

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»» (ФИЦ КазНЦ РАН),

Российская Федерация, Республика Татарстан,

г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31,

Член-корреспондент РАН



Калачев Алексей Алексеевич

25 ноября 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Мишина Алексея Викторовича

«Взаимодействие мод и эффекты неоднородности инверсии населенностей уровней активной среды в динамике сверхизлучающих лазеров с низкодобротными резонаторами»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.4 – радиофизика

Актуальность темы

Диссертационная работа А.В. Мишина содержит численные и аналитические исследования уникальных режимов генерации и не изучавшихся ранее коллективных эффектов в ряде многообещающих многочастичных систем активных центров (атомов, экситонов, примесных центров и др.), помещенных в низкодобротный резонатор и находящихся под действием непрерывной некогерентной накачки. При достаточно низкой скорости релаксации поляризации, т.е. плотности оптических дипольных колебаний этих центров, исследованные режимы и эффекты имеют сверхизлучательный характер и связаны со специфической динамикой атомов и поля, которая отсутствует в стандартных лазерах. В подобных условиях легко возбуждаются и оказываются относительно долгоживущими неоднородности инверсии населенностей уровней активных центров, как крупномасштабные, так и мелкомасштабные, например, полуволновые, связанные с биениями встречных волн электромагнитного поля и поляризации среды.

Несмотря на более чем полувековую историю изучения вопросов, связанных с явлением сверхизлучения Дике, остается актуальным создание полноценной теории сверхизлучающих лазеров, в которых коллективное спонтанное излучение активных центров под действием непрерывной накачки может привести к генерации когерентного излучения с интересными и необычными спектрально-корреляционными свойствами. Разработка подобных лазеров представляет интерес для оптической передачи информации, создания новых бистабильных элементов, динамической спектроскопии, диагностики

состояний многочастичных систем и других приложений. Более того, в последнее время наблюдается бурное развитие исследований в области сверхизлучения, так что можно ожидать в ближайшем будущем экспериментальную демонстрацию различных схем и разнообразные практические приложения сверхизлучающих лазеров, например, на основе многослойных гетероструктур с квантовыми точками или экситонами.

Цель диссертационной работы состоит в проведении качественного теоретического анализа и детального исследования результатов численного моделирования новых режимов лазерной генерации, основанных на нелинейном взаимодействии пространственно-неоднородных структур инверсии населенностей с электромагнитным полем и поляризацией активной среды лазера. Особая роль в этом исследовании обращается на спонтанно возникающие когерентные пространственно-временные структуры электромагнитного поля и инверсии населенностей уровней активных центров, важные с точки зрения не только прикладной, но и фундаментальной физики многочастичных систем с радиационным взаимодействием.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во введении описаны актуальность выбора темы исследования, цели и задачи работы, методы исследования и научная новизна, научная и практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава начинается с обзора литературы и описания основных уравнений исследуемой модели сверхизлучающего лазера – нелинейных полуклассических уравнений Максвелла-Блоха, в которых рассмотрена динамика инверсии населенностей, приводящая к появлению полуволновой решетки этой инверсии при условии однородной по пространству накачки, которая создает однородную инверсию. В линейном приближении получены дисперсионные соотношения, на основе которых выведено характеристическое уравнение, позволяющее сделать анализ модового состава излучения. На этой основе далее проанализирована возможность лазерной генерации на поляритонных модах, которая нереализуема в стандартных лазерах, например полупроводниковых, поскольку в них отсутствует неустойчивость поляритонных мод. В частности, указана возможность такой генерации в области частот, соответствующей запрещенной фотонной зоне в комбинированном резонаторе Фабри-Перо с распределенной обратной связью встречных волн.

Вторая глава посвящена изучению нового для сверхизлучающего лазера режима, в котором вместо естественной генерации последовательности импульсов сверхизлучения Дике при повышении уровня непрерывной накачке происходит переход к квазимонохроматической (одномодовой) генерации со спонтанным нарушением зеркальной симметрии, когда в симметричном резонаторе интенсивности излучения из противоположных торцов могут отличаться во много раз. Такая генерация возможна при малом неоднородном уширении спектральной линии активной среды и связана с возникновением устойчивой решетки инверсии населенностей уровней активных центров, сосредоточенной преимущественно возле одного из торцов лазера и действующей как невзаимный усилитель. Данный режим подробно исследован для ряда параметров активной среды и резонатора, в том числе установлены условия вытеснения решетки инверсии

населенностей к одному из торцов, выяснены причины автомодуляция установившейся генерации и бистабильности зеркально симметричных сверхизлучательных состояний.

Третья глава посвящена исследованию параметрического когерентного механизма самосинхронизации мод в сверхизлучающем лазере с комбинированным резонатором и большим неоднородным уширением спектральной линии активной среды. Качественные оценки и статистический анализ результатов численного моделирования позволили найти основное условие эффективности этого механизма синхронизации мод: межмодовое расстояние для нестационарных мод на краю запрещенной зоны должно в целое число раз превышать межмодовое расстояние для квазиэквидистантных синхронизируемых мод. Проведено исследование одновременной генерации разных квазипериодических последовательностей импульсов, образованных как нестационарными уширенными модами, так и квазиэквидистантными модами различных областей спектра. Также проведено статистическое исследование свойств последовательностей таких импульсов, а именно, изучены амплитуды, периоды следования, полуширины цугов сверхизлучательных импульсов и солитоноподобных импульсов самосинхронизованных мод для различных параметров активной среды и резонатора при симметричном и несимметричном спектрах.

В четвертой главе представлены результаты исследования параметрического механизма самосинхронизации мод и сделан анализ численных расчетов установившейся динамики сверхизлучающего лазера при специальном выборе параметров, обеспечивающем квазипериодичность следования импульсов (цугов импульсов) сверхизлучения двух центральных наиболее неустойчивых мод, спектральные компоненты которых в этих условиях становятся квазидискретными. Если период следования этих сверхизлучательных импульсов достаточно стабилен и кратен периоду обхода солитоном резонатора, то в таком случае возможен параметрический резонанс между биениями отдельных дискретных компонент, взятых по одной из этих двух нестационарных мод, и биениями соседних квазиэквидистантных мод на крыльях спектра. На примерах лазеров с симметричными спектрами генерации показано, что дополнение основного параметрического резонанса указанным временным резонансом, т.е. выполнение условий двойного резонанса, приводит к улучшению самосинхронизации мод и формированию двух кратных гребенок в спектре сверхизлучающего лазера.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации, которые все представляются весьма интересными и важными.

Новизна полученных результатов

1. С помощью 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.
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 обратной связи волн).
3. Установлены происхождение и свойства бистабильности указанной асимметричной генерации в определённой области параметров сверхизлучающего лазера и накачки.

4. Найдены режимы генерации с сосуществующими квазипериодическими последовательностями когерентных импульсов (цугов импульсов) сверхизлучения, создаваемых одной или несколькими нестационарными сверхизлучательными модами, а также обходящих резонатор импульсов, создаваемых самосинхронизованными квазистационарными почти эквидистантными модами, в условиях большого неоднородного уширения спектральной линии активной среды, находящейся под действием непрерывной накачки.

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. Определены возможности повышения стабильности подобной самосинхронизации мод и устойчивости формируемых ими солитоноподобных структур в условиях двойного резонанса, когда основной параметрический резонанс дополняется временным резонансом, отвечающим кратности периодов следования сверхизлучательных и солитоноподобных импульсов.

Достоверность полученных результатов и выводов, представленных в диссертации, обеспечивается адекватным выбором использованных физических моделей рассматриваемых явлений, проверенной корректностью описывающих их уравнений и численных методов решения последних, согласованностью найденных решений с известными решениями в ряде частных случаев. Положения диссертации **вполне обоснованы** корректностью и адекватностью полученных теоретических результатов.

Научная и практическая значимость работы

Основное научное значение проведенных исследований состоит в установлении ряда новых возможностей получения высококогерентных состояний многочастичного ансамбля активных центров, находящихся под действием однородной непрерывной накачки в низкодобротном резонаторе. Эти состояния не только важны для фундаментальной физики радиационно взаимодействующих частиц, но и могут служить основой для реализации новых способов генерации излучения с уникальными спектрально-корреляционными свойствами. В этом отношении полезны, например, развитые в диссертации новые методы самосинхронизации лазерных мод, создания двухпериодных последовательностей импульсов и получения различных, в том числе кратных, гребёнок спектра непрерывной генерации сверхизлучающих лазеров. Немаловажными представляются и разработанные в диссертации методы качественного и количественного исследования результатов численного моделирования сложных состояний системы частиц и поля,

Замечания

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. Отсутствует детальное описание результатов расчета горячих мод для некоторых представленных в главах 2-4 сверхизлучающих лазеров, нелинейная динамика которых моделировалась численно. Интерпретация подобного моделирования в ряде случаев могла бы быть более полноценной за счет использования свойств горячих мод, рассчитанных на

основе линеаризованных уравнений, тем более что выполнимость таких расчетов автором была хорошо продемонстрирована в разделе 1.3.

2. Статистический анализ тех или иных импульсных последовательностей генерируемого излучения представлен выборочно для каких-то специальных случаев. Можно предположить, что для остальных имеющихся в диссертации случаев численного моделирования наличие статистического анализа полученных данных способствовало бы выявлению новых физических деталей этой динамики.

3. Не понятен термин «грубости» в предложении на стр. 4: «В работе изучаются вполне определённые режимы указанной сверхизлучательной лазерной генерации, информацию о существовании, грубости, физической значимости и перспективности которых призваны дать полученные научные результаты».

4. Представляется неудачным использование термина «слабая релаксация» на стр. 6. Здесь, по-видимому, предполагается медленная релаксация по сравнению с затуханием поля моды резонатора. Между тем, на той же странице этому случаю сопоставляются активные центры «с малым временем некогерентной релаксации колебаний их оптических дипольных моментов», что, по-видимому, является некорректным (поскольку малое время соответствует быстрой релаксации), и вместо «малого» следует говорить о «большом» времени релаксации.

5. В диссертации даны необычные определения (стр. 17): T_2 – время некогерентной релаксации поляризации, T_1 – время некогерентной релаксации инверсии населённости. Обычно в литературе они называются временем фазовой релаксации или временем релаксации поляризации и временем релаксации населённости. Понятие некогерентной релаксации подразумевает наличие когерентной релаксации, что требует пояснений.

Опечатки и неточности в тексте.

1. Стр. 42: используется неудачный термин «примерно в целое число раз».
2. Стр. 88: Есть аббревиатура ПВЛЭОФ со ссылкой, но нет её расшифровки.
3. Стр. 17: в определении Δ (дельта) нужно заменить ω на ω_0 и далее заменить ω на ω_{21} .
4. Стр. 32: В подписи к рис. 1.3.8. написано: «...треугольниками представлены времена жизни фотона T_E в «холодном» резонаторе при $n_p = 0$, ромбами – декременты при наличии среды с поглощением $n_p = -1$ ». На рисунках нет ни треугольников, ни ромбов.
5. Стр. 84: написано «отмеченных на рисунке 4а овалами». Нужно поставить номер рисунка 3.1.4(а).
6. Стр. 89: в подписи к рисунку неверное обозначение а). Должно быть с).
7. Стр. 116: неправильный номер рисунка. Должен быть 4.2.3.
8. Стр. 117: рисунок 4.2.4: нет определения цветов линий с расшифровкой к чему они относятся.

Приведенные замечания не снижают общей высокой оценки представленной диссертации. В целом следует отметить, что диссертационная работа Мишина А.В. свидетельствует о достаточно высокой квалификации автора как физика-теоретика и является существенным вкладом в области создания теории сверхизлучающих лазеров.

Полученные результаты представляют большой интерес (значимость) и могут быть рекомендованы к использованию в Казанском федеральном университете, Казанском физико-техническом институте ФИЦ КазНЦ РАН, Московском государственном университете, Институте общей физики им. Прохорова РАН (г. Москва), Физико-

техническом институте им. А.Ф.Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург) и в ряде других научных центрах, занимающихся исследованиями по данной тематике.

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных материалов, и 14 работах в сборниках трудов и тезисов докладов международных и российских научных конференций. Текст работ, опубликованных по теме диссертации, соответствует ее содержанию. Достоверность и обоснованность основных результатов и положений, выносимых на защиту, не вызывает сомнений. Проведенные исследования являются новыми и вполне завершенными. Тема диссертации соответствует специальности 1.3.4 – радиофизика. Диссертация правильно оформлена, автореферат полностью отражает её содержание. Результаты, представленные в диссертации, получены лично автором либо при его непосредственном участии.

Диссертация отвечает всем требованиям действующего «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым ВАК Минобрнауки России к кандидатским диссертациям, а ее автор – Алексей Викторович Мишин – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – радиофизика.

Отзыв на диссертацию заслушан и одобрен на заседании Ученого совета Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), протокол № 34 от 23 ноября 2022 г.

Текст отзыва составил:

Ведущий научный сотрудник
КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН,
д.ф.-м.н.



Шахмуратов Рустэм Назимович

420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт 10/7. тел.: +7 (843) 272 05 03,
e-mail: shakhmuratov@mail.ru

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»
Почтовый адрес: 420111, Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31,
Телефон: +7 (843) 231 90 00,
Email: presidium@knc.ru,
сайт: <https://knc.ru>



Шахмуратова Р.М. завершено
ученый секретарь РИЦ КазНЦ РАН
Знаменца С.А.