



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

# Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Политехническая ул., 26, С.-Петербург, 194021  
Телефон: (812) 297-2245 Факс: (812) 297-1017  
post@mail.ioffe.ru http://www.ioffe.ru

20.09.2017 № 11217-849/01/780.3

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

В диссертационный совет Д 002.034.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Дворцова Дениса Валерьевича: «Одночастотные лазерные диоды с длинами волн 630 – 660 нм для интерференционных измерений», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 — «Приборы и методы экспериментальной физики»

Преимущества полупроводниковых инжекционных лазеров перед другими типами лазеров известны – это высокий КПД, компактность, доступность лазерного излучения в широком спектральном ближнем ИК диапазоне. Это делает их востребованными во многих областях промышленности - от компактных источников когерентного излучения в системах передачи данных и считывания информации, до источников накачки и обработки материалов. При этом каждое применение накладывает свои требования к выходным характеристикам лазеров. В этой связи задача улучшения и оптимизации приборных характеристик инжекционных лазеров является актуальной. В частности, в настоящее время для некоторых применений очень важной является проблема обеспечения стабильного одночастотного режима работы полупроводникового лазера, при чем желательно в некотором диапазоне температур и токов накачки. В данной диссертационной работе Д.В. Дворцова исследовался одночастотный режим работы коммерчески доступных лазерных диодах диапазона длин волн 630-660 нм. В задачи работы входили исследования характеристик лазерных диодов с резонатором Фабри-Перо, важные для практического применения в интерференционных измерениях. Это делает тему данной диссертационной работы актуальной не только с научной, но и с практической точки зрения.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационных исследований, четко определена цель работы и задачи, решаемые для её достижения, показаны ее научная новизна и практическая ценность, приведены выносимые на защиту научные положения.

Первая глава носит обзорный характер. В ней приведена история создания полупроводниковых лазеров, рассмотрен принцип работы, типы полупроводниковых лазеров

и их характеристики. Анализ литературных данных позволил диссертанту сделать вывод о необходимости и актуальности проведения исследований основных характеристик одночастотного режима работы лазерных диодов и стабилизации частоты излучения лазерных диодов по линиям поглощения веществ, в частности иода.

Во второй главе приведены исследования выходных характеристик лазерных диодов с резонатором Фабри-Перо, излучающих в диапазоне длин волн 630-660 нм. Также в данной главе приведено описание используемой в измерениях экспериментальной техники и методик измерений исследуемых лазеров. Исследовались промышленные образцы лазеров известных фирм Arima (Тайвань) и Hitachi Laser Diodes (Япония). Выходные мощности излучения таких лазеров лежали в диапазоне 7-12 мВт. В основном исследования были направлены на изучения спектра излучения лазеров при изменении токов накачки и рабочих температур с целью подтверждения существования стабильного одночастотного режима работы у исследуемых лазеров. Для исследований использовался специально изготовленный сканирующий интерферометр Фабри-Перо с базой 0,15 мм, который позволял измерять спектры излучения лазеров, включающие несколько продольных мод. В результате установлено, что исследованные лазерные диоды красного диапазона спектра устойчиво работают в одночастотном режиме с уровнем боковых мод, не превышающим 2-3% от мощности доминирующей моды. Очень важно, что одночастотный режим работы воспроизводился от включения к включению при сохранении значений рабочего тока и температуры. Оценена протяженность зон одночастотного режима. Она составляет примерно 1 – 3 °С по температуре и 2–3 мА по току. Также в данной главе были произведены теоретические и экспериментальные оценки длины когерентности и ширины линии излучения исследуемых лазеров, что очень важно для их использовании в дальнометрии и интерферометрии. Для экспериментальной оценки данных параметров была собрана схема на основе интерферометра Маха-Цендера. В результате получены значения ширины линии излучения около 100 МГц и длины когерентности  $\geq 3$  м. Результаты исследований характеристик лазерных диодов явились основой для реализации системы автоподстройки частоты и работ по стабилизации частоты лазеров по линиям поглощения иода.

Результаты экспериментальных исследований стабилизации частоты лазерных диодов красного диапазона спектра по доплеровски уширенным линиям поглощения иода приведены в третьей главе. Для экспериментов по стабилизации частоты лазерных диодов была собрана экспериментальная установка и блок автоматической подстройки частоты. В реализованной схеме управление частотой генерации лазера и её модуляция пробным сигналом осуществлялись изменением тока через лазер. Показано, что остаточные отклонения частоты реализованной системы стабилизации не превосходят  $\pm 15$  МГц, что эквивалентно нестабильности частоты  $\Delta\nu/\nu \sim 10^{-8}$  для красного диапазона спектра.

В четвертой главе рассмотрены вопросы проведения интерференционных измерений с учетом особенностей работы лазерных диодов в одночастотном режиме и показаны результаты экспериментального моделирования таких измерений. Также представлены результаты исследования нестабильности углового положения оси диаграммы

направленности излучения лазерных диодов. Показано, что положение оси диаграммы направленности лазерных диодов не является постоянным. Оно меняется в процессе выхода лазера на рабочий стационарный режим работы, а также при изменении рабочей температуры и тока накачки. При этом в зависимости от условий работы лазера сдвиг диаграммы направленности может достигать до десяти угловых секунд. Также в данной главе описываются эксперименты по исследованию влияния обратно отраженного излучения на одночастотный режим работы Фабри-Перо лазерных диодов. Важно отметить следующие полученные результаты: небольшая часть выходного излучения (на уровне  $10^{-4} - 10^{-5}$ ) способна нарушить стабильно существующий одночастотный режим и вызвать появление сильных амплитудных флуктуаций компонент спектра; отраженное излучение на уровне  $\geq 10^{-4}$ , падающее на торец лазера под небольшим углом, 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 обратно отраженного излучения, то есть с помощью обратной связи.

Сформулированные в заключении основные результаты работы обоснованы и подтверждаются представленными экспериментальными и теоретическими исследованиями.

Достоверность и надежность полученных результатов не вызывает сомнений и подтверждается, во-первых, тщательно продуманными методиками экспериментов, и, во-вторых, подтверждением экспериментальных результатов теоретическими расчетами. Основные результаты диссертации опубликованы в 26 печатных работах и апробация работы проведена на 10 научных конференциях.

Научная новизна диссертации определяется, прежде всего, полученными результатами, среди которых хотелось бы отметить следующие, представляющие наибольшую ценность:

- впервые 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 путем уменьшения ее потерь;
- 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;

По диссертации имеются следующие замечания.

1. При проведении исследований спектральных характеристик серийно выпускаемых лазерных диодов (глава 2) не был проведен анализ влияния длины резонатора лазера на его одночастотный режим работы. Тем не менее, известно, что чем меньше длина Фабри-Перо резонатора лазера, тем больше межмодовое расстояние. Соответственно, по всей видимости, и больше вероятность достижения одночастотного режима работы. Поскольку межмодовые расстояния были даже измерены в исследуемых образцах и варьировались от 92 ГГц до 190 ГГц, длины резонатора исследованных образцов отличались. Было бы интересно и не лишне провести такие исследования.

2. При описании характеристик исследуемых серийно выпускаемых лазерных диодов

указано, что выходное зеркало всех исследуемых образцов имеет пропускание  $\sim 0,7$  и отражение —  $0,3$  по мощности (стр. 83). Однако не очень понятно, на основании каких данных сделан такой вывод. В техническом описании производителей этих лазеров оппонент не нашел таких данных. Известно, что все производители в основном наносят просветляющие покрытия на выходной торец лазера с коэффициентом отражения  $1-8\%$ , в том числе и с целью увеличения срока службы прибора. Если это так, то это необходимо учитывать в некоторых вычислениях, приведенных в работе, а также при проведении экспериментов по исследованию влияния обратно отраженного излучения на одночастотный режим работы Фабри-Перо лазерных диодов.

Указанные замечания не являются принципиальными и не влияют на высокую оценку исследований проведенных в работе.

Оценивая диссертационную работу в целом, следует отметить актуальность тематики диссертации, высокий научно-методический уровень ее выполнения, значительное число принципиально новых результатов, имеющих как научное, так и практическое значение. Также особо необходимо подчеркнуть правильность и аккуратность оформления диссертации, а также логическое изложение материала в каждой из глав.

Таким образом, диссертационная работа Д.В. Дворцова «Одночастотные лазерные диоды с длинами волн  $630 - 660$  нм для интерференционных измерений» полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук.

Автореферат и опубликованные работы правильно и с достаточной полнотой отражают содержание диссертации.

Старший научный сотрудник,  
и.о. зав. лабораторией ФТИ им А.Ф.Иоффе РАН,  
кандидат физ.-мат. наук

  
Н.А. Пихтин

Ученый секретарь,  
профессор



  
А.П. Шергин