

*на правах рукописи*



**Дворцов Денис Валерьевич**

**ОДНОЧАСТОТНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ДИОДЫ С ДЛИНАМИ ВОЛН  
630 – 660 НМ ДЛЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Специальность 01.04.01 — Приборы и методы экспериментальной физики.

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого.

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, доцент  
**Парфенов Владимир Александрович**

**Официальные оппоненты:** **Каманина Наталия Владимировна**  
доктор физико-математических наук,  
начальник отдела «Фотофизика сред с  
нанообъектами» ГОИ им. С. И. Вавилова

**Пихтин Никита Александрович**  
кандидат физико-математических наук,  
исполняющий обязанности заведующего  
лабораторией «Полупроводниковой  
Люминесценции и инжекционных  
излучателей» ФТИ РАН им. А.Ф. Иоффе

**Ведущая организация:** Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), кафедра  
лазерных измерительных и навигационных  
систем (ЛИНС)

**Защита состоится 6 октября 2017 года в 11:00** на заседании  
диссертационного совета Д002.034.01 на базе Института аналитического  
приборостроения РАН (ИАП РАН) по адресу 198095, Санкт-Петербург, ул.  
Ивана Черных, д. 31 – 33, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ИАП  
РАН по тому же адресу и на сайтах [www.iairas.ru](http://www.iairas.ru) и [www.iai.rssi.ru](http://www.iai.rssi.ru). Отзывы на  
диссертацию и автореферат направлять по адресу 198095, Санкт-Петербург,  
ул. Ивана Черных, д. 31 – 33, лит. А.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук

А. Л. Буляница

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена лазерным диодам с резонатором Фабри-Перо (FP лазерные диоды) красного диапазона спектра с длинами волн 630 – 660 нм, работающим в одночастотном режиме, включая стабилизацию частоты излучения по доплеровски уширенным линиям поглощения иода  $^{127}\text{I}_2$ , для использования их в интерференционных измерениях.

**Актуальность темы исследования.** FP лазерные диоды с длинами волн 630 – 660 нм работают в видимой области спектра, удобной для практических применений. Они выпускаются промышленно и широко используются в различных прикладных задачах.

Выходные характеристики этой группы лазеров все последние годы продолжали улучшаться. Росла выходная мощность, снижался порог генерации, расширялась номенклатура изделий. Улучшилось качество создаваемого излучения — в настоящее время практически все лазеры работают в режиме генерации нулевой (основной) моды.

Лазерные диоды компактны, имеют низкую стоимость, малое энергопотребление, большую наработку на отказ.

На практике такие лазерные диоды используются в основном в качестве генераторов оптического пучка с малой угловой расходимостью и хорошими пространственными характеристиками. В тоже время сторона их работы, связанная со спектральными характеристиками создаваемого излучения, практически не находит отражения в технических описаниях к лазерным диодам и, соответственно, почти не рассматривается.

Как показали результаты выполненных ранее исследований полупроводниковых лазеров ИК диапазона, FP лазерные диоды могут генерировать одночастотное излучение. Разным аспектам работы таких лазерных диодов в одночастотном режиме посвящено большое количество публикаций. Имеются обзорные статьи, отражающие достигнутые в них результаты. Тем не менее, многие вопросы, связанные с одночастотным режимом работы лазеров и возможностью их применений, остаются неясными. Также непонятны возможности появившихся много позже лазерных диодов видимого диапазона, реализуемых с использованием новых технологий, в том числе на основе квантоворазмерных гетероструктур.

Если говорить об одночастотном режиме работы лазеров, то он интересен тем, что при этом генерируется излучение с наиболее узкой шириной спектра. Наличие этого режима работы у лазерных диодов, наряду с основными достоинствами данного типа лазеров, могло бы расширить спектр их практического применения.

Например, интерес к использованию одночастотных лазеров присутствует в области оптической связи, спектроскопических приложений, интерференционных измерений, голографии, измерительных задачах, например, дальнометрии. Для решения этих задач были созданы специальные одночастотные полупроводниковые лазеры с распределенной

обратной связью (DFB), распределенным брэгговским отражателем (DBR), а также лазеры с внешним резонатором (ECLD).

Если ограничиться задачами, не требующими проведения высокоточных прецизионных измерений, то простые по сравнению с отмеченными выше FP лазерные диоды, работающие в одночастотном режиме, потенциально могли бы быть задействованы в таких применениях.

В частности, в интерферометрии всегда существовала потребность в компактных, надежных, недорогих и малопотребляющих источниках излучения. Такими достоинствами как раз обладают FP лазерные диоды, что позволяет рассматривать их как основу для построения компактного и дешевого источника излучения с повышенной когерентностью для решения широкого круга задач, и прежде всего интерференционных измерений.

К недостаткам лазерных диодов, в первую очередь, относят широкую линию излучения, вызванную влиянием спонтанного излучения. Эта величина может составлять от нескольких десятков до сотни мегагерц. Во-вторых, у лазерных диодов отсутствует фиксированное значение частоты генерации. Оно определяется рабочим током накачки и температурой.

Эти недостатки в контексте конкретных задач могут быть не столь существенны. Такая ширина линии излучения и зависимость частоты генерации от рабочего тока и температуры приемлемы для решения многих прикладных задач. Кроме того, в видимом диапазоне длин волн, а «красные» лазерные диоды как раз работают в этой области, существует достаточно плотный спектр линий поглощения иода. Практически для любой частотной области работы лазера можно подобрать линию поглощения, которая, являясь репером частоты, могла бы удовлетворить требованиям задачи стабилизации частоты. При ее осуществлении вопрос неопределенности значения частоты мог бы быть снят.

При этом можно ограничиться стабилизацией частоты по доплеровски уширенным линиям поглощения. Такое решение не приведет к существенному усложнению схемы лазера и увеличению его размеров.

Таким образом, отмеченные ограничения не могут существенно повлиять на возможность использования лазерного диода красного диапазона спектра в качестве основы для построения источника излучения с повышенной когерентностью. С другой стороны, сохранение при этом указанных выше достоинств FP лазерных диодов дает возможность иметь малогабаритный, эффективный и дешевый источник излучения, что соответствует основным тенденциям современного развития техники вообще и лазерной техники в частности. Следует добавить, что появление любого нового, доступного пользователям технического средства обычно способствует расширению поля его применений, и лазерный источник излучения не будет здесь исключением.

С учетом практической значимости и необходимости уточнения и расширения научных представлений об одночастотном режиме работы FP лазерных диодов тему диссертационной работы можно считать актуальной.

Подведем итог вышесказанному, сформулировав цели и задачи диссертационной работы.

**Цель диссертационной работы** состоит в исследовании одночастотного режима работы FP лазерных диодов с длинами волн 630 – 660 нм для использования таких лазеров в интерференционных измерениях.

При проведении исследований использовались промышленно выпускаемые лазеры, обладающие достаточным уровнем завершенности, выполненные в стандартных корпусах с воспроизводимыми характеристиками. Это обеспечивает повторяемость получаемых результатов.

Для достижения указанной цели были поставлены **следующие задачи:**

1. Исследовать возможность работы промышленно выпускаемых лазерных диодов красного диапазона спектра в одночастотном режиме.
2. Провести экспериментальные исследования для выяснения основных характеристик одночастотного режима работы лазерных диодов.
3. Осуществить стабилизацию частоты излучения лазерных диодов по линиям поглощения иода  $^{127}\text{I}_2$ .
4. Исследовать характеристики FP лазерных диодов, важные для практического применения в интерференционных измерениях.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Одночастотный режим серийно выпускаемых лазерных диодов с длинами волн 630 – 660 нм и номинальной мощностью излучения 5 – 10 мВт обладает устойчивостью и воспроизводимостью от включения к включению лазеров и реализуется в виде совокупности областей непрерывного изменения тока и температуры, отличающихся генерируемой продольной модой; области одночастотного режима разделены узкими интервалами непрерывного изменения тех же параметров, в которых реализуется переходный режим с многомодовой генерацией; в одночастотном режиме уровень мощности ближайших к генерируемой моде продольных мод не превышает 2 – 3 % от уровня основной моды.
2. Перестройка частоты одночастотных FP лазерных диодов, включающая непрерывное периодическое изменение частоты генерации путем модуляции рабочего тока и одновременно выполняемую дискретную перестройку частоты излучения посредством изменения температуры лазера, так что два последовательных значения температуры лежат в диапазоне сканирования частоты током, позволяет получить непрерывную пропись доплеровских линий поглощения иода.
3. Одночастотный режим работы FP лазерных диодов с длинами волн 630 – 660 нм позволяет осуществить стабилизацию частоты генерации этих лазеров по доплеровски уширенным линиям поглощения иода  $^{127}\text{I}_2$  и устойчиво работать в этих условиях.
4. В системе стабилизации частоты излучения FP лазерного диода с введением пробного сигнала токовой модуляции частоты в результате

изменения мощности излучения лазера с частотой пробного сигнала возникает сдвиг положения "нуля" дискриминационной характеристики.

5. Отраженное зеркалом обратно в сторону лазера выходное излучение мощностью  $10^{-4} - 10^{-1}$  от исходной, направленное под малым углом к выходному пучку, способно переключить частоту генерации FP лазерного диода на его ближайшую продольную моду и обеспечить устойчивую одночастотную генерацию.

#### **Научная новизна**

1. На основании результатов экспериментального исследования показано, что современные FP лазерные диоды с длинами волн 630 – 660 нм, мощностью 5 – 10 мВт, изготовленные с использованием технологий MQW, создающие одномодовое излучение (режим основной моды), могут работать в одночастотном режиме; получены представления об особенностях реализации такого режима и подтверждено, что причины его установления обусловлены оптической схемой и свойствами полупроводниковой структуры.

2. Исследован переходный (многомодовый) режим работы лазерных диодов, возникающий между областями одночастотной генерации, и установлены формы его реализации.

3. Показана возможность стабилизации частоты по доплеровски уширенным линиям поглощения иода  $^{127}\text{I}_2$  и устойчивой работы в этом режиме серийно выпускаемых лазерных диодов красного диапазона спектра.

4. Впервые экспериментально показано, что излучение, обратно отраженное в лазер под малым углом к выходному пучку, способно обеспечить устойчивую одночастотную генерацию одной из ближайших к основной продольной моды.

5. Впервые показано, что положение оси диаграммы направленности излучения FP лазерных диодов может меняться при изменении рабочего тока и температуры.

#### **Практическая значимость**

1. Показана возможность создания источника с повышенной когерентностью излучения на основе FP лазерного диода с сохранением основных достоинств, присущих этому типу приборов, путем стабилизации частоты генерацией по линиям поглощения  $^{127}\text{I}_2$  для интерференционных измерений.

2. Предложены схемы и методики измерений, с использованием которых получены данные о спектральных характеристиках лазерных диодов с длинами волн 630 – 660 нм. Данные методики могут использоваться при исследовании лазерных диодов других диапазонов спектра.

3. Предложена методика перестройки частоты одночастотных FP лазерных диодов, включающая непрерывное периодическое изменение частоты генерации путем модуляции рабочего тока и одновременно выполняемую дискретную перестройку частоты излучения посредством изменения температуры лазера, которая позволяет получить непрерывную

пропись линий поглощения иода путем регистрации и совмещения отдельных фрагментов спектра.

4. Получена формула для оценки сдвига нуля дискриминационной характеристики, возникающего в системе стабилизации частоты с введением пробного сигнала при модуляции частоты током.

5. Получены данные о стабильности углового положения диаграммы направленности излучения FP лазерных диодов и влиянии обратного отражения на работу таких лазеров в одночастотном режиме.

6. Проведено макетирование интерференционных измерений с использованием FP лазерных диодов в качестве источников излучения.

**Обоснованность и достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертационной работе, обеспечивались применением целого ряда спектроскопических методов с использованием интерферометров типа Фабри-Перо, Маха-Цендера, сканирующего интерферометра, и подтверждаются большим количеством проведенных независимых экспериментов, их многократным повторением в течение 3-х – 6-ти месяцев и тщательной обработкой результатов. Полученные экспериментальные результаты не противоречат друг другу.

**Личный вклад автора.** Автор непосредственно участвовал в разработке и создании экспериментальных установок, проведении экспериментальных и теоретических исследований, обработке и анализе полученных данных. Материалы для публикаций подготавливались совместно с научным руководителем.

**Апробация результатов.** Основные положения работы докладывались на следующих конференциях: научно-практических конференциях с международным участием «Неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 гг.), конференциях "ЛАЗЕРЫ, ИЗМЕРЕНИЕ, ИНФОРМАЦИЯ" (Санкт-Петербург, 2012, 2013, 2014, 2015 гг.), конференции ФизикА.СПб (Санкт-Петербург, 2014 гг.), конференциях "Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геологии и транспорте" (Новороссийск, 2015, 2016 гг.).

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 26 печатных работах. Из них: 8 работ изданы в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертационного исследования, 2 из которых также опубликованы в англоязычных версиях журналов, индексируемых в базе Scopus, и 18 — в сборниках трудов конференций и тезисов докладов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа изложена на 181 страницах, содержит 74 рисунков, 2 таблицы, список использованной литературы, включающий 204 наименований и 3 приложения.

#### **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, его научная новизна и

практическая значимость. Приведены основные положения, которые выносятся на защиту, отмечены степень достоверности и апробация полученных результатов.

**В первой главе** дается краткий обзор истории развития техники полупроводниковых лазеров и место в ней FP лазерных диодов. Рассматривается принцип их работы, основные характеристики. Анализируются опубликованные в литературе экспериментальные и теоретические работы, посвященные режимам работы лазерных диодов с Фабри-Перо резонатором и вопросам стабилизации их частоты. На основе полученной информации сформулированы вопросы и задачи, требующие непосредственного решения в ходе работы.

**Вторая глава** посвящена экспериментальным измерениям спектральных характеристик лазерных диодов с резонатором Фабри-Перо красного диапазона спектра. Также здесь приведено описание используемой в измерениях экспериментальной техники и сведения об исследуемых лазерах.

В соответствии с первой поставленной задачей было необходимо исследовать наличие одночастотного режима работы у исследуемых лазеров и установить параметры его реализации. В экспериментах использовался специально изготовленный сканирующий интерферометр Фабри-Перо с базой 0,15 мм, который позволял просматривать спектры излучения лазеров, включающие несколько продольных мод. Измерения производились при наклонном падении излучения на интерферометр с целью исключить влияние обратного отражения на работу лазера.

В ходе исследований было установлено, что лазерные диоды красного диапазона спектра устойчиво работают в одночастотном режиме с уровнем боковых мод, не превышающим нескольких процентов от мощности доминирующей моды.

Типичный спектр излучения лазерных диодов в одночастотном режиме приведен на рис. 1.а. Как видно из рисунка, он эквидистантный и содержит одну доминирующую линию, которая соответствует излучаемой продольной моде лазера.

Одночастотный режим в FP лазерах является самоустанавливающимся, то есть, он не требует наличия каких-либо дополнительных элементов для его создания. При сохранении рабочих параметров (ток накачки, температура) он воспроизводится от включения к включению.

Одночастотный режим реализуется в виде определенных областей (зон) изменения температуры и тока. Каждой области соответствует своя продольная мода лазера. В небольших промежутках между областями существования одночастотного режима реализуется многомодовый режим, при котором лазер генерирует несколько продольных мод, конкурирующих друг с другом. Его спектрограмму можно видеть на рис.1.б. При переходе из одной области одночастотного режима в другую происходит смена

генерируемой продольной моды. Изменение частоты при этом может составлять от одного до двух-трех межмодовых интервалов.

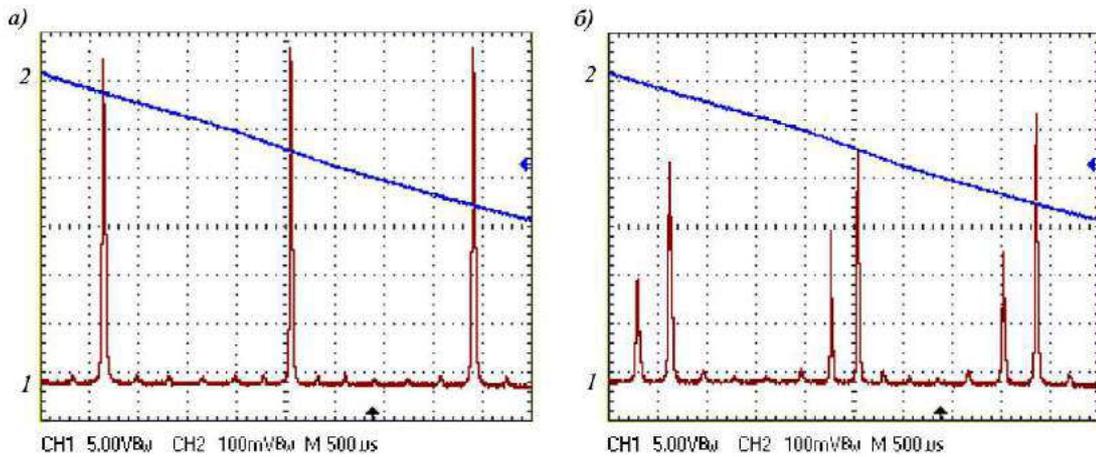


Рисунок 1 – Спектр излучения лазерного диода. а) одночастотный режим, б) многомодовый режим. Развертки: 1 — спектр лазера; 2 — сканирующее напряжение

Стоит отметить, что одночастотный режим существует в большей части области допустимых значений рабочей температуры и тока лазеров, как это видно на рис. 2.

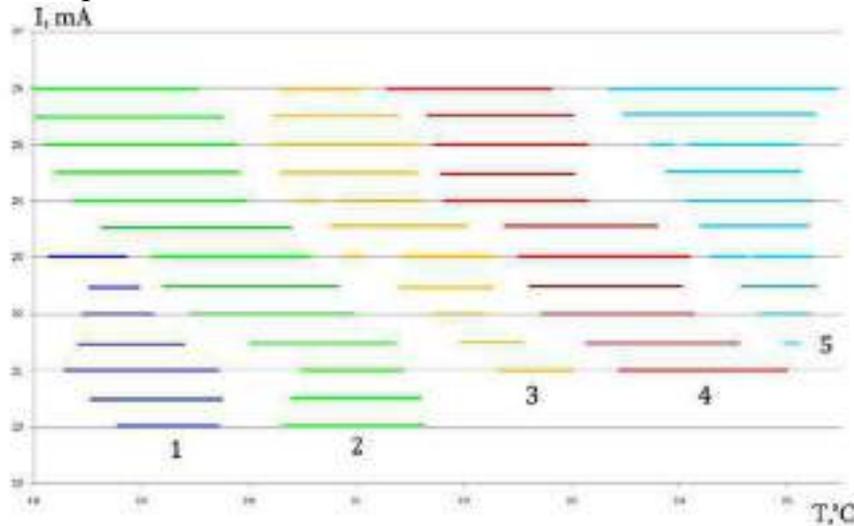


Рисунок 2 – Типичная картина зон существования одночастотного режима в координатах ток-температура на примере лазера ADL65055. Цифры 1 – 5 соответствуют разным продольным модам

В рамках решения второй поставленной задачи были выполнены эксперименты по измерению основных характеристик лазерных диодов, работающих в одночастотном режиме и представляющих практический интерес.

При наблюдении спектра лазера было неясно, в какой момент можно считать, что заканчивается генерация в одночастотном режиме, и начинается многомодовый режим. Поэтому, в первую очередь, необходимо было

конкретизировать границы областей изменения тока и температуры, в которых реализуется режим одночастотной генерации. Для решения этого вопроса использовался интерферометр Фабри-Перо в режиме сканирования частоты, с помощью которого контролировался одночастотный режим. Температура и ток лазера могли меняться с помощью источника питания и блока термостабилизации.

В процессе измерений снималось две зависимости — зависимость мощности излучения от температуры (тока) и зависимость мощности мод, генерируемых в одночастотном режиме от температуры (тока). Амплитуды мод измерялись по экрану осциллографа в относительных единицах и затем нормировались на мощность излучения.

Результаты измерений можно видеть на рис. 3. По полученным графикам можно было оценить также размер областей существования одночастотного режима.

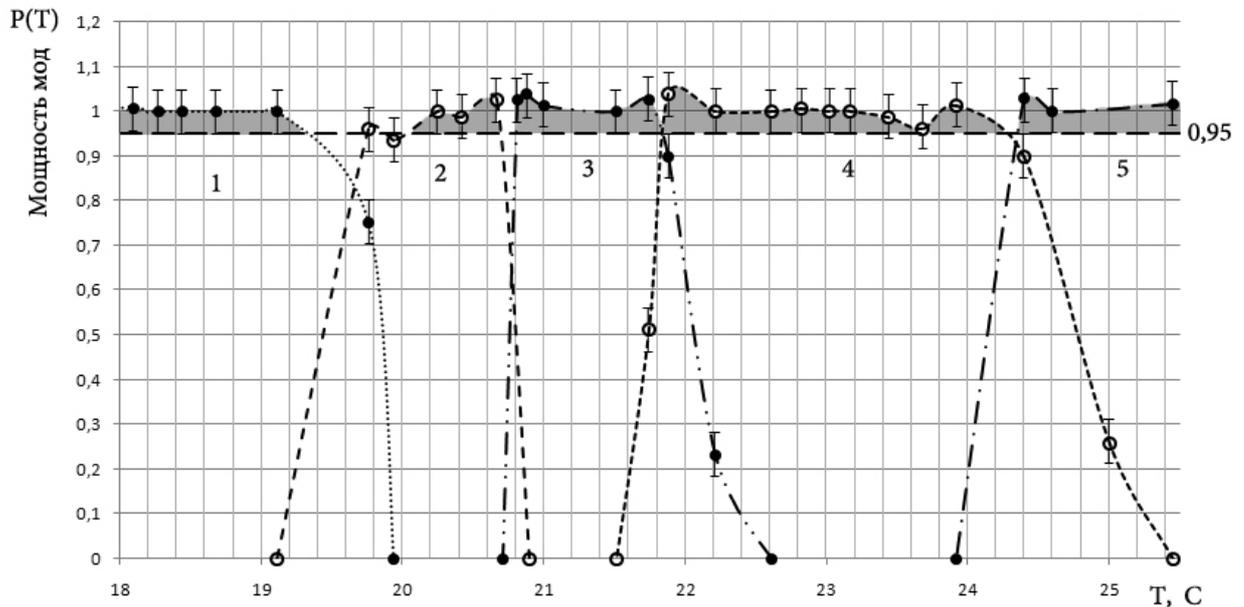


Рисунок 3 – Зависимости мощности продольных лазерных мод, генерируемых в областях существования одночастотного режима, от температуры. Цифрами обозначены зависимости, отвечающие отдельным продольным модам. Закрашенные области — области устойчивой одночастотной генерации

При уровне мощности главной моды выше 0.95 наблюдалась стабильная по амплитуде одночастотная генерация. С учетом большой скорости спада уровня основной моды с температурой соответствующий этому уровню интервал температур принимался за размер области одночастотного режима. Изменения уровня мощности моды в зоне одночастотной генерации с температурой в пределах 5% принимались за точность измерений и не идентифицировались как зависимость. Аналогично определялось положение зон по току.

Получить более точные представления о смене характера генерации можно было, настраиваясь на отдельную моду путем замены сканирующего напряжения постоянным от регулируемого источника, тем самым, получая возможность следить за ее уровнем. Измерения, выполненные таким образом, показали, что при многомодовом режиме конкурирующие моды генерируются не одновременно, а сменяя друг друга в разные моменты времени. При этом мощность излучения последовательно «переходит» из одной моды в другую. Это иллюстрирует рис. 4.

Наблюдаемая смена генерируемых мод в многомодовом режиме позволяет рассматривать его как переходный между одночастотными режимами на разных продольных модах.

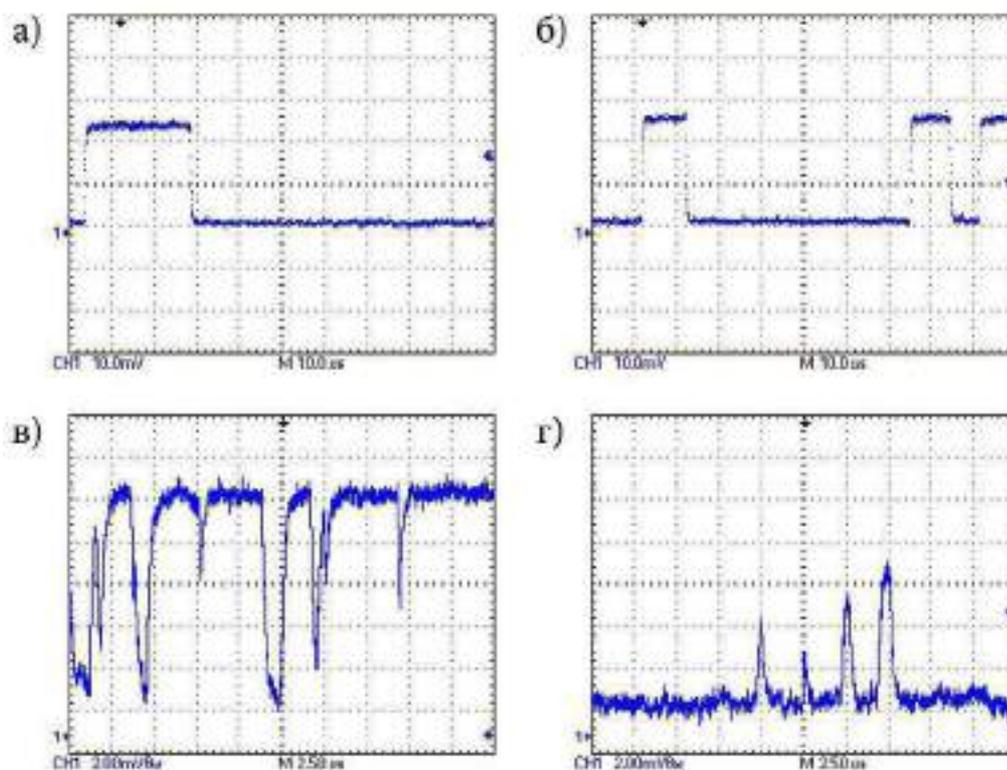


Рисунок 4 – Переключения мод в переходном режиме: а), б) — соответствуют двум модам для лазера ADL65055; в), г) — соответствуют двум модам для лазера HL6358. По вертикали приведена мощность моды в отн. ед., по горизонтали — время в мкс.

Эксперименты показали, что переходный режим реализуется как минимум в двух вариантах. Для лазеров одного типа были характерны включения-выключения мод на различную длительность. При приближении к границе одночастотного режима периоды включения одной из мод уменьшались, в то время как другая была включена все дольше. В одночастотном режиме переключения пропадали.

Для лазеров другого типа был характерен случай генерации мод в виде импульсов генерации. И по мере приближения и удаления от границ

одночастотного режима, менялась частота появления этих импульсов для каждой из мод, а их длительность оставалась практически неизменной.

Таким образом, по переключениям мод можно было судить о приближении к одночастотному режиму работы лазера. Однако данный метод достаточно сложный. Поэтому в качестве основного способа определения границ одночастотного режима был выбран первый метод. Для контроля при необходимости можно было настроиться на отдельную моду и проверить наличие переключений.

Далее, поскольку во многих приложениях (интерферометрии, дальнометрии и др.) важным параметром является ширина линии излучения, были произведены теоретические и экспериментальные оценки этого параметра.

Согласно модифицированной формуле Шавлова-Таунса, ширина линии излучения исследуемых лазеров может составлять величину от нескольких десятков до сотни МГц.

Для экспериментальной оценки данного параметра была собрана схема на основе интерферометра Маха-Цендера. Ее можно видеть на рис. 5.

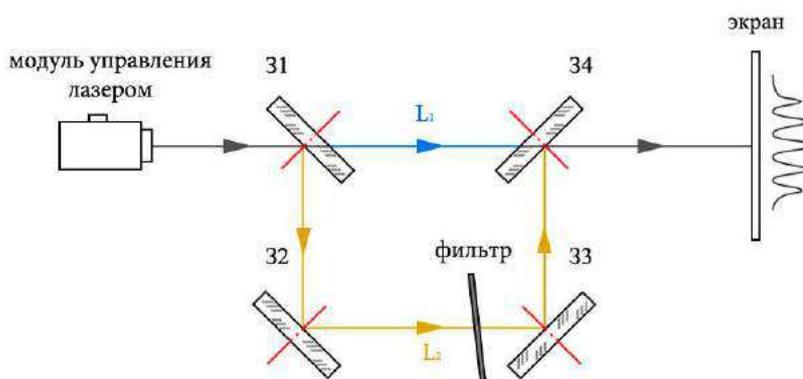


Рисунок 5 – Схема интерферометра Маха-Цендера, использованная в измерениях: 31– 34 — зеркала

В ходе эксперимента удалось получить контрастные интерференционные полосы с видимостью  $\sim 1$ . Меняя угловую настройку зеркал, можно было получить две, три и больше интерференционных полос. За время наблюдения, визуального либо с использованием видеокамеры, видность получаемой картины не менялась. Это позволило оценить длину когерентности лазера, которая связана с его шириной линии излучения соотношением:

$$l_{\text{ког}} \sim \frac{c}{\Delta\nu},$$

где  $c$  — скорость света,  $\Delta\nu$  — ширина спектра излучения.

В экспериментах по прямой интерференции двух пучков получалась контрастная интерференционная вплоть до разности хода равной три метра. Дальнейшее ее увеличения было ограничено условиями эксперимента. Тем самым, это позволило оценить длину когерентности величиной  $\geq 3$  м, а

ширину линии излучения —  $\leq 100$  МГц. Эти результаты не противоречат теоретической оценке и их достаточно для многих практических применений.

Во второй главе также приведены результаты измерений других характеристик лазерных диодов, работающих в одночастотном режиме. Ниже представлены основные из них:

1. Протяженность зон одночастотного режима. Она составляет  $\sim (1 - 3)^{\circ}\text{C}$  по температуре и  $(2 - 3)$  мА по току. Такие изменения входных параметров соответствуют изменению частоты генерации на одно или несколько межмодовых интервалов.
2. Крутизны зависимости частоты излучения лазера от тока инжекции и температуры в пределах существования одночастотного режима достаточно велики и составляют величины  $\sim 8$  ГГц/мА и  $\sim 30$  ГГц/ $^{\circ}\text{C}$ , соответственно.
3. Максимальные уходы среднего значения частоты не превышали 120 МГц за время 100 мс. Таким образом, спектр колебаний среднего значения частоты генерации лазерных диодов носит низкочастотный характер.
4. Влияние режима работы лазера на величину мощности излучения в пределах точности ее регистрации (точность эксперимента  $10^{-2}$  по мощности) не наблюдалось.
5. Измеренные межмодовые расстояния для разных типов лазеров лежали в пределах 100 – 200 ГГц.

Полученные в процессе измерений данные позволили перейти к реализации системы автоподстройки частоты и к вопросу стабилизации частоты лазеров по линиям поглощения иода.

**Третья глава** содержит результаты экспериментального исследования вопроса стабилизации частоты лазерных диодов красного диапазона спектра по доплеровски уширенным линиям поглощения иода.

На начальном этапе решалась задача регистрации линий поглощения иода, попадающих в области одночастотного режима работы лазерных диодов и выбор из них подходящих для стабилизации частоты.

Поскольку лазерные диоды обладают рядом особенностей, например, довольно большой крутизной зависимости частоты от температуры, что затрудняет настройку на линии поглощения, была предложена и реализована специальная методика перестройки частоты.

Она заключалась в перестройке частоты лазера путем изменения температуры от одного фиксированного значения к другому, с одновременным сканированием частоты током. Модуляция тока осуществлялась подачей треугольного напряжения на вход источника тока лазерного диода для управления его значением. Таким образом, можно было регистрировать линии поглощения, попадающие в область сканирования частоты током вблизи выбранного значения температуры. Для обеспечения непрерывности просмотра спектра значения температуры могли быть любыми, но выбирались таким образом, чтобы две ближайшие из них входили в область сканирования частоты током.

С помощью данной методики, можно было регистрировать линии поглощения иода, попадающие в область перестройки частоты исследованных диодов в пределах существования одночастотного режима по температуре. Фрагмент спектра поглощения, попадающего в область перестройки лазерного диода в одночастотном режиме, можно видеть на рис. 6.

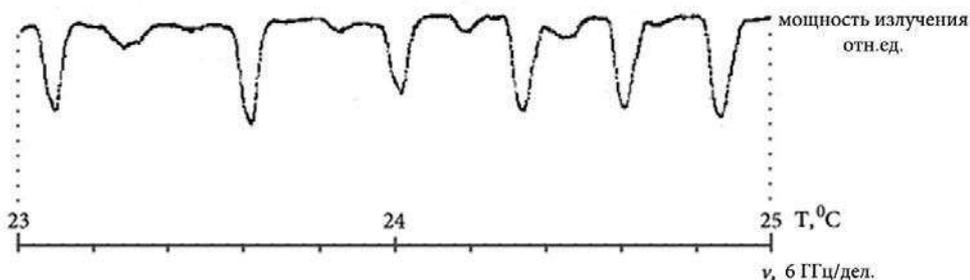


Рисунок 6 – Фрагмент спектра линий поглощения иода, попадающих в область перестройки частоты излучения лазерного диода типа ADL65055

Для экспериментов по стабилизации частоты лазерных диодов был собран блок автоматической подстройки частоты и экспериментальная установка, показанная на рис.7.

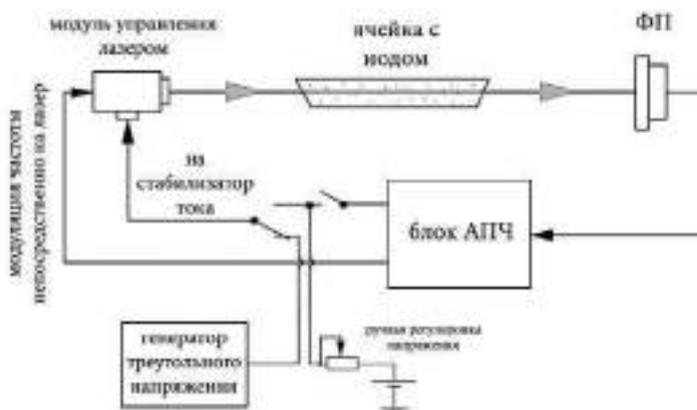


Рисунок 7 – Установка по стабилизации частоты излучения лазерных диодов: ФП — фотоприемник; АПЧ — система автоподстройки частоты; ИП — источник питания лазера

При разомкнутой цепи обратной связи, с помощью описанной выше методики осуществлялся выбор линии поглощения, затем при фиксированной температуре сканирование тока снималось, и замыкалась петля обратной связи блока АПЧ. Таким образом, лазер переводился в режим стабилизации частоты.

Тогда, если частота лазера смещалась относительно максимума поглощения, фазовый детектор блока АПЧ в зависимости от того, на какую величину и в какую сторону от максимума поглощения сдвинута частота генерации лазера формировал сигнал ошибки определенной полярности и величины, который поступал на вход блока питания лазера. Под действием

сигнала ошибки ток лазера изменялся и перестраивал, тем самым, частоту излучения лазера, удерживая ее вблизи максимума поглощения.

Надежная работа FP лазеров в режиме стабилизации показала, что реализуемый в них одночастотный режим обладает достаточной стабильностью.

В реализованной схеме управление частотой генерации лазера и её модуляция пробным сигналом осуществлялись изменением тока. Но, модуляция тока неизбежно вызывает модуляцию мощности.

В результате на сигнал модуляции мощности излучения с частотой пробного сигнала, связанный с расстройкой частоты, будет накладываться сигнал «паразитной» модуляции мощности, вызванный той же модуляцией тока на частоте пробного сигнала. Это приведет к неизбежному сдвигу рабочей точки (ноль сигнала ошибки) реперной характеристики.

Оценка величины возникающих при этом ошибок показала, что, величина частотного сдвига рабочей точки обратно пропорциональна уровню мощности выходного излучения и зависит от крутизны ватт-амперной и перестроечной характеристики лазера. Для наших экспериментов величина сдвига составляет  $\sim 3$  МГц. Это величина небольшая, но ее следует иметь в виду, поскольку она накладывает ограничение на точность стабилизации.

В конце главы приводятся данные о реализованной системе стабилизации частоты излучения лазерных диодов, и делается оценка достигнутой стабильности частоты по дискриминационной характеристике. Она показала, что остаточные отклонения частоты реализованной системы стабилизации после замыкания петли АПЧ не превосходят  $\pm 15$  МГц, что эквивалентно нестабильности частоты  $\Delta\nu/\nu \sim 10^{-8}$  для красного диапазона спектра.

**В четвертой главе** рассматриваются вопросы, связанные с практическим использованием лазерных диодов в интерференционных измерениях.

Как следует из полученных результатов, одночастотный режим работы серийно выпускаемых FP лазерный диодов с длинами волн 630 – 660 нм может быть использован для интерференционных измерений. Об этом свидетельствуют, в том числе, спектрограммы одночастотного режима, результаты измерения длины когерентности, возможность регистрации доплеровски уширенных линий поглощения иода и стабилизации по ним частоты излучения лазеров.

К наиболее характерным задачам интерференционных измерений, отражающих возможности использования в них лазерных источников, можно отнести измерения длин с шагом  $\lambda$ ,  $\lambda/2$  и т.п., требующих от источника излучения повышенной длины когерентности, малой угловой расходимости и стабильности частоты. Интересны также измерения смещений в пределах длины волны с большой разностью хода между интерферирующими пучками.

Отвлекаясь от принципиальной возможности решения таких задач, следует остановиться на особенностях их решения, обусловленных характеристиками одночастотного режима FP лазерных диодов.

В диссертации рассматриваются три возможные реализации источника излучения на лазерных диодах.

В первом случае рабочие параметры лазерного диода выбираются в центре области одночастотного режима. Требования к постоянству тока и температуры при этом минимальные —  $\pm 1$  мА и  $\pm 0,5$  °С. Нестабильность частоты лазера, соответствующая такому случаю,  $\Delta\nu/\nu \sim \pm 3,2 \cdot 10^{-5}$ .

Второй вариант предполагает поддержание стабильности и воспроизводимости тока накачки и температуры на более высоком уровне. Ввиду большей крутизны зависимости частоты от температуры, решающее влияние на стабильность частоты будет иметь именно последний параметр. Ограничиваясь технически доступной величиной нестабильности по температуре, например,  $\sim \pm 0,05$  °С, можно рассчитывать на  $\Delta\nu/\nu \sim \pm 3,2 \cdot 10^{-6}$ .

Наконец, ориентируясь на стабилизацию частоты по иоду, можно получить источник с воспроизводимостью среднего значения частоты  $\Delta\nu/\nu \pm 5 \cdot 10^{-8}$ , то есть  $\Delta\nu = \pm 20$  МГц, и длиной когерентности, определяемой шириной линии, то есть меньше 100 МГц.

Последний вариант менее доступен в связи с необходимостью иметь ячейку, наполненную чистым иодом и способную поддерживать вакуум высокого уровня ( $10^{-6}$  мм рт. ст.) в течение срока работы источника. Такие ячейки можно сделать относительно дешевыми только в массовом производстве.

Каждому из рассмотренных случаев можно сопоставить соответствующую его возможностям практическую задачу.

Проведенное экспериментальное моделирование интерференционных измерений также учитывало особенности работы лазерных диодов. Реализованная схема измерений, согласно рис. 8, базировалась на интерферометре Маха-Цендера, так как в этом случае исключались обратные отражения в сторону лазера. Разность хода плеч интерферометра составляла 60 см.

Геометрия схемы измерений была предельно компактной и включала установку двух зеркал интерферометра 31, 32 на продолжении оси лазера. Два других зеркала 33, 34 находились в измерительном плече на объекте. В отдельных экспериментах для еще большего упрощения схемы зеркала 33, 34 заменялись одним зеркалом. Схема позволяла при необходимости устанавливать на пути выходного пучка лазера кювету с иодом. Такое решение также конструктивно просто обеспечивает возможность термостабилизации лазера совместно с ячейкой и зеркалами интерферометра.

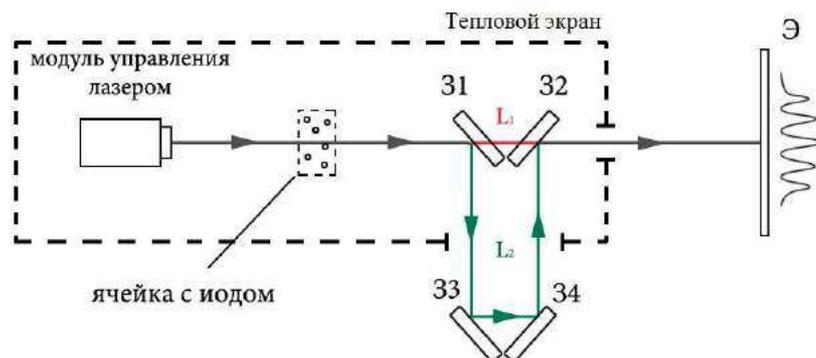


Рисунок 8 – Схема экспериментальной установки по моделированию интерференционных измерений: 31 – 34 — зеркала; Э — экран или видеокамера

Зеркала 33, 34 устанавливались на пьезокорректоре и могли смещаться при подаче на него напряжения, имитируя смещение объекта. Небольшой наклон зеркала 32 позволял создать линейный сдвиг фазы по апертуре пучка.

В результате наблюдалась интерференционная картина, показанная на рис.9б. Направление смещения максимумов указывало на увеличение – уменьшение расстояния до зеркал 33, 34.

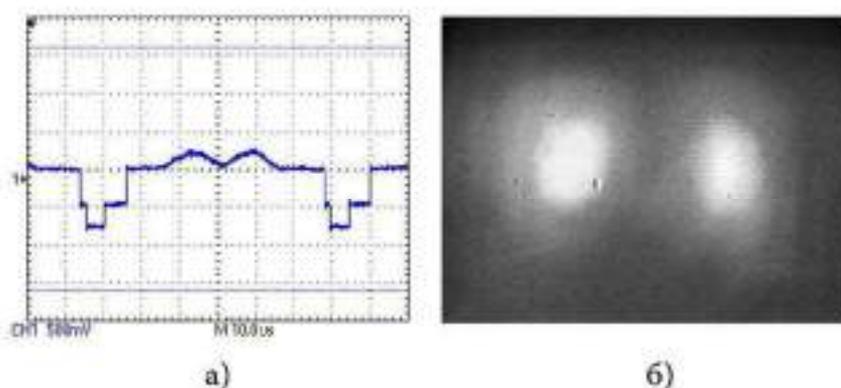


Рисунок 9 – Два интерференционных максимума: а) — сигнал развертки с осциллографа; б) — сигнал с видеокамеры

Измерения смещений могли выполняться либо путем учета дискретного изменения длины на целое число полуволн, либо смещения интерференционного максимума в пределах одной длины волны, что соответствовало сформулированным выше задачам.

В качестве одного из примеров использования такой схемы проведено измерение чувствительности пьезокорректора КП-1.

На результаты измерений интерференционных схем может влиять как угловая нестабильность оси диаграммы направленности, так и отраженное (рассеянное) назад, в сторону лазера, излучение от оптических элементов схемы измерений.

Для получения представлений о влиянии этих факторов на режим работы лазера были поставлены специальные измерения.

Исследования стабильности углового положения оси диаграммы направленности излучения лазерных диодов проводились с помощью четырехквadrантного фотоприемника, как это показано на рис. 10.

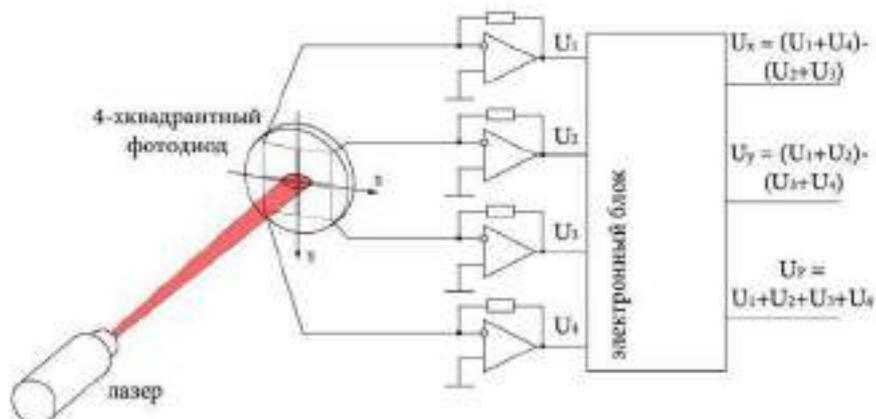


Рисунок 10 – Схема экспериментальной установки по измерению нестабильности оси диаграммы направленности лазерных диодов

Как выяснилось в ходе экспериментов, положение оси диаграммы направленности лазерных диодов не является постоянным. Оно меняется в процессе выхода лазера на рабочий стационарный режим работы (как можно видеть на рис. 11), а также при изменении рабочей температуры и тока накачки.

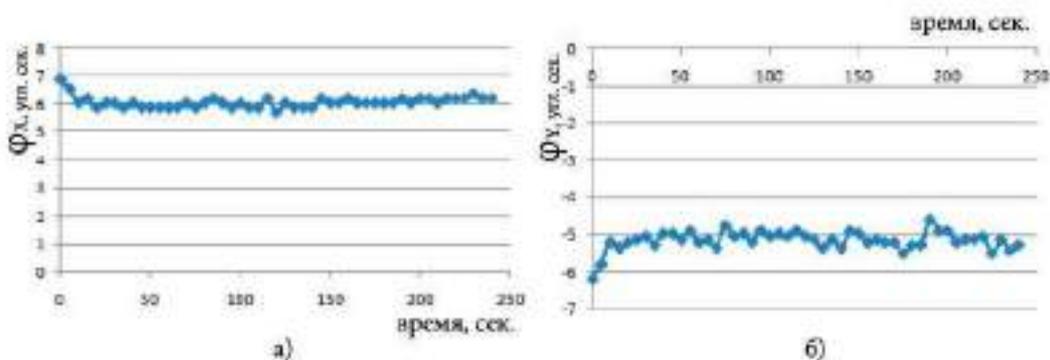


Рисунок 11 – Зависимость углового положения диаграммы направленности от времени для лазера ADL65055. По оси ординат отложено угловое положение ( $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$ ) осей диаграммы направленности, по оси абсцисс — время с момента включения лазера. Значения +6 угл. сек по X и – 5,2 угл. сек. по Y соответствуют стационарному положению оси пучка. Плоскость р-п перехода ориентирована параллельно оси Y

В зависимости от условий работы величина таких уходов может достигать до десяти угловых секунд. Это необходимо иметь в виду при построении интерференционных схем, поскольку нестабильность положения оси диаграммы направленности может влиять на результаты измерений таких схем. В стационарных условиях непрерывной генерации положение оси диаграммы направленности оставалось практически неизменными и по

результатам измерений сохранялось в пределах точности проводимых измерений —  $\pm 0,5$  угл. сек.

Далее, в данной главе описываются эксперименты по исследованию влияния обратно отраженного излучения на одночастотный режим работы FP лазерных диодов. По результатам проведенной работы следует отметить следующее:

- Небольшая часть выходного излучения (на уровне  $10^{-4} - 10^{-5}$ ) способна нарушить стабильно существующий одночастотный режим.
- Отсутствие влияния отраженного излучения на работу лазера наблюдается, начиная с ослабления мощности отраженного пучка в  $\sim 10^6$  раз.
- Отраженное излучение на уровне  $\geq 10^{-4}$  от выходного, идущее в сторону лазера под небольшим углом к выходному пучку, способно обеспечить в зависимости от настройки устойчивую генерацию на одной из ближайших к основной моде. Таким образом, показана возможность переключения генерации одной продольной моды на другую путем модуляции наличия (есть-нет) обратно отраженного излучения, то есть с помощью обратной связи. Наблюдаемое явление связывается с уменьшением потерь генерируемой моды по сравнению с остальными. Тогда, как обычно, генерацию одной продольной моды обеспечивает небольшое преимущество в усилении.

Наконец, в этой же главе приводятся результаты теоретической и экспериментальной оценок уровня амплитудных шумов излучения лазера, на основании которых делается заключение о возможности миниатюризации лазера со стабилизацией частоты по линиям поглощения иода за счет использования ячеек с длиной  $\sim 1$  см.

### **Заключение и основные результаты**

В процессе работы были решены все поставленные задачи и достигнута цель диссертационных исследований, а именно, исследован одночастотный режим серийно выпускаемых FP лазерных диодов, включая стабилизацию частоты излучения лазеров по линиям поглощения  $^{127}\text{I}_2$ .

1. Разработаны схемы и основанные на них методики исследования спектральных характеристик лазерных диодов, и получены данные об этих характеристиках, а именно:
  - проведена экспериментальная оценка длины когерентности излучения и связанной с ней ширины спектра излучения лазера;
  - получены оценки спектра и величины уходов среднего значения частоты лазера в одночастотном режиме;
  - получены количественные значения таких характеристик лазерных диодов, как крутизны зависимостей частоты генерации от температуры и от тока в пределах области одночастотного режима, расстояние между продольными модами лазеров;

- измерены размеры зон одночастотной генерации и областей существования переходного режима работы;
  - получена оценка мощности «остаточных» мод по отношению к доминирующей компоненте спектра одночастотной генерации.
2. Осуществлена стабилизация частоты лазерных диодов по линиям поглощения иода. В ходе выполненных экспериментов было достигнуто следующее:
    - предложена методика перестройки частоты, позволяющая наблюдать линии поглощения иода, выбирать удобные из них для стабилизации и быстро переходить в режим стабилизации частоты;
    - осуществлена стабилизация излучения лазерного диода по доплеровски уширенным линиям поглощения иода;
    - сделана оценка достигнутой стабильности частоты.
  3. Проведены измерения нестабильности оси диаграммы направленности лазерных диодов.
  4. Рассмотрен вопрос о постановке интерференционных измерений с использованием лазерных диодов красного диапазона спектра с резонатором Фабри-Перо.
  5. Произведена теоретическая и экспериментальная оценки амплитудных шумов, на основании которых сделан вывод о возможности миниатюризации системы стабилизации частоты лазера.

Таким образом, была достигнута цель работы, а именно получены данные об одночастотном режиме работы и реализован макет лазера со стабильным значением частоты на основе серийных красных лазерных диодов с Фабри-Перо резонатором, показана возможность использование таких лазеров в интерференционных измерениях. Полученные данные могут быть использованы при разработке стабилизированного по частоте источника когерентного излучения для широкого круга практических задач в области интерферометрии.

### **Список публикаций по теме диссертационного исследования**

#### **Статьи:**

1. *Дворцов Д.В., Парфенов В.А* Одночастотный режим работы лазерных диодов // НТВ СПб. Физ.- мат. науки. – 2013. – Вып.2 (170). – С. 89 – 96.
2. *Дворцов Д.В., Парфенов В.А.* Спектральные характеристики одночастотного режима работы лазерных диодов // Научное приборостроение. 2014. Т. 24. № 3. С. 17 – 23.
3. *Дворцов Д.В., Парфенов В.А., Фомин А. С.* Стабилизация частоты излучения лазерных диодов по частоте поглощения изотопа иода  $^{127}\text{I}_2$  // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 3. С.9 – 12.  
*Dvortsov D.V., Parfenov V. A., Fomin A. S.* Stabilizing the radiation frequency of laser diodes, using the absorption lines of iodine isotope  $^{127}\text{I}_2$  // Journal of Optical Technologies, 2015, 82(3), p.136 – 138.
4. *Дворцов Д.В., Парфенов В.А* Особенности формирования сигнала ошибки при стабилизации частоты лазерного диода // Научное приборостроение, 2015. Т.25, №2, С.108 – 112.

5. *Дворцов Д.В., Парфенов В.А* Особенности использования лазерных диодов для регистрации линий поглощения иода // Научное приборостроение, 2016, том 26, № 1, С. 62 – 67.
  6. *Дворцов Д.В., Парфенов В.А* Измерение нестабильности оси диаграммы направленности излучения лазерных диодов // Оптический журнал, 2016, Т.83, №5, С.1 – 5.  
*Dvortsov D.V., Parfenov V. A.* Measuring the instability of the directional-pattern axis of laser-diode radiation // Journal of Optical Technologies, 2016, 83(5), p.279 – 282.
  7. *Дворцов Д.В., Парфенов В.А* Переходный режим работы лазерных диодов красного диапазона спектра // Научное приборостроение, 2017, том 27, № 1, С. 77 – 82.
  8. *Дворцов Д.В., Парфенов В.А* Влияние обратно отраженного излучения на режим работы лазерного диода красного диапазона спектра // Оптический журнал, 2017, Т.84, №4, С. 73 – 76.
- Сборники трудов конференций и тезисы докладов:**
9. *Краснов А.В., Парфенов В.А., Дворцов Д.В.* Исследование характеристик VCSEL лазера // XXXIX Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч. IX. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010, стр. 83 – 85.
  10. *Краснов А.В., Парфенов В.А., Дворцов Д.В.* Исследования характеристик VCSEL лазеров с длиной волны излучения 850 нм // XL Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч. IX. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011, стр. 88 – 90.
  11. *Бондарев В. Г., Дворцов Д.В., Парфенов В. А.* Исследование одночастотного режима работы полупроводниковых лазерных диодов // XLI Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Ч. IX. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012, стр. 87 – 89.
  12. *Парфенов В.А., Галямина О.Д., Дворцов Д.В.* Исследование спектральных характеристик полупроводниковых лазерных диодов // Труды конференции "ЛАЗЕРЫ, ИЗМЕРЕНИЯ, ИНФОРМАЦИЯ" под ред. проф. Привалова В.Е. Изд-во Политехн. ун-та, 2012, стр. 99.
  13. *Бондарев В. Г., Дворцов Д.В., Парфенов В. А.* Исследование одночастотного режима работы полупроводниковых лазерных диодов // Неделя науки СПбГПУ. Лучшие доклады: материалы научно-практической конференции с международным участием. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013, стр.125 – 128.
  14. *Дворцов Д. В., Парфенов В. А.* Измерение ширины линии излучения полупроводниковых лазерных диодов // XLII Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Ч. IX. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013.
  15. *Дворцов Д.В., Парфенов В. А.* Особенности перестройки частоты полупроводниковых лазеров // Студенты и молодые ученые инновационной России: материалы работ молодежной научной конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013, стр. 7 – 9.
  16. *Дворцов Д. В., Парфенов В. А.* Модуляция частоты излучения лазерного диода для получения сигнала ошибки в системе стабилизации его частоты // Труды конференции "ЛАЗЕРЫ, ИЗМЕРЕНИЯ, ИНФОРМАЦИЯ" под ред. проф. Привалова В.Е. Изд-во Политехн. ун-та, 2013.
  17. *Дворцов Д. В., Парфенов В. А.,* Стабилизация частоты лазерных диодов по линиям поглощения иода // ФИЗИКА.СПб. Тезисы докладов российской конф., по физике и астр., Санкт-Петербург 28-30 окт. 2014 –СПб.: Изд-во Политехн ун-та, 2014 – 255с.,С.145.
  18. *Дворцов Д. В., Парфенов В. А., Фомин А. С.,* Стабилизация полупроводниковых лазерных диодов по доплеровски уширенным линиям поглощения  $^{127}\text{I}_2$  // "ЛАЗЕРЫ,

- ИЗМЕРЕНИЯ, ИНФОРМАЦИЯ" 2014: сб. док.24-й Межд. конф.–Т.1.– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. –326с., С. 196 – 204
19. *Дворцов Д. В., Парфенов В. А.*, Исследование зависимости мощности излучения лазерных диодов от режима работы // "ЛАЗЕРЫ, ИЗМЕРЕНИЯ, ИНФОРМАЦИЯ" 2014: сб. док. 24-й Межд. конф. – Т.2. – СПб.: Изд-во Политехн ун-та, 2014.–250с., С.153 – 157.
  20. *Дворцов Д.В., Измайлов К. В., Парфенов В.А* Стабилизация частоты излучения лазерных диодов по линиям поглощения  $^{127}\text{I}_2$  // Научн. форум с межд. участ. «Неделя науки СПбПУ», 1 – 6 декабря 2014: материалы научн. практ. конф. ИФНиТ СПбПУ. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. –476с., С.91 – 93.
  21. *Дворцов Д.В., Измайлов К. В., Парфенов В.А* Измерение нестабильности оси диаграммы направленности излучения лазерных диодов красного диапазона спектра // Неделя Науки СПбПУ, 30 ноября – 5 декабря 2015: материалы научн форума с межд. участ. ИФНиТ. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. –496с., С.86 – 88.
  22. *Дворцов Д. В., Парфенов В. А.*, Измерение нестабильности оси диаграммы направленности излучения лазерных диодов красного диапазона спектра // Межд. конф. "Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте – 2015" , 7 – 11 сентября 2015 Новороссийск, труды конф. Новороссийск: Изд-во ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2015, –314с., С.83 – 85.
  23. *Дворцов Д. В., Парфенов В. А.*, Влияние обратного отражения на режим работы лазерного диода // Межд. конф. "Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте – 2016", 12 – 17 сентября 2016 Новороссийск, труды конф. Новороссийск: Изд-во ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2016, С.39 – 40.
  24. *Дворцов Д. В., Парфенов В. А.*, Интерференционные измерения с использованием лазерных диодов красного диапазона спектра // Межд. конф. "Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте – 2016", 12 – 17 сентября 2016 Новороссийск, труды конф. Новороссийск: Изд-во ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2016, С.32 – 33.
  25. *Дворцов Д.В., Измайлов К.В., Парфенов В.А.* Интерференционные измерения с использованием лазерных диодов красного диапазона спектра // Неделя науки СПбГПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 534 с. С. 179-181.
  26. *Дворцов Д.В., Парфенов В.А.* Переключение частоты генерации лазерного диода с помощью обратно отраженного излучения // Неделя науки СПбГПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 534 с. С. 182-184.