

На правах рукописи

Кострюков Павел Владимирович

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ИЗЛУЧЕНИЯ  
ПРИ СИНХРОНИЗАЦИИ ПОПЕРЕЧНЫХ МОД  
В ЛАЗЕРАХ С ПРОДОЛЬНОЙ НАКАЧКОЙ

Специальность 01.04.21 — лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2009

Работа выполнена на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научные руководители: доктор физико-математических наук,  
профессор Тункин Владимир Григорьевич  
кандидат физико-математических наук  
Горбунков Михаил Валериевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Быков Владимир Павлович  
доктор физико-математических наук,  
профессор Кравцов Николай Владимирович

Ведущая организация: ФГУП НИИ «Полюс» имени М.Ф. Стельмаха

Защита состоится 14 мая 2009 г. в 16<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ, дом 1, строение 62, корпус нелинейной оптики, аудитория имени С.А. Ахманова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 года

Ученый секретарь диссертационного совета Д 501.001.31,  
кандидат физико-математических наук, доцент

Т.М. Ильинова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Диодная накачка твердотельных лазеров вызывает в настоящее время все больший интерес, поскольку позволяет получить высокую эффективность генерации, качество излучения при относительной простоте реализации и компактности<sup>1,2</sup>. В режиме генерации на нескольких поперечных модах эффективность «свет – свет» лазеров с диодной накачкой может достигать 70%<sup>3,4</sup>. Для многих практических применений предпочтителен режим одномодовой генерации. Так, в<sup>5</sup> сообщается о реализации высокоэффективной (58%) одномодовой генерации с близким к гауссовому распределением поля при использовании поперечной схемы накачки. Усреднение пространственной неоднородности накачки проводилось в достаточно сложной схеме с применением геометрии полного внутреннего отражения в активной среде и специально разработанного, астигматически исправленного резонатора с цилиндрическими элементами. Другой и более простой с практической точки зрения способ генерации одномодового излучения — использование продольной схемы накачки, при которой излучение накачки вводится в активную среду вдоль оси резонатора через одну из торцевых граней. Практический интерес представляет случай узкого пучка накачки, диаметр которого меньше диаметра нулевой моды холодного резонатора. Именно в этом случае удастся реализовать высокоэффективную генерацию на гауссовой моде холодного резонатора<sup>6</sup>.

Разработка и оптимизация твердотельных лазерных систем с продольной диодной накачкой представляет собой достаточно емкую задачу. Частью ее является исследование пространственной структуры выходного лазерного излучения.

---

<sup>1</sup> D.W. Hughes, J.R.M. Barr, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **25**, 563-586 (1992).

<sup>2</sup> Н.В. Кравцов, *Квантовая электроника*, **31**(8), 661-677 (2001).

<sup>3</sup> J. Zehetner, *Optics Communications*, **117**, 273-276 (1995).

<sup>4</sup> M.O. Ramirez et al., *Applied Physics B*, **77**, 621-623 (2004).

<sup>5</sup> A. Minassian, B. Thompson, M.J. Damzen, *Applied Physics B*, **76**, 341-343 (2003).

<sup>6</sup> P. Laporta, M. Brussard, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **27**(10), 2319-2326 (1991).

Одной из причин искажения пространственной структуры выходного излучения являются дифракционные эффекты на внутрирезонаторных элементах. Основным таким элементом в лазерах с продольной диодной накачкой, является активная среда с профилированным, т.е. неоднородным по поперечному сечению, распределением усиления, характерным для случая узкой накачки.

Активная среда с профилированным усилением представляет собой элемент с негауссовой функцией пропускания. В общем случае излучение лазера с таким элементом должно отличаться от гауссовых пучков, описывающих моды резонатора с гауссовыми элементами. Возникает естественный вопрос, какими изменениями пространственной структуры излучения сопровождается выигрыш в эффективности генерации, полученный за счет формирования профилированного усиления? При этом актуальной является задача о влиянии конфигурации резонатора на искажения пространственной структуры за счет профилированного усиления.

Продольная схема накачки используется не только в твердотельных лазерах с диодной накачкой. Она также находит применение для накачки лазеров на красителях и лазеров на титан-сапфире. Кроме того, реализованы продольные схемы накачки твердотельных активных сред излучением газовых, твердотельных и лазеров на красителях.

Эксперименты<sup>7,8,9</sup> показывают, что существует ряд так называемых критических конфигураций резонатора, в которых при накачке узким пучком наблюдаются заметные отличия пространственной структуры излучения от гауссовой, в то время как при достаточной отстройке от критических конфигураций пространственная структура излучения близка к гауссовой. Существование критических конфигураций связывается с вырождением мод холодного резонатора по частоте. Любая суперпозиция вырожденных по частоте мод самовоспроизводится за полный обход резонатора<sup>10</sup>. Перераспределение энергии в системе мод в условиях пространственной неоднородности усиления приводит к

---

<sup>7</sup> Q. Zhang, B. Ozygus, H. Weber, *The European Physical Journal - Applied Physics*, **6**, 293-298 (1999).

<sup>8</sup> H.-H. Wu et al., *Optics Communications*, **165**, 225-229 (1999).

<sup>9</sup> G. Martel et al., *Optics Communications*, **201**, 117-127 (2002).

<sup>10</sup> Ю.А. Ананьев, *Оптика и спектроскопия*, **64**(3), 650-652 (1988).

синхронизации поперечных мод: формируется суперпозиция, обеспечивающая максимальное усиление. Для того чтобы обеспечить синхронизацию поперечных мод, или наоборот, исключить возбуждение высших мод в лазерах с продольной накачкой, необходимо исследование как системы критических конфигураций на диаграмме устойчивости, так и пространственной структуры излучения в окрестности отдельных критических конфигураций в зависимости от параметров резонатора и накачки.

Чувствительность выходных распределений излучения к параметрам накачки, в частности к мощности и диаметру пучка, позволяет рассматривать синхронизацию поперечных мод в контексте диагностических применений, например для измерений фокусного расстояния тепловой линзы<sup>11</sup>.

Световые пучки с негауссовыми распределениями интенсивности, формирующиеся в резонаторах с вырождением при профилированном усилении, могут найти применения для создания новых оптических ландшафтов в технологии манипуляции микро- и наночастицами с помощью лазерного излучения<sup>12</sup>.

В имеющихся на данное время работах рассмотрена синхронизация поперечных мод в лазерах с резонаторами длиной до десятка сантиметров. Во многих типах пикосекундных и фемтосекундных лазеров применяются резонаторы длиной ~100 см и более. Синхронизация поперечных мод в резонаторах такой длины не рассматривалась.

Таким образом, синхронизация поперечных мод в лазерах с продольной накачкой представляет собой многогранную задачу, исследование которой является в настоящее время актуальным по целому ряду аспектов.

## **Цели и задачи диссертационной работы**

1. Расчет методом Фокса-Ли распределений амплитуды, фазы и модового состава излучения для критических конфигураций. Определение количества критических конфигураций на диаграмме устойчивости в зависимости от числа Френеля.

---

<sup>11</sup> B. Ozygus, Q. Zhang, *Applied Physics Letters*, **71**(18), 2590-2592 (1997).

<sup>12</sup> D.G. Grier, *Nature*, **424**, 810–816 (2003).

2. Определение значений параметров резонатора и накачки (коэффициента и степени неоднородности усиления), обеспечивающих синхронизацию поперечных мод в критических конфигурациях. Разработка аналитической модели для получения простых оценок данных значений.
3. Исследование эффекта синхронизации поперечных мод в лазерах с метровыми резонаторами и сравнение с результатами, полученными при длине резонатора до десяти сантиметров.
4. Исследование пространственных распределений интенсивности излучения диодных линеек с волоконным выводом. Разработка модели расчета распределения инверсии населенностей в активной среде.

### **Научная новизна**

1. Впервые определено влияние числа Френеля на количество критических конфигураций на диаграмме устойчивости двухзеркального резонатора. По форме распределений интенсивности на зеркалах обнаружено существование двух типов критических конфигураций, определяемых параметрами вырождения.
2. Разработана аналитическая модель двух пучков, взаимодействующих за счет пространственной неоднородности усиления, позволяющая определить условия, обеспечивающие синхронизацию поперечных мод. Показано, что результаты аналитической модели близки к полученным численным методом Фокса-Ли.
3. Оригинальными являются полученные оценки пороговых значений параметров распределения усиления (диаметра и усиления на оси) и ширины диапазона отстройек от строгого вырождения, при которых реализуется синхронизация поперечных мод.
4. Впервые исследована синхронизация поперечных мод в лазере с метровым резонатором. Обнаружено нарушение круговой симметрии пространственной структуры излучения, связанное с астигматизмом резонатора. Определены условия проявления астигматизма.

## **Практическая ценность**

1. Получены простые аналитические оценки значений диаметра накачки, позволяющих обеспечить или исключить проявление той или иной критической конфигурации. Определены ширины критических областей на диаграмме устойчивости.
2. Продемонстрирована возможность диагностики слабого астигматизма лазерных кристаллов в условиях расщепления вырождения при синхронизации поперечных мод. Показано, что для диагностики предпочтительно использовать глухие резонаторы больших длин.
3. В схеме компактного лазера с накачкой одиночным лазерным диодом мощностью 5 Вт продемонстрирована возможность разделения конфигураций резонатора на критические и некритические в случае использования в качестве активной среды кристаллов Nd:YLF и невозможность такого разделения в случае кристаллов Nd:YAG. Предложена методика поиска оптимальной конфигурации резонатора.

## **Защищаемые положения**

1. Число областей на диаграмме устойчивости двухзеркального лазерного резонатора, в которых при продольной накачке реализуется синхронизация поперечных мод, растет с увеличением числа Френеля, оставаясь ограниченным значением, определяемым отношением диаметров пучка накачки и нулевой моды холодного резонатора. Области синхронизации расширяются с увеличением резонаторных потерь.
2. Излучение, формирующееся при синхронизации поперечных мод в лазере с продольной накачкой, в зависимости от параметров вырождения имеет на противоположных зеркалах либо близкие, либо существенно различающиеся распределения интенсивности.
3. Модель, построенная на анализе взаимодействия двух мод в условиях пространственно неоднородного усиления, позволяет получить аналитические выражения для пороговых значений параметров распределения усиления и

параметров резонатора, при которых реализуется синхронизация поперечных мод.

4. При синхронизации поперечных мод в условиях проявления астигматизма резонатора для каждого обнаруживающегося вырождения имеют место две различные длины резонатора, при которых излучение представляет собой суперпозиции эрмит-гауссовых мод с нулевыми значениями первого и второго индекса соответственно.

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 4 научных статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК России «Квантовая электроника» и «Applied Optics» и докладывались автором на международных конференциях: IV Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика – 2005», Санкт-Петербург, Россия, 17–21 октября 2005; «The Third Conference on Laser Optics for Young Scientists (LOYS 2006)», Saint-Petersburg, Russia, June 26–30, 2006; International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT 2007), Minsk, Belarus, May 28 – June 1, 2007; XV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», секция «Физика», Москва, Россия, 8–11 апреля 2008; International Conference «Laser Optics 2008», St.Petersburg, Russia, June 23–28, 2008, а также на семинарах кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, Института кристаллографии имени А.В. Шубникова РАН и отделения квантовой радиофизики Физического института имени П.Н. Лебедева РАН.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 134 страницах, включает в себя 47 рисунков, 4 таблицы и 78 формул. Список цитируемой литературы содержит 108 наименований.

## Личный вклад автора

Все изложенные в диссертационной работе оригинальные результаты получены автором лично или при его непосредственном участии.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, научная новизна и защищаемые положения.

В **первой главе «Состояние исследований пространственной структуры излучения лазеров с продольной накачкой»** дан краткий обзор работ по исследованию пространственной структуры излучения лазеров с продольной накачкой. Перечислены основные подходы к описанию таких лазеров. Приведены результаты ряда экспериментальных и теоретических работ, дающих представление о физических процессах, определяющих формирование пространственной структуры излучения. Обсуждаются результаты работ по синхронизации поперечных мод в лазерах с вырожденными резонаторами при накачке узким пучком. **§1.1** посвящен особенностям лазеров с продольной накачкой. Отмечается роль соотношения между диаметром нулевой моды холодного резонатора и эффективным диаметром накачки. Рассматривается механизм искажения пространственной структуры излучения в представляющем практический интерес случае пучка накачки, узкого по сравнению с нулевой модой резонатора. В **§1.2** выделяются подходы к описанию лазеров с продольной накачкой. Описаны приближение амплитудного экрана и особенности профиля пропускания активной среды. Дан обзор основных методов расчета пространственной структуры излучения лазеров с негауссовыми элементами. Обсуждаются способы характеристики отличий пространственной структуры излучения от структуры нулевой моды холодного резонатора. В **§1.3** представлены результаты теоретических и экспериментальных работ по синхронизации поперечных мод в лазерах с продольной накачкой. Существование критических конфигураций связывается с частотным вырождением мод холодного резонатора, которое имеет место при условии

$$\arccos \sqrt{g_1 g_2} = \pi \frac{r}{s}, \quad (1)$$

где  $g_{1,2}$  — параметры конфигурации резонатора,  $r/s$  — несократимая дробь, характеризующая вырождение. Обсуждается возможность существования в резонаторе суперпозиций мод при выполнении условия вырождения. Отмечается, что в имеющихся на данный момент экспериментальных работах по синхронизации поперечных мод в лазерах с продольной накачкой используются резонаторы небольших длин (до десятка см).

Во второй главе «Структура основной моды аксиально-симметричных лазеров с устойчивыми резонаторами при пространственно неоднородном усилении» представлены результаты численного моделирования методом Фокса-Ли распределений комплексной амплитуды основной моды лазера с аксиально-симметричным двухзеркальным резонатором с тонкой активной средой, расположенной на одном из зеркал. В §2.1 представлена схема модельного лазера, описана модель расчета, приведена система уравнений, описывающих распределения комплексной амплитуды на зеркалах резонатора. Резонатор характеризуется параметрами конфигурации  $g_1, g_2$  и числом Френеля  $N_F$ . Рассматривается случай гауссовых профилей усиления в активной среде вида

$$K(r) = 1 + (K_0 - 1) \exp \left[ -\xi^2 \frac{r^2}{w_{AC}^2} \right], \quad (2)$$

где  $K_0$  — усиление на оси,  $w_{AC}$  — радиус нулевой моды холодного резонатора,  $\xi$  — степень неоднородности (равна отношению радиусов нулевой моды и области усиления). Отличие рассчитанных распределений комплексной амплитуды от гауссовых характеризуется введенным параметром  $|\beta_0|^2$ , который представляет собой долю мощности, которая содержится в нулевой моде холодного резонатора. В §2.2 представлены результаты расчета зависимости  $|\beta_0|^2$  от параметров конфигурации резонатора  $g_1$  и  $g_2$  (рис. 1). Значительные снижения  $|\beta_0|^2$  от 1, т.е. заметные отличия распределений основной моды от распределений нулевой моды холодного резонатора, реализуются в критических конфигурациях, которые представляют собой участки гипербол  $g_1 g_2 = const$ . Представлены зависимости  $|\beta_0|^2$  от  $g_2$  для плоскоферических ( $g_1 = 1$ ) и симметричных ( $g_1 = g_2$ ) резонаторов при различных  $N_F$ . В §2.3 приводятся рассчитанные распределения комплексной амплитуды на зеркалах резонатора для ряда критических конфигураций.

Распределения либо имеют вид узкого приосевого пичка на фоне широкого пьедестала, либо представляют собой выраженные кольцевые структуры.

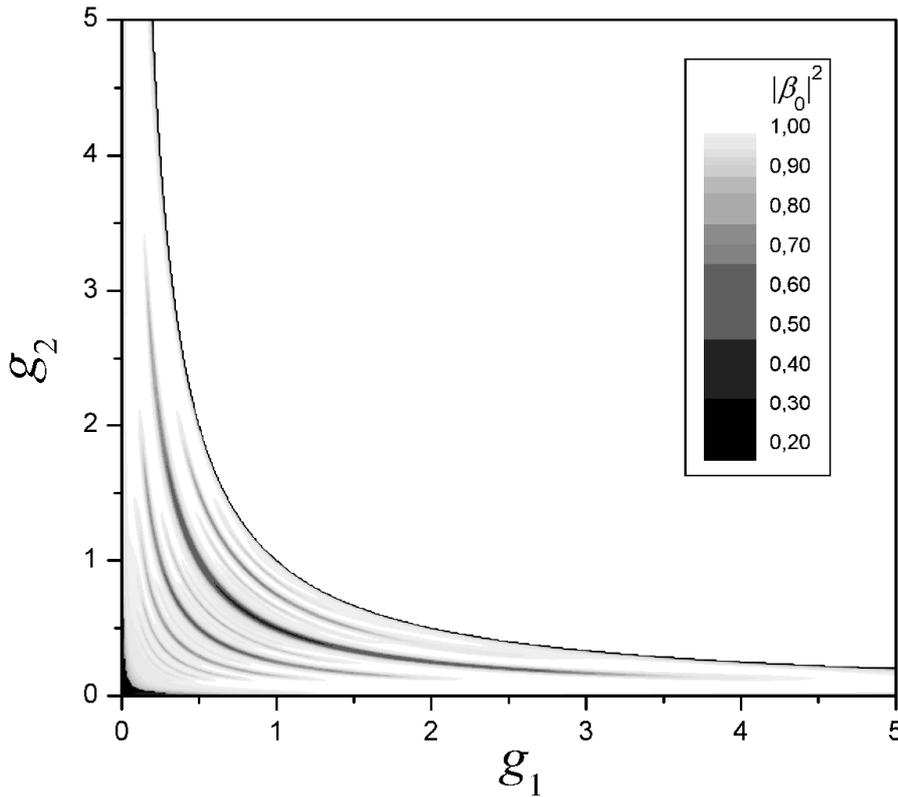


Рис. 1. Зависимость  $|\beta_0|^2$  от  $g_1$  и  $g_2$  при  $N_F = 9$ ,  $K_0 = 2.0$ ,  $\zeta = 3$ .

В §2.4 обсуждаются результаты расчетов. Представлена физическая интерпретация формирования негауссовой основной моды, построенная на основе анализа фазовых набегов лаггер-гауссовых пучков. Разложение распределений комплексной амплитуды показало, что в критических конфигурациях основная мода образована набором лаггер-гауссовых пучков со значениями радиального индекса  $p_j = \frac{s}{2}j$ , где  $j = 0, 1, 2, 3, \dots$  в случае четных  $s$  и  $p_j = sj$  при нечетных  $s$ .

Установлено, что в критических конфигурациях с нечетными  $s$  основная мода имеет на противоположных зеркалах близкие распределения, в то время как при четных  $s$  распределения существенно различаются. В §2.5 рассматриваются два способа приближения пространственной структуры основной моды к гауссовой: за счет перехода к некритической конфигурации резонатора и при установке внутри резонатора диафрагмы. Основные результаты второй главы сформулированы в §2.6.

В третьей главе «Влияние параметров пространственно неоднородного усиления на основную моду в окрестности критических конфигураций» численно и аналитически изучается влияние параметров профилированного усиления — усиления на оси  $K_0$  и степени неоднородности  $\xi$  — на особенности основной моды. В §3.1 представлены результаты расчета методом Фокса-Ли зависимостей  $|\beta_0|^2$  от  $g_2$  для плоскосферических ( $g_1 = 1$ ) и симметричных ( $g_1 = g_2$ ) резонаторов при различных  $K_0$  и  $\xi$ . Результаты расчета показывают, что число критических конфигураций не зависит от  $K_0$ , увеличение  $K_0$  приводит к расширению областей, в пределах которых наблюдается значительное снижение  $|\beta_0|^2$ . Увеличение  $\xi$  приводит к росту числа проявляющихся критических конфигураций. В §3.2 изложено представление активной среды с профилированным усилением как элемента, осуществляющего перераспределение амплитуд в системе лаггерр-гауссовых пучков. Рассмотрены зависимости матричных элементов профилированного усиления вида (2) от  $K_0$  и  $\xi$ . В §3.3 разработана аналитическая модель двух взаимодействующих пучков. Основная мода рассматривается как суперпозиция двух лаггерр-гауссовых пучков с радиальными индексами  $p = 0$  и  $p = \Delta p$ , где  $\Delta p = s/2$  или  $s$  при четном или нечетном  $s$  соответственно. Модель учитывает взаимодействие пучков в условиях пространственно неоднородного усиления, дифракционные потери и относительный сдвиг фаз пучков за обход резонатора, возникающий при отстройке от строгого вырождения. В §3.4 с помощью разработанной модели в предположении, что доля мощности, сосредоточенная в пучке с  $p = \Delta p$  много меньше доли мощности, приходящейся на пучок с  $p = 0$ , получены аналитические выражения для пороговых значений параметров, обеспечивающих синхронизацию поперечных мод. В частности определены значения  $\xi_{0,9}$  такие, что при  $\xi > \xi_{0,9}$  при строгом вырождении в пучке нулевого порядка содержится не более 90% мощности (табл. 1). Также получены аналитические выражения для ширины диапазона отстроек от строгого вырождения на диаграмме устойчивости, в пределах которых реализуется синхронизация поперечных мод. Ширины областей синхронизации увеличиваются с ростом усиления. Показано, что оценки ширин областей синхронизации и величин  $\xi_{0,9}$ , определяемые с помощью аналитической модели хорошо согласуются со

значениями, полученными численным методом Фокса-Ли. В §3.5 представлены основные результаты третьей главы.

$\Delta\rho$	$r/s$	$\xi_{0.9}$ по Фоксу-Ли	$\xi_{0.9}$ по аналитической модели
2	1/4	1.26	1.26
3	1/3, 1/6	1.75, 1.75	1.73
4	1/8, 3/8	2.11, 2.12	2.09
5	1/5, 1/10, 3/10	2.42, 2.43, 2.42	2.40
6	1/12, 5/12	2.75, 2.70	2.67
7	1/7, 2/7	2.97, 2.93	2.92
8	3/16, 5/16	3.17, 3.17	3.15
9	1/9, 2/9	3.53, 3.37	3.36

Табл. 1. Значения  $\xi_{0.9}$  для различных  $r/s$ , полученные методом Фокса-Ли и с помощью аналитической модели двух пучков.

В четвертой главе «Пространственная структура излучения при синхронизации поперечных мод в лазере с астигматическим резонатором» приведены результаты экспериментального и численного исследования синхронизации поперечных мод в Nd:YAG-лазере с продольной диодной накачкой. §4.1 посвящен описанию экспериментальной установки (рис. 2). Исследуемый Nd:YAG-лазер с накачкой излучением лазерного диода имел выходное зеркало с радиусом кривизны 150 см и пропусканием  $< 1\%$ . Пучок накачки в активной среде имел характерные размеры  $0.04 \times 0.12$  мм. В эксперименте регистрировались распределения интенсивности за выходным зеркалом при различных длинах резонатора.

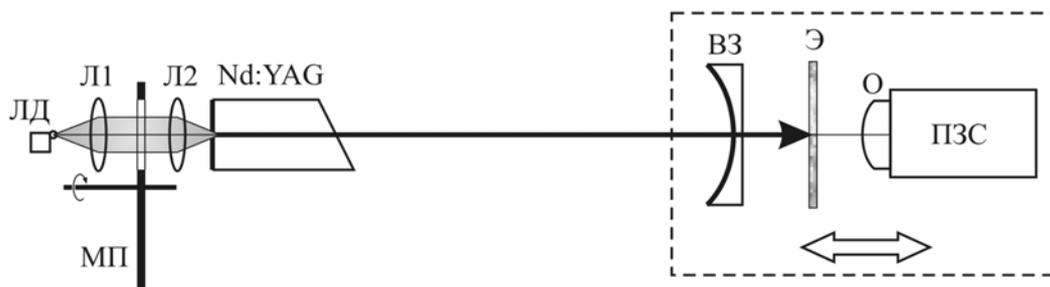


Рис. 2. Схема Nd:YAG-лазера с продольной диодной накачкой. ЛД — лазерный диод, Л1 и Л2 — коллимирующая и фокусирующая линзы, МП — механический прерыватель, ВЗ — выходное зеркало, Э — экран, О — объектив.

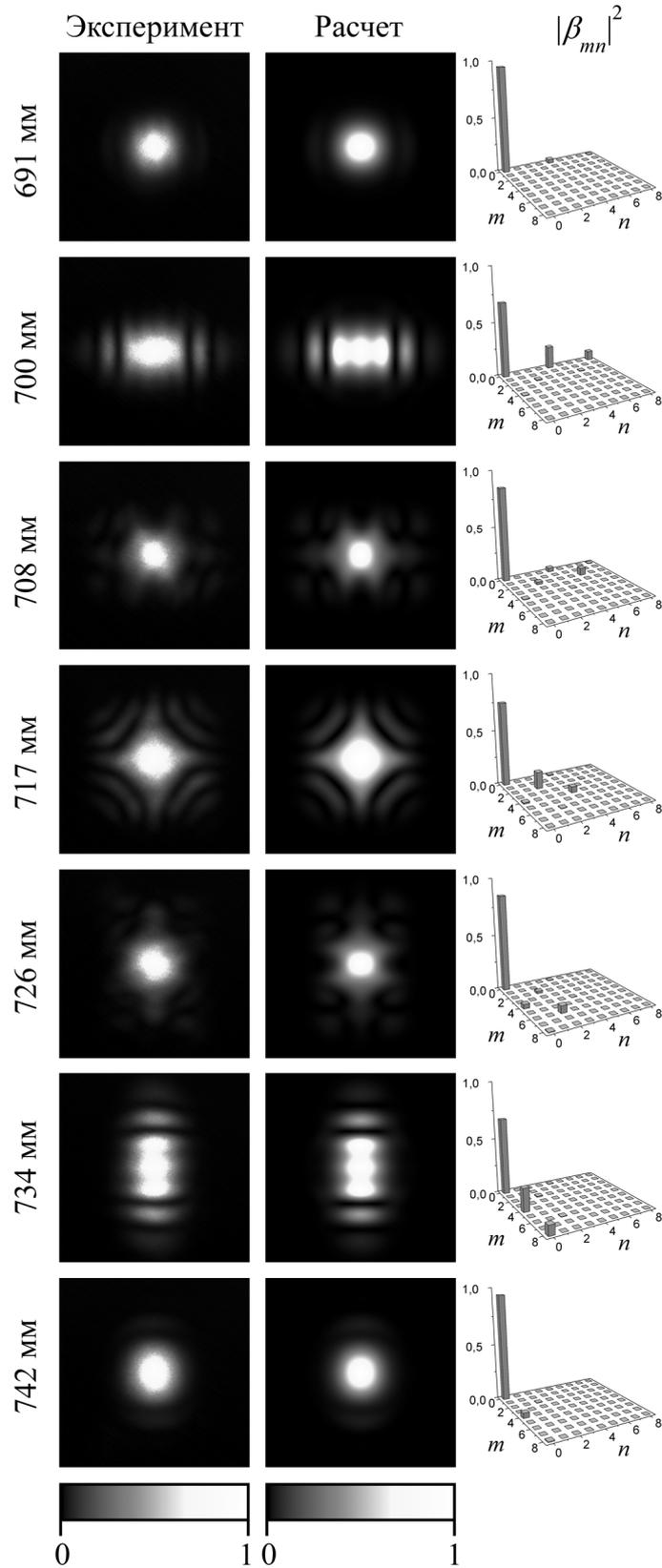


Рис. 3. Экспериментальные (левый столбец) и рассчитанные (средний столбец) распределения интенсивности и относительные энергии эрмит-гауссовых пучков  $|\beta_{mn}|^2$  (правый столбец) в окрестности вырождения с  $r/s = 1/4$ . В миллиметрах указана длина резонатора.  $D_x = 0.057 \text{ м}^{-1}$ ,  $D_y = 0.18 \text{ м}^{-1}$ . Для данного случая  $L_x^{\text{deg}}$  и  $L_y^{\text{deg}}$  равны 700мм и 734мм соответственно.

В §4.2 приводятся экспериментальные результаты. Длина резонатора в эксперименте менялась от 45 см до 140 см. Было обнаружено, что распределения интенсивности излучения при синхронизации поперечных мод не демонстрируют круговой симметрии, наблюдаемой в работах других авторов в случае резонаторов длиной до десятка сантиметров. Нарушение круговой симметрии проявляется в том, что для каждого проявляющегося вырождения существуют две т.н. вырожденные длины  $L_x^{\text{deg}}$  и  $L_y^{\text{deg}}$ , при которых распределения интенсивности развернуты в перпендикулярных друг другу выделенных направлениях. Экспериментальные распределения интенсивности для  $r/s = 1/4$  приведены на рис. 3 (правый столбец). Распределения интенсивности поворачиваются при вращении активной среды относительно оси резонатора. Описанное поведение пространственной структуры наблюдалось для шести кристаллов Nd:YAG и Nd:YLF (от кристалла к кристаллу менялись значения  $L_x^{\text{deg}}$  и  $L_y^{\text{deg}}$  и ориентация выделенных направлений  $x$  и  $y$  относительно плоскости падения на скошенную грань). Предложена интерпретация нарушения круговой симметрии, основанная на расщеплении вырождения за счет действия слабого астигматизма активной среды: неравенство оптических сил активной среды  $D_x$  и  $D_y$  приводит к тому, что условия вырождения для эрмит-гауссовых мод семейств  $HG_{m0}$  и  $HG_{0n}$  с ненулевыми первым и вторым индексами реализуются отдельно, соответственно при длинах  $L_x^{\text{deg}}$  и  $L_y^{\text{deg}}$ . Реализованная для проверки данной интерпретации численная модель расчета распределений интенсивности излучения представлена в §4.3. Модель основана на перераспределении амплитуд в системе астигматических эрмит-гауссовых пучков в условиях пространственно неоднородного усиления. В §4.4 представлены результаты расчета (см. рис. 3). Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными. Отмечается, что расщепление астигматизма позволяет без привлечения численного моделирования измерить величину астигматизма лазерных кристаллов. Оптические силы  $D_x$  и  $D_y$  находятся из измерений  $L_x^{\text{deg}}$  и  $L_y^{\text{deg}}$  и для шести исследованных кристаллов попадают в диапазон от  $-0.03 \text{ м}^{-1}$  до  $+0.2 \text{ м}^{-1}$ . В §4.5 изучены особенности фокусировки суперпозиций эрмит-гауссовых пучков, формирующихся при синхронизации поперечных мод в лазере с астигматическим резонатором. Обсуждается наличие в окрестности фокальной плоскости

фокусирующей линзы псевдоперетяжек, поперечный и продольный размеры которых в несколько раз меньше размеров перетяжки нулевой моды холодного резонатора. §4.6 посвящен определению условий проявления слабого астигматизма резонатора при синхронизации поперечных мод. Показано, что связанное с астигматизмом расщепление вырождения перестает проявляться при уменьшении длины резонатора и/или увеличении потерь. С помощью Nd:YAG и Nd:YLF-лазеров с резонаторами длиной соответственно  $\sim 75$  см и  $\sim 7$  см экспериментально продемонстрировано, что при одном и том же астигматизме резонатора в условиях синхронизации поперечных мод возможно формирование излучения как с кольцевой пространственной структурой с симметрией близкой к круговой, так и со структурой, демонстрирующей расщепление вырождения. В §4.7 представлены основные результаты четвертой главы.

В пятой главе «**Особенности фокусировки излучения диодных линеек с волоконным выводом и структура излучения компактного Nd:YLF-лазера**» представлены результаты исследования пространственных распределений излучения накачки, транспортируемого по волоконному световоду, и пространственных распределений выходного излучения компактного лазера с накачкой одиночным лазерным диодом.

В §5.1 теоретически и экспериментально исследованы пространственные распределения интенсивности излучения диодных линеек с волоконным выводом в схеме продольной накачки твердотельных лазеров. Рассмотрены пространственные и угловые распределения излучения на выходе световода в зависимости от длины и изгибов световода. Экспериментально зарегистрированы и рассчитаны численно распределения интенсивности накачки в поперечных сечениях пучка при фокусировке (рис. 4). Расчет проводился средствами геометрической оптики. Установлено, что существует область, в которой интенсивность излучения на оси превышает интенсивность в плоскости изображения торца световода. Данная область расположена между фокальной плоскостью фокусирующей линзы и плоскостью изображения. Также рассчитаны распределения инверсной населенности в четырехуровневой активной среде при различных положениях лазерного кристалла в пучке накачки.

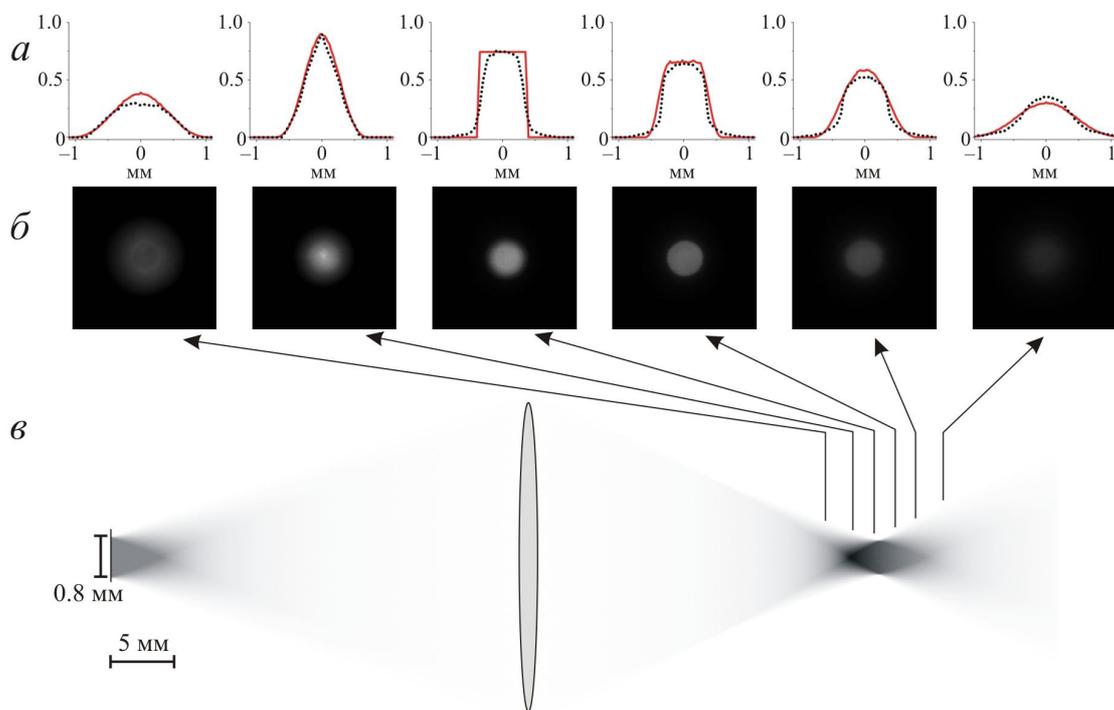


Рис. 4. Зарегистрированные экспериментально распределения интенсивности (*б*), профили рассчитанных (сплошные кривые) и измеренных (пунктирные кривые) распределений (*а*) в различных сечениях пучка накачки, а также рассчитанное распределение интенсивности накачки в плоскости  $xz$  (*в*).

В §5.2 изучается пространственная структура излучения компактного лазера с накачкой мощным одиночным лазерным диодом с кристаллами Nd:YLF и Nd:YAG в качестве активной среды. Накачка лазера осуществлялась непрерывным лазерным диодом мощностью 5 Вт, излучающим на длине волны 0.805 мкм. В рассматриваемой схеме длина резонатора полуконфокальной конфигурации составляла 7 см. Было обнаружено, что при использовании кристаллов Nd:YLF в качестве активной среды конфигурации резонатора по характеру выходных распределений интенсивности можно разделить на критические и некритические при мощности накачки вплоть до 5 Вт. Предложена методика поиска оптимальной конфигурации резонатора. В случае кристаллов Nd:YAG разделение конфигураций резонатора на критические и некритические представляется затруднительным, поскольку даже при мощности накачки 1 Вт распределения интенсивности существенно отличаются от гауссовых практически при всех длинах резонатора.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Методом Фокса-Ли рассчитана структура распределений амплитуды основной моды лазера при стационарном неоднородном распределении усиления, создаваемым приосевой аксиально-симметричной продольной накачкой, для различных параметров резонатора  $g_1$  и  $g_2$  во всей области устойчивости. Определены критические конфигурации, проявляющиеся при ряде значений числа Френеля  $N_F$ . Показано, что с увеличением  $N_F$  количество критических конфигураций на диаграмме устойчивости возрастает.
2. Численно и аналитически исследовано влияние параметров пространственно неоднородного аксиально-симметричного распределения усиления (усиления на оси  $K_0$  и степени неоднородности  $\xi$ ) и параметров резонатора на пучковый состав основной моды. Для ряда критических конфигураций определены нижние границы диапазона значений  $\xi$ , обеспечивающих синхронизацию поперечных мод. На диаграмме устойчивости диапазон отстроя от строгого вырождения, в пределах которого реализуется синхронизация поперечных мод, расширяется с увеличением коэффициента усиления.
3. Разработана аналитическая модель двух пучков, взаимодействующих в условиях пространственной неоднородности усиления. Оценки, полученные в рамках данной модели, хорошо согласуются с результатами расчетов по методу Фокса-Ли.
4. Экспериментально и теоретически исследована пространственная структура излучения Nd:YAG-лазера с неоднородной продольной диодной накачкой с двухзеркальным резонатором, образованным плоским зеркалом на одной из граней активной среды и выходным сферическим зеркалом с радиусом кривизны 150 см с пропусканием  $<1\%$ . Обнаружено связанное со слабым астигматизмом активной среды расщепление вырождения, сопровождающееся нарушением круговой симметрии излучения. Продемонстрирована возможность диагностики слабого астигматизма лазерных кристаллов.
5. Теоретически и экспериментально рассмотрена синхронизация поперечных мод в резонаторе со слабым астигматизмом. Показано, что связанное с астигматизмом

расщепление вырождения, сопровождающееся нарушением круговой симметрии, перестает проявляться при уменьшении длины резонатора и/или увеличении потерь. Экспериментально показано, что при одном и том же астигматизме резонатора в лазере с продольной накачкой в условиях синхронизации поперечных мод возможно формирование основной моды как с кольцевой пространственной структурой с круговой симметрией, так и со структурой, демонстрирующей расщепление вырождения.

6. Экспериментально и численно изучены особенности фокусировки излучения диодной линейки с волоконным выводом. Установлено, что существует область, где интенсивность на оси превышает интенсивность в плоскости изображения.
7. Продемонстрировано преимущество кристалла Nd:YLF по сравнению с Nd:YAG с точки зрения генерации излучения с близкими к гауссовому распределениями в схеме компактного лазера с накачкой одиночным диодом мощностью 5 Вт.

### СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. М.В. Горбунков, П.В. Кострюков, Л.С. Телегин, В.Г. Тункин, Д.В. Яковлев, «Особенности структуры основной моды лазеров с устойчивыми резонаторами при пространственно неоднородном усилении», *Квантовая электроника*, т. **37**, № 2, с. 173-180 (2007).
2. М.В. Горбунков, П.В. Кострюков, В.Г. Тункин, «Влияние параметров резонатора и пространственно неоднородного усиления на пространственную структуру основной моды лазеров с устойчивыми резонаторами», *Квантовая электроника*, т. **38**, № 7, с. 689-694 (2008).
3. V.V. Bezotosnyi, E.A. Cheshev, M.V. Gorbunkov, P.V. Kostryukov, V.G. Tunkin, «Manifestation of active medium astigmatism at transverse mode locking in a diode end-pumped stable resonator laser», *Applied Optics*, v. **47**, № 20, p. 3651-3657 (2008)
4. М.В. Горбунков, П.В. Кострюков, В.Б. Морозов, А.Н. Оленин, Л.С. Телегин, В.Г. Тункин, Д.В. Яковлев, «Пространственное распределение интенсивности излучения диодных линеек с волоконным выводом и расчет инверсии в схеме

- продольной накачки твердотельных лазеров», *Квантовая электроника*, т. **35**, № 12, с. 1121-1125 (2005).
5. П.В. Кострюков, «Расчет основной моды резонатора пикосекундного твердотельного лазера с продольной диодной накачкой», Труды четвертой международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2005», с. 350-351.
  6. M.V. Gorbunkov, P.V. Kostryukov, V.G. Tunkin, «Fundamental mode structure of lasers with stable cavities and nonuniform spatial gain distribution», The Third Conference on Laser Optics for Young Scientists (LOYS 2006), Technical Digest, p.31.
  7. V.V. Bezotosnyi, E.A. Cheshev, M.V. Gorbunkov, P.V. Kostryukov, V.G. Tunkin, «Transverse Mode Locking in a Diode End-Pumped Laser with Frequency Degenerate Resonator», ICONO / LAT 2007 Technical Digest, L01-36.
  8. В.В. Безотосный, М.В. Горбунков, П.В. Кострюков, В.А. Петухов, Ю.М. Попов, В.Г. Тункин, Е.А. Чешев, «Исследование пространственной структуры излучения твердотельного лазера с неоднородной продольной диодной накачкой в импульсном и непрерывном режимах генерации», Сборник трудов конференции «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе» (4-8 июня, Минск 2007), с. 73-76.
  9. V.V. Bezotosniy, E.A. Cheshev, M.V. Gorbunkov, P.V. Kostryukov, V.G. Tunkin, «Transverse mode locking in a diode end-pumped Nd:YAG laser with different resonator lengths», International conference «Laser Optics – 2008», ThR1-p40, (2008).
  10. П.В. Кострюков, «Проявление астигматизма активной среды в синхронизации поперечных мод в Nd:YAG лазере с продольной диодной накачкой», Сборник трудов XV Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2008», секция «Физика», стр.3.