

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В.ЛОМОНОСОВА

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына

На правах рукописи

Алёшин Дмитрий Александрович

**ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА
ДИНАМИКУ ГЕНЕРАЦИИ КОЛЬЦЕВЫХ
ЧИП-ЛАЗЕРОВ**

Специальности:

01.04.05 – оптика

01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2008

Работа выполнена на кафедре оптики и спектроскопии физического факультета
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Кравцов Николай Владимирович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Очкин Владимир Николаевич

доктор физико-математических наук,
профессор Тункин Владимир Григорьевич

Ведущая организация: Институт общей физики имени А.М. Прохорова РАН,
119991, Москва, улица Вавилова 38

Защита состоится « 10 » декабря _____ 2008 г. в _____ 15:00 _____ часов на заседании
Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 501.001.45 при
Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу:
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, НИИ Ядерной физики имени Д.В.
Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова, 19 корпус, аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке НИИ ядерной физики
имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан « 6 » ноября _____ 2008 г.

Ученый секретарь Совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций
Д 501.001.45 при МГУ имени М.В. Ломоносова
кандидат физико-математических наук

О.М. Вохник

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Успехи в разработке и создании твердотельных кольцевых лазеров (ТКЛ) с полупроводниковой накачкой, достигнутые за последние годы, значительно повышают интерес к таким лазерам в связи с возможностями существенного улучшения их стабильности и снижения технических флуктуаций. Это открывает новые возможности для изучения нелинейной динамики самих лазеров. Особенно интересным представляется изучение сложной нелинейной динамики твердотельных кольцевых лазеров.

Твердотельные кольцевые лазеры, будучи сложными нелинейными системами, являются удобным объектом для исследования общих закономерностей нелинейной динамики. Изучение нелинейного взаимодействия встречных волн в активной среде играет значительную роль в развитии наших представлений о фундаментальных свойствах вещества.

В твердотельном кольцевом лазере в каждом из встречных направлений излучение характеризуется сложной нелинейной динамикой. В автономных кольцевых лазерах возможно возникновение самых разнообразных режимов генерации: режима бегущей волны, автомодуляционных режимов первого и второго рода, режима стоячей волны и различных нестационарных режимов. С практической точки зрения наиболее важными из них являются режим однонаправленной генерации и двунаправленные автомодуляционные режимы.

Наиболее исследованным в настоящее время является режим однонаправленной генерации (режим бегущей волны). Режимы двунаправленной генерации исследованы значительно меньше (за исключением, может быть, только режима автомодуляционных колебаний первого рода). В подавляющем большинстве работ, посвященных особенностям двунаправленных режимов, исследовались только зависимости частот и амплитуд автомодуляционных колебаний от различных параметров лазера (коэффициентов связи, частотной и амплитудной невязимости, превышения мощности накачки над порогом и т.д.). Фазовая динамика двунаправленных режимов генерации до сих пор остается изученной недостаточно полно.

В кольцевых неавтономных лазерах возникает еще большее разнообразие режимов генерации. Наиболее часто исследуемыми неавтономными системами являются лазеры с периодической модуляцией добротности и превышением накачки над порогом.

Наиболее близкими по свойствам к двунаправленным кольцевым лазерам являются системы связанных лазеров. Однако между ними имеются и существенные различия, не позволяющие обобщить все полученные для систем связанных лазеров

результаты на случай кольцевых лазеров. Так, принципиальным отличием кольцевых лазеров является взаимная связь встречных волн. В двунаправленных кольцевых лазерах большую роль в динамике излучения играют различные невзаимные эффекты, отсутствующие в связанных лазерах. Как правило, для связанных лазеров существует практически неустраняемая неидентичность лазерных параметров, включая их частоты генерации.

Перспективными для практического применения являются твердотельные монолитные кольцевые лазеры с полупроводниковой накачкой. Они обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными кольцевыми лазерами. Так, механическая жесткость конструкции таких лазеров исключает разъюстировку резонатора, что позволяет повысить стабильность всех режимов генерации, и в случае необходимости, получить одномодовое одночастотное излучение с высокой амплитудной и частотной стабильностью. Для таких лазеров характерны высокая стабильность излучения, малые габариты, высокий КПД, отсутствие высокого напряжения и сложных систем охлаждения и термостабилизации.

Следует отметить, что у такой конструкции есть и ряд недостатков. Так, монолитность кольцевого лазера не позволяет вносить в резонатор управляющие элементы, тем самым влияя на режимы генерации. Ошибки изготовления резонаторов могут привести к неработоспособности всей системы в целом и компенсация этих ошибок практически не возможна. Поэтому исследование способов внешнего воздействия на активный элемент и развитие удобных для практического применения методик расчета характеристик таких лазеров является важной и актуальной задачей.

В случае монолитных лазеров возникает чрезвычайно важная, сложная и актуальная проблема экспериментального измерения ряда ключевых параметров лазеров. Так как прямое измерение части ключевых управляющих параметров (например, коэффициентов связи встречных волн) не возможно и, кроме того, значение этих параметров практически невозможно предугадать на стадии проектирования системы, разработка методик их экспериментального определения весьма актуальна.

Твердотельные кольцевые лазеры используются в лазерной гиromетрии, при создании оптических стандартов частоты и высокостабильных источников излучения для спектроскопии и прецизионной измерительной техники, при проведении различных фундаментальных исследований. Твердотельные лазеры с когерентной накачкой лазерными диодами находят все большее практическое применение в качестве источников излучения в когерентных оптических линиях связи, лазерных радарах и лидарах, инерционных датчиках. Не менее перспективно использование их

в таких областях науки и техники как прецизионные оптические измерения, метрология, лазерная гироскопия, голография, интерферометрия.

Большой интерес представляет изучение влияния внешних магнитных полей на динамику генерации кольцевых лазеров, что связано с возможностью возникновения в них взаимных эффектов (частотных, амплитудных и поляризационных). Магнитное поле позволяет эффективно управлять характеристиками излучения твердотельных кольцевых лазеров, поэтому исследование его влияния на динамику генерации представляется весьма актуальной задачей.

Целью настоящей диссертационной работы является:

- Разработка удобных для практического применения методик расчета и оптимизации параметров кольцевых чип-лазеров.
- Исследование влияния внешнего постоянного магнитного поля на характеристики и области существования квазипериодических и хаотических режимов генерации кольцевых чип-лазеров.
- Исследование влияния магнитного поля на фазовую динамику встречных волн в кольцевых чип-лазерах.
- Усовершенствование математической модели твердотельных кольцевых лазеров с целью расширения границ ее применимости.

Научная новизна работы:

- Теоретически получены явные выражения для областей устойчивости неплоских кольцевых резонаторов, удобные для практического применения и требующие значительно меньших вычислительных затрат, по сравнению с уже существующими методиками.
- Теоретически обнаружено, что при определенной геометрии резонатора в неплоском кольцевом чип-лазере возможно возбуждение встречных волн с линейной поляризацией. Получено необходимое условие существования таких волн. Обнаружено, что при определенных параметрах кольцевого резонатора эллиптичность излучения резко зависит от угла неплоскостности.
- В кольцевом чип-лазере с периодической модуляцией накачки в областях существования динамического хаоса экспериментально обнаружены окна стабильности периодических и квазипериодических режимов генерации.
- Исследовано влияние магнитного поля на структуру областей существования различных режимов генерации. Обнаружен новый периодический импульсный режим QPI-2T, отличный от ранее изученных. Установлено, что при определенных условиях переключение режимов генерации может происходить в магнитных полях около одного эрстеда.

- Экспериментально исследована динамика разности фаз полей встречных волн в автомодуляционном режиме первого рода под влиянием магнитного поля. Показано, что при достаточно малых частотных невязаностях кольцевого резонатора (малых значениях магнитного поля) имеет место взаимная синхронизация частот встречных волн. Продемонстрировано, что экспериментальное измерение ширины области синхронизации в ТКЛ может быть использовано для определения разности фаз коэффициентов связи встречных волн.
- Получена система обыкновенных дифференциальных уравнений векторной модели твердотельных кольцевых лазеров, в которой учитывается неоднородность поперечного распределения накачки и внутрирезонаторного поля. Данная модель хорошо описывает экспериментально наблюдаемый эффект зависимости фазового сдвига автомодуляционных колебаний от превышения накачки над порогом, чего не удавалось добиться в рамках стандартной скалярной и векторной модели.

Научная и практическая значимость работы.

В работе продемонстрировано:

- Возможность возбуждения встречных волн с линейной поляризацией в неплоских кольцевых чип-лазерах.
- Возможность управления областями существования различных квазипериодических и хаотических режимов генерации ТКЛ при помощи внешнего магнитного поля.
- Возможность переключения режимов генерации при помощи малых магнитных полей порядка одного эрстеда.
- Наличие взаимной синхронизации частот встречных волн при достаточно малых частотных невязаностях резонатора.
- Возможность измерения разности фаз коэффициентов связи встречных волн при помощи измерения ширины области синхронизации.
- В твердотельных кольцевых лазерах различие поперечных распределений полей встречных волн может приводить к расщеплению собственных частот резонатора и к возникновению дополнительного фазового сдвига автомодуляционных колебаний излучения встречных волн.

Полученные результаты могут представить большой интерес как для фундаментальной физики (исследование взаимодействия электромагнитных колебаний в активной среде, исследование общих свойств нелинейных систем и др.), так и для технических приложений (управление характеристиками лазеров,

регистрация предельно малых оптических невзаимностей, передача информации и др.).

Защищаемые положения:

1. При определенной геометрии в неплоском кольцевом чип-лазере возможно возбуждение встречных волн с линейной поляризацией.
2. Существуют конфигурации неплоского кольцевого резонатора, в которых поляризация излучения встречных волн резко зависит от угла неплоскостности.
3. В неавтономном кольцевом чип-лазере с периодической модуляцией накачки внутри области существования режима динамического хаоса существуют окна стабильности периодических и квазипериодических режимов, взаимное положение и размеры которых существенно зависят как от величины внешнего магнитного поля, так и от превышения накачки над порогом. При определенных условиях переключение режимов генерации может происходить в магнитных полях порядка одного эрстеда.
4. При достаточно малых частотных невзаимностях кольцевого резонатора (малых магнитных полях) имеет место взаимная синхронизация частот встречных волн. В области синхронизации разность оптических фаз встречных волн колеблется в ограниченном интервале с периодом, равным периоду автомодуляционных колебаний. Диапазон изменения косинуса разности оптических фаз встречных волн сильно зависит от разности коэффициентов связи. Ранее выдвигавшаяся гипотеза о том, что коэффициенты связи в монолитных кольцевых чип-лазерах определяются рассеянием на неоднородностях показателя преломления и поэтому близки к комплексно-сопряженным, не всегда верна – в исследуемом лазере наблюдается значительное отличие коэффициентов связи от комплексно-сопряженных, что соответствует случаю рассеяния на неоднородностях поглощения. Измерение ширины области синхронизации может быть эффективно использовано для определения разности фаз коэффициентов связи встречных волн.
5. В твердотельных кольцевых лазерах различие поперечных распределений полей встречных волн может приводить к расщеплению собственных частот резонатора и к возникновению дополнительного фазового сдвига автомодуляционных колебаний. Учет различия поперечных распределений встречных волн в векторной модели твердотельных кольцевых лазеров позволяет описать экспериментально наблюдаемый эффект зависимости фазового сдвига автомодуляционных колебаний от превышения накачки над

порогом, чего не удастся добиться в рамках стандартных скалярной и векторной модели

Апробация результатов работы: Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 5-ти научных работах, 4 из которых – статьи в специализированных реферируемых научных журналах “Квантовая электроника” и “Вестник Московского Университета”, и докладывались на IV международной конференции “Прикладная Оптика” – 2004 (С.-Петербург) и на международной школе молодых ученых “Актуальные проблемы физики” – 2004 (Звенигород). Список работ приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора: Все результаты, приведенные в диссертационной работе, получены лично автором, либо при его непосредственном участии.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, пяти глав, пяти приложений, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 162 страницы машинописного текста, включая 34 рисунка. Список цитированной литературы состоит из 165 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулирована цель работы, отмечены научная новизна, научная и практическая значимость, приведены защищаемые положения и кратко изложено содержание работы по главам.

Первая глава представляет собой краткий литературный обзор, содержащий основные, наиболее важные результаты исследований твердотельных кольцевых лазеров. В главе рассмотрены основные методики расчета резонаторов кольцевых лазеров, наиболее важные и интересные режимы генерации твердотельных кольцевых лазеров с однородноуширенной линией усиления активной среды, приведены основные уравнения, описывающие динамику излучения твердотельных кольцевых лазеров.

Из представленного обзора сделан вывод, что, несмотря на широкие исследования особенностей твердотельных кольцевых лазеров, до сих пор ряд вопросов остаются недостаточно полно изученными: недостаточно полно изучена фазовая динамика двунаправленных режимов генерации ТКЛ, влияние постоянного магнитного поля на характеристики режимов генерации, математическая модель ТКЛ также не всегда дает результаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными наблюдениями.

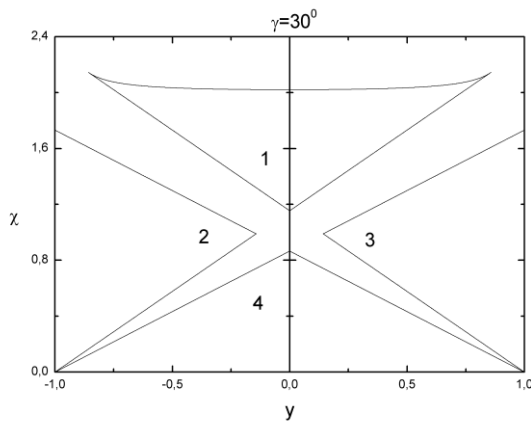


Рис.1. Области устойчивости неплоского резонатора кольцевого чип-лазера (1,2,3,4) с углом падения луча на выходное зеркало равным 30° .

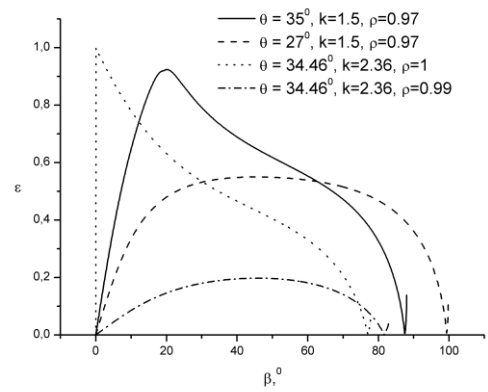


Рис.2. Зависимости эллиптичности ϵ излучения от угла неплоскостности β .

Вторая глава посвящена развитию методов расчета кольцевых резонаторов. В разделе 2.1 получены аналитические, удобные для практического применения выражения для областей устойчивости неплоских кольцевых резонаторов (графическое представление областей устойчивости представлено на рис. 1). Раздел 2.2 посвящен оптимизации конструкции кольцевых резонаторов, а именно исследованию вопроса возможности возбуждения встречных волн с линейной поляризацией в неплоских кольцевых чип-лазерах. Показано, что при определенной геометрии неплоского резонатора в кольцевых чип-лазерах возможно возбуждение встречных волн с линейной поляризацией (рис. 2). Найдено необходимое условие существования таких волн. Обнаружено, что при определенных параметрах поляризация излучения может резко зависеть от угла неплоскостности резонатора (рис. 2). В разделе 2.3 приведены параметры резонатора исследуемого чип-лазера.

В третьей главе рассматривается вопрос влияния постоянного магнитного поля на квазипериодические и хаотические режимы генерации ТКЛ. В разделе 3.1 описана экспериментальная установка, позволяющая осуществлять гармоническую модуляцию накачки чип-лазера и воздействовать на активную среду постоянным магнитным полем. В разделе 3.2 приведены основные экспериментальные результаты. Так, были обнаружены окна стабильности периодических и квазипериодических режимов генерации внутри области существования режима динамического хаоса (рис. 3). Исследовано влияние магнитного поля на структуру областей существования различных режимов генерации (рис.4). Показано, что взаимное расположение областей существования различных режимов генерации и их

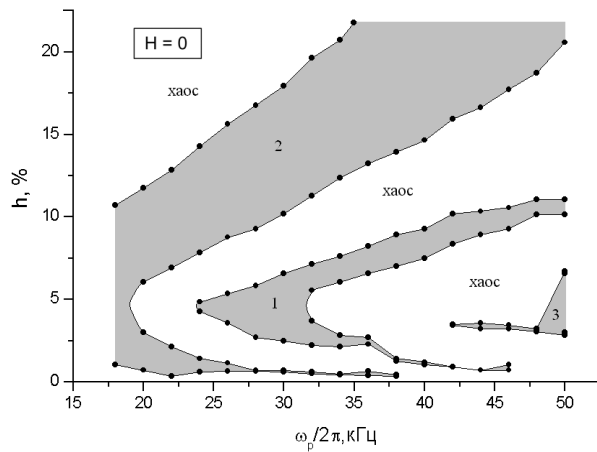


Рис. 3. Области существования различных режимов генерации в отсутствие магнитного поля (превышение накачки над порогом – 7%). Окна периодичности (области 1, 2 и 3) показаны серым цветом.

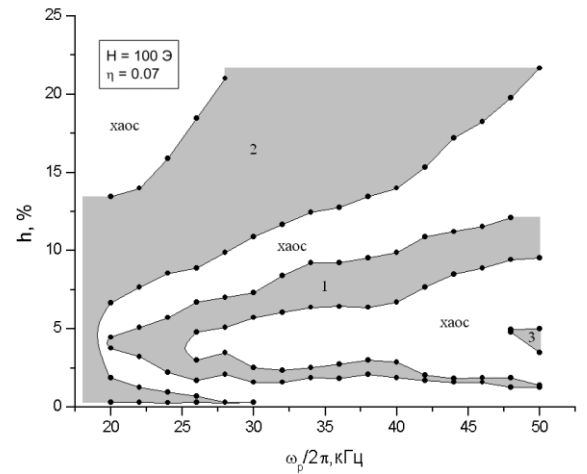


Рис. 4. Области существования различных режимов генерации при $H \approx 100 \text{ Э}$ (превышение накачки над порогом – 7%).

размеры существенным образом зависят как от напряженности магнитного поля, так и от превышения накачки над порогом. Установлено, что при определенных условиях переключение режимов генерации может происходить в магнитных полях напряженностью около одного эрстеда. Обнаружен новый периодический импульсный режим генерации QPI-2T, отличный от ранее изученных. Показано, что использование частотной и/или амплитудной невзаимности, возникающей в монолитном кольцевом лазере при наложении постоянного магнитного поля, является одним из эффективных путей управления нелинейной динамикой кольцевых лазеров.

Четвертая глава посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям динамики разности фаз полей встречных волн в автомодуляционном

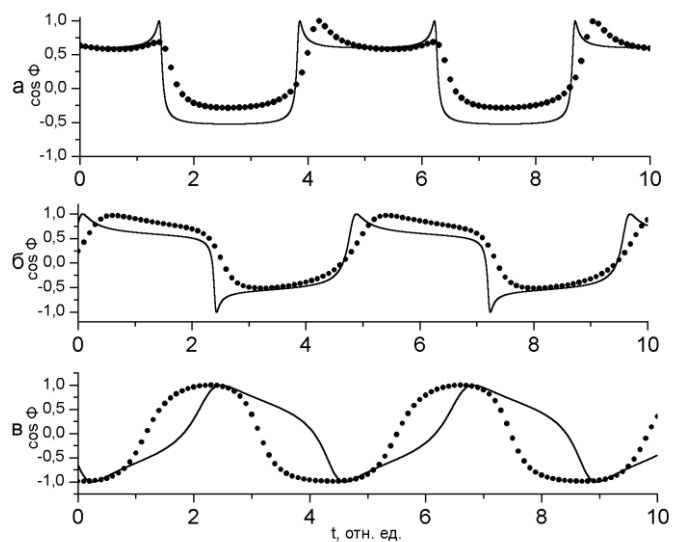


Рис. 5. Временные зависимости косинуса разности фаз полей встречных волн в области фазовой синхронизации (а,б) и в области биений (в). Сплошные кривые - теория, точки - эксперимент.

режиме первого рода под влиянием магнитного поля. Раздел 4.1 содержит теоретический анализ динамики разности фаз полей встречных волн и ширины области синхронизации частот встречных волн.

В разделе 4.2 описана экспериментальная установка, позволяющая одновременно регистрировать интенсивности трех сигналов: обеих встречных волн и их фотосмещения. В разделах 4.3 и 4.4 приведены основные экспериментальные результаты и произведено их сравнение с теорией (рис. 5): обнаружено, что при достаточно малых частотных невзаимностях кольцевого резонатора (малых значениях магнитного поля) имеет место взаимная синхронизация частот встречных волн. Показано, что экспериментальное измерение ширины области синхронизации в ТКЛ может быть использовано для определения разности фаз коэффициентов связи встречных волн. Ранее выдвигавшаяся гипотеза о том, что коэффициенты связи в монолитных кольцевых чип-лазерах определяются рассеянием на неоднородностях показателя преломления и поэтому близки к комплексно-сопряженным не всегда верна – значительное отличие коэффициентов связи от комплексно-сопряженных в исследуемом лазере соответствует случаю рассеяния на неоднородностях поглощения.

В пятой главе получена система обыкновенных дифференциальных уравнений векторной модели твердотельных кольцевых лазеров, в которой учитывается

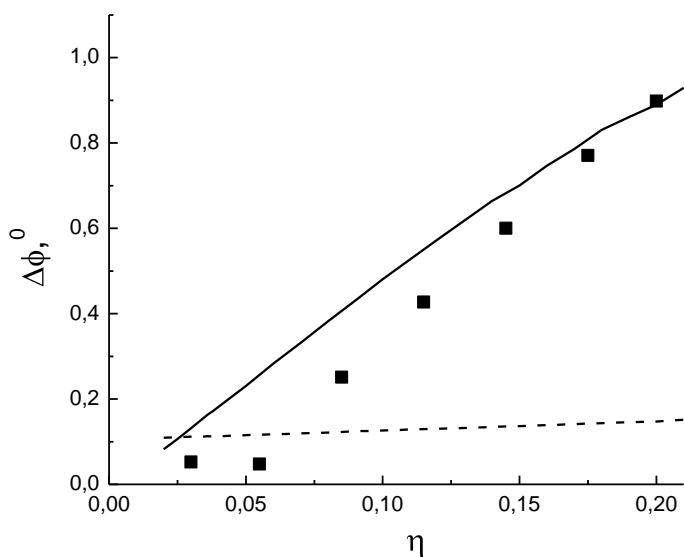


Рис. 6. Экспериментальная (точки) и расчетные зависимости фазового сдвига автомодуляционных колебаний встречных волн от превышения накачки над порогом. Сплошная линия – результаты моделирования с использованием описываемой модели, пунктир – с использованием стандартной векторной модели.

неоднородность поперечного распределения накачки и внутрирезонаторного поля. В разделе 5.1 кратко приведен вывод системы. В разделе 5.2 описана экспериментальная установка. Анализ теоретических и экспериментальных результатов показал, что в твердотельных кольцевых лазерах различие поперечных распределений полей встречных волн может приводить к расщеплению собственных частот резонатора и к возникновению дополнительного фазового

сдвига автомодуляционных колебаний излучения встречных волн. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов, проведенное в разделе 5.3, показало, что полученная модель хорошо описывает экспериментально наблюдаемый эффект зависимости фазового сдвига автомодуляционных колебаний от превышения накачки над порогом, чего не удастся добиться в рамках стандартных скалярной и векторной модели (рис. 6).

Приложение I содержит краткое описание метода лучевых матриц расчета кольцевых резонаторов и является дополнением к гл. 1.

Приложение II содержит описание стандартного метода расчета поляризационных характеристик кольцевых резонаторов, основанного на методе матриц Джонса, и также является дополнением к гл. 1.

В приложении III приведена классификация режимов генерации твердотельных кольцевых лазеров, использованная в диссертации.

В приложении IV описана методика численного моделирования динамики генерации ТКЛ, использованная при исследованиях. Так же приведены уравнения основных используемых моделей ТКЛ в безразмерном виде.

В приложении V кратко описана разработанная программа моделирования хода лучей в резонаторах кольцевых чип-лазеров, ее основные возможности и применения.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ

Исследованы конструктивные особенности и влияние магнитного поля на динамику генерации твердотельных кольцевых лазеров. В рамках этих исследований получены следующие результаты:

1. Получены явные аналитические выражения для областей устойчивости неплюских кольцевых резонаторов, удобные для практического применения и требующие значительно меньших вычислительных затрат, по сравнению с уже существующими методиками.
2. Обнаружено, что при определенной геометрии резонатора неплюских кольцевых чип-лазерах возможно возбуждение встречных волн с линейной поляризацией. Получено необходимое условие существования таких волн. Обнаружено, что при определенных параметрах кольцевого резонатора поляризации встречных волн резко зависят от угла неплюскостности.

3. Экспериментально обнаружены окна стабильности периодических и квазипериодических режимов внутри области существования динамического хаоса в кольцевом чип-лазере с периодической модуляцией накачки. Исследовано влияние постоянного магнитного поля на структуру областей существования различных режимов генерации. Обнаружен новый периодический импульсный режим QPI-2T, отличный от ранее изученных. Обнаружено, что взаимное расположение областей существования различных режимов генерации и их размеры существенным образом зависят как от напряженности магнитного поля, так и от превышения накачки над порогом. Установлено, что при определенных условиях переключение режимов генерации может происходить в магнитных полях напряженностью порядка одного эрстеда.
4. Проведены теоретические и экспериментальные исследования динамики разности фаз полей встречных волн в автомодуляционном режиме первого рода под влиянием магнитного поля. Обнаружено, что при достаточно малых частотных невязаностях кольцевого резонатора (малых значениях магнитного поля) имеет место взаимная синхронизация частот встречных волн. Показано, что экспериментальное измерение ширины области синхронизации в ТКЛ может быть использовано для определения разности фаз коэффициентов связи встречных волн.
5. Продемонстрировано, что ранее выдвигавшаяся гипотеза о том, что коэффициенты связи встречных волн в монолитных кольцевых чип-лазерах определяются рассеянием на неоднородностях показателя преломления и поэтому близки к комплексно-сопряженным не всегда верна – значительное отличие коэффициентов связи от комплексно-сопряженных в исследуемом лазере соответствует случаю рассеяния на неоднородностях поглощения.
6. Получена система обыкновенных дифференциальных уравнений векторной модели твердотельных кольцевых лазеров, в которой учитывается неоднородность поперечного распределения накачки и внутрирезонаторного поля. Показано, что в твердотельных кольцевых лазерах различие поперечных распределений полей встречных волн может приводить к расщеплению собственных частот резонатора и к возникновению дополнительного фазового сдвига автомодуляционных колебаний излучения встречных волн. Полученная модель хорошо описывает

экспериментально наблюдаемый эффект зависимости фазового сдвига автомодуляционных колебаний от превышения накачки над порогом, чего не удастся добиться в рамках стандартной скалярной и векторной модели.

7. Разработана программа моделирования хода лучей в резонаторах кольцевых чип-лазеров, которая позволяет строить резонаторы с заданной лучевой траекторией, находить замкнутую лучевую траекторию в заданных резонаторах, моделировать неточности изготовления моноблоков и искать возможные способы их компенсации, моделировать влияние искажений геометрии резонаторов на лучевую траекторию.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Д.А. Алешин, Н.В. Кравцов. Возбуждение линейно поляризованных волн в кольцевых чип-лазерах // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия, 3, 13-16 (2003).
2. Д.А. Алешин, Н.В. Кравцов. Устойчивость неплоских резонаторов кольцевых чип-лазеров // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия, 6, 42-45 (2003).
3. Д.А. Алешин. Поляризационные характеристики и устойчивость неплоских резонаторов твердотельных кольцевых чип-лазеров // IV Международная конференция "Прикладная оптика", Сборник трудов I(2), 351-354 (2004).
4. Д.А. Алешин, Н.В. Кравцов, С.Н. Чекина. Влияние магнитного поля на квазипериодические и хаотические режимы генерации твердотельных кольцевых лазеров // Квантовая электроника 35, 7-12 (2005).
5. Д.А. Алешин, И.И. Золотоверх, Н.В. Кравцов, Е.Г. Ларионцев. Фазовая динамика в автомодуляционном режиме генерации кольцевого твердотельного лазера // Квантовая электроника 38, 482-485 (2008).

Напечатано с готового оригинала-макета

Издательство ООО “МАКС Пресс”

Лицензия ИД N 00510 от 01.12.99 г.

Подписано к печати 30.10.2008 г.

Формат 60x90 1/16. Усл.печ.л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 623.

Тел. 939-3890. Тел./Факс 939-3891.

119992, ГПС-2, Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В.Ломоносова,
2-й учебный корпус, 627 к.