

ОТЗЫВ

официального оппонента
доктора физико-математических наук,
Мельникова Леонида Аркадьевича
на диссертацию **Яруновой Елизаветы Андреевны**
**«Стабилизация оптического поля широкоапертурных лазеров с
помощью внешней оптической инжекции»,**
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.6. Оптика

Актуальность темы диссертации. Диссертационная работа Яруновой Е. А. посвящена исследованию пространственно-временной динамики широкоапертурных лазеров, которая характеризуется нерегулярным излучением, что вызвано различными пространственно-временными неустойчивостями. В настоящее время исследование и разработка широкоапертурных лазеров мотивируется увеличением мощности излучения при сохранении компактного продольного размера. Автором в диссертации подробно изложено, что твердотельным лазерам класса В свойственна волновая неустойчивость, которая приводит к нерегулярной динамике в поперечном сечении генерируемого пучка. Кроме того, известно, что модуляция накачки в широкоапертурных лазерах приводит к параметрической неустойчивости даже если в отсутствии модуляции лазерная система устойчива. Параметрическая неустойчивость приводит либо к формированию упорядоченных пространственно-временных структур, либо к пространственно-временному хаосу. Широкоапертурные полупроводниковые поверхностно излучающие лазеры с вертикальным резонатором (VCSEL) подвержены модуляционной неустойчивости. В оптике данная неустойчивость может приводить к формированию оптических паттернов, генерации оптических солитонов, возникновению оптических волн-убийц, что имеет множество применений, но также может приводить к филаментациям и ухудшению качества пучка.

Таким образом, описанные в диссертационной работе типы неустойчивостей приводят к нерегулярной динамике в поперечном сечении пучка лазера, которую для практических приложений необходимо подавить. Ввиду выше сказанного, тема диссертационной работы Яруновой Е. А. обоснованно является актуальной, так как она направлена на исследование методов улучшения пространственного и временного качества излучения широкоапертурных лазеров. Основное внимание в диссертационной работе уделяется, в частности, методу

Входящий №	206-8624
Дата	18 НОЯ 2024
Самарский университет	

использования дополнительного внешнего оптического излучения малой амплитуды.

Содержание диссертационной работы. *Во введении* изложена актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору известных теоретически и экспериментально полученных примеров нерегулярного излучения широкоапертурных лазеров. *В разделе 1.1* приведен обзор основных типов пространственно-временных оптических неустойчивостей, развивающихся в таких устройствах. Кроме того, проведено краткое сравнение известных методов стабилизации лазерного излучения. *В разделе 1.2* представлена математическая модель Максвелла-Блоха для описания динамики широкоапертурных твердотельных, газовых лазеров, а также полупроводниковых лазеров на квантовых точках. *Раздел 1.3* посвящен описанию эффективной модели Максвелла-Блоха для полупроводниковых поверхностно-излучающих лазеров с вертикальным резонатором (VCSEL). Продемонстрирована методика исключения поляризации и доказывается применимость подобного приближения для описания динамики VCSEL. *В разделе 1.4* приведены численные методики, использованные для получения результатов данной диссертации. Основные результаты первой главы представлены в *разделе 1.5*.

Во второй главе приведены результаты подавления оптических неустойчивостей, возникающих в широкоапертурных лазерах класса В. *В разделе 2.1* исследуется эффективность нерезонансной внешней оптической инжекции для подавления неустойчивости Андронова-Хопфа (волновая неустойчивость). *В разделе 2.2* в систему уравнений Максвелла-Блоха вводится модуляция параметра тока накачки, что приводит к развитию неустойчивости Фарадея (параметрической неустойчивости). Проверяется эффективность метода внешней оптической инжекции для подавления неустойчивости Фарадея. *В разделе 2.3* исследуются вопросы стабилизации динамики для параметров системы, при которых развивается как неустойчивость Андронова-Хопфа, так и неустойчивость Фарадея. Рассматривается возможность и условия стабилизации нерезонансным внешним оптическим излучением. Основные результаты главы представлены в *разделе 2.4*.

В третьей главе продемонстрировано, что внешнее оптическое излучение слабой амплитуды эффективно подавляет модуляционную неустойчивость и стабилизирует излучение широкоапертурного VCSEL. *Раздел 3.1* посвящен исследованию механизма стабилизации пространственно-временной динамики широкоапертурного VCSEL с помощью слабой внешней резонансной оптической

инжекции. Численно показано, что внешнее оптическое излучение малой амплитуды позволяет подавить оптические неустойчивости и стабилизировать излучение широкоапертурного VCSEL. В разделе 3.2 описывается возможность формирования стационарных пространственных оптических структур в виде полос (страйпов) и гексагонов в системе широкоапертурного VCSEL под воздействием внешнего оптического излучения. В разделе 3.3 приводятся численные расчеты динамики оптического поля VCSEL с учетом формы профиля тока накачки и геометрии пучка внешнего оптического излучения. Исследуется, как влияет ширина пучка внешнего оптического излучения на пороговое значение амплитуды внешнего резонансного излучения, необходимое для стабилизации. Основные результаты третьей главы представлены в разделе 3.4.

В главе 4 исследуется система широкоапертурного VCSEL с нерезонансной внешней оптической инъекцией. В разделе 4.1 показано, что учет малой по модулю частотной отстройки, между свободно генерируемым и инжeksiруемым излучением не разрушает эффект стабилизации динамики оптического поля широкоапертурного VCSEL. В разделе 4.2 рассматривается случай положительного фактора Генри. Исследуется существование бистабильных режимов в системе. Показано, что увеличение значения фактора Генри увеличивает области неустойчивостей Тьюринга и плоской волны. В разделе 4.3 рассматривается случай отрицательного фактора Генри. Обнаружено формирование стационарных оптических структур в виде полос и гексагонов. Показано, что рост тока накачки приводит к формированию в системе, помимо неустойчивости Тьюринга, неустойчивости плоской волны. Основные результаты четвертой главы представлены в разделе 4.4. В заключении сформулированы основные полученные научные результаты работы.

Таким образом, диссертация изложена на 127 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 144 наименования.

Приведенная характеристика разделов диссертации позволяет сделать вывод, что содержание диссертационного исследования полностью соответствует положениям, выносимым на защиту. Содержание автореферата полностью соответствует диссертационной работе.

Новизна проведенных исследований и полученных результатов.

1. Автором диссертации проведено исследование динамики широкоапертурного лазера класса В как аналитическими методами, так и с помощью численного моделирования двумерной нестационарной системы уравнений Максвелла-Блоха (двухуровневая модель с однородным уширением). В результате, впервые найдены условия, при которых внешняя нерезонансная инъекция слабого сигнала является эффективной для подавления обоих типов неустойчивостей (волновой и параметрической), развивающихся в таких лазерах. Показано, что подавление неустойчивости имеет пороговый характер, то есть

происходит при превышении интенсивности инжектируемого излучения некоторого порогового значения. Важным отличием настоящей диссертации от более ранних исследований является учет частотной отстройки между генерируемым и инжектируемым излучением, а также определение условий подавления параметрической неустойчивости.

2. Метод слабой оптической инъекции был впервые использован для стабилизации излучения широкоапертурного VCSEL. Аналитические и численные исследования проводились на основе стандартно применяемой к полупроводниковым лазерам двумерной математической модели, учитывающей фактор Генри. Были аналитически определены размеры поперечной лазерной апертуры, при которых в отсутствие инъекции начинает развиваться модуляционная неустойчивость. Впервые автором было показано, что стабилизация модуляционной неустойчивости в VCSEL достигается за счет управляемого внешней оптической инъекцией изменения величины стационарного поля генерации, а не за счет подавления релаксационных колебаний, как в случае волновой и параметрических неустойчивостей.

3. Также было показано впервые, что с помощью слабой оптической инъекции можно как преобразовать хаотические филаменты в регулярные стационарные оптические структуры (полосы и гексагоны), так и полностью стабилизировать широкоапертурный VCSEL. Определено пороговое значение амплитуды внешнего оптического излучения (выражение для критического значения оптического поля) необходимое для получения высококогерентного нефиламентного выходного пучка. Данный результат позволяет предсказывать эффективность метода внешней оптической инъекции при различных физических параметрах работы VCSEL.

4. Кроме того, Яруновой Е. А. проведены расчеты, учитывающие геометрию пучка внешнего оптического излучения и профиль тока накачки. С помощью численного моделирования впервые обнаружено, что, изменяя ширину пучка внешнего оптического излучения, можно осуществлять переключение между структурами в виде колец, полос и гексагонов. Также были построены зависимость пороговой амплитуды инъекции от степени кривизны профиля накачки и зависимость пороговой амплитуды инъекции от ширины пучка этого внешнего излучения.

5. Автором рассмотрен случай некогерентного внешнего оптического излучения в широкоапертурном VCSEL. Построена S-кривая однородного стационарного решения в зависимости от амплитуды внешней оптической инъекции и показана корреляция между бистабильностью и развитием неустойчивостей в системе. Получено, что в системе могут наблюдаться эффекты оптической бистабильности в зависимости от амплитуды тока накачки.

Определены параметры системы, при которых формируются полосы и гексагоны, при этом пространственный размер структур находится в согласии с проведенным линейным анализом.

Практическая значимость результатов, полученных в диссертации, заключается в том, что в работе с помощью аналитических расчетов и численных экспериментов показано, что метод внешнего оптического излучения может успешно применяться для подавления различных типов пространственно-временных неустойчивостей в широкоапертурных лазерах и стабилизировать лазерный пучок, что в перспективе позволит создавать компактные мощные источники лазерного излучения.

Теоретическая значимость диссертационной работы связана с тем, что в работе получены условия и границы применимости использования внешнего оптического излучения для подавления пространственно-временных неустойчивостей разных типов, что важно для лазерной физики и нелинейной динамики оптических систем.

Степень обоснованности и достоверности полученных положений и выводов. Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается классическими известными моделями для широкоапертурных лазеров, а также использованием характерных лазерных параметров, соответствующих определенным типам лазеров. Все полученные численные результаты находятся в согласии с аналитическими выкладками. В диссертации обосновано использование численных методов, конечно-разностных схем, начальных и граничных условий численных задач.

Основные результаты диссертации отражены в 9 статьях, опубликованных в профильных научных изданиях, рекомендованных ВАК и/или рецензируемых базами данных Scopus и Web of Science. Автором также получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Замечания и вопросы по диссертационной работе.

В целом, принципиальных замечаний по диссертационной работе нет. Задачи поставлены корректно, соответствуют современному уровню представлений о процессах, происходящих в рассматриваемых типах лазеров, для численного моделирования выбраны соответствующие задачам численные методы.

В диссертации Е.А. Яруновой нехарактерным в положительном смысле для большинства работ по динамике лазеров является широкое использование дисперсионных диаграмм и диаграмм устойчивости.

Работа Е.А. Яруновой содержит некоторые неточности:

- В работе есть небольшое число невыправленных опечаток.
- Метод переменных направлений, используемый в работе, в литературе по численным методам (например, Самарский А.А. Введение в численные методы и др.) часто называется методом суммарной аппроксимации. Это может немного запутать читателя.
- Динамика лазерных систем, рассмотренных в работе, не содержит отдельных уравнений для встречных волн, то есть электромагнитное поле взято в приближении среднего поля на длине резонатора. Это заметно упрощает динамику систем, и применение этого приближения (mean field limit в англоязычной литературе) требует некоторого обоснования от автора. Наличие встречных волн может привести к так называемой релаксационной неустойчивости (R.V.Johnson, J.H.Marburger, Phys.Rev.A4, 1175(1971)), неустойчивости с учетом структуры встречных пучков (Paul Narum, Alexander L. Gaeta, Mark D. Skeldon, and Robert W. Boyd.Vol. 5, No. 3/March 1988/J. Opt. Soc. Am. B)
- Не очень понятно описано, каким методом решались СЛАУ в 1.4. так как описание алгоритма в этом разделе относится к методу Кранка-Никольсона, в котором часто используется метод прогонки.

Заключение. Указанные выше замечания не носят принципиальный характер и не снижают общей значимости, научной и практической ценности диссертационной работы, содержание которой соответствует п. 1. «Развитие физических основ волновой оптики, включая физические процессы интерференции, дифракции, поляризации и когерентности света», п. 2 «Принципы формирования световых пучков и электромагнитных полей субволновых масштабов. Структурированный свет, в том числе спиральные пучки. Оптика анизотропных, движущихся, нестационарных сред, металлооптика и плазмоника» и п.13 «Развитие физических основ квантовой и нелинейной оптики и спектроскопии. Самовоздействие света в среде» направлений исследований паспорта научной специальности 1.3.6. Оптика.

Диссертационная работа «Стабилизация оптического поля широкоапертурных лазеров с помощью внешней оптической инжекции» является завершенным исследованием, обладающим научной новизной и практической значимостью, и отвечает критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Ярунова Елизавета Андреевна

заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Официальный оппонент, профессор, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.05 - Оптика, профессор кафедры «Приборостроение» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

lam-pels@ya.ru

410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77.

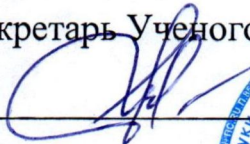


Мельников Леонид Аркадьевич

11 ноября 2024 г.

Подпись Мельникова Леонида Аркадьевича заверяю:

Ученый секретарь Ученого совета СГТУ имени Гагарина Ю.А.



Потапова Анжелика Владимировна

