

ОТЗЫВ

официального оппонента
о диссертационной работе Мишина Алексея Викторовича
«Взаимодействие мод и эффекты неоднородности инверсии населенностей уровней
активной среды в динамике сверхизлучающих лазеров с низкодобротными
резонаторами»,
представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
1.3.4 – радиофизика

Диссертационная работа А.В. Мишина посвящена изучению необычных режимов лазерной генерации, при которых существенную роль играет динамика когерентных оптических колебаний дипольных моментов активных центров, т.е. поляризации, и возникает самосогласованная структура биений встречных волн и неоднородного распределения инверсии населенностей уровней активной среды. Такие структуры активно взаимодействуют с волнами электромагнитного поля и поляризации лазера и тем самым определяют упомянутые нестандартные режимы, имеющие сверхизлучательный характер.

Стандартное балансное приближение динамики лазеров не подходит для описания сверхизлучательных процессов, так как в этом случае время жизни фотона в резонаторе меньше, чем время некогерентной релаксации оптических дипольных колебаний, и необходимо решать полную систему уравнений Максвелла – Блоха. Подобные процессы в последнее время привлекают всё большее внимание, так что актуальность представленных исследований не вызывает сомнений. Их практическая значимость обусловлена ожидаемым широким использованием когерентных процессов рассматриваемого типа в различных устройствах передачи и обработки информации, широкополосной спектроскопии тех или иных объектов и сред, создания источников излучения со сложными спектрально-корреляционными свойствами.

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

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и основные задачи работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, отмечены новизна полученных результатов и указан личный вклад автора.

В первой главе описываются базовые уравнения исследуемой модели – система нелинейных полуклассических уравнений Максвелла – Блоха, причем рассматриваются случаи и однородного, и неоднородного уширений спектральной линии активной среды. В уравнениях учитываются как отражения на торцах лазера, так и распределенные вдоль его оси брэгговские отражения с периодом полдлины волны. Последние усложняют структуру встречных волн поля, биениями которых создаётся полуволновая решетка инверсии населенностей уровней активной среды. Учитывается также возможная отстройка частоты брэгговского резонанса от центральной частоты спектральной линии перехода между рабочими уровнями активной среды.

Существенное внимание в данной главе уделяется линеаризованной системе уравнений Максвелла – Блоха и анализу на ее основе спектров горячих мод и структур поля для различных параметров резонатора и активной среды, в том числе при уровне накачки выше порога генерации. В частности, подробно изучена возможность лазерной генерации на поляритонных модах и показано, что при однородном уширении спектральной линии активной среды неустойчивыми будут именно поляритонные моды, лежащие внутри запрещенной фотонной зоны комбинированного резонатора Фабри-Перо с распределенной обратной связью встречных волн. На типичных примерах показано, как от этой связи, а именно, от определяющей ее амплитуды полуволновой модуляции диэлектрической проницаемости матрицы активных центров, зависят спектры горячих мод и их инкременты.

Вторая глава посвящена изучению ряда особенностей явления спонтанного нарушения зеркальной симметрии лазерной генерации в лазерах класса D, для которых скорость некогерентной релаксации поля в резонаторе много больше скорости релаксации оптических дипольных колебаний активных центров. Качественный анализ результатов численного расчета нелинейной динамики подобных лазеров с симметричными резонаторами и в основном однородным уширением спектральной линии активной среды показывает, что при значительном превышении порога генерации в широкой области параметров возникает существенная разница в интенсивностях полей, излучаемых из противоположных торцов лазера в установившемся режиме.

Было установлено, что нарушение зеркальной симметрии сопровождается смещением полуволновой решетки инверсии населенностей уровней активной среды к одному из торцов лазера, и на ней происходит асимметричное перераспределение и усиление полей встречных волн. При этом асимметричная генерация может быть как существенно нестационарной, т.е. спектрально широкополосной, так и квазистационарной, т.е. квазимонохроматической, со слабой автомодуляцией несимметричных профилей поля, поляризации и инверсии населенностей уровней активной среды. Изучено влияние параметров лазера и накачки на указанные профили и динамику состояний активной среды, которые по существу обусловлены глобальной асимметричной перестройкой исходно симметричной резонансной поляритонной моды лазера за счет образования в нем несимметричной полуволновой решетки инверсии населенностей уровней активных центров. Выяснен один из механизмов автомодуляции асимметричных профилей поля, поляризации и инверсии населенностей - нелинейное взаимодействие указанной перестроившейся (исходно наиболее неустойчивой) поляритонной моды с соседними поляритонными модами, для которых отстройки по частоте от центра спектральной линии близки к частоте Раби-осцилляций определенных слоев активных центров в области максимумов инверсии населенностей и ее решетки.

Отдельно в диссертации исследован вопрос о влиянии неоднородного уширения спектральной линии активной среды на обнаруженный эффект спонтанного нарушения зеркальной симметрии лазерной генерации. При значении неоднородного уширения порядка однородного наблюдается бистабильность, заключающаяся в переходах между двумя зеркально симметричными состояниями асимметричной генерации. Объяснение данного эффекта связано с разрушением установившейся слабой решетки инверсии

населенностей уровней активной среды случайно возникающими мощными сверхизлучательными импульсами и последующим ее спонтанным (равновероятным) возникновением около того или иного торца лазера. В конце второй главы кратко описываются свойства возможных режимов генерации для типичной области параметров сверхизлучающего лазера.

В третьей главе исследуется механизм вовлечения в генерацию и последующая самосинхронизация квазиэквидистантных мод на крыльях лазерного спектра в случае большого неоднородного уширения спектральной линии активной среды. Фактически этот механизм сводится к нелинейному четырехмодовому взаимодействию в условиях параметрического резонанса биений определенных пар мод, когда отношение межмодового интервала для наиболее неустойчивых нестационарных (или квазистационарных) мод к межмодовому интервалу для мод на крыльях спектра равно целому числу. Параметрический резонанс особенно эффективен, если такое отношение равно двум. В диссертации представлено детальное исследование динамических спектров поляризации, инверсии населенностей и осциллограмм импульсов поля, отвечающих отдельным участкам спектра излучения для различных параметров активной среды и резонатора. В частности, рассмотрены резонаторы с различной длиной и различными зеркалами на торцах, отличающиеся не только модулем, но и фазой коэффициента отражения, от которой зависит характер и степень асимметрии исходного спектра горячих мод, а следовательно, эффективность их самосинхронизации.

Статистический анализ основных характеристик различных импульсных последовательностей в сложном нестационарном излучении лазера, проведенный автором, позволяет судить о явлении конкуренции различных солитоноподобных импульсов, имеющем место, например, в случае симметричного спектра генерации с непротофазным следованием цугов сверхизлучательных импульсов, когда солитоноподобные импульсы обладают сложной формой из-за взаимодействия нестационарных мод. Подобный статистический анализ важен также для оценки качества самосинхронизации квазиэквидистантных мод на крыльях спектра генерации сверхизлучающего лазера.

В четвертой главе рассматривается вопрос о дискретизации спектра сверхизлучательных мод и повышении качества самосинхронизации мод на крыльях спектра лазерной генерации в случае, когда сверхизлучательные импульсы (или цуги импульсов) имеют стабильный период, кратный периоду обхода солитоном резонатора. Тогда две центральные сверхизлучательные (наиболее неустойчивые) спектрально уширенные моды распадаются на квазидискретные компоненты, для ряда которых к тому же возможно выполнение условия параметрического резонанса их биений с биениями самосинхронизирующихся мод на крыльях спектра генерации.

В этом случае так называемого двойного резонанса (временного и параметрического), как показывают приведенные в диссертации характерные примеры, самосинхронизация мод действительно значительно улучшается. Соответствующий режим генерации отвечает наличию двух частотных гребенок, причем квазимонохроматические моды имеют межмодовый интервал вдвое меньше разности

частот между некоторыми дискретными компонентами двух сверхизлучательных мод и в целое число раз больше интервала между некоторыми из этих компонент в одной и другой сверхизлучательной моде.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертации.

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. Достоверность результатов и положений диссертации подтверждается обоснованным применением физических моделей рассматриваемых явлений, проверенной корректностью описывающих их уравнений и численных методов решения этих уравнений, непротиворечивой физической интерпретацией всей совокупности выясненных свойств изученных ансамблей радиационно взаимодействующих активных центров.

Результаты, представленные в диссертации, получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии.

Изложение материала диссертации является четким и понятным, сопровождается многочисленными иллюстрациями, а имеющееся небольшое число опечаток и неточностей не влияет на понимание текста и высокий уровень диссертационной работы.

По представленным в диссертации материалам имеется ряд замечаний и вопросов.

1) В разделе 1.3 недостает явной и более детальной характеристики частот поляритонных мод с максимальными инкрементами как функций коэффициента распределенной обратной связи в лазере с комбинированным резонатором. Могут ли (и при каких условиях) наибольшими инкрементами в рассматриваемом сверхизлучающем лазере с однородным уширением спектральной линии обладать электромагнитные, а не поляритонные моды?

2) В главе 2 отсутствует обсуждение общего критерия спонтанного нарушения зеркальной симметрии генерации сверхизлучающего лазера с симметричным резонатором. Можно ли указать хотя бы качественно уровень превышения накачки порога лазерной генерации, требуемый для установления асимметричного сверхизлучательного состояния?

3) На ряде рисунков в разделах 3.3, 4.2, 4.4 импульсы излучения сверхизлучательных мод показаны крайне схематично. В какой мере достоверна приведенная в диссертации статистическая обработка подобных сверхизлучательных импульсов? Что мешает прорисовать детали этих импульсов, хотя бы в такой же степени подробности, в которой на многих рисунках приведены детали солитоноподобных импульсов, образованных квазимонохроматическими модами на крыльях лазерного спектра?

4) В работе нет описания использованных при расчетах алгоритмов и методов.

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на положительную оценку диссертационной работы А.В. Мишина. Автореферат и публикации по теме диссертации соответствуют ее содержанию.

В целом диссертацию можно охарактеризовать как актуальное, законченное исследование, выполненное на высоком научном уровне и имеющее важное фундаментальное и прикладное значение. При более детальной оценке к наиболее интересным и важным результатам можно отнести теоретическую модель

Диссертационная работа А.В. Мишина отвечает всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 11.09.2021), которые предъявляются к кандидатским диссертациям, а ее автор, Мишин Алексей Викторович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – радиофизика.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук (01.04.05-оптика), профессор, заведующий кафедрой «Приборостроение» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (СГТУ), 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77. Тел. +7-927-2215985, e-mail: lam-pels@yandex.ru

Выражаю согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации.

25 ноября 2022 г.

Мельников Леонид Аркадьевич

Подпись д.ф.-м.н., профессора
Мельникова Л.А.

Ученый секретарь
культурологический факультет



Совета СГТУ имени Гагарина Ю.А., доктор

Тищенко Наталья Викторовна