

**Ярунова Елизавета Андреевна**

**СТАБИЛИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ШИРОКОАПЕРТУРНЫХ  
ЛАЗЕРОВ С ПОМОЩЬЮ ВНЕШНЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ ИНЖЕКЦИИ**

1.3.6. Оптика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена на кафедре физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет) и в теоретическом секторе Самарского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (СФ ФИАН).

**Научный руководитель:**

**Молевич Нонна Евгеньевна**, доктор физико-математических наук, профессор.

**Официальные оппоненты:**

**Мельников Леонид Аркадьевич**, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», профессор кафедры приборостроения;

**Осипов Олег Владимирович**, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», заведующий кафедрой высшей математики.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», Республика Крым, г. Симферополь.

Защита состоится 6 декабря 2024 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» [https://ssau.ru/resources/dis\\_protection/yarunova](https://ssau.ru/resources/dis_protection/yarunova)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.379.01  
к.ф.-м.н, доцент

Телегин А. М.

## Общая характеристика работы

**Актуальность.** Диссертация посвящена теоретическому исследованию стабилизации оптического поля широкоапертурных лазеров с помощью инъекции внешнего излучения, а также контролю и управлению пространственно-временными оптическими структурами, формируемыми в таких системах.

Говоря о востребованности широкоапертурных лазеров, стоит отметить, что современная тенденция в области оптических систем связи – это использование миниатюрных устройств. Данный запрос стимулирует активное развитие исследований, направленных на разработку ультракомпактных источников света (С.-Н.Cheng, 2021; С.-Н.Cheng, 2022; А.Liu, 2019). В частности, в высокоскоростных оптических системах связи для этих целей используются твердотельные микрочиповые лазеры и полупроводниковые вертикально-излучающие лазеры. Короткая длина резонатора таких лазеров позволяет легко добиться работы на единственной продольной моде и небольшого времени отклика лазера на управляющее внешнее воздействие. В то же время, малая длина резонатора приводит к достаточно низкой выходной мощности, что ограничивает применимость лазера только для задач передачи данных на короткие расстояния. Простое увеличение уровня накачки с целью повышения мощности приводит к сильному термическому нагреву активной среды, её деградации и ухудшению качества излучения.

Наиболее естественный способ обойти это ограничение и повысить выходную мощность, не отказываясь от всех преимуществ конфигурации с коротким резонатором – это увеличить поперечное сечение активной среды лазера. Однако, ценой полученной выгоды является ухудшение характеристик излучаемого луча из-за возникающей конкуренции между поперечными пространственными модами. В связи с этим актуально исследовать как особенности нерегулярной динамики оптического поля широкоапертурных лазеров, так и методы улучшения пространственного и временного качества оптического излучения таких устройств.

**Степень разработанности темы.** Взаимодействие большого числа поперечных мод широкоапертурном оптическом резонаторе приводит к развитию различных пространственно-временных поперечных неустойчивостей (Р.К.Jakobsen, 1992; Е.Cabrera, 2006; А.V.Pakhomov, 2016). Твердотельные и полупроводниковые лазеры в основном относятся к лазерам динамического класса В, которым свойственна неустойчивость оптического поля Андронова-Хопфа (волновая неустойчивость оптического поля). Развитие данной неустойчивости связывают с неустойчивостью режима пространственно-однородной генерации широкоапертурного лазера по отношению к малым пространственно-временным возмущениям оптического поля. Неустойчивость Андронова-Хопфа относится к неустойчивостям колебательного типа, так как определяется наличием положительной действительной части комплексного корня дисперсионного уравнения. Неустойчивость Андронова-Хопфа приводит к формированию сложных нестационарных пространственно-временных оптических структур, включая бегущие и стоячие волны, хаотические режимы (А.V.Pakhomov, 2016; D.A.Anchikov, 2016; D.A.Anchikov, 2017).

Как уже было сказано выше, важнейшим применением широкоапертурных твердотельных и полупроводниковых лазеров являются оптические системы связи. Одним из наиболее распространенных методов передачи информации является

прямая модуляция тока накачки. Известно, что модуляция накачки может приводить к возбуждению поперечных оптических структур (D.A.Anchikov, 2017; A.A.Krents, 2017; M.Radziunas, 2011). В частности, в работах (D.A.Anchikov, 2017; A.A.Krents, 2017) показано, что модуляция накачки в широкоапертурных лазерах приводит к неустойчивости Фарадея (параметрической неустойчивости) оптического поля.

Отдельно стоит сказать, что широкоапертурным полупроводниковым поверхностно излучающим лазерам с вертикальным резонатором (VCSEL) свойственна модуляционная неустойчивость оптического поля (K.Panajotov, 2010; S.Kumar, 2017). В оптике данная неустойчивость может приводить к формированию оптических паттернов (K.Staliunas, 1998; D.Michaelis, 1997), генерации оптических солитонов (M.Brambilla, 1997; M.Tlidi, 2015), возникновению оптических волнубийц (C.Rimoldi, 2021; C.Rimoldi, 2022), что имеет множество применений, но также может приводить к филаментациям (A.J.Campillo, 1973) и ухудшению качества оптического излучения. Модуляционная неустойчивость (МН) является частным случаем стационарной неустойчивости Тьюринга. Кроме того, в системе широкоапертурного VCSEL может развиваться еще один тип неустойчивостей – неустойчивость плоской волны (НПВ). В работе (M.C.Cross, 1987) была приведена классификация перечисленных типов неустойчивостей в зависимости от поведения корней дисперсионного уравнения. На рисунке 1 приведены дисперсионные кривые, соответствующие различным типам неустойчивостей. Хорошо видно, что данные стационарные неустойчивости характеризуются положительным действительным корнем  $\lambda_{Re}$  дисперсионного уравнения, но отличаются диапазоном неустойчивых волновых чисел  $k$ .

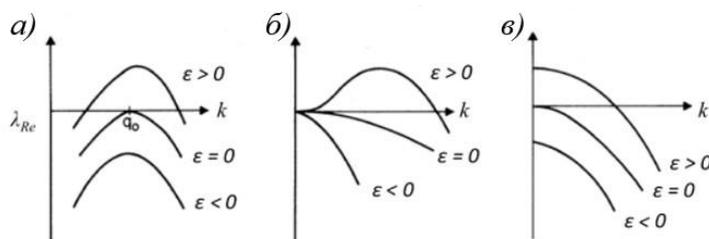


Рисунок 1 – Зависимость  $\lambda_{Re}(k)$  от значения волновых чисел и управляющего параметра  $\epsilon$  для трех различных типов неустойчивостей а) неустойчивость Тьюринга б) модуляционная неустойчивость в) неустойчивость плоской волны

Описанные типы неустойчивостей приводят к нерегулярной динамике в поперечном сечении оптического пучка, которую для практических приложений необходимо подавить. В связи с этим важно найти способы улучшения пространственного и временного качества оптического излучения широкоапертурных лазеров. Существует большое разнообразие методов стабилизации оптического поля лазерного излучения. Например, в работе (R.Herrero, 2012) исследуется способ подавления модуляционной неустойчивости оптического поля с помощью пространственной модуляции тока накачки в полупроводниковых лазерах полосковой геометрии. В работах (W.W.Ahmed, 2015; W.W.Ahmed, 2016) исследуется стабилизация излучения VCSEL, подверженного модуляционной неустойчивости, с помощью пространственно-временной модуляции накачки. Существуют более сложные схемы стабилизации модуляционной неустойчивости, основанные на одновременной реализации пространственной модуляции тока накачки и изменения показателя преломления (W.W.Ahmed, 2018; J.Medina, 2018), а также другие способы стабилизации (K.Kim,

2022; K.Kim, 2023; S.Bittner, 2020). Кроме того, свою эффективность доказали методы стабилизации, основанные на внешней обратной связи, как для подавления неустойчивости Андронова-Хопфа (D.O'Brien, 2004), так и для подавления оптических филаментаций иной природы (N.Gaciu, 2008; D.O'Brien, 2004; P.Wolff, 2004; T.Tachikawa, 2010).

Ранее было показано, что стабилизация оптического поля в широкоапертурных лазерах возможна с помощью дополнительного внешнего излучения высокой амплитуды (S.Takimoto, 2009; A.Gavrielides, 1997; F.M.Mogensen, 1985), такой, что интенсивность внешнего излучения сравнима с генерируемой. Подобное соотношение интенсивностей хоть и позволяет достичь желаемого профиля излучения, но делает реализацию метода в массовом производстве достаточно затратным. В связи с этим возникает интерес к достижению аналогичного результата, но воздействием внешним дополнительным оптическим излучением слабой амплитуды. Также, представляет интерес проверить эффективность метода оптической инъекции для стабилизации динамики широкоапертурных лазеров по отношению к различным пространственно-временным оптическим неустойчивостям.

Можно заключить, что **актуальность** диссертационного исследования обусловлена запросом современных технологий на создание мощных компактных лазеров со стабильным пространственно-однородным оптическим пучком.

**Цель диссертационной работы** – определить особенности подавления различных типов пространственно-временных неустойчивостей оптических полей, генерируемых в широкоапертурных лазерах, с помощью метода внешней оптической инъекции. Рассчитать параметры внешнего когерентного излучения, позволяющего подавлять неустойчивости оптических полей.

#### **Задачи диссертационной работы:**

1. Определить области значений амплитуды внешнего излучения и частотной отстройки между генерируемым и инжектируемым излучением, в которых эффективно подавляются неустойчивости оптического поля типа Андронова-Хопфа и/или Фарадея в широкоапертурном лазере динамического класса В.
2. Описать особенности подавления модуляционной неустойчивости оптического поля, возникающей в широкоапертурных VCSEL (поверхностно-излучающих лазерах с вертикальным резонатором), с помощью резонансной внешней оптической инъекции. Изучить влияние формы профиля тока накачки и геометрии пучка внешнего оптического излучения на стабилизацию широкоапертурного VCSEL и формирование стационарных оптических структур.
3. Исследовать влияние значения фактора Генри и значения тока накачки на динамику и стационарную структуру оптического поля широкоапертурного VCSEL при наличии частотной отстройки между генерируемым и инжектируемым излучением. Определить области значений амплитуды внешнего излучения и частотной отстройки между генерируемым и инжектируемым излучением, в которых эффективно подавляются неустойчивости оптического поля в широкоапертурном VCSEL.

#### **Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Показано, что неустойчивость Фарадея оптического поля широкоапертурного лазера с модуляцией параметра накачки эффективно подавляется внешним оптическим излучением. Найдены области параметров внешнего оптического излучения, при которых возможно одновременное подавление неустойчивостей

оптического поля типа Андронова-Хопфа и Фарадея, в том числе при наличии частотной отстройки между генерируемым и инжектируемым излучением.

2. Установлено, что модуляционная неустойчивость оптического поля эффективно подавляется резонансным внешним оптическим излучением в широкоапертурном VCSEL. Определено критическое значение амплитуды оптической инжекции, необходимой для генерации пространственного однородного профиля интенсивности. Показано, что учет кривизны форм профиля контакта тока накачки и пучка внешнего оптического излучения не разрушает эффект стабилизации оптического пучка, а лишь незначительно увеличивает значение пороговой амплитуды оптической инжекции. Получено, что изменение амплитуды и ширины пучка внешнего оптического излучения позволяет управлять типом наблюдаемых стационарных пространственных оптических структур.

3. Определена область значений амплитуды оптической инжекции и отстройки между генерируемым излучением и инжектируемым, в которой нерезонансная оптическая инжекция способна подавлять модуляционные неустойчивости оптического поля в широкоапертурном VCSEL. Для случая положительного фактора Генри при токах накачки выше пороговых построена кривая зависимости модуля амплитуды однородного стационарного оптического поля от модуля амплитуды внешнего нерезонансного оптического излучения и показано соответствие между ее бистабильностью и наличием в системе неустойчивостей различных типов. Для случая отрицательного фактора Генри обнаружено формирование стационарных пространственных оптических структур.

**Область исследования** соответствует следующим пунктам направлений исследований паспорта научной специальности **1.3.6 Оптика:**

1. Развитие физических основ волновой оптики, включая физические процессы интерференции, дифракции, поляризации и когерентности света.

2. Принципы формирования световых пучков и электромагнитных полей субволновых масштабов. Структурированный свет, в том числе спиральные пучки. Оптика анизотропных, движущихся, нестационарных сред, металлооптика и плазмоники.

13. Развитие физических основ квантовой и нелинейной оптики и спектроскопии. Самовоздействие света в среде.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Построенные диаграммы устойчивости определяют области параметров внешнего оптического излучения, при которых подавляются одновременно существующие неустойчивости оптического поля типа Андронова-Хопфа и Фарадея.

2. Полученное выражение для критического стационарного значения оптического поля позволяет рассчитать пороговую амплитуду резонансной оптической инжекции, необходимую для подавления модуляционной неустойчивости оптического поля VCSEL.

3. Результаты численных расчетов на основе эффективной модели Максвелла-Блоха определяют условия формирования и переключения между оптическими паттернами в поле излучения VCSEL, а также зависимости порогового значения оптической инжекции от ширины оптического пучка внешнего излучения, кривизны профиля тока накачки, частотной отстройки между генерируемым и инжектируемым излучением, величины и знака фактора Генри.

Таким образом, **практическая и теоретическая ценность** проведенных

исследований заключается в том, что их результаты могут быть использованы для улучшения оптического качества широкоапертурных лазерных систем, а также формирования стационарных оптических паттернов.

**Достоверность** полученных научных результатов обеспечивается общепринятыми математическими моделями для широкоапертурных лазеров, а также отсутствием противоречий между аналитическими результатами и численными решениями. Проведена верификация численной схемы посредством сравнения с известными результатами других авторов на тестовых задачах.

**Публикации.** 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, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Апробация.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах Самарского Филиала Физического Института РАН им. П.Н. Лебедева. Результаты работы докладывались на XVI-XXI Всероссийском молодежном Самарском конкурсе-конференции научных работ по оптике и лазерной физике (Самара 2018-2023 гг.), XXXII Всероссийской школе-конференции «Волны» им. Сухорукова (МГУ, Москва, 2021 г.), Международной конференции Saratov Fall Meeting (Саратов, 2019, 2021, 2022, 2023 гг.), XVIII, XIX школах «Нелинейные волны» (Н. Новгород, 2018, 2020), Международной конференции International Conference Laser Optics (Санкт-Петербург, 2018, 2020 гг.), Международной конференции и молодёжной школе «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ- 2019-2021, 2023, 2024 гг.), IX-X Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2023, ЛаПлаз-2024, Международном молодежном научном форуме Ломоносов-2023.

#### **Связь с государственными программами и НИР.**

Работы по теме диссертации выполнялись в соответствии с планами фундаментальных научно-исследовательских работ по грантам и программам: государственное задание Минобрнауки РФ FSSS-2020-0014, FSSS-2023-0009, 0023-2019-0003, FFMR-2024-0017.

**Авторский вклад.** Все результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично либо при его определяющем личном участии. Результаты, вошедшие в диссертацию, были отмечены дипломами Самарского конкурса-конференции научных работ по оптике и лазерной физике: 2018 г. – 2 место, 2022г. – интересный доклад, 2023 г. – 2 место; дипломом за 3 место в 2021 г. в стендовой секции международной конференции и молодёжной школы «Информационные технологии и нанотехнологии»; стипендией Правительства Российской Федерации по приоритетному направлению за 2021/2022 гг.; премиями победителя в Самарском областном конкурсе «Молодой учёный» (номинация «студент» 2019 г., «аспирант» - 2021 г); премиями победителя областного конкурса по назначению денежных выплат молодым ученым и конструкторам в 2022г, в 2024г.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 127 страниц, включая 63 рисунка, список литературы содержит 144 наименования.

**Благодарности.** Автор выражает благодарности к.ф.-м.н. Кренцу Антону Анатольевичу, доценту кафедры физики Самарского университета, за консультации

при написании диссертации, а также научному руководителю д.ф.-м.н., профессору Молевич Нонне Евгеньевне.

### Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные результаты работы и их научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** рассматриваются особенности пространственно-временной динамики 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 инжекции имеет ряд преимуществ относительно других методов.

В **разделе 1.2** представлена система уравнений Максвелла-Блоха с учетом нерезонансного внешнего оптического излучения, позволяющая исследовать механизм подавления пространственно-временных оптических неустойчивостей в широкоапертурных лазерах класса В. Система уравнений Максвелла-Блоха для огибающих электрического поля  $E$ , поляризации  $P$  и инверсии населенности  $D$ , общепризнанно и адекватно моделирующая пространственно-временную динамику излучения широкоапертурного лазера, имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} &= ia\Delta_{\perp}E + \sigma(P - (1 - i\delta)E + E_{inj}e^{i\theta t}), \\ \frac{\partial P}{\partial t} &= -(1 + i\delta)P + DE, \\ \frac{\partial D}{\partial t} &= -\gamma \left[ D - r(t) + \frac{1}{2}(E^*P + P^*E) \right]. \end{aligned} \tag{1}$$

Обезразмеривание огибающих проводилось следующим образом:  $D = \tilde{D}\omega N_0\mu^2/\hbar\epsilon_0k\gamma_{\perp}$ ,  $P = \tilde{P}i2\omega N_0\mu^2/\hbar\epsilon_0k\sqrt{\gamma_{\parallel}\gamma_{\perp}}$ ,  $E = \tilde{E}2\mu/\hbar\sqrt{\gamma_{\parallel}\gamma_{\perp}}$ ,  $N_0$  – концентрация резонансных атомов,  $\mu$  – дипольный момент резонансного перехода,  $\tilde{D}$ ,  $\tilde{P}$ ,  $\tilde{E}$  – размерные переменные;  $\gamma = \gamma_{\parallel}/\gamma_{\perp}$  и  $\sigma = k/\gamma_{\perp}$ , где  $\gamma_{\perp}$ ,  $\gamma_{\parallel}$  и  $k$  – скорости релаксации поляризации среды, инверсии населённости и электрического поля в резонаторе соответственно;  $\delta = (\omega_{21} - \omega_c)/(\gamma_{\perp} + k)$  – обезразмеренная отстройка между центром линии усиления и частотой резонатора  $\omega_c$ , при этом несущая оптическая частота равна собственной частоте свободной генерации лазера, с учетом эффекта затягивания частоты  $\omega = (\gamma_{\perp}\omega_c + k\omega_{21})/(k + \gamma_{\perp})$ ;  $\Delta_{\perp}$  – двумерный поперечный лапласиан,  $a = c^2/(2\omega\gamma_{\perp}d^2)$  – дифракционный параметр, где  $d$  –

характерный пространственный размер задачи. Время обезразмерно на  $\gamma_{\perp}^{-1}$ .  $r$  – накачка, нормированная на пороговое значение при нулевой отстройке.  $E_{inj}$  – амплитуда внешнего оптического излучения,  $\theta$  – частотная отстройка между свободно генерируемым и инжектируемым излучением.

В системе (1) предполагается, что лазер работает на единственной продольной моде, а активная среда имеет однородно уширенную линию. Не учет в (1) фактора Генри мотивируется симметричностью линии усиления твердотельных и газовых лазеров, но система (1) также активно применяется для моделирования динамики полупроводниковых лазеров на квантовых точках. Не смотря на то, что система (1) описывает лазер, работающий на единственной продольной моде, весь спектр поперечных оптических мод оказывается учтен автоматически за счет включения в модель двумерного Лапласиана и надлежащих граничных условий на боковых поверхностях однородной активной среды и резонатора лазера.

Как уже было сказано, модель (1) не учитывает фактор Генри – параметр, который является важной характеристикой полупроводниковых сред. По этой причине, в следующем **разделе 1.3** используется так называемая эффективная модель Максвелла-Блоха, которая, как известно, позволяет адекватно описать динамику широкоапертурных полупроводниковых VCSELs. С учетом внешнего оптического излучения эта модель имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial t} = -[1 + i\vartheta + 2C(i\alpha - 1)(N - 1)]E + i\Delta_{\perp}E + E_{inj}, \\ \frac{\partial N}{\partial t} = -\gamma \left[ N - I + |E|^2(N - 1) \right] + \gamma d\Delta_{\perp}N, \end{cases} \quad (2)$$

где  $E, N$  – безразмерные огибающие электрического поля и инверсии населённости, соответственно,  $\vartheta$  – частотная отстройка между частотой генерации и частотой резонатора. Величина  $\gamma = \tau_p / \tau_c$ , где  $\tau_c$  – скорость релаксации инверсии населенности. Время  $t$  обезразмерено на  $\tau_p = 2L / \nu T$ , где  $T$  – коэффициент пропускания зеркал,  $\nu = c/n$ , а  $n$  – коэффициент преломления среды,  $L$  – длина полости резонатора. Пространственные координаты  $(x, y)$  обезразмерены на  $\sqrt{a} = \sqrt{L\lambda_0 / 2\pi T}$ , где  $\lambda_0$  – центральная линия излучения. В уравнениях (2)  $C$  – параметр, который определяется коэффициентом усиления лазера и скоростью релаксации фотонов.  $\Delta_{\perp}$  – двумерный поперечный Лапласиан, описывает дифракцию и диффузию носителей в поперечном направлении. Ток накачки  $I$  генерирует носители внутри активной области, а  $d = l_D^2 / a$  – безразмерный коэффициент диффузии, где  $l_D$  – характерная длина диффузии. Параметр  $\alpha$  является важной характеристикой полупроводниковых сред и известен в литературе как фактор Генри. Данная модель получена в приближении медленно меняющихся амплитуд с учетом генерации на одной продольной моде.

**Раздел 1.4** содержит описание используемой в диссертации методики для численного решения систем дифференциальных уравнений. Основные результаты первой главы описаны в разделе 1.5.

Во **второй главе** приведены результаты подавления оптических неустойчивостей, возникающих в широкоапертурных лазерах класса В, описываемых моделью Максвелла-Блоха (1). **Раздел 2.1** посвящен подавлению

неустойчивости Андронова-Хопфа с помощью внешнего излучения слабой амплитуды в широкоапертурном лазере на основе анализа системы Максвелла-Блоха (1). При этом учитывается частотная отстройка между генерируемым излучением и инжектируемым излучением. Выполненный ранее (A.V.Pakhomov, 2016; D.A.Anchikov, 2016; D.A.Anchikov, 2017) линейный анализ устойчивости показал, что в системе без оптической инжекции развивается неустойчивость Андронова-Хопфа (волновая неустойчивость), которая характеризуется парой комплексно-сопряженных корней дисперсионного уравнения, положительная действительная часть которых определяет инкремент нарастания малых возмущений оптического поля. Численно построенная бифуркационная диаграмма показывает, что динамика системы зависит от значений параметров тока накачки  $r$  и частотной отстройки  $\delta$  и может демонстрировать как оптические филаментации, так и пространственно-однородную динамику. Инжекция внешнего оптического излучения подавляет неустойчивость Андронова-Хопфа (действительная часть комплексно-сопряженных корней становится отрицательной), что приводит к стабилизации лазерного излучения. Этот результат подтверждается как линейным анализом, так численным решением системы (1). Установлено, что в случае, когда частота инжектируемого и генерируемого излучения не совпадают, эффект стабилизации не разрушается, а существует области синхронизации, в которой инжекция эффективно подавляет неустойчивость Андронова-Хопфа. Численно построена бифуркационная диаграмма (рисунок 2а) подтверждает данные результаты. Заштрихованная область рисунка 2а – область отсутствия неустойчивости Андронова-Хопфа. На рисунках 2б и 2в показан вид мгновенного распределения интенсивности при параметрах, соответствующих точкам 1 и 2 бифуркационной диаграммы рисунка 2а, соответственно.

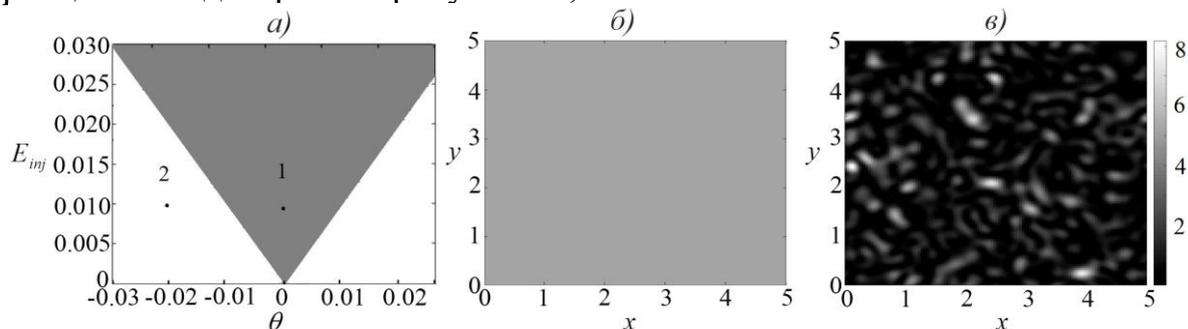


Рисунок 2 – а) Бифуркационная диаграмма (диаграмма устойчивости) для параметров системы (1)  $\sigma = 0,025$ ,  $\gamma = 5 \cdot 10^{-5}$ ,  $a = 10^{-4}$ ,  $r = 2$ ,  $\delta = -0,15$ . Мгновенное распределение интенсивности при  $E_{inj} = 0,01$  и отстройке б)  $\theta = 0$  (точка 1 бифуркационной диаграммы рисунка 2а) и в)  $\theta = -0,02$  (точка 2 бифуркационной диаграммы рисунка 2а)

В разделе 2.2 в систему Максвелла-Блоха (1) вводится модуляция параметра тока накачки в виде  $r(t) = r_0(1 + m \cdot \cos(\Omega t))$ , где  $m$  - глубина модуляции,  $\Omega$  - частота модуляции и исследуется эффективность метода внешней оптической инжекции для подавления неустойчивости Фарадея (параметрической неустойчивости).

Известно, что модуляция параметра накачки в системе (1) приводит к колебаниям амплитуды поля лазерного излучения с той же частотой. Анализ устойчивости Флоке показал, что модуляция параметра накачки может приводить к возбуждению пространственно-временных структур, если частота модуляции близка

к частоте релаксационных колебаний. При увеличении глубины модуляции  $m$  наблюдается переход лазера в режим пространственно-временного хаоса. Даже если подобрать параметры работающего лазера такими, чтобы в исходной системе (1) не развивалась неустойчивость Андронова-Хопфа, то модуляция параметра накачки все равно приводит к неустойчивости Фарадея и генерации пространственно-временного хаоса.

Теоретически исследована динамика широкоапертурного лазера с временной периодической модуляцией параметра накачки и резонансной инъекцией внешнего оптического излучения. Показано, что оптическая инъекция эффективно подавляет поперечные неустойчивости оптического поля, возникающие в результате модуляции накачки.

**В разделе 2.3** рассматривается работа широкоапертурного лазера в области параметров, при которых развиваются оба типа неустойчивостей и показывается, что с помощью оптической инъекции возможно одновременное подавление, как неустойчивости Андронова-Хопфа, так и неустойчивости Фарадея.

Построенные бифуркационные диаграммы (рисунок 3), определяют пороговые границы инжектируемого сигнала, начиная с которых при выбранных глубине модуляции  $m$  и отстройке  $\theta$  будет наблюдаться стабилизация излучения широкоапертурного лазера (для определенности выбрано три значения  $m=0$ ,  $m=0,25$  и  $m=0,5$ ). Другое общепринятое название этих диаграмм – диаграммы устойчивости. Рост  $m$  приводит к росту порогового значения. Эффективное подавление неустойчивых поперечных мод при  $m=0,5$  происходит при параметрах, находящихся в области рисунка выше кривой с точками, при  $m=0,25$  – в области выше пунктирной кривой, при  $m=0$  – в области выше сплошной кривой. Основные результаты второй главы описаны в разделе 2.4.

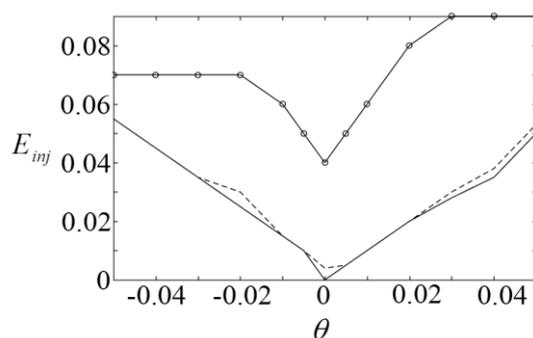


Рисунок 3 – Бифуркационная диаграмма (диаграмма устойчивости) при параметрах  $\sigma=0,025$ ,  $\gamma=5\cdot 10^{-5}$ ,  $r=2$ ,  $\delta=-0,15$ ,  $a=6\cdot 10^{-4}$ , определяющая границу пороговых значений амплитуды инжекции в зависимости от глубины модуляции  $m$  и частотной отстройки  $\theta$

**В третьей главе** рассматривается динамика оптического поля полупроводникового поверхностно излучающего лазера с вертикальным резонатором (VCSEL) с широкой апертурой и резонансным внешним оптическим излучением.

**Раздел 3.1** посвящен исследованию механизма стабилизации пространственно-временной динамики оптического поля широкоапертурного VCSEL с помощью слабой внешней резонансной оптической инъекции на основе эффективной модели Максвелла-Блоха (2). В отсутствие внешнего излучения широкоапертурный VCSEL генерирует нерегулярную динамику в результате развития модуляционной неустойчивости. Построена бифуркационная диаграмма в пространстве волновых чисел  $q$  и однородных стационарных значений поля  $|E_s|$ , позволяющая определить границы неустойчивостей Андронова-Хопфа и Тьюринга, которые также могут развиваться в системе. Модуляционная неустойчивость (МН) является частным случаем неустойчивости Тьюринга и находится внутри границ

области (рисунок 4б). Аналитически и численно продемонстрировано, что внешнее оптическое излучение слабой амплитуды успешно подавляет модуляционную неустойчивость и стабилизирует излучение VCSEL. Получена формула для критического стационарного значения оптического поля:

$$|E_{cr}| = \sqrt{-1 + \mu\beta/2 + \sqrt{\mu(\mu\beta^2 - 4(\beta - 1))}/2}, \quad \text{где } \mu = 2C(I - 1) \text{ и } \beta = \sqrt{1 + \alpha^2},$$

позволяющая рассчитать пороговую амплитуду оптической инжекции, необходимую для стабилизации излучения. Это означает, для стационарных значений  $|E_s| > |E_{cr}|$  будет наблюдаться высококогерентный нефиламентированный выходной оптический пучок. Обнаружен иной механизм стабилизации излучения VCSEL, по сравнению с системой Максвелла-Блоха (1), связанный с изменением значения стационарного поля генерации.

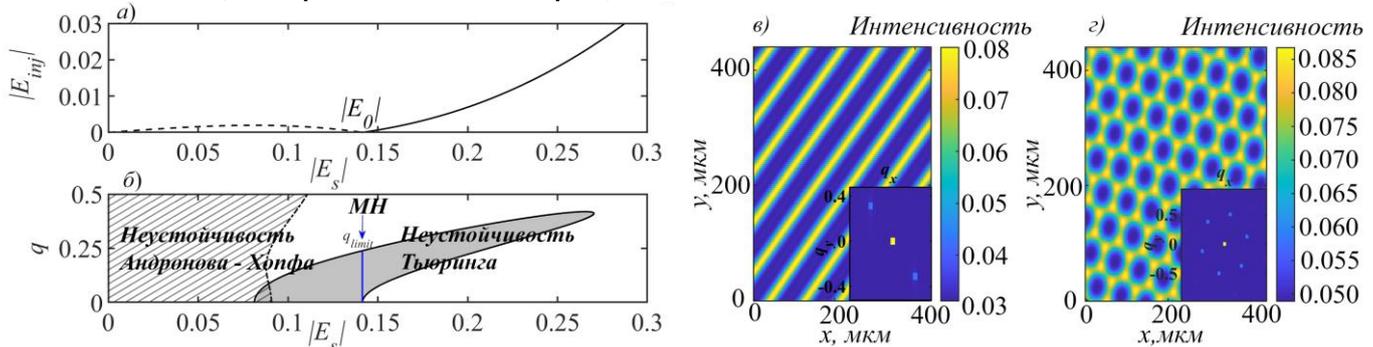


Рисунок 4 – а) Кривая амплитуды однородного стационарного оптического поля. Хорошо видно, что в отсутствие инжекции ( $|E_{inj}| = 0$ ) существует одно нетривиальное решение  $|E_0|$ , которое подвержено модуляционной неустойчивости б) Области неустойчивостей Андронова-Хопфа и Тьюринга. Незакрашенная область соответствует области устойчивой генерации. Пространственное распределение интенсивности и пространственный спектр в дальней зоне для случая в) страйп паттерна при наличии внешнего оптического излучения  $|E_{inj}| = 0,01$  и г) гексагонального паттерна при наличии внешнего оптического излучения  $|E_{inj}| = 0,02$

**В разделе 3.2** описывается механизм формирования стационарных пространственных оптических структур в широкоапертурном VCSEL с помощью внешнего оптического излучения. В результате изменения амплитуды однородного стационарного оптического поля под воздействием внешней оптической инжекции в поперечном профиле интенсивности формируется стационарный оптический паттерн в виде полос (так называемых, страйпов) (рисунок 4в) и в виде гексагонов (рисунок 4г). Таким образом, стационарные пространственные оптические структуры были получены, когда в систему добавлялось внешнее оптическое излучение различной амплитуды, что позволяет «двигать» значение стационарного поля вдоль области неустойчивости Тьюринга и варьировать диапазон неустойчивых волновых чисел.

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 пучка и степени кривизны профиля в эффективной модели Максвелла-Блоха (2) для широкоапертурного VCSEL. В широкоапертурных лазерах форма профиля тока накачки обычно близка к однородной в центральной части с относительно медленным (сглаженным) убыванием к краям апертуры. Для моделирования динамики VCSEL использовался профиль тока накачки, имеющий вид:

$I = I_0 \exp(-0,5((x^2 + y^2)/w_0^2)^n)$ ,  $I_0$  – амплитуда тока накачки,  $w_0$  – определяет расстояние, на котором ток накачки уменьшается в  $\sqrt{e}$  раз, а величина  $n$  – скорость (резкость) спада амплитуды профиля на краях апертуры по сравнению со значением на оси. Для практической оценки эффективности метода оптической инжекции необходимо учесть как профиль токовой накачки лазера, так и геометрию пучка внешнего излучения. Другими словами, для инжектируемого внешнего оптического излучения также рассматривалась более реальная форма пучка в виде:  $E_{inj} = E_{inj0} \exp(-(x^2 + y^2)/w^2)$ , где  $w$  – ширина пучка. В результате численного решения системы дифференциальных уравнений (2) с учетом указанной формы пучка внешнего оптического излучения и профиля тока накачки было показано, что неустойчивости по-прежнему эффективно подавляются и достигается нефиламентированный выходной пучок. Учет реалистичных форм контакта тока накачки и пучка внешнего излучения не разрушает эффект стабилизации, и возникает устойчивое во времени распределение интенсивности, которое в поперечном сечении близко к однородному со слабой модуляцией (рисунок 5б).

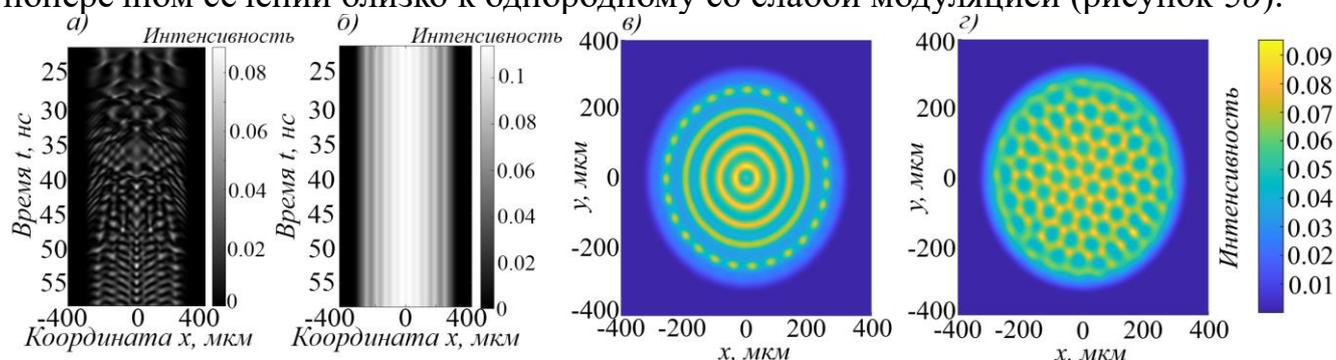


Рисунок 5 – Пространственно-временная динамика оптического поля с учетом профиля накачки с  $I_0 = 1,85$ ,  $n = 10$  и  $w_0 = 350$  мкм а) без внешнего оптического излучения б) с внешним оптическим излучением в виде Гауссова пучка с амплитудой  $E_{inj0} = 0,05$  и шириной пучка  $w = 263$  мкм. в) стационарное распределение интенсивности в виде 5 колец при наличии внешнего оптического излучения в виде пучка Гаусса с амплитудой  $E_{inj0} = 0,02$  шириной  $w = 263$  мкм г) стационарное распределение интенсивности в виде гексагонов при наличии внешнего оптического излучения в виде пучка Гаусса с амплитудой  $E_{inj0} = 0,02$  и шириной  $w = 439$  мкм

Еще одним важным результатом является построенная в диссертации зависимость, показывающая, что эффективность инжектируемого излучения возрастает по мере сглаживания краев профиля тока накачки, а также зависимость пороговой амплитуды внешнего оптического излучения от ширины пучка внешней оптической инжекции. Рассмотрено, что изменение амплитуды и ширины пучка внешнего оптического излучения позволяет управлять типом стационарных пространственных структур и получать полосы, гексагоны, кольца (рисунки 5в и 5г). Основные результаты третьей главы описаны в разделе 3.4.

Материал **Главы 4** содержит исследование эффектов, к которым может приводить наличие частотной отстройки между генерируемым и инжектируемым излучением в широкоапертурном VCSEL. В частности, в **разделе 4.1** рассматривается стабилизация широкоапертурного VCSEL при наличии малой частотной отстройки  $\delta_i$  между генерируемым и инжектируемым излучением. Построена бифуркационная диаграмма (диаграмма устойчивости), отражающая пороговое значение оптической инжекции в зависимости от малой частотной отстройки.

В разделах 4.2 и 4.3 рассматриваются различные режимы работы широкоапертурного VCSEL в зависимости от знака фактора Генри при наличии частотной отстройки между генерируемым и инжектируемым излучением. **Раздел 4.2** посвящен случаю положительного фактора Генри. Показано, что в таком случае в системе наблюдаются эффекты оптической бистабильности. Построена S-кривая однородного стационарного решения (амплитуды оптического поля) и показана корреляция между ее бистабильностью и наличием в системе неустойчивостей различных типов. В случае положительного фактора Генри показано, что в системе может развиваться неустойчивость Тьюринга. В области неустойчивости Тьюринга в свою очередь может быть выделена подобласть, так называемой неустойчивости плоской волны. Кривая однородного стационарного решения в данном случае остается бистабильной при росте значения фактора Генри. Показано, что точки поворота кривой однородного стационарного решения всегда соответствуют границам неустойчивости плоской волны. С увеличением фактора Генри  $\alpha$  оба типа неустойчивостей сохраняются, что подтверждает существование оптической бистабильности в системе (рисунок 6а). Получено, что рост значения фактора Генри  $\alpha$  и тока накачки  $I$  увеличивает области неустойчивости Тьюринга и неустойчивости плоской волны (рисунок 6б).

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 (рисунок 6в). Основные результаты четвертой главы описаны в разделе 4.4.

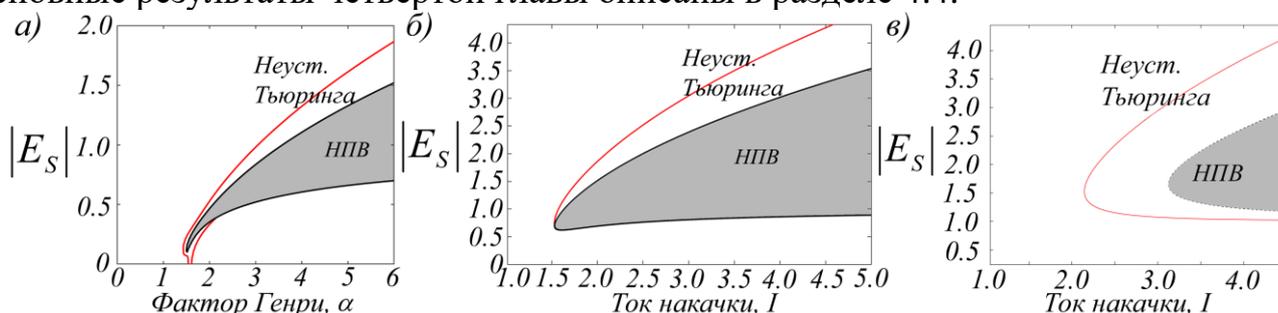


Рисунок 6 – Области НПВ и неустойчивости Тьюринга а) в пространстве  $(\alpha, |E_s|)$  б) в пространстве  $(I, |E_s|)$  для случая положительного фактора Генри в) в пространстве  $(I, |E_s|)$  для случая отрицательного фактора Генри

В **заклучении** перечислены основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы.

1. Найдены области значений амплитуды внешнего излучения и частотной отстройки между генерируемым и инжектируемым излучением, в которых эффективно подавляются неустойчивости оптического поля типа Андронова-Хопфа и/или Фарадея в широкоапертурном лазере динамического класса В. Построены бифуркационные диаграммы, определяющие пороговые границы инжектируемого сигнала. При глубине периодической модуляции параметра накачки  $0 < m < 0,5$  и частотной отстройке  $-0,4 < \theta < 0,4$  ( $\theta$  нормирована на ширину линии усиления),

стабилизирующая интенсивность внешнего оптического излучения находится в пределах 0,01% - 0,8% от интенсивности насыщения.

2. Рассчитано, что для VCSEL с длиной волны генерации равной 850 нм, ширина активной области, на которой возможно развитие модуляционной неустойчивости при выбранных в диссертации параметрах системы, должна быть больше  $L_{\min} \approx 115$  мкм. Предложено для устранения модуляционной неустойчивости оптического поля, генерируемого широкоапертурным VCSEL, управлять стационарным значением генерации с помощью слабой внешней оптической инжекции. Для этого построена бифуркационная диаграмма и найдено выражение, позволяющее определить пороговое значение амплитуды оптической инжекции для смещения модуля амплитуды стационарного поля в устойчивую область. Показано, что для стабилизации оптического поля достаточно, чтобы пороговая амплитуда оптической инжекции была порядка 1% от интенсивности стационарного поля. Показано также, что внешняя оптическая инжекция позволяет получить в поле излучения VCSEL стационарные пространственные оптические структуры различной формы. Продемонстрировано, что изменение амплитуды и ширины пучка внешнего оптического излучения позволяет управлять типом стационарных пространственных оптических структур.

3. Исследовано влияние несовпадения частоты инжектируемого оптического пучка и генерируемого лазером излучения на стабилизацию оптического поля и формирование стационарных оптических структур в широкоапертурном VCSEL в зависимости от знака фактора Генри. Получено, что учет малой частотной отстройки не разрушает эффект стабилизации. При этом с ростом значения модуля отстройки  $|\delta_i|$  между генерируемым и инжектируемым излучением от 0 до 0,3 (отстройка  $|\delta_i|$  нормирована на ширину линии усиления) увеличивается пороговое значение интенсивности внешнего оптического излучения с 0,09% до 0,6% от интенсивности насыщения. Получено, что кривая зависимости модуля амплитуды однородного стационарного оптического поля от модуля амплитуды внешнего нерезонансного оптического излучения (S-кривая) может быть как бистабильной, так и моностабильной в зависимости от параметров системы. Показано, что в случае бистабильности точки поворота данной S-кривой всегда соответствуют границам неустойчивости плоской волны. Из чего сделан вывод, что в рассмотренной системе широкоапертурного VCSEL неустойчивость плоской волны существует, когда S-кривая бистабильна. Получено, что для случая положительного фактора Генри S-кривая всегда бистабильна, и при увеличении фактора Генри и значения тока накачки границы областей неустойчивостей Тьюринга и плоской волны увеличиваются. Для случая отрицательного фактора Генри обнаружены параметрические области формирования стационарных оптических структур, а именно, полос и гексагонов.

### Основные публикации по теме диссертации

1. Stabilization of Broad-Area Laser Emission by Optical Injection / **Е. А. Ярунова**, А. А. Кренц, Н. Е. Молевич, Д. А. Анчиков // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2019. – Т. 46.– № 4. – С. 130-132. (Стабилизация излучения широкоапертурных лазеров с помощью оптической инжекции / **Е. А. Ярунова**, А. А. Кренц, Д. А. Анчиков, Н. Е. Молевич // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2019. – Т. 46.– № 4. – С. 33-37.)

2. Suppression of Spatiotemporal Instabilities in Broad-Area Lasers with Pump Modulation by External Optical Injection / **E. A. Yarusova**, A. A. Krents, N. E. Molevich, D. A. Anchikov // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2021. – Т. 48.– №2. – С. 55-58. (Подавление пространственно-временных неустойчивостей в широкоапертурных лазерах с модуляцией накачки при помощи оптической инъекции / **Е. А. Ярунова**, А. А. Кренц, Д. А. Анчиков, Н. Е. Молевич // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2021. – Т. 48.– № 2. – С. 35-41).

3. **Yarusova, E. A.** Spatiotemporal Dynamics of Broad-Area Lasers with the Pump Modulation and Injection of External Optical Radiation / E. A. Yarusova, A. A. Krents, N. E. Molevich // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2021. – Т. 64.– № 4. – С. 290-299. (**Ярунова, Е. А.** Пространственно-временная динамика широкоапертурных лазеров с модуляцией накачки и инъекцией внешнего оптического излучения / Е. А. Ярунова, А. А. Кренц, Н. Е. Молевич // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2021. – Т. 64.– № 4. – С. 320-330).

4. **Ярунова, Е. А.** Исследование типов неустойчивостей в VCSEL с фактором Генри / Е. А. Ярунова, А. А. Кренц, Н. Е. Молевич // Специальный выпуск журнала Физическое образование в вузах. – 2023. – Т. 29.– № 1. – С.168-171.

5. **Ярунова, Е. А.** Влияние слабой инъекции на пространственно-временные неустойчивости в широкоапертурном полупроводниковом лазере с вертикальным резонатором / Е. А. Ярунова, А. А. Кренц, Н. Е. Молевич // Компьютерная оптика. – 2023. – Т. 47.– № 6. – С.920-926.

6. **Yarusova, E. A.** Suppression of modulation instability in VCSEL by external optical injection / E. A. Yarusova, A. A. Krents, N. E. Molevich // Optics Letters. – 2023. – Т. 48.– №. 15. – С. 4021-4024.

7. **Yarusova, E. A.** Modulation Instability in Driven VCSELs Above Threshold / E. A. Yarusova, A. A. Krents, N. E. Molevich // Optical Memory and Neural Networks. – 2023. – Т. 32. – № Suppl. 1.– С. S46–S53.

8. **Ярунова, Е. А.** Стабилизация излучения широкоапертурного VCSEL дополнительным внешним оптическим пучком / Е. А. Ярунова, А. А. Кренц, Н. Е. Молевич // Журнал технической физики. – 2024. – Т. 94.– №. 3. – С. 474-481.

9. **Ярунова, Е. А.** Оптическая бистабильность в системе широкоапертурного полупроводникового лазера / Е. А. Ярунова, А. А. Кренц, Н. Е. Молевич // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. – 2023.– № 4.– С. 2341001-1-2341001-6.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020611385. Программа построения бифуркационной диаграммы, предназначенной для широкоапертурных лазеров класса В с оптической инъекцией и отстройкой: получено 30.01.2020 / А. А. Кренц, **Е. А. Ярунова.**–2020.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020613093. Программа построения диаграммы, отражающей динамику оптического поля в кольцевом резонаторе с нелинейностью и запаздывающей обратной связью: получено 10.03.2020 / А. А. Кренц, **Е. А. Ярунова.**–2020.