

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной деятельности
ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»,
д.т.н., профессор



Н. В. Любомирский

2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» на диссертационную работу 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 диссертационной работы

Актуальность темы представленной Яруновой Е. А. диссертационной работы обусловлена тем, что в последние годы существует большая востребованность в создании суперкомпактных источников света, которые используются в оптических системах связи. Для этих целей рассматриваются широкоапертурные твердотельные и полупроводниковые лазеры, а также полупроводниковые вертикально-излучающие лазеры (VCSEL). В последние годы внимание обращено на лазеры типа VCSEL которые могут быть использованы в быстродействующих оптоволоконных системах передачи и обработки информации, датчиках и сенсорах различного типа, высокопроизводительных компьютерных системах, а также как элементы сенсорных систем распознавания жестов или лиц.

Перечисленные типы лазеров будут иметь компактные продольные размеры, что будет востребовано во многих приложениях, но для увеличения мощности выходного излучения их поперечную апертуру увеличивают. Из-за широкой поперечной апертуры в таких устройствах происходит взаимодействие большого числа поперечных мод резонатора и развиваются различные пространственно-временные оптические неустойчивости, которые были подробно классифицированы автором в диссертации.

Таким образом, на сегодняшний день актуальной задачей является поиск универсального и наиболее эффективного метода стабилизации излучения таких лазеров. В связи с вышеизложенным в диссертационной работе Яруновой Е. А.



обоснованно рассматривалась стабилизация оптического поля широкоапертурных лазеров с помощью инъекции внешнего оптического излучения малой амплитуды, а также исследовалась возможность контроля и управления пространственно-временными оптическими структурами, формируемыми в таких системах. Решаемые Яруновой Е. А. в диссертации задачи являются научно значимыми и имеют практическую ценность. Автором диссертации успешно продемонстрировано, что рассмотренный метод слабого внешнего оптического излучения позволяет подавлять различные пространственно-временные оптические неустойчивости в широкоапертурных лазерах, а также в VCSEL и получать пространственно-однородный лазерный пучок.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 144 наименования. Работа изложена на 127 страницах и содержит 63 рисунка.

Во введении автор обосновала актуальности темы диссертации, сформулировала цель и задачи исследования, научную новизну, представила основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 автором рассматривались особенности пространственно-временной динамики оптического поля широкоапертурных лазеров и основные математические модели, используемые для их описания. В частности, в разделе 1.1 показано, что динамика широкоапертурных лазеров естественным образом подвержена различным пространственно-временным оптическим неустойчивостям. Для этого в подразделе 1.1.1 приводится обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных пространственно-временной динамике широкоапертурных лазеров. Далее, в подразделе 1.1.2 дается подробное описание основных типов неустойчивостей, возникающих в широкоапертурных лазерах – стационарных неустойчивостей (неустойчивость Тьюринга, модуляционная, плоской волны), а также колебательных (Андропова – Хопфа (волновая) и Фарадея (параметрическая)). Кроме того, подраздел 1.1.3 содержит краткий обзор различных методов стабилизации лазерного излучения, из которого можно сделать вывод, что метод внешней оптической инъекции имеет ряд преимуществ относительно других методов. В разделе 1.2 представлена система уравнений Максвелла-Блоха с учетом внешнего оптического излучения, позволяющая исследовать механизм подавления пространственно-временных оптических неустойчивостей в широкоапертурных лазерах класса В. Данная модель не учитывает фактор Генри - параметр, который является важной характеристикой оптических свойств полупроводниковых сред. По этой причине, в следующем разделе 1.3 вводится эффективная модель Максвелла-Блоха с учетом внешнего

оптического излучения, позволяющая исследовать динамику широкоапертурных полупроводниковых VCSEL с учетом роли фактора Генри. Раздел 1.4 содержит описание используемой в диссертации методики для численного решения систем дифференциальных уравнений. Основные результаты первой главы представлены в разделе 1.5.

В главе 2 приведены результаты подавления оптических неустойчивостей, возникающих в широкоапертурных лазерах класса В. Раздел 2.1 посвящен подавлению неустойчивости Андронова-Хопфа с помощью внешнего излучения слабой амплитуды. При этом учитывается частотная отстройка между генерируемым излучением и инжектируемым излучением. В разделе 2.2 вводится модуляция параметра тока накачки и исследуется эффективность метода внешней оптической инъекции для подавления неустойчивости Фарадея (параметрической неустойчивости). В разделе 2.3 рассматривается работа лазера в области параметров, при которых развиваются оба типа неустойчивостей и показывается, что возможно одновременное подавление, как неустойчивости Андронова-Хопфа, так и неустойчивости Фарадея. Результаты второй главы представлены в разделе 2.4.

Третья глава посвящена исследованию пространственно-временной динамики оптического поля широкоапертурного VCSEL. В разделе 3.1 показывается, что модуляционная неустойчивость в широкоапертурном VCSEL приводит к нерегулярному излучению. Демонстрируется, что внешнее оптическое излучение слабой амплитуды успешно подавляет модуляционную неустойчивость и стабилизирует излучение VCSEL. В разделе 3.2 описывается механизм формирования стационарных пространственных оптических структур в широкоапертурном VCSEL с помощью внешнего оптического излучения. Результаты, представленные в разделе 3.3, учитывают кривизну профиля тока накачки и геометрию пучка внешнего оптического излучения, что позволяет провести оценки зависимости амплитуды внешнего излучения от ширины оптического пучка и степени кривизны профиля. Показано, что эффективность инжектируемого излучения возрастает по мере сглаживания краев профиля тока накачки. Рассмотрено, что изменение амплитуды и ширины пучка внешнего оптического излучения позволяет управлять типом наблюдаемых стационарных пространственных структур. Основные результаты третьей главы представлены в разделе 3.4.

Материал Главы 4 содержит исследование эффектов, к которым может приводить нерезонансная внешняя инъекция в широкоапертурном VCSEL. В частности, в разделе 4.1 рассматривается стабилизация широкоапертурного VCSEL при наличии малой частотной отстройки между генерируемым и инжектируемым излучением. Построена бифуркационная диаграмма, отражающая пороговое

значение оптической инжекции в зависимости от частотной отстройки. В разделах 4.2 и 4.3 рассматриваются различные режимы работы широкоапертурного VCSEL в зависимости от знака фактора Генри при наличии нерезонансного внешнего оптического излучения. Раздел 4.2 посвящен случаю положительного фактора Генри. Показано, что в таком случае в системе наблюдаются эффекты оптической бистабильности. Построена кривая однородного стационарного решения и показана корреляция между ее бистабильностью и наличием в системе неустойчивостей различных типов. Получено, что рост значения фактора Генри увеличивает области неустойчивости Тьюринга и неустойчивости плоской волны. В разделе 4.3 рассматривается случай отрицательного фактора Генри. Обнаружено формирование пространственных оптических структур – страйпов и гексагонов для стационарных значений из области неустойчивости Тьюринга. Кривая однородного стационарного решения для этого случая может быть как бистабильной, так и моностабильной в зависимости от уровня тока накачки. Получено, что с ростом тока накачки кроме увеличения области неустойчивости Тьюринга, происходит формирование неустойчивости плоской волны. Основные результаты 4 главы представлены в разделе 4.4.

В заключении представлены основные результаты диссертационного исследования.

Таким образом, содержание диссертационного исследования полностью соответствует положениям, выносимым на защиту. Диссертационная работа выполнена на хорошем научном уровне, все представленные результаты, были опубликованы в журналах перечня ВАК, включая высокорейтинговые журналы, специализированные на публикации в области оптических исследований, а также апробированы на всероссийских и международных конференциях по оптике.

Научная новизна полученных результатов

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1) Впервые показано, что учет частотной отстройки между генерируемым и инжектируемым излучением не разрушает эффект стабилизации оптического поля широкоапертурного лазера, динамика которого описывается системой уравнений Максвелла-Блоха. Ранее метод внешнего оптического излучения применялся для подавления неустойчивости Андронова-Хопфа только в резонансном случае. Кроме того, автором диссертации впервые применен метод внешнего оптического излучения для подавления неустойчивости Фарадея, возникающей в результате модуляции накачки в широкоапертурном лазере, а также проведены численные расчеты эффективности метода при одновременном развитии как неустойчивости Фарадея, так и неустойчивости Андронова-Хопфа.

2) Впервые найдены условия подавления модуляционной неустойчивости в широкоапертурном VCSEL с помощью слабого внешнего оптического излучения. Показано, что учет реальных форм профиля накачки и пучка внешнего излучения не разрушает эффект стабилизации оптического поля, а лишь незначительно увеличивает пороговое значение оптической инжекции. Численно продемонстрирована возможность управления типом полученных оптических стационарных пространственных структур посредством изменения амплитуды и ширины пучка внешнего оптического излучения.

3) Впервые определены пороговые значения оптической инжекции необходимой для стабилизации системы широкоапертурного VCSEL с помощью нерезонансной внешней оптической инжекцией в зависимости от частотной отстройки между генерируемым и инжектируемым излучением. Рассмотрено формирование стационарных оптических структур в широкоапертурном VCSEL с отрицательным фактором Генри под воздействием нерезонансного внешнего оптического излучения, а также условия существования бистабильных оптических режимов в такой системе выше порога лазерной генерации при положительном факторе Генри.

Обоснование и достоверность научных положений и выводов

Обоснованность и достоверность полученных в работе результатов обеспечивается использованием общепризнанных математических моделей для моделирования динамики широкоапертурных лазеров. Приведенные в диссертации системы уравнений были многократно апробированы ранее и результаты, полученные на основе этих моделей другими авторами, находятся в хорошем согласии с экспериментальными результатами. Достоверность полученных результатов обеспечивается согласием выполненного аналитически линейного анализа устойчивости однородных стационарных решений систем дифференциальных уравнений, и численного моделирования систем дифференциальных уравнений. Автором проводилась верификация построенных численных схем посредством сравнения с результатами других авторов на тестовых задачах и характерных лазерных режимах. Выводы по главам и в заключении работы чётко аргументированы и убедительны.

Полученные в диссертации результаты и выносимые на защиту положения являются достоверными и обоснованными так как:

- 1) Подавление неустойчивостей Фарадея и Андронова-Хопфа подтверждается согласием численных решений систем дифференциальных уравнений Максвелла-Блоха, так и построенными дисперсионными кривыми.
- 2) Пороговый эффект подавления модуляционной неустойчивости зафиксирован на основе численного моделирования эффективной системы

Максвелла-Блоха, а также построенной диаграммы устойчивости, и выражения для критического стационарного значения оптического поля.

3) Существование бистабильных режимов подтверждается как численным решением эффективной системы Максвелла Блоха с нерезонансной внешней оптической инжекцией, так и построением областей неустойчивостей Тьюринга и плоской волны в пространстве параметров фактора Генри и тока накачки.

По материалам диссертации опубликовано 28 научных работ, в том числе 9 статей в научных изданиях, рекомендованных ВАК и/или рецензируемых базами данных Scopus и Web of Science, 17 работ Всероссийских и международных конференций, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Опубликованные работы в полном объеме отражают содержащиеся в диссертации научные результаты.

Теоретическая и практическая значимость результатов и выводов диссертационной работы

Проведенные численные и аналитические расчеты подтверждают возможность использования нерезонансного излучения от одного стабильно генерирующего компактного лазера для стабилизации излучения другого широкоапертурного лазера, генерирующего пучок слабой когерентности. Получены диапазоны амплитуды внешнего оптического излучения и частотной отстройки (часто физически неустранимой) между генерируемым и инжектируемым излучением, которые будут крайне необходимы при проведении подобных экспериментов, и позволят подавить неустойчивости для выбранного набора параметров лазерной генерации.

Получено аналитическое выражение для критического стационарного значения оптического поля в VCSEL, позволяющее численно спрогнозировать пороговое значение оптической инжекции необходимой для стабилизации при выбранных лазерных параметрах и сделать оценку наиболее эффективного случая.

Успешно показано, что внешняя инжекция в широкоапертурном VCSEL позволяет получать стационарные оптические структуры, что представляет собой отдельное направление для дальнейших исследований, но также учтено, что варьирование ширины и амплитуды пучка внешнего излучения позволяет изменять тип стационарных пространственных структур, что позволит использовать такое устройство для оптического переключения и оптической памяти. Кроме того, рассмотренный в диссертации метод оптической инжекции имеет ряд преимуществ перед другими способами стабилизации оптического излучения, а наиболее

значительное из них это получение устойчивого во времени квазиоднородного профиля генерации.

Рекомендации по использованию полученных результатов

Результаты диссертационной работы рекомендуется к использованию в лабораториях, специализирующихся в области динамики лазеров, нелинейной оптики, а также в учебно-исследовательских целях для подготовки специалистов. Результаты диссертационного исследования могут быть полезны для создания экспериментальных установок на основе системы лазеров «ведущий-ведомый», которые позволят управлять оптическим пучком одного лазера, путем введения слабого излучения от другого.

Замечания по диссертационной работе

Диссертация не лишена некоторых недостатков.

1. Вообще говоря, VCSEL типы полупроводниковых лазеров предназначены для передачи больших массивов данных, поскольку они имеют малую расходимость симметричного пучка. Поэтому сразу возникает вопрос, зачем создавать лазеры с большой расходимостью и асимметрией пучка, чтобы затем исследовать их неустойчивость?
2. Из текста диссертации не ясно, какая длительность воздействия внешним оптическим излучением необходима для стабилизации широкоапертурного лазера?
3. Не указаны мощности работы таких широкоапертурных лазеров, а также при каких частотах рассматривается модуляция накачки.
4. В работе не оговаривается, какие интенсивности внешнего оптического излучения необходимы для стабилизации?
5. В диссертации недостаточно уделено внимание способам и схемам введения внешнего излучения на систему широкоапертурного лазера.

Заключение

В диссертации Яруновой Е. А. изложены новые, научно обоснованные технологические решения для разработки компактных и мощных источников пространственно-однородного излучения, что является существенным вкладом в развитие оптических технологий. Указанные замечания не снижают научной и практической ценности диссертационной работы, которая является завершенным исследованием и 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. Автореферат диссертации правильно отражает ее содержание и полностью соответствует структуре работы.

Диссертация «Стабилизация оптического поля широкоапертурных лазеров с помощью внешней оптической инъекции» выполнена на высоком научном уровне, содержит результаты, обладающие научной новизной и практической значимостью, 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.

Диссертация и отзыв обсуждены и одобрены на расширенном заседании кафедры общей физики физико-технического института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» (протокол №2 от 17.10.2024).

Отзыв составил

заведующий кафедрой общей физики,

д.ф.-м.н., профессор


Воляр Александр Владимирович

Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Адрес: Российская Федерация, Республика Крым, г. Симферополь, 295007, проспект Академика Вернадского, 4

Телефон (3652) 60-84-98

Электронная почта cfuv@crimeaedu.ru Сайт <https://cfuv.ru/>

