 13 марта 2020 г.), Т.2, С. 667 – 668 (2020).

A13. Vladimir Kocharovsky, Ekaterina Kocharovskaya, Alexey Mishin, Alexey Seleznev "Double Resonance and Coherent Parametric Self-Mode-Locking in CW Superradiant Lasing" // 23rd Photonics North Conference abstracts (31 May– 2 June 2021, accepted).

A14. Vitaly Kocharovsky, Vladimir Kocharovsky, Ekaterina Kocharovskaya, Alexey Mishin "Novel Steady-State Light-Matter Phase" // 23rd Photonics North Conference abstracts (31 May – 2 June 2021, accepted).

A15. Vladimir Kocharovsky, Alexey Mishin, Vitaly Kocharovsky, Ekaterina Kocharovskaya, Alexey Seleznev " Simultaneous generation of pulse trains with different periods in a class C quantum-dot heterolaser" // CLEO/Europe-EQEC 2021 abstracts, (21 – 25 June 2021, accepted).