

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 посвящена актуальным исследованиям ряда уникальных режимов и механизмов генерации так называемых сверхизлучающих лазеров, в которых время жизни фотона меньше времени некогерентной релаксации оптических дипольных колебаний. Эти режимы и механизмы, ранее детально не изучавшиеся, связаны с самопроизвольно возникающей существенной неоднородностью инверсии населенностей уровней активной среды и нелинейным взаимодействием поля и поляризации среды.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикаций автора по теме работы и списка цитируемой литературы.

Во Введении обоснована актуальность темы исследования, очерчены задачи, сформулированы цели работы, описаны использованные методы исследования, перечислены выносимые на защиту положения, отмечена новизна и обоснована достоверность полученных результатов, приведены сведения об их апробации и личном вкладе автора.

В главе 1 обсуждаются основные уравнения, использованные для исследования изучаемых в диссертации режимов сверхизлучательной генерации как при однородном, так и при неоднородном уширении спектральной линии активной среды: дифференциальные полуклассические уравнения Максвелла – Блоха и получаемые их линеаризацией алгебраические – характеристическое и дисперсионное – уравнения. В первых, в отличие от последних, учитывается неоднородность инверсии населённости уровней активной среды и полуволовая решётка инверсии населённости, создаваемая биениями встречных волн.

В рамках линейной теории подробно изучены зависимости спектра горячих мод и структур их поля от различных параметров резонатора и активной среды лазера, проведено исследование возможности лазерной сверхизлучательной генерации на поляритонных модах в среде с инверсией населенностей уровней, дана классификация мод сверхизлучающего лазера и обсуждается их вклад в генерацию в зависимости от величины распределённой обратной связи волн в комбинированном резонаторе Фабри-Перо. В диссертации отмечена возможность существования неустойчивых поляритонных мод в запрещенной фотонной зоне, образующейся благодаря указанной связи встречных электромагнитных волн.

В главе 2 рассмотрен динамический фазовый переход, связанный с возникновением устойчивой полуволовой решётки инверсии населённости и приводящий к спонтанному нарушению зеркальной симметрии генерации сверхизлучающего лазера. Это явление имеет место при достаточно сильном превышении порога генерации, когда происходит спонтанное смещение максимума решётки инверсии населённости из центра резонатора к одному из его торцов. Получающееся неоднородное асимметричное распределение инверсии населённости в общем случае является осциллирующим и по-разному усиливает встречные волны поля. В симметричном резонаторе установление максимума указанной полуволовой

решётки имеет вероятностный характер: для случайных начальных условий при заданных параметрах резонатора и активной среды с равной вероятностью устанавливается правоторцевой или левоторцевой режимы асимметричной генерации, осциллограммы излучения в которых одинаковы с точностью до зеркальной симметрии выходящих волн.

Там же проанализирован режим автомодуляции найденного асимметричного сверхизлучательного фазового состояния, одной из основных причин которой является нелинейное попарное взаимодействие наиболее добротных поляритонных мод, имеющих межмодовую отстройку примерно равную частоте Раби-осцилляций резонансных слоёв активных центров в области максимума инверсии населённостей и её решётки.

Исследовано также влияние неоднородного уширения спектральной линии активной среды на свойства симметричной и асимметричной генерации. Отмечена возможность бистабильности асимметричного сверхизлучательного состояния при расстройке резонанса активных центров с какой-либо модой резонатора и при значениях неоднородного уширения спектральной линии, приближающихся к однородному. Бистабильность связана со спорадическим разрушением полуволновой решетки инверсии населённостей импульсами сверхизлучения и ее последующим спонтанным восстановлением у одного из торцов лазера.

В главе 3 исследуется так называемый параметрический когерентный механизм синхронизации мод сверхизлучающего лазера, не связанный с какой-либо модуляцией внешних параметров или помещением в лазер нелинейных элементов. Согласно этому механизму, синхронизация квазиэквидистантных мод на крыльях лазерного спектра наиболее эффективна в условиях параметрического резонанса, при котором межмодовый интервал для наиболее добротных сверхизлучательных мод в целое число раз больше межмодового интервала для квазиэквидистантных мод резонатора. Особенно эффективна такая синхронизация при двукратном отличии указанных межмодовых интервалов.

В работе даны примеры подобной синхронизации как для симметричного, так и для несимметричного спектра горячих мод сверхизлучающего лазера. Исследована конкуренция солитоноподобных импульсов синхронизованных мод в случае симметричного спектра. Проведено выделение синхронизованных импульсов из сложного нестационарного излучения лазера и осуществлен детальный статистический анализ их характеристик для различных параметров резонатора и различных участков спектра сверхизлучающего лазера.

В главе 4 продолжен анализ генерации квазипериодических последовательностей солитоноподобных и сверхизлучательных импульсов и продемонстрирован дополнительный механизм синхронизации мод на крыльях спектра сверхизлучающего лазера для случая симметричного спектра генерации. Этот механизм обусловлен тем обстоятельством, что если период следования сверхизлучательных импульсов кратен периоду обхода резонатора солитоном, то соответствующие центральные сверхизлучательные моды расщепляются на дискретные компоненты, для которых минимальное спектральное расстояние в целое число раз меньше межмодового интервала на крыльях спектра, и поэтому может быть не только выполнено указанное в главе 3 условие параметрического резонанса, но и достигнута дополнительная долговременная фазовая когерентность сверхизлучательных и солитоноподобных импульсов, следующих с разными, но кратными периодами.

Показана улучшенная синхронизация части квазиэквидистантных мод при выполнении условий двойного резонанса (параметрического и временного) для кратностей периодов следования указанных импульсов равной $K = 4$ и $K = 5$.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

Диссертация написана в хорошем стиле, хотя и содержит ряд опечаток и неточностей, не влияющих, впрочем, на понимание содержания и качество сформулированных результатов. Она представляет собой законченную научную работу и вместе с тем содержит указания на перспективные направления дальнейших исследований. Диссертация хорошо структурирована и снабжена большим количеством рисунков, делающих изложение более понятным и наглядным.

Личный вклад автора состоит в осуществлении теоретического анализа, выборе параметров и проведении ряда численных расчетов, статистической обработке импульсных сигналов и интерпретации полученных результатов, и не вызывает сомнений.

Достоверность результатов диссертации подтверждается использованием в ней апробированных уравнений и численных методов исследования, непротиворечивой физической интерпретацией результатов проведённого моделирования и соответствием полученных результатов результатам, известным ранее для некоторых частных случаев.

Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, опираются на полученные в ней результаты и являются полностью обоснованными.

В работе имеются, однако, некоторые недостатки.

1. Желателен более полный, а не фрагментарный, демонстрационный анализ поляритонных мод сверхизлучающего лазера, представленный в разделе 1.3. Так, уместно было бы указать условия существования и характеристики поляритонных мод в запрещённой фотонной зоне лазера с комбинированным резонатором и инвертированной активной средой, а не ограничиваться их кратким обсуждением и парой примеров на с. 29-31.

2. Хотя в конце раздела 2.2 на с. 60 и отмечена связь Раби-осцилляций активных центров в самосогласованном поле асимметричного сверхизлучательного фазового состояния с возбуждением поляритонных мод, ответственных за автомодуляцию данного состояния, этого недостаточно для выявления фактического механизма указанной автомодуляции. Поэтому установленное физическое явление нельзя признать объяснённым.

3. В нескольких разделах диссертации, например, в разделе 3.4, приводятся данные статистической обработки численного моделирования тех или иных импульсных последовательностей, генерируемых различными группами лазерных мод, например, последовательностей солитоноподобных импульсов или импульсов сверхизлучения. Необходимо было бы, пусть кратко, охарактеризовать процедуру расчёта статистически значимых характеристик подобных импульсов, например, их амплитуд, длительностей и периодов следования, если эти характеристики важны для выводов, сделанных в работе.

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертации, её научной и практической значимости. Последняя обусловлена широкими потенциальными возможностями использования различных режимов когерентной генерации исследованных в диссертации лазеров, например, в информационной оптике и динамической спектроскопии, а также в фундаментальной физике многочастичных систем с радиационным взаимодействием.

Основные результаты диссертации А. В. Мишина опубликованы в 8 статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК и 14 работах в сборниках трудов и тезисов докладов международных и российских научных конференций. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, можно заключить, что данная диссертационная работа является завершённым исследованием и удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении

1. H.J. Khashi, S.V. Sergeev, M. Al-Araimi, A. Rozhin, D. Korobko, A. Fotiadi, "High-frequency vector harmonic mode locking driven by acoustic resonances," *Optics Letters* 44, 5112-5115 (2019).
2. S.M. Popov, O.V. Butov, A.P. Bazakutsa, M.Y. Vyatkin, Y.K. Chamorovskii, A.A. Fotiadi, "Random lasing in a short Er-doped artificial Rayleigh fiber," *Results in Physics* 16, 102868 (2020).
3. V.V. Spirin, J.L. Bueno Escobedo, D.A. Korobko, P. Mégret, and A.A. Fotiadi, "Stabilizing DFB laser injection-locked to an external fiber-optic ring resonator," *Optics Express* 28, 478-484 (2020).
4. D.A. Korobko, I.O. Zolotovskii, V.V. Svetukhin, A.V. Zhukov, A.N. Fomin, C.V. Borisova, A.A. Fotiadi, "Detuning effects in Brillouin ring microresonator laser," *Optics Express* 28, 4962-4972 (2020).
5. V.V. Spirin, J.L.B. Escobedo, D.A. Korobko, P. Mégret, A.A. Fotiadi, "Dual-frequency laser comprising a single fiber ring cavity for self-injection locking of DFB laser diode and Brillouin lasing," *Optics Express* 28(25), 37322-37333 (2020).
6. V. V. Spirin, J. L. Bueno Escobedo, S. V. Miridonov, M. C. Maya Sánchez, C. A. López-Mercado, D. A. Korobko, I. O. Zolotovskii, and A. A. Fotiadi, "Sub-kilohertz Brillouin fiber laser with stabilized self-injection locked DFB pump laser," *Optics & Laser Technology* 141, 107156 (2021).
7. V. A. Ribenek, D. A. Stoliarov, D. A. Korobko, and A. A. Fotiadi, "Pulse repetition rate tuning of a harmonically mode-locked ring fiber laser using resonant optical injection," *Optics Letters* 46, 5687-5690 (2021).
8. A. A. Fotiadi, D. A. Korobko, I. O. Zolotovskii, and J. R. Taylor, "Brillouin-like amplification in rare-earth-doped optical fibers," *Opt. Express* 29, 40345-40359 (2021).
9. A. Abramov, I. Zolotovskii, V. Kamynin, V. Prikhodko, A. Tregubov, D. Stoliarov, M. Yavtushenko, and A. Fotiadi, "High-peak power frequency modulation pulse generation in cascaded fiber configurations with inscribed fiber bragg grating arrays," *Photonics* 8 (2021).
10. A. Abramov, I. Zolotovskii, V. Kamynin, A. Domanov, A. Alekseev, D. Korobko, M. Yavtushenko, and A. Fotiadi, "Generation of subpicosecond pulse trains in fiber cascades comprising a cylindrical waveguide with propagating refractive index wave," *Photonics* 8 (2021).
11. V. A. Ribenek, D. A. Stoliarov, D. A. Korobko, and A. A. Fotiadi, "Mitigation of the supermode noise in a harmonically mode-locked ring fiber laser using optical injection," *Optics Letters* 46, 5747-5750 (2021).
12. C. A. Lopez-Mercado, D. A. Korobko, I. O. Zolotovskii, and A. A. Fotiadi, "Application of dual-frequency self-injecting locked DFB laser for Brillouin optical time domain analysis," *Sensors* 21, 6859 (2021).
13. A. Abramov, I. Zolotovskii, V. Lapin, P. Mironov, M. Yavtushenko, V. Svetukhin, and A. Fotiadi, "Amplification and Generation of Frequency-Modulated Soliton Pulses in Nonuniform Active Fiber Configurations," *Photonics* 9(3), 160 (2022).
14. D. A. Korobko, V. A. Ribenek, D. A. Stoliarov, P. Mégret, and A. A. Fotiadi, "Resonantly induced mitigation of supermode noise in a harmonically mode-locked fiber laser: revealing the underlying mechanisms," *Opt. Express* 30(10), 17243 (2022).
15. D. C. Kirsch, A. Bednyakova, P. Varak, P. Honzatko, B. Cadier, T. Robin, A. Fotiadi, P. Peterka, and M. Chernysheva, "Gain-controlled broadband tuneability in self-mode-locked Thulium-doped fibre laser," *Communication Physics* 5(1), (2022).

Фотиади Андрей Александрович

«25» ноября 2022 г.