

На правах рукописи

Аулова Татьяна Викторовна

ДИНАМИКА ГЕНЕРАЦИИ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО КОЛЬЦЕВОГО ЧИП-
ЛАЗЕРА С ОПТИЧЕСКОЙ НЕВЗАИМНОСТЬЮ, СОЗДАННОЙ
МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2014

Работа выполнена на кафедре оптики и спектроскопии физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова».

Научный руководитель:

д. ф.-м. н., профессор Ларионцев Евгений Григорьевич

Официальные оппоненты:

д. ф.-м. н., профессор Хандохин Павел Александрович,

Институт прикладной физики Российской академии наук, ведущий научный сотрудник (г.Нижний Новгород)

к. ф.-м. н. Голяев Юрий Дмитриевич,

«Научно-исследовательский институт «Полюс» имени М. Ф. Стельмаха»,
начальник научно-производственного комплекса (г.Москва)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт общей физики им. А.М. Прохорова» Российской академии наук (г.Москва)

Защита состоится 17 декабря 2014 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д.501.001.45 на базе Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 5 (19 корпус НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова), аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в Отделе диссертаций Научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова, библиотеке Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова и на сайте <http://www.sinp.msu.ru/ru/dissertation/20095>

Автореферат разослан 12 ноября 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д.501.001.45

кандидат физико-математических наук

О.М. Вохник

Общая характеристика работы

Твердотельные кольцевые лазеры (ТКЛ) широко используются в практических и научных целях. По способу построения кольцевого резонатора и помещения активной среды внутрь него, можно выделить три основных конструктивных типа ТКЛ: лазеры, состоящие из дискретных элементов, полумоноблочные и монолитные лазеры. Монолитные ТКЛ (кольцевые чип-лазеры) имеют моноблочную конструкцию, основной отличительной особенностью которой является то, что все отражающие поверхности находятся на поверхности кристалла активного вещества, благодаря чему появляется возможность конструирования лазеров небольших размеров и с небольшим уровнем внутрирезонаторных потерь. Небольшие геометрические размеры упрощают задачу термостабилизации активного элемента. Благодаря своей конструкции, чип-лазеры наименее подвержены внешним возмущениям, их лазерные параметры стабильны во времени. Кольцевые чип-лазеры с полупроводниковой накачкой отличаются наиболее высокой стабильностью выходного излучения по сравнению с ТКЛ других типов.

Детальные исследования динамики твердотельных кольцевых лазеров (ТКЛ) важны для изучения общих закономерностей в нелинейной динамике систем различной природы. Одним из актуальных вопросов является определение наиболее полной и подходящей теоретической модели, способной в полной мере описать динамику генерации твердотельных кольцевых лазеров. Детальные теоретические исследования нелинейной динамики и их сравнение с экспериментом являются основой для развития математической модели твердотельных кольцевых лазеров. Именно тщательно поставленный физический эксперимент позволяет решить вопрос об адекватности математической модели реальной нелинейной системе и установить на опыте границы её применения.

В твердотельном кольцевом лазере излучение в каждом из встречных направлений характеризуется сложной нелинейной динамикой. В непрерывном кольцевом чип-лазере может существовать целый ряд режимов генерации: стационарный режим однонаправленной генерации, режим стоячей волны, режим биений, автомодуляционные режимы первого и второго рода, а также другие

нестационарные режимы. С практической точки зрения наиболее важными являются режим однонаправленной генерации, режим биений и автомодуляционные режимы генерации.

В исследованиях по нелинейной динамике излучения для реализации различных режимов генерации ТКЛ возникает необходимость управления совокупностью лазерных параметров, связанных с активной средой и кольцевым резонатором. В ТКЛ, состоящих из дискретных элементов, ряд параметров лазера (сферичность и коэффициенты пропускания зеркал, длина резонатора, положение активного элемента относительно перетяжки каустики резонатора, коэффициенты связи встречных волн через обратное рассеяние и т.д.) можно изменять в достаточно широких пределах. В таких лазерах возможно также введение в резонатор и дополнительных управляющих элементов, изменяющих фазовую и амплитудную невзаимность кольцевого резонатора (амплитудные и частотные фарадеевские элементы, ультразвуковые модуляторы). Таким образом, в ТКЛ, состоящих из дискретных элементов, имеются широкие возможности для эффективного управления режимами генерации и выходными характеристиками излучения. В то же время, в случае монолитных ТКЛ конструкция лазера не позволяет вносить в резонатор невзаимные и управляющие элементы, тем самым управление режимами генерации таких лазеров затруднено.

Проблема управления режимами генерации уже нашла достаточно много решений в неавтономных кольцевых чип-лазерах, чему посвящено большое количество работ. В кольцевых чип-лазерах с периодическим изменением параметров (при модуляции превышения мощности накачки над порогом, добротности резонатора, коэффициентов связи встречных волн через обратное рассеяние) можно эффективно управлять динамикой генерации, варьируя амплитуду и частоту модуляции. Однако же, возможности управления динамикой генерации в автономном чип-лазере до последнего времени оставались весьма ограниченными.

В связи с этим, изучение влияния внешних магнитных полей на динамику генерации кольцевых лазеров представляет большой интерес. Вследствие эффекта Фарадея, наложение магнитного поля на активную среду лазера приводит к изменению таких важных в динамике чип-лазеров параметров, как амплитудная и

частотная невязанность. В проведенных ранее исследованиях не были изучены возможности управления динамикой генерации монолитных ТКЛ, связанные с возникновением частотной и амплитудной невязанностей при воздействии на чип-лазер неоднородным магнитным полем.

Целью настоящей диссертационной работы являлось: 1) детальное исследование динамики излучения автономного твердотельного кольцевого чип-лазера на YAG:Nd^{3+} с неплоским резонатором при воздействии на него постоянным неоднородным магнитным полем; 2) изучение и реализация новых методов управления динамикой излучения автономного кольцевого чип-лазера с помощью магнитного поля; 3) исследовать возможность получения режима биений с равными средними значениями интенсивностей встречных волн; 4) уточнение векторной модели кольцевого чип-лазера при сравнении результатов проведенных экспериментов с теорией; 5) исследование возможностей параметрического возбуждения в исследуемом чип-лазере релаксационных колебаний на субгармонике периодического сигнала модуляции накачки.

Научная новизна работы заключается в следующих положениях:

1. Экспериментально реализованы новые возможности управления режимами генерации автономного кольцевого чип-лазера, возникающие при воздействии на него постоянным неоднородным магнитным полем. Обнаружен ряд не наблюдавшихся ранее в кольцевом чип-лазере режимов генерации: режим биений с большой частотной подставкой, режим с периодической низкочастотной огибающей автомодуляционных колебаний, периодические автомодуляционные режимы однонаправленной генерации.

2. Установлена возможность возбуждения динамического хаоса в автономном кольцевом чип-лазере с помощью постоянного магнитного поля, наложенного на активный элемент лазера.

3. В кольцевом чип-лазере с периодической модуляцией накачки исследовано параметрическое возбуждение релаксационных колебаний на субгармонике внешнего модулирующего сигнала в стационарном режиме однонаправленной генерации и в автомодуляционном режиме первого рода.

4. Экспериментально исследовано явление неизохронности автомодуляционных колебаний кольцевого чип-лазера на YAG:Nd, что позволило оценить величину фактора амплитудно-фазовой связи в векторной модели ТКЛ, используемой при описании динамики излучения.

Научная и практическая значимость работы

1. В работе продемонстрирована возможность изменения коэффициентов обратной связи встречных волн при изменении температуры моноблока.

2. Предложен и изучен новый способ эффективного управления динамикой генерации автономного чип-лазера с помощью неоднородного магнитного поля.

3. В чип-лазере реализован режим биений с равными средними значениями интенсивностей встречных волн и постоянной частотной подставкой, что открывает возможности для более точных измерений оптической невязимости.

4. Полученные результаты расширяют функциональные возможности кольцевых чип-лазеров и могут быть использованы как в научных исследованиях, так и в технических приложениях.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Наложение на активную среду постоянного неоднородного магнитного поля позволяет эффективно управлять динамикой лазерного излучения в режимах однонаправленной и двунаправленной генерации. Величину амплитудной, а также и частотной невязимостей кольцевого резонатора, возникающих при наложении на кольцевой чип-лазер неоднородного магнитного поля, можно варьировать в широких пределах, изменяя расположение пространственно неоднородного поля внутри чип-лазера.

2. При воздействии неоднородным магнитным полем можно реализовать ряд не наблюдавшихся ранее в кольцевом чип-лазере режимов генерации (режим биений с большой частотной подставкой, квазипериодический автомодуляционный режим с низкочастотной импульсной огибающей, периодические автомодуляционные режимы однонаправленной генерации).

3. При изменении температуры моноблока кольцевого чип-лазера можно как выравнять, так и делать существенно неравными модули коэффициентов обратной связи встречных волн.

4. Экспериментальное исследование неизохронности автомодуляционных колебаний позволяет оценить коэффициент фазово-амплитудной связи в теоретической модели кольцевого чип-лазера.

5. Параметрическое возбуждение релаксационных колебаний на субгармонике внешнего сигнала, модулирующего накачку в кольцевом чип-лазере, приводит к существенно отличающейся динамике излучения в режимах однонаправленной и двунаправленной генерации. В случае однонаправленной генерации в области параметрической неустойчивости происходит удвоение периода модуляции излучения и имеет место бистабильность. В случае двунаправленной генерации в области параметрической неустойчивости периодический автомодуляционный режим генерации сменяется либо квазипериодическим режимом, либо режимом динамического хаоса.

Апробация результатов работы

Основные положения и результаты диссертационной работы отражены в публикациях в специализированном ведущем научном журнале «Квантовая электроника» и докладывались на международных конференциях: Международной конференции молодых ученых «Оптика-2009» (С.-Петербург), ALT-2011 (Болгария), «Фундаментальные проблемы оптики» – 2011 (С.-Петербург).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 7 работах (4 статьи, 3 тезиса доклада).

Личный вклад автора. Все результаты экспериментальных исследований, выполненных в диссертационной работе, получены лично автором, результаты численного моделирования и теоретического анализа, а также подготовка полученных результатов к публикации проводились при его непосредственном участии.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, содержащего выводы, и списка литературы.

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

Первая глава диссертации представляет собой краткий литературный обзор, посвященный твердотельным кольцевым лазерам (ТКЛ). В этой главе перечислены основные типы конструкции твердотельных лазеров, достоинства и недостатки каждого из них. Отмечено, что монолитные кольцевые твердотельные

лазеры (см. рис. 1) с полупроводниковой накачкой (кольцевые чип-лазеры) обладают рядом преимуществ по сравнению с лазерами на дискретных элементах: высокая стабильность лазерных параметров, низкий уровень внешних технических возмущений, компактность и ряд других конструкционных преимуществ. Далее рассмотрены теоретические модели, использовавшиеся для описания динамики генерации

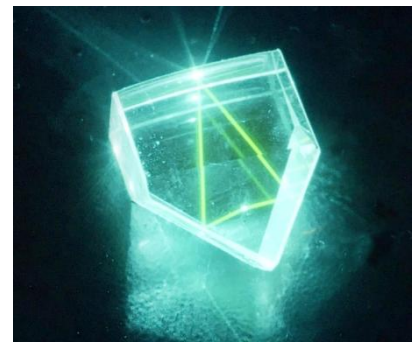


Рис. 1. Монолитный кольцевой чип-лазер (контур резонатора подсвечен лучом аргонового лазера).

ТКЛ. Отмечено, что многие параметры, используемые в этих моделях, не поддаются непосредственному измерению и требуют уточнения, что является актуальной задачей. Особое внимание уделено обзору различных режимов генерации автономных кольцевых твердотельных лазеров, экспериментально наблюдавшихся ранее, и известных способов управления динамикой излучения ТКЛ. Отмечено, что в случае автономных ТКЛ на дискретных элементах режимы генерации исследованы гораздо шире (из-за относительной простоты их реализации и возможности введения дополнительных элементов внутрь резонатора ТКЛ). В то же время, для автономных чип-лазеров расширение возможностей для эффективного управления их режимами генерации является актуальной задачей.

Во второй главе приведены результаты исследования температурной зависимости коэффициентов связи встречных волн через обратное рассеяние. Экспериментально обнаружено, что даже в отсутствии амплитудной и частотной не взаимности резонатора практически во всём диапазоне изменения температуры

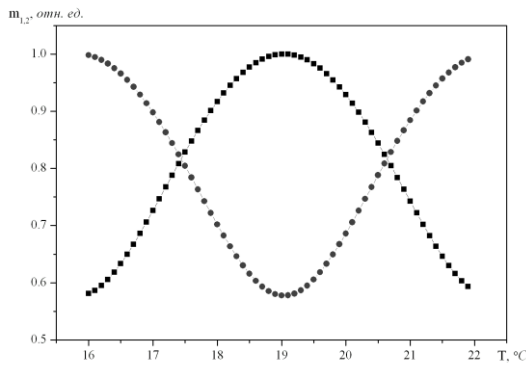


Рис.2. Теоретически рассчитанная зависимость линейных коэффициентов связи встречных волн от температуры моноблока.

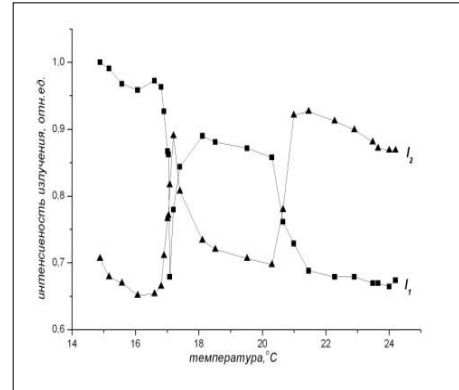


Рис.3. Экспериментальная зависимость максимумов интенсивностей встречных волн (I_1 и I_2) от температуры активного элемента

моноблока (активного элемента) имеет место несимметричная обратная связь встречных волн (рис. 2 и рис. 3). Дано качественное объяснение обнаруженной несимметрии связи с помощью модели с двумя типами центров рассеяния световых волн в кольцевом резонаторе: на неоднородностях показателя преломления и на неоднородностях поглощения (потерь) внутрирезонаторной среды. Несимметрия связи возникает благодаря интерференции полей, рассеянных на этих центрах. Проведенные теоретические оценки качественно согласуются с результатами эксперимента (рис. 2 и рис. 3).

Во второй главе также приведены результаты экспериментальных исследований неизохронности автомодуляционных колебаний. На рис. 4 большими кружками показана экспериментально измеренная зависимость частоты автомодуляции ω_m от их амплитуды. Эти результаты позволили уточнить векторную модель ТКЛ. Сравнение экспериментально измеренной зависимости с теоретически вычисленной позволило получить оценку фактора амплитудно-фазовой связи α (рис. 4). Он оказался равен 0.2.

В третьей главе предложен и исследован эффективный способ управления динамикой излучения кольцевого чип-лазера на YAG:Nd, основанный на воздействии на активный элемент неоднородным магнитным полем, создающим как частотную, так и значительную амплитудную невязанность кольцевого резонатора. В эксперименте внешнее неоднородное магнитное поле создавалось постоянным

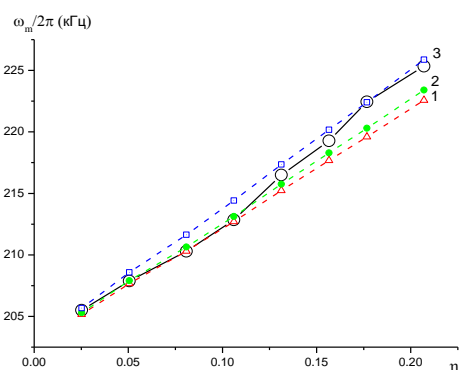


Рис.4. Экспериментальные и теоретические зависимости автомодуляционной частоты от уровня превышения накачки над порогом

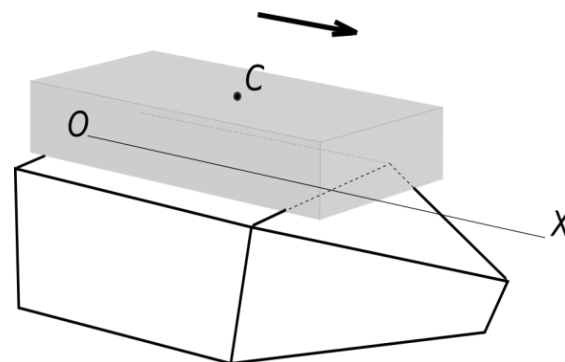


Рис.5. Взаимное расположение магнита и активного элемента чип-лазера (точка С - центр бруска магнита)

магнитом, имеющим форму параллелепипеда размером 12 мм×8 мм×5 мм, который был ориентирован (своей длинной стороной) вдоль оси симметрии Ox призмы резонатора и мог перемещаться с помощью микрометрического юстировочного устройства в этом направлении (рис. 5). Амплитудная и частотная невязности кольцевого резонатора, возникающие под действием этого магнитного поля, изменялись при перемещении магнита в достаточно широких пределах. В главе продемонстрированы возможности метода: экспериментально реализован ряд автомодуляционных и стационарных режимов генерации, режим биений с большой частотной подставкой и режим динамического хаоса, однонаправленный режим генерации с модуляцией на частоте релаксационных колебаний, режим синфазных пульсаций. Также с помощью данного метода найден новый квазипериодический режим автомодуляционных колебаний с низкочастотной импульсной огибающей (рис. 6), в котором автомодуляционные колебания интенсивностей встречных волн имеют противофазную низкочастотную огибающую. Исследованы временные и спектральные характеристики излучения, а также найдены условия возникновения этого режима генерации. Этот режим имеет ряд особенностей, присущих автомодуляционному режиму второго рода, однако отличается от него существенной асимметрией автомодуляции интенсивностей встречных волн, связанной с наличием амплитудной невязности кольцевого

резонатора. С изменением положения магнита относительно активной среды, экспериментально наблюдалось, что имеет место петлеобразный характер зависимости средних значений интенсивности встречных волн от величины частотной невзаимности. Было найдено положение магнита, при котором в эксперименте возникает режим биений с равными значениями интенсивностей встречных волн.

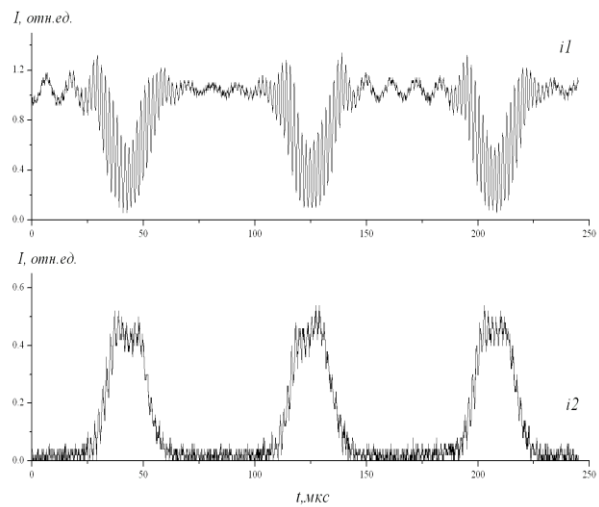


Рис.6. Осциллограммы интенсивностей встречных волн $I_{1,2}$ в автомодуляционном режиме с противофазной импульсной огибающей. сильной и слабой волн.

В четвертой главе исследована экспериментально и на основе численного моделирования динамика генерации кольцевого чип-лазера при параметрическом возбуждении релаксационных колебаний на субгармонике внешнего периодического сигнала, модулирующего накачку лазера. Исследовано влияние внешнего постоянного магнитного поля на параметрические эффекты. При модуляции накачки превышение накачки $\eta(t)$ над порогом можно представить в виде

$$\eta(t) = \eta_0 + h \sin(2\pi f_p t) \quad (1)$$

где η_0 – превышение накачки над порогом в отсутствии модуляции накачки; h и f_p – глубина и частота модуляции накачки соответственно.

Параметрические процессы исследованы при модуляции накачки в двух режимах генерации ТКЛ: стационарном режиме однонаправленной генерации и автомодуляционном режиме первого рода. Обнаружены существенные различия в динамике излучения для этих режимов. В режиме однонаправленной генерации периодическая модуляция накачки с достаточно малой глубиной h приводит в широкой области частот модуляции (за исключением областей параметрического резонанса) к синусоидальной модуляции интенсивности излучения с частотой f_p . В области же параметрической неустойчивости (если субгармоника $f_p/2$

модулирующего сигнала приближается к частоте релаксационных колебаний f_r) имеет место бифуркация удвоения периода колебаний. В области параметрического резонанса отклик лазера на сигнал модуляции существенно возрастает, модуляция излучения становится импульсной, а период следования импульсов T становится равным двум периодам модуляции T_p ($T = 2T_p = 2/f_p$).

На рис. 7 приведены экспериментально измеренные, а также полученные на основе численного моделирования зависимости амплитуды спектральной компоненты $A(f_p/2)$ от частоты модуляции накачки f_p . Как видно из рисунка, существуют две области (I и II), в которых возникает параметрическая раскачка релаксационных колебаний.

При вхождении в область параметрической неустойчивости со стороны больших частот (уменьшение частоты модуляции; область I)

параметрическая раскачка наблюдается при значениях f_p от 190 кГц до 120 кГц. При увеличении частоты модуляции область параметрической неустойчивости оказывается значительно меньшей (область II) - от 170 кГц до 190 кГц.

В случае двунаправленной генерации в области параметрической неустойчивости периодический автомодуляционный режим генерации сменяется либо квазипериодическим режимом, либо режимом динамического хаоса.

При работе лазера в автомодуляционном режиме первого рода модуляция накачки приводит, в отсутствие параметрической неустойчивости, к возникновению квазипериодического режима генерации. В области параметрической неустойчивости экспериментально наблюдался переход лазера в режим динамического хаоса.

В зависимости от глубины модуляции накачки возможно возникновение как режима квазипериодических колебаний, так и режима динамического хаоса.

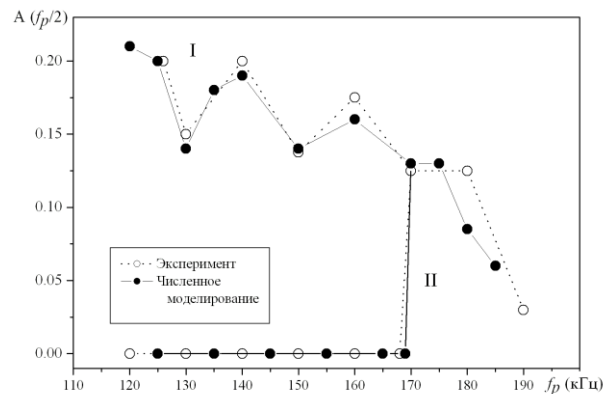


Рис.7. Зависимость амплитуды спектральной компоненты на частоте субгармоники $A(f_p/2)$ от частоты модуляции накачки f_p

Границы областей квазипериодического режима и режима динамического хаоса в зависимости от глубины модуляции накачки показаны на рис. 8.

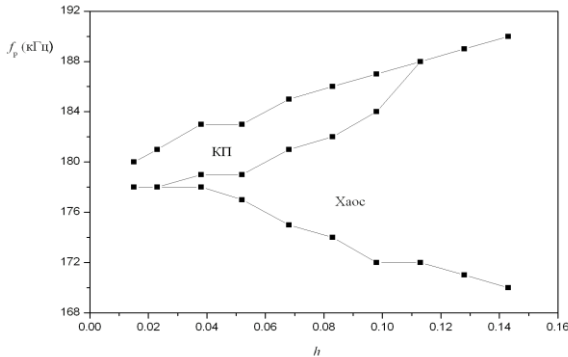


Рис.8. Границы областей квазипериодического режима (КП) и режима динамического хаоса в зависимости от глубины модуляции накачки h

Видно, что при небольших глубинах модуляции наблюдается лишь квазипериодический режим. В отличие от случая однонаправленной генерации, область существования этого режима оказывается значительно более узкой (несколько кГц) и сужается с увеличением глубины модуляции: при $h = 0.04$ ширина этой области равна 4 кГц, а при $h = 0.08$ – всего 1 кГц. Область существования режима динамического хаоса, напротив, увеличивается с ростом глубины модуляции. В режиме хаоса (при фиксированной глубине модуляции h) область непрерывного спектра существенно изменяется в зависимости от частоты модуляции f_p .

В заключение сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы:

1. Установлено, что в кольцевом чип-лазере при изменении температуры моноблока лазера можно создавать несимметричную связь встречных волн через обратное рассеяние и изменять степень несимметрии (отношение модулей коэффициентов связи). Дано качественное объяснение возникающей несимметрии на основе модели с двумя типами центров обратного рассеяния встречных волн: на неоднородностях показателя преломления и на неоднородностях коэффициента поглощения излучения во внутриврезонаторной среде. Несимметрия связи возникает благодаря интерференции полей, рассеянных на этих центрах.

2. Произведена оценка величины фактора амплитудно-фазовой связи α , используемого в векторной модели ТКЛ, путём сравнения экспериментально полученных и теоретически рассчитанных (при заранее заданных различных величинах фактора α) неизохронных зависимостей частоты автомодуляционных

колебаний от превышения накачки над порогом генерации. Величина фактора α оказалось равной 0.2.

3. Продемонстрирована возможность эффективного управления режимами генерации автономного кольцевого чип-лазера при воздействии на него внешним постоянным неоднородным магнитным полем. Амплитудная и частотная невязимности кольцевого резонатора, наведенные неоднородным магнитным полем внутри кристалла, оказываются гораздо большими, нежели в случае однородного внешнего магнитного поля. При перемещении области с неоднородным магнитным полем внутри моноблока чип-лазера амплитудная и частотная невязимности резонатора могут изменяться в широких пределах.

4. Изменение амплитудной и частотной невязимностей приводит к возникновению ряда новых, не наблюдавшихся ранее в автономном кольцевом чип-лазере, режимов генерации: режима биений с большой частотной подставкой, режима с периодической низкочастотной огибающей автомодуляционных колебаний, периодических автомодуляционных режимов однонаправленной генерации.

5. Продемонстрирована возможность возбуждения динамического хаоса в автономном кольцевом чип-лазере с помощью постоянного магнитного поля, наложенного на активный элемент лазера.

6. При параметрическом возбуждении релаксационных колебаний на субгармонике внешнего модулирующего сигнала, в кольцевом чип-лазере обнаружена бистабильность генерации. Исследована динамика излучения как в условиях однонаправленной генерации, так и при двунаправленной генерации. Продемонстрирована возможность параметрического возбуждения релаксационных колебаний на субгармонике внешнего модулирующего сигнала. Найдены границы областей бистабильности, исследованы области существования квазипериодического режима и режима динамического хаоса в зависимости от параметров модуляции накачки (глубины и частоты модуляции).

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Аулова Т.В., Золотоверх И.И., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Чекина С.Н. Неизохронность частоты автомодуляционных колебаний в твердотельном кольцевом лазере. // Квантовая электроника, том 40, № 3, с. 199-202 (2010)
2. Аулова Т.В., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Чекина С.Н. Квазипериодический режим автомодуляционных колебаний с низкочастотной импульсной огибающей в кольцевом чип-лазере. // Квантовая электроника, том 41, № 1, с. 13-16 (2011)
3. Aulova T.V., Checkina S.N. New kinds of oscillations in solid-state ring Nd:YAG lasers. // Тезисы 19th International Conference on Advanced Laser Technologies, Golden Sands, Bulgaria (2011)
4. Аулова Т.В., Чекина С.Н. Новые режимы генерации в твердотельных кольцевых лазерах на Nd:YAG в присутствии внешнего магнитного поля. // Тезисы VII международной конференции молодых ученых и специалистов «ОПТИКА – 2011», Санкт-Петербург, Россия (2011)
5. Аулова Т.В., Чекина С.Н. Параметрическое возбуждение релаксационных колебаний на субгармонике внешнего модулирующего сигнала в кольцевом Nd:YAG-лазере. // Тезисы VII международной конференции молодых ученых и специалистов «ОПТИКА – 2011», Санкт-Петербург, Россия (2011)
6. Аулова Т.В., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Чекина С.Н. Параметрическое возбуждение релаксационных колебаний на субгармонике внешнего модулирующего сигнала в кольцевом YAG : Nd-лазере. // Квантовая электроника, том 42, № 8, с. 659-662 (2012)
7. Аулова Т.В., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Чекина С.Н., Фирсов В.В. Управление режимами генерации кольцевого чип-лазера при воздействии постоянным магнитным полем. // Квантовая электроника, том 43, № 5, с. 477-480 (2013)

Отпечатано в копицентре « СТ ПРИНТ »
Москва, Ленинские горы, МГУ, 1 Гуманитарный корпус.
e-mail: globus9393338@yandex.ru тел.: 8 (495) 939-33-38
Тираж 110 экз. Подписано в печать 13.10.2014 г.