

На правах рукописи



Мишин Алексей Викторович

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОД
И ЭФФЕКТЫ НЕОДНОРОДНОСТИ
ИНВЕРСИИ НАСЕЛЕННОСТЕЙ УРОВНЕЙ
АКТИВНОЙ СРЕДЫ
В ДИНАМИКЕ СВЕРХИЗЛУЧАЮЩИХ ЛАЗЕРОВ
С НИЗКОДОБРОТНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ**

1.3.4 – радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН, Нижний Новгород)

Научный руководитель: Кочаровский Владимир Владиленович, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты: Мельников Леонид Аркадьевич, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина» (СГТУ) (г. Саратов)

Фотиади Андрей Александрович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет» (УлГУ) (г. Ульяновск)

Ведущая организация: Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского – обособленное структурное подразделение ФГБУН «ФИЦ «Казанский научный центр РАН» (г. Казань)

Защита диссертации состоится «12» декабря 2022 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.238.01 в Институте прикладной физики РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46)

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте [iprfpan.ru](http://rfpan.ru) ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук».

Автореферат разослан «8» ноября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук



Э. Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы исследования

В настоящей диссертационной работе основное внимание уделяется необычным для лазерной динамики режимам и механизмам генерации излучения, связанным с взаимодействием мод в условиях существенно неоднородного распределения инверсии населённостей уровней активной среды и амплитуды и фазы полуволновой решётки этой инверсии населённостей, обусловленной взаимодействием встречных волн, амплитуды и фазы которых также являются неоднородными и согласованными с указанными распределениями. Ожидаемые исследуемые 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 (ср., скажем, [1, 2]).

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 квантовой радиофизики 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, информацию о существовании, грубости, физической значимости и перспективности которых призваны дать полученные научные результаты. Сделанные выводы 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 про-

странстве 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, поставленные в работе задачи и сформулированные результаты касаются только тех структур, которые в настоящее время представляются надёжно установленными физически и могут быть с уверенностью исследованы имеющимися численными и аналитическими методами. Эти методы были апробированы на основе многочисленных расчетов с использованием ряда известных 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 [2], подготовленном (с соавторами) научным руководителем диссертанта. Если само явление сверхизлучения было предсказано более полувека тому назад (коллективное спонтанное излучение Дике [3]) и реализовано в виде импульсов суперфлюоресценции при импульсной накачке открытых ансамблей атомов и молекул в 70-е годы прошлого века (см., например, [4–6], а о современных экспериментах – [7–15]), то сверхизлучательная лазерная генерация при непрерывной накачке продемонстрирована только недавно и пока лишь в простейшем стационарном одномодовом режиме [16–19], а экспериментальное изучение сверхизлучательных фазовых переходов в резонаторах только начинается (см., например, [20–22, 2]). 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, [23–33]). 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, включающим поляризацию активной среды.

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 [2, 15, 34] 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 диссертанта, в том числе совместных (см. список работ диссертанта), 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 инфракрасной оптике и широкополосной спектроскопии различных сред.

Цели диссертационного исследования

Диссертация нацелена на качественный теоретический анализ и на детальное исследование и выявление закономерностей результатов численного моделирования новых режимов генерации сверхизлучающих лазеров и новых когерентных состояний ансамблей активных центров в них, которые возникают благодаря взаимодействию мод в условиях согласованного неоднородного распределения инверсии населённостей уровней активной среды и полуволновой решётки этой инверсии населённостей. Немаловажной целью является и исследование возможностей реализации и управления уникальными коллективными состояниями активных центров и внутрирезонаторного поля, а следовательно, спектрально-динамическими свойствами выходящего излучения для различных активных сред, прежде всего полупроводниковых гетероструктур. Именно на основе использования последних в дальнейшем ожидается реализация рассматриваемых режимов сверхизлучательной генерации, установление конкретных физических механизмов их функционирования и

выяснение степени их зависимости от характеристик используемого резонатора и уровня 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 диссертационной работы 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, бистабильного, обусловленных спонтанным нарушением зеркальной 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 синхронизированных 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. Путем решения характеристического и дисперсионного уравнений найдены спектральные свойства и пространственная структура горячих мод в лазерах класса C, D с низкодобротными комбинированными резонаторами Фабри – Перо при наличии распределённой обратной связи встречных волн и проведено сопоставление этих свойств с рассчитанными численно спектрами сверхизлучающих лазеров в различных режимах генерации.
2. На основе численного моделирования динамики сверхизлучающего лазера изучены особенности и дано качественное объяснение спонтанного нарушения зеркальной симметрии генерации встречных волн в симметричном резонаторе Фабри – Перо (в том числе при наличии распределённой

ной обратной связи волн); указана возможная область параметров лазера и непрерывной накачки, необходимых для подобной асимметричной генерации, в том числе в условиях её автомодуляции, и выявлены пространственная неоднородность и основные свойства создаваемой встречными волнами решётки инверсии населённостей уровней активной среды с однородным уширением спектральной линии рабочего перехода.

3. Установлены происхождение и свойства бистабильности указанной асимметричной генерации в определённой области параметров сверхизлучающего 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. Найдены режимы генерации с сосуществующими квазипериодическими последовательностями когерентных импульсов (цугов 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; 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 (цугов импульсов) двух указанных последовательностей.
5. 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 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; 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 получения 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 эффективных 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 и описывающих горячие моды лазера.

Положения, выносимые на защиту

1. Выявленные широкие возможности управления спектральной неэквидистантностью, инкрементами/декрементами и неоднородностью структуры горячих мод сверхизлучающих лазеров, включающих активную среду в низкодобротном комбинированном резонаторе 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 резо-

натором существуют самосогласованные асимметричные состояния поля, поляризации и инверсии населённостей уровней активной среды, которые характеризуются значительно различающимися интенсивностями излучения, выходящего из противоположных торцов лазера, и могут обладать устойчивой автомодуляцией, а также быть бистабильными, т.е. демонстрировать спонтанные переходы между двумя асимметричными состояниями, зеркально симметричными друг другу.

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 под действием такого параметрического когерентного механизма происходит 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 спектр генерации в низкодобротном комбинированном резонаторе Фабри – Перо с распределённой обратной связью встречных волн, при определённых условиях спонтанно формируются две кратные гребёнки, 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 (цугов 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 физической интерпретацией всей совокупности выясненных свойств изученных ансамблей радиационно взаимодействующих активных центров.

Апробация результатов работы

Изложенные в диссертации результаты были представлены на следующих конференциях:

- XXIII – XXV международных симпозиумах «Нанофизика и наноэлектроника» (г. Нижний Новгород, 2019 – 2022 гг.);
- международных конференциях по лазерам, электрооптике и квантовой электронике CLEO/Europe-EQEC 2019, CLEO/Europe-EQEC 2021 (Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference) (г. Мюнхен, Германия, 23 – 27 июня 2019 г.; виртуальная конференция, 21 – 25 июня 2021 г.);
- 29-й международной Крымской конференция “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2019) (г. Севастополь, 8 – 14 сентября 2019 г.);
- международных симпозиумах по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (КОИПСС) (г. Москва, ФИАН, НИЯУ МИФИ, 2019 и 2021 гг.);
- 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.);
- 30th Annual International Laser Physics Workshop “Laser Physics 2022” (18 – 28 июля 2022 г., онлайн).

Личный вклад автора

Все теоретические результаты, представленные в диссертации, получены лично автором или при его непосредственном участии. Автор непосредственно занимался анализом возможных параметров реальных активных сред и выбором надлежащих параметров сверхизлучающего лазера для численного моделирования, расчётом и анализом горячих мод для различных параметров лазерной модели, статистическим анализом характеристик сверхизлучательных и солитоноподобных импульсов, сравнительным анализом динамических спектров и пространственно-временных структур внутрирезонаторных самосогласованных состояний поля, поляризации и инверсии населённостей уровней активной среды. Автором также проработана физическая интерпретация выявленных динамических закономерностей и пространственно-спектральных структур в сверхизлучающем лазере с непрерывной накачкой.

Публикации

Оригинальные результаты по теме диссертационного исследования представлены в 22 публикациях, из которых 8 – в рецензируемых научных изданиях [A1–A8], в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 14 – тезисы докладов научных конференций [A9–A22].

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка работ автора по теме диссертации, содержащего 22 наименования, и списка литературы, содержащего 193 источника. Общий объем диссертации составляет 160 страниц, включая 60 рисунков и 4 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описаны актуальность выбора темы исследования и степень её разработанности, цели и задачи диссертации, научная новизна и методы исследования, теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту.

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 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 населённости энергетических уровней, тогда как для данной работы существенны поляритонные моды в инвертированной, активной среде (например гетеролазеров, в которых поляритон формирует экситон и фотон), где волновая дисперсия оказывается качественно иной и наряду с инкрементами мод в существенной мере зависит от соотношения величины так называемой кооперативной частоты в среде с положительной инверсией населённости 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. Асимметрия спектра этих мод возможна даже в геометрически симметричном резонаторе, где пространственная структура огибающих поля мод симметрична, и зависит не только от сдвига спектральной линии активной среды относительно частоты брэгговского резонанса, но также от фаз коэффициентов отражения зеркал и сдвига полуволновой брэгговской структуры относительно центра резонатора. В диссертации для краткости словосочетания симметричный или несимметричный резонатор иногда относятся не к его геометрическим, а к спектральным свойствам, что обычно ясно из контекста.

Раздел 1.1 посвящен обзору литературы и мотивации исследования динамики генерации и структуры когерентных состояний активной среды сверхизлучающих лазеров при непрерывной некогерентной накачке.

В разделе 1.2 изложена хорошо зарекомендовавшая себя модель сверхизлучающего лазера и описывающая её система нелинейных уравнений Максвелла – Блоха с учетом использованных приближений, вводятся необходимые обозначения и терминология, раскрывается их физический смысл.

В разделе 1.3 изучаются спектры горячих мод для широкого набора параметров с помощью численного решения дисперсионного и характеристического уравнений, полученных линеаризацией уравнений Максвелла – Блоха.

В разделе 1.4 дан обзор возможных явлений, ожидаемых на основе проведённых оценок (в том числе с использованием спектра горячих мод) и связанных с возникновением нетривиальных пространственных, спектральных и временных структур инверсии населённостей уровней активной среды.

Раздел 1.5 содержит выводы по первой главе.

Результаты, представленные в первой главе, опубликованы в [A1, A3, A9 – A11, A18].

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 уровней. 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 бистабильности – самопроизвольного переключения между зеркально симметричными состояниями. Найденное явление асимметричной генерации, сопровождающееся устойчивым (стационарным или автомодуляционным) смещением к одному из торцов лазера сильно неоднородных 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 достаточно высокодобротном резонаторе под действием внешнего однородного когерентного поля излучения в отсутствие непрерывной некогерентной накачки.

В разделе 2.1 дано общее представление о предсказанном явлении спонтанного нарушения зеркальной симметрии генерации, происходящем в симметричном сверхизлучающем лазере с однородной непрерывной накачкой.

Разделе 2.2 содержит исследование автомодуляции состоянии установившейся асимметричной генерации лазера, обусловленной близостью разности частот квазимонохроматической сверхизлучательной и двух ближайших к

ней поляритонных мод к так называемой частоте Раби-осцилляций активных центров в области пика решётки инверсии населённостей.

В **разделе 2.3** приведены примеры бистабильности асимметричной сверхизлучательной генерации, в частности, наблюдаемой при сравнимых величинах однородного и неоднородного уширения спектральной линии.

В **разделе 2.4** исследуются области параметров лазера, резонатора и накачки, при которых имеет место асимметричная генерации, и её особенности.

Раздел 2.5 содержит выводы по второй главе.

Результаты, представленные во второй главе, опубликованы в [A7, A11, A12, A16, A19 – A22].

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 явления 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 полупроводниковых 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 также 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 ФП-РОС выясняются основные свойства динамических спектров генерируемых мод и особенности статистики формируемых ими лазерных 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.

В **разделе 3.1** приводятся различные динамические спектры генерации, полученные из численного нелинейного счета, которые показывают эффек-

тивность синхронизации мод при параметрическом резонансе биений нестационарных (сверхизлучательных) мод с биениями квазистационарных мод.

В разделе 3.2 представлены особенности установившейся генерации сверхизлучательных мод и самосинхронизации квазиэквидистантных мод в лазерах с существенно несимметричными и почти симметричными спектрами, когда периоды следования импульсов различных сверхизлучательных мод оказываются тоже существенно различными или почти равными.

Раздел 3.3 посвящен вопросам конкуренции солитоноподобных импульсов частично синхронизованных мод в лазерах с симметричными спектрами и использованию динамических спектров поляризации и инверсии населённости для качественного анализа явления параметрической синхронизации.

Раздел 3.4 содержит сравнительный анализ качества синхронизации мод и солитоноподобных импульсов для лазеров с различными параметрами.

Раздел 3.5 содержит выводы по третьей главе.

Результаты, представленные в третьей главе, опубликованы в [A4 – A6, A10, A13 – A14, A17,].

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 гребенок, 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. Излагаемые здесь результаты являются детализацией ряда изученных в главе 3 режимов генерации сверхизлучающих лазеров применительно к проблеме реализации указанного эффекта двойного резонанса и выяснения его преимуществ.

В разделе 4.1 обсуждаются важные для дальнейшего изложения особенности временной динамики и статистики квазипериодических последовательностей импульсов или цугов импульсов сверхизлучательных мод.

Раздел 4.2 посвящен рассмотрению эффектов дискретизации спектра сверхизлучательных мод в условиях генерации ими квазипериодических импульсов или цугов импульсов для лазеров с почти симметричным спектром.

Раздел 4.3 содержит описание явления временного резонанса последовательностей импульсов сверхизлучательных мод и импульсов самосинхрони-

зованных квазиэквидистантных мод в условиях действия параметрического механизма самосинхронизации части мод на крыльях спектра генерации.

В разделе 4.4 приведены важные примеры получения дискретных компонент в спектре сверхизлучательных мод в условиях реализации временных резонансов с различной кратностью следования указанных последовательностей импульсов, когда в спектре генерации лазера фактически присутствуют две кратные гребёнки, когерентно связанные друг с другом (рис. 1).

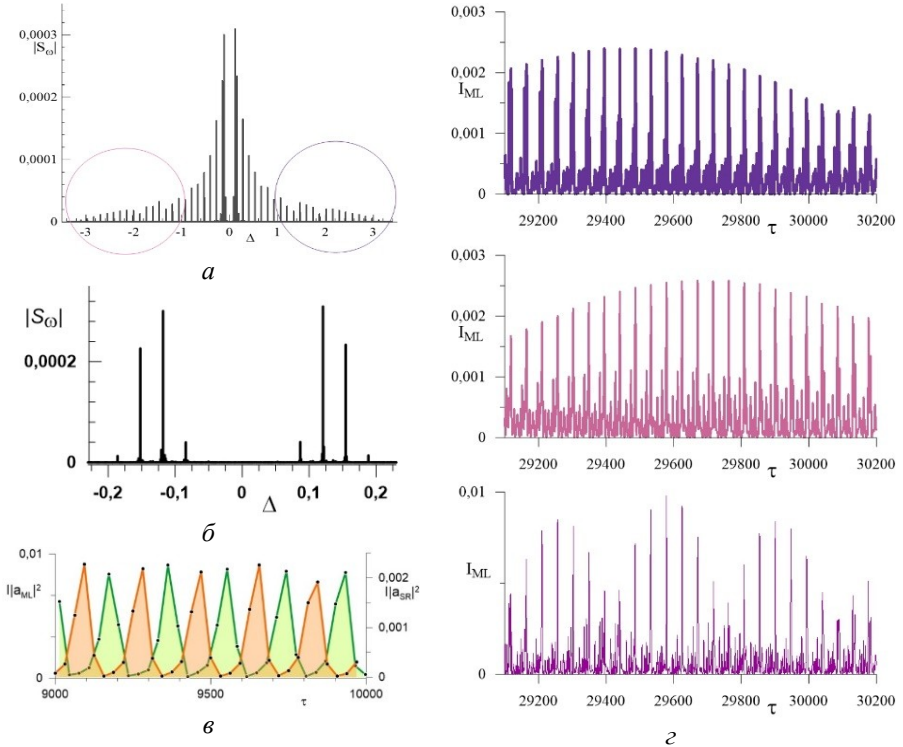


Рис. 1. Типичный полный спектр (а) и спектр двух сверхизлучательных мод (б) в установившейся генерации сверхизлучающего лазера в условиях двойного резонанса – параметрического и временного (с кратностью $K = 4$), а также осциллограмма периодически чередующихся цугов импульсов двух сверхизлучательных мод (в) и осциллограммы (г) излучения в четыре раза чаще идущих импульсов, образованных самосинхронизованными модами на левом (вверху), правом (в середине) и обоих (внизу) крыльях спектра генерации.

Раздел 4.5 содержит выводы по четвертой главе.

Результаты, представленные в четвертой главе, опубликованы в [A2, A8, A15, A17].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

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 бистабильным переходам между двумя асимметричными состояниями, зеркально симметричными друг другу. Согласно проведенному сравнению дискретного спектра слабой автомодуляции и спектра поляритонных мод сверхизлучающего лазера с симметричным резонатором Фабри – Перо в режиме сильно нарушенной зеркальной симметрии генерации, доминирующие составляющие спектра обусловлены нелинейным возбуждением двух поляритонных мод с наименьшими декрементами благодаря резонансным колебаниям Раби активных центров в области наибольшей амплитуды полуволновой решётки инверсии населённостей.
3. В лазере класса C 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 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 C, имеющего симметричный спектр генерации в низкодобротном комбинированном резонаторе 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 целом число раз превышает период обхода резонатора светом.

СПИСОК РАБОТ 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 / V. V. Kocharovskiy, A. S. Gavrilov, E. R. Kocharovskaya, A. V. Mishin, I. S. Ryabinin, A. F. Selezhev, V. V. Kocharovskiy // Breakthrough directions of scientific research at MEFPh. 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.
- A3. Особенности одновременной генерации низко- и высокодобротных 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.
- A4. 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.
- A5. Сосуществование когерентных импульсов сверхизлучательных и квазистационарных мод в лазере с низкодобротным 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.
- A6. 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. – Т. 55, № 9. – С. 758–765.
- A7. Поляритонный резонанс в автомодуляции асимметричного состояния сверхизлучающего лазера / Е. Р. Кочаровская, А. В. Мишин, Вл. В. Кочаровский

- ровский, В. В. Кочаровский // Физика и техника полупроводников. – 2022. – Т. 56, № 7. – С. 651–658.
- A8. Когерентное взаимодействие мод и кратные гребенки в спектре сверхизлучающего лазера / Е. Р. Кочаровская, А. С. Гаврилов, А. Ф. Селезнев, А. В. Мишин, В. В. Кочаровский, Вл. В. Кочаровский // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52, № 9. – С. 1–6.
- A9. Е. Р. Кочаровская, А. В. Мишин, И. С. Рябинин «Одновременная генерация низко- и высокодобротных мод в гетеролазерах на квантовых точках: спектрально-корреляционный анализ» // Тезисы докладов XXIII Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника» (г. Нижний Новгород, 11 – 14 марта 2019 г.), Т.2, С. 722 – 723 (2019).
- A10. 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).
- A11. 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. 2019. Vol. 30. P. 08009 (2019).
- A12. А. В. Мишин, Е. Р. Кочаровская, И. В. Корюкин, Вл. В. Кочаровский, В. В. Кочаровский «Эффект спонтанного нарушения симметрии излучения сверхизлучающего гетеролазера с симметричным низкодобротным резонатором» // Сборник тезисов докладов VII Международного симпозиума по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (КОИПСС-2019) (г. Москва, ФИАН, НИЯУ МИФИ, 18 – 20 ноября 2019 г.). С. 63 – 64 (2019).
- A13. 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).
- A14. 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 «Нанопизика и наноэлектроника» (г. Нижний Новгород, 10–13 марта 2020 г.), Т. 2. С. 667–668 (2020).
- A15. 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, online). P. 21436727.

- A16. Vitaly Kocharovsky, Vladimir Kocharovsky, Ekaterina Kocharovskaya, Alexey Mishin “Novel Steady-State Light-Matter Phase” // 23rd Photonics North Conference abstracts (31 May – 2 June 2021, online). P. 21299575.
- A17. 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, online). P. cb_p_21.
- A18. А. В. Мишин, Е. Р. Кочаровская «Изменение спектра и структуры поляритонных мод гетеролазера класса С под действием распределённой обратной связи волн» // Сборник тезисов докладов VIII Международного симпозиума по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (КОИПСС-2021) (г. Москва, ФИАН, НИЯУ МИФИ, 23 – 25 ноября 2021 г.). С. 49 (2021).
- A19. Е. Р. Кочаровская, А. В. Мишин, В. В. Кочаровский, Вл. В. Кочаровский «Поляритонные резонансы в автомодуляции сверхизлучающих лазеров» // Тезисы докладов XXVI Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника» (г. Нижний Новгород, 14 – 17 марта 2022 г.). Т. 2. С. 864 – 865 (2022).
- A20. Вл. В. Кочаровский, Е. Р. Кочаровская, А. В. Мишин, В. В. Кочаровский, «Диссипативный сверхизлучательный фазовый переход в системе активных центров с некогерентной непрерывной накачкой в низкодобротном резонаторе Фабри – Перо» // Тезисы докладов XXVI Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника» (г. Нижний Новгород, 14 – 17 марта 2022 г.). Т. 2. С. 866 – 867 (2022).
- A21. E. Kocharovskaya, A. Mishin, V. Kocharovsky “Polariton self-modulation of an asymmetric steady-state of a superradiant laser with a low-Q symmetric Fabry-Perot cavity” // 30th Annual International Workshop “Laser Physics 2022” (18 – 28 July 2022, online).
- A22. V. Kocharovsky, E. Kocharovskaya, A. Mishin “Dissipative superradiant state in a Fabry-Perot cavity with weakly reflecting mirrors” // 30th Annual International Workshop “Laser Physics 2022” (18 – 28 July 2022, online).

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ханин, Я. И. Основы динамики лазеров / Я. И. Ханин – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 1999. – 368 с. – ISBN 5-02-014375-8.
2. Кочаровский, Вл. В. Сверхизлучение: принципы генерации и реализация в лазерах / Вл. В. Кочаровский, В. В. Железняков, Е. П. Кочаровская, В. В. Кочаровский // Успехи физических наук. – 2017. – Т. 187, № 4. – С. 367–410.
3. Dicke, R. H. Coherence in Spontaneous Radiation Processes / R. H. Dicke // Physical Review. – 1954. – Vol. 93, No. 1. – P. 99.
4. 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.
5. 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.
6. Gibbs, H. M. Single-Pulse Superfluorescence in Cesium / H. M. Gibbs, Q. H. F. Vrethen, H. M. J. Hikspoors // Physical Review Letters. – 1977. – Vol. 39, No. 9. – P. 547.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.

14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. Florian, R. Time-resolving experiments on Dicke superfluorescence of O₂-centers in KCl. Two-color superfluorescence / R. Florian, L. O. Schwan, D. Schmid // *Physical Review A*. – 1984. – Vol. 29, No. 5. – P. 2709.
24. Schiller, A. Spatial coherence in large-sample superfluorescence of O₂ centers in KCl / A. Schiller, L. O. Schwan, H. D. Schmid // *Journal of Luminescence*. – 1988. – Vol. 40–41. – P. 541–542.
25. 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.
26. 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.
27. Андреев, А. В. Оптическое сверхизлучение: новые идеи и новые эксперименты / А. В. Андреев // *Успехи физических наук*. – 1990. – Т. 160, № 12. – С. 1–46.

28. 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.
29. Kocharovskiy, V. V. Mode instability and nonlinear superradiance phenomena in open Fabry-Perot cavity / V. V. Kocharovskiy, Vl. V. Kocharovskiy, E. R. Golubyatnikova // *Computers and Mathematics with Applications*. – 1997. – Vol. 34, No. 7–8. – P. 773–793.
30. Железняков, В. В. Волны поляризации и сверхизлучение в активных средах / В. В. Железняков, В. В. Кочаровский, В. В. Кочаровский // *Успехи физических наук*. – 1989. – Т. 159, № 4. – С. 194–260.
31. Jones, D. J. Dynamics of Monolithic Passively Mode-Locked Semiconductor Lasers / D. J. Jones, L. M. Zhang, J. E. Carroll, D. D. Marcenac // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 1995. – Vol. 31, No. 5. – P. 1051–1058.
32. Андреев, А. В. Кооперативная самодифракция света в резонаторе / А. В. Андреев, М. В. Федотов // *Квантовая электроника*. – 1993. – Т. 20, № 1. – С. 79–83.
33. Андреев, А. В. Динамика сверхизлучения в резонаторе / А. В. Андреев // *Квантовая электроника*. – 1993. – Т. 20, № 6. – С. 581–585.
34. 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.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение.....	4
Глава 1. Базовая модель и спектры горячих мод сверхизлучающего лазера с низкодобротным комбинированным резонатором	13
1.1. Когерентные сверхизлучательные состояния активной среды при наличии непрерывной некогерентной накачки. Обзор литературы	13
1.2. Уравнения 2-уровневой модели 1-мерного сверхизлучающего лазера класса C, D	16
1.3. Характеристическое уравнение. Поляритонные и электромагнитные горячие моды	22
1.4. Пространственные, временные и спектральные структуры инверсии населенностей уровней активной среды. Обзор возможных явлений.....	41
1.5. Выводы	43
Глава 2. Спонтанное нарушение зеркальной симметрии сверхизлучательных структур в симметричном лазере класса D с почти однородным уширением спектральной линии.....	44
2.1. Асимметричные установившиеся состояния активной среды в различных низкодобротных резонаторах.....	44

2.2. Автомодуляция несимметричных профилей поля, поляризации и инверсии населенностей уровней активной среды	50
2.3. Бистабильность: переходы между двумя зеркально симметричными состояниями	60
2.4. Влияние параметров лазера и накачки на профили и динамику состояний активной среды	64
2.5. Выводы	69
Глава 3. Параметрический когерентный механизм самосинхронизации мод в комбинированном резонаторе лазера класса С	71
3.1. Динамические спектры генерации и параметрический резонанс биений нестационарных мод с биениями квазистационарных мод	72
3.2. Особенности спектра и самосинхронизации мод в лазерах с несимметричными спектрами мод	80
3.3. Конкуренция солитоноподобных импульсов частично синхронизованных мод в лазерах с симметричными спектрами мод	87
3.4. Сравнительный анализ качества синхронизации мод и солитоноподобных импульсов для лазеров с различными параметрами	93
3.5. Выводы	104
Глава 4. Явление двойного резонанса и спонтанное формирование двух кратных гребенок в спектре сверхизлучающего лазера с самосинхронизацией мод	105
4.1. Квазипериодические последовательности импульсов сверхизлучения и квазидискретные спектры сверхизлучательных мод в лазере класса С	106
4.2. Периодическая последовательность импульсов и дискретный спектр сверхизлучательных мод	109
4.3. Солитоноподобные и сверхизлучательные импульсы в условиях сосуществования спектрального (параметрическая связь) и временного (кратность следования) резонансов	118
4.4. Зависимость спектрально-временных характеристик двухпериодной генерации от параметров лазера и проблема получения двух кратных гребенок спектра при наличии параметрического резонанса	123
4.5. Выводы	138
Заключение	140
Список работ автора по теме диссертационного исследования	142
Список литературы	145

Мишин Алексей Викторович

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОД
И ЭФФЕКТЫ НЕОДНОРОДНОСТИ
ИНВЕРСИИ НАСЕЛЕННОСТЕЙ
УРОВНЕЙ АКТИВНОЙ СРЕДЫ
В ДИНАМИКЕ СВЕРХИЗЛУЧАЮЩИХ ЛАЗЕРОВ
С НИЗКОДОБРОТНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 10.10.2022.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 55(2022).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46