



УДК 621.373.8

*Д.В. Дворцов, В.А. Парфенов***ОДНОЧАСТОТНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ***D.V. Dvortsov, V.A. Parfenov*St. Petersburg State Polytechnical University,
29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia**SINGLE-FREQUENCY MODE REGIME OF LASER DIODES**

В статье приводятся результаты экспериментального исследования одночастотного режима генерации лазерных диодов (режим генерации одной продольной моды). Рассмотрено влияние температуры и тока накачки на область существования одночастотного режима. Получены количественные характеристики работы лазера в данном режиме.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ЛАЗЕР. ЛАЗЕРНЫЙ ДИОД. ОДНА ПРОДОЛЬНАЯ МОДА. ОДНОЧАСТОТНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ.

Experimental results of study of single-longitudinal-mode regime of laser diodes are presented in the paper. The influence of temperature and injection current on the range of presence of single-frequency mode is considered. Quantitative characteristics of laser operation in this regime are obtained.

SEMICONDUCTOR LASER. LASER DIODE. SINGLE-LONGITUDINAL-MODE REGIME. SINGLE-FREQUENCY MODE.

Полупроводниковые лазерные диоды, благодаря малым размерам, низкому энергопотреблению, большому времени работы на отказ, находят применение в оптической записи цифровой информации, волоконно-оптических системах связи, лазерных принтерах, различных датчиках, дальномерах, устройствах позиционирования и т. п. Большинство этих задач ограничивается требованием минимальной расходимости излучения, и поэтому их решение базируется на использовании лазерных диодов, генерирующих излучение, соответствующее основной моде. Можно с определенностью утверждать, что в настоящее время практически все лазерные диоды с выходной мощностью единицы – десятки милливольт работают в режиме генерации нулевой моды.

Однако для ряда применений, таких как лазерная спектроскопия, интерференционные измерения, системы волоконно-оптической связи с волновым уплотнением, требования к излучению не

ограничиваются наличием нулевой моды. Для решения этих задач необходимы лазеры, работающие в одночастотном режиме (или в режиме генерации одной продольной моды). Под эти применения были разработаны специальные полупроводниковые лазеры с внешним резонатором, например, DBR-лазер [1], лазер с волоконной брэгговской решеткой [2], лазеры с перестройкой частоты для спектроскопических исследований [3]. Эти квантовые генераторы производятся отдельными образцами и представляют собой достаточно уникальные дорогостоящие приборы.

В отличие от них лазеры, относящиеся к первой группе применений, выпускаются в массовых количествах, крайне дешевы и демонстрируют постоянное улучшение параметров выходного излучения. К ним относятся качество излучения в виде нулевой моды, надежность в работе, длительное сохранение выходных характеристик. Более того, как показывают результаты исследований [4, 5], лазеры данной группы

могут работать в одночастотном режиме. Эта информация также находит отражение в технических описаниях к некоторым лазерам и в проспектах их дистрибьютеров [6]. Поэтому было бы интересно, если это возможно, использовать данные лазеры как источники одночастотного излучения.

Вместе с тем, наличие информации лишь о генерации лазером одной продольной моды оставляет в стороне многие важные вопросы работы лазера и не дает представления о возможности применения таких диодов при решении конкретных задач, ввиду отсутствия необходимых для этого данных. Например, неясно, существует ли такой режим во всем допустимом диапазоне изменения рабочих токов, как влияет на него температура, какова ширина спектра излучения, есть ли какие-либо другие особенности генерации в этом режиме.

Поэтому целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование одночастотного режима работы серийно выпускаемых лазерных диодов с целью получения информации об условиях его реализации.

Экспериментальная часть

В работе исследовались лазерные диоды с номинальной выходной мощностью 5 и 10 мВт, излучающие в наиболее распространенном, «красном», диапазоне спектра на длинах волн вблизи 635 и 655 нм. Такие уровни мощности излучения представляются достаточными для решения многих практических задач, например, с использованием интерференционных измерений, и в то же время позволяют ограничить возможные варианты выбора лазеров.

Среди исследованных были лазеры HL6358MG (639 нм, 10-милливаттный, Hitachi Laser Diodes), для которых в техническом описании (ТО) указывается наличие одной продольной моды. Можно отметить также, что это одна из немногих фирм, в ТО которых приводится такая информация, а также указывается, что лазеры имеют MQW-структуру.

У остальных исследованных лазеров данная информация в ТО вообще отсутствовала. Это лазеры известной фир-

мы Agima Lasers: ADL-63054TL (635 нм, 5-милливаттный), ADL-63102TL (637 нм, 10-милливаттный), ADL-65052TL (655 нм, 5-милливаттный), ADL-65055TL (655 нм, 5-милливаттный). Существуют таблицы замещения (replacement) этих лазеров продукцией фирм Opnext, Sanyo, что указывает на близость используемых в них технических решений.

Данная группа лазеров включалась в эксперименты в силу соображений, что они в определенных условиях также могли бы работать в одночастотном режиме, так как имеют много общего с лазерами, позиционируемыми как лазеры с одной продольной модой. Это и одинаковый материал активной среды (AlGaInP), и организация резонатора, и близкие значения мощности, длины волны и расходимости излучения, и электрические параметры. Наконец, принималась во внимание информация, опубликованная в работах [4, 5].

Для повышения достоверности результатов каждый тип лазеров присутствовал в экспериментах в количестве не менее трех единиц.

Ввиду большой угловой расходимости излучения полупроводниковых лазеров их спектральные характеристики могут исследоваться только после предварительной коллимации излучения. Для проведения экспериментов была разработана единая модульная конструкция крепления лазерных диодов. Поскольку конструктивно они выполнены в одинаковых корпусах диаметром 5,6 мм, диоды запрессовывались в специальном посадочном месте модуля. Контактные ножки лазера припаивались к микроплате, которая, в свою очередь, посредством ленточного кабеля с разъемом соединялась с источником питания. Асферическая линза с фокусным расстоянием 4,5 мм в резьбовой оправке вворачивалась в корпус модуля и обеспечивала коллимацию выходного излучения.

Лазерный модуль устанавливался в термостате, температура которого автоматически контролировалась и могла перестраиваться платой термостабилизации в пределах (15 – 30) °С. При этом выбранное значение температуры поддерживалось

с точностью не хуже 0,03 °С.

Перед проведением экспериментов все лазерные модули тестировались: снимались их ватт-амперные характеристики. Цель этих измерений состояла в фиксации энергетических возможностей конкретного лазера уже в модульном исполнении. Это давало возможность в дальнейшем контролировать мощностные характеристики лазерного диода в течение всего периода работы.

Схема установки для исследования спектра излучения лазерных диодов приведена на рис. 1.

Спектр лазерного излучения контролировался с помощью двух интерферометров Фабри – Перо. Интерферометр 6 имел базу 7 см (постоянная интерферометра – 2,1 ГГц). База второго интерферометра 7 могла регулироваться в пределах (0,2 – 0,5) мм (постоянная интерферометра составляла 300 – 750 ГГц), причем его конструкция позволяла осуществлять эту регулировку плавно. В отличие от первого, второй интерферометр был сканирующим и обеспечивал просмотр всего спектра генерации.

Питание лазерных диодов осуществлялось от источника, работающего в режиме

стабилизации тока. Установка рабочего тока производилась многооборотным потенциометром, позволявшим выбирать значения тока лазера с точностью 0,1 мА в диапазоне (10 – 70) мА.

При генерации основной поперечной моды в общем случае спектр излучения лазера представляет собой группу эквидистантных частотных компонент, соответствующих продольным модам лазера. Частотное расстояние между продольными модами лазера $\Delta\nu_{\text{ММ}}$ следует выражению

$$\Delta\nu_{\text{ММ}} = c/(2Ln),$$

где c – скорость света, L – длина резонатора, n – показатель преломления материала полупроводникового кристалла ($n = \text{const}(\lambda)$), λ – длина волны излучения.

При известных значениях длины резонаторов $L = (0,3 – 0,5)$ мм и показателе преломления $n = 3,5$ значение $\Delta\nu_{\text{ММ}}$ лежит в соответствующих пределах (143 – 86) ГГц.

В одночастотном режиме должна наблюдаться только одна спектральная компонента.

Результаты экспериментов

Как показали эксперименты, одночастотный режим работы был достижим у

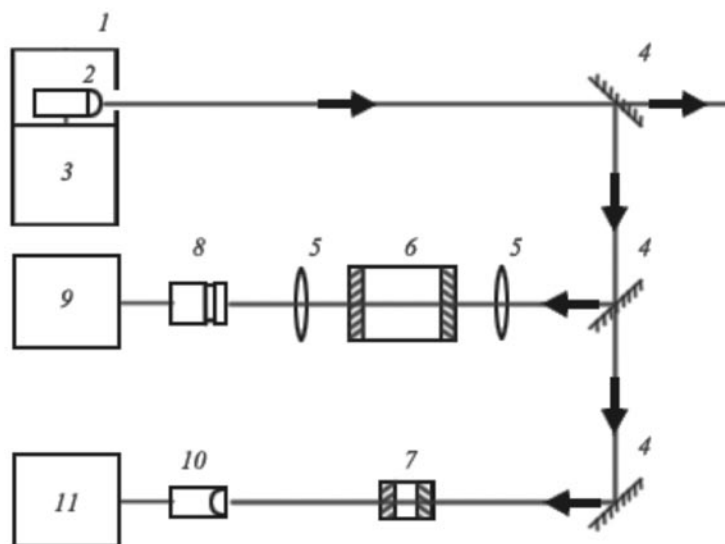


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – термостат; 2 – лазерный модуль; 3 – термоэлектрический элемент Пельтье;
- 4 – отклоняющие зеркала; 5 – линзы; 6, 7 – интерферометры Фабри – Перо;
- 8 – видеокamera; 9 – монитор; 10 – фотоприемник; 11 – осциллограф

всех лазеров, независимо от наличия или отсутствия в технических описаниях информации о генерации одной продольной моды. Особенности существования этого режима, которые будут описаны далее, в наиболее характерной форме наблюдались у 5-милливаттных лазерных диодов.

Одночастотный режим работы существовал не во всем диапазоне изменения рабочего тока, а только в некоторых интервалах (зонах) его изменения, имеющих величину (2 – 3) мА. Таких зон при изменении тока накачки в пределах от порогового тока $I_{\text{пор}}$ до максимального $I_{\text{макс}}$ у 5-милливаттного лазера может быть две-три. В промежутках между зонами генерируется несколько мод. Причем соотношение между амплитудами мод быстро меняется. Это хорошо наблюдалось с помощью осциллографа. В режи-

ме автоматической развертки спектральные компоненты, регистрируемые сканирующим осциллографом, буквально «живут», меняясь по амплитуде, в то время как выделенная строка при однократной развертке создает иллюзию неизменного спектра и не совпадает с картиной, получаемой при наложении спектров.

В центре зоны доминирует одна частота. По отношению к ней амплитуды ближайших дополнительных компонент не превосходят (2 – 3) %. Ближе к границе зоны их амплитуды растут, достигая (5 – 10) %, после чего при постоянном токе в течение нескольких секунд (моды явно конкурируют между собой) устанавливается многочастотный режим. При дальнейшем увеличении тока может вновь появиться тенденция к одночастотному режиму, а затем окон-

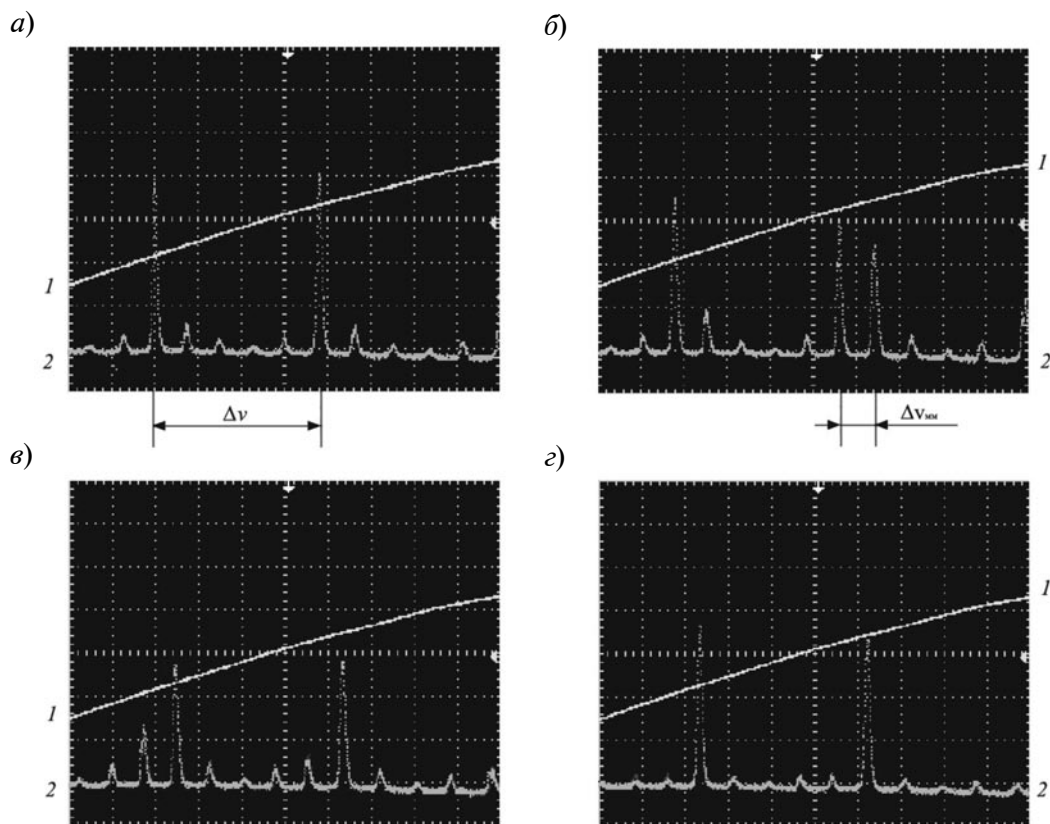


Рис. 2. Осциллограммы напряжений лазерного диода ADL-63054 при увеличении тока накачки от 28,1 мА (а) до 33,4 мА (г): 1 – напряжения, изменяющие базу интерферометра; 2 – спектры лазерного излучения; а, б – одночастотный вблизи срыва и многочастотный режимы генерации; в – восстановление одночастотного режима с началом доминирования соседней моды; г – установившийся одночастотный режим генерации на соседней моде.

Температура 19,3 °С, стабилизирована. $\Delta\nu$ – постоянная интерферометра, $\Delta\nu_{\text{мм}}$ – межмодовый интервал

чательно устанавливается многочастотный режим. Аналогично, но уже в обратном порядке, в новой зоне устанавливается одночастотный режим с генерацией соседней моды. На границе зон наблюдались области гистерезисных явлений. Их величина зависела от скорости перестройки тока.

На рис. 2 приведены осциллограммы, иллюстрирующие работу лазера в этом режиме.

Крутизна S , зависимости перестройки частоты от тока в пределах зоны определялась с помощью интерферометра b с большой базой и составляла приблизительно $(7 - 8)$ ГГц/мА. При этом частота генерации уменьшалась с ростом тока накачки.

Аналогичные явления наблюдались при изменении температуры лазера (температура термостата), но при постоянном токе накачки. При этом также имелись интер-

валы температур (температурные зоны) величиной $(0,6 - 0,9)$ °С, в пределах которых существовал устойчивый одночастотный режим. Между указанными зонами возникал многочастотный режим. При непрерывном изменении температуры его вновь сменял одночастотный режим. На границах зон наблюдались гистерезисные явления. Их величина зависела от скорости изменения температуры.

На рис. 3 приведены осциллограммы сигналов с фотоприемника 10 (см. рис. 1), иллюстрирующие последовательную смену режимов генерации с изменением температуры при постоянном токе накачки. На них хорошо видно, особенно при сопоставлении с разворачивающим напряжением на развертке 1 , что после возврата к одночастотному режиму генерация происходит уже на другой, ближайшей к первоначальной, моде резонатора.

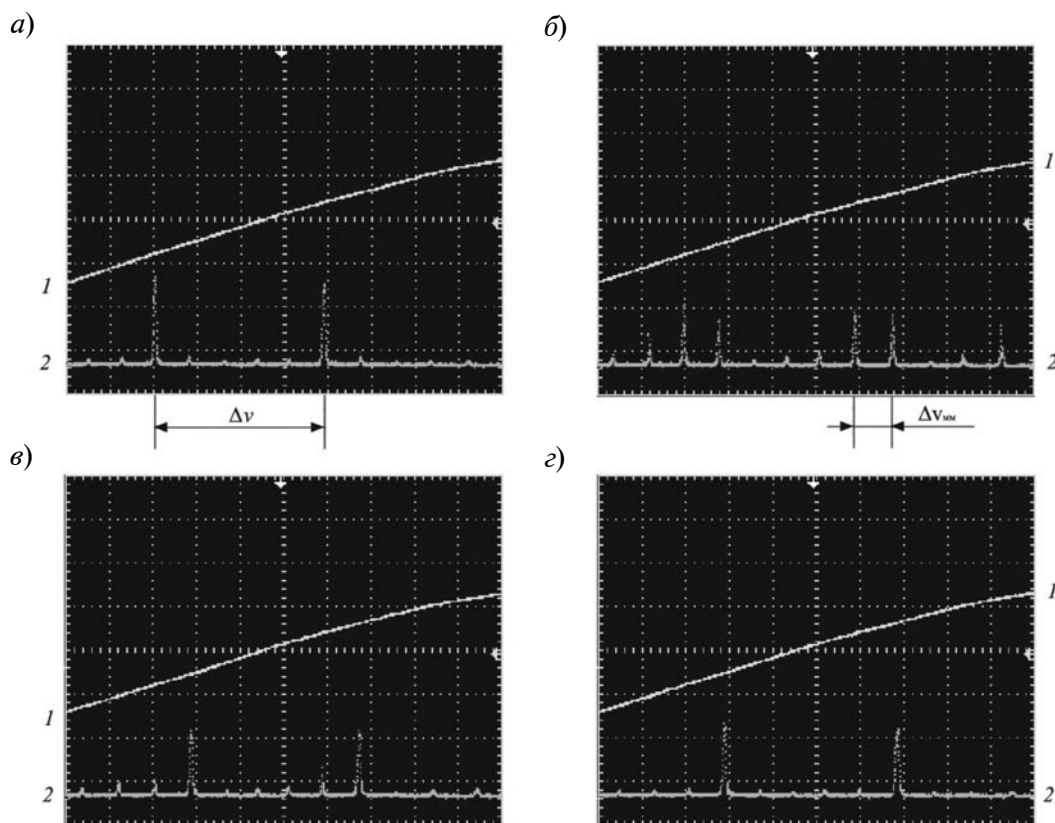


Рис. 3. Осциллограммы напряжений лазерного диода ADL-65055 при увеличении температуры лазера от 23,9 °С (а) до 25,0 °С (г) (ток накачки 28 мА, стабилизирован). Прикладываемые напряжения (1), спектры лазерного излучения (2), а также характер смены режимов работы аналогичны приведенным на рис. 2

Крутизна S_T зависимости перестройки частоты от температуры в пределах зоны существования одночастотного режима определялась с помощью интерферометра 7 (см. рис. 1) с большой базой и составляла примерно 29 ГГц/°С. При этом частота генерации уменьшалась с ростом температуры.

Было проведено также измерение средней крутизны S перестроечной характеристики лазера от температуры при постоянном токе. Она измерялась с использованием монохроматора МДР-2, без учета наличия или отсутствия одночастотного режима, и составила для исследуемых лазеров величину (0,2 – 0,3) нм/°С. Длина волны росла с ростом температуры.

Представленную картину существования и смены одночастотного режима можно дополнить следующими моментами.

Находясь в пределах одной зоны существования одночастотного режима, можно путем варьирования температуры и тока накачки приближаться к границам зоны, но не выходить из нее. Увеличение температуры можно «скомпенсировать» уменьшением тока и наоборот. Отсюда следует важный практический вывод, что можно получать одночастотный режим (правда, с разной мощностью) практически при любых значениях тока, но при разных температурах.

Закономерность перехода из одной зоны существования одночастотного режима в другую с изменением моды на ближайшую выполняется не всегда. Наблюдались перескоки частоты через одну и даже через две моды, но в ту же сторону, куда происходило плавное смещение частоты с изменением тока или напряжения. Вышеизложенное в целом характерно и для 10-милливаттных лазеров. Для них, по сравнению с 5-милливаттными лазерами, смена зон происходила менее определенно. Устойчивой генерации на ближайшей к генерируемой моде часто не наблюдалось. Соответственно, и количество наблюдаемых зон оказывалось меньшим.

Вблизи порога, то есть при низких уровнях генерации, одночастотный режим был обычно неустойчивым.

Стоит также отметить устойчивость и воспроизводимость одночастотного режима после выключения и последующего включения лазера с прежними значениями рабочего тока и температуры.

Поскольку отмеченные явления наблюдались для всех исследованных лазеров, можно считать одинаковым физический «механизм», лежащий в их основе.

Не останавливаясь подробно на обсуждении полученных результатов, важно отметить следующее.

Ввиду того, что генерация не прекращается со сменой режимов и усиление превышает порог для нескольких мод во всем диапазоне токов (температур), можно считать, что тот или иной режим возникает в результате конкурирующих процессов. Это подтверждается и наличием гистерезисных явлений вблизи границ зон, и визуально наблюдаемым установлением режимов, и самим наличием области многочастотного режима, пока преимущество одной из мод не станет достаточным.

Одночастотный режим может стать более выгодным, например, при однородном съеме инверсной заселенности за счет конкуренции мод вблизи зеркал резонатора при небольшом превышении усиления генерируемой моды над остальными. Другими словами, в этих условиях преимущество оказывается у моды с большим усилением, которая подавляет остальные.

Смещение максимума кривой усиления по частоте приводит к нарушению условий конкуренции мод и разрушению одночастотного режима. Оно происходит вследствие изменения температуры активной среды как при перестройке температуры термостата, так и при изменении тока накачки, который непосредственно влияет на температуру области генерации. Об этом свидетельствует одинаковый результат их воздействия на область существования режима. Рост температуры ведет к увеличению длины волны излучения. Причиной такого влияния температуры на положение максимума усиления является уменьшение ширины запрещенной зоны с ее ростом. Сдвиг максимума усиления характеризуется крутизной S .

Наличие факторов, влияющих на конкуренцию мод, будет оказывать влияние и на возможность существования одночастотного режима.

Частота генерируемой моды изменяется в результате изменения оптической длины резонатора. Последняя растет при повышении температуры, что должно при генерации одной продольной моды приводить к понижению частоты генерации. Скорость изменения частоты в одночастотном режиме определяется величинами крутизны S_l и S_r .

Еще одной характеристикой, важной для практики, является длина временной когерентности, определяющая пространственную базу, на которой можно проводить интерференционные измерения.

Как известно, оценку длины когерентности l можно получить из соотношения

$$l = c/\Delta\nu_{\text{изл}},$$

где $\Delta\nu_{\text{изл}}$ — ширина спектра излучения.

Оценку можно также получить экспериментально, путем прямых интерференционных измерений. Поскольку измерения спектра с помощью интерферометра всегда включают аппаратную функцию прибора, а оценки оставляют открытым вопрос о характеристиках получаемой интерференционной картины, представлялось более корректным провести прямые наблюдения интерференции пучков, полученных из выходного излучения лазера по схеме Маха — Цендера, при разной пространственной задержке. Предварительно проверялась поляризация излучения; оно было линейно поляризованным.

Эксперименты по наблюдению интерференции пучков на выходе интерферометра Маха — Цендера показали, что в диапазоне задержек до 3 м (возможности эксперимен-

та) наблюдается достаточно контрастная интерференционная картина. Это позволяет оценить ширину спектра $\Delta\nu_{\text{изл}}$ исследованных лазеров на уровне 100 МГц.

С такими источниками излучения можно уверенно проводить измерения, по крайней мере в тех задачах, где требуется регистрировать изменение разности хода пучков по числу наблюдаемых интерференционных максимумов.

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что все исследованные образцы промышленно выпускаемых лазерных диодов позволяют осуществлять устойчивый и воспроизводимый одночастотный режим работы. Выявленные общие закономерности реализации одночастотного режима исследованных лазеров приводят к выводу о едином для всех лазеров физическом «механизме», лежащем в основе его существования. По-видимому, это справедливо и для других современных лазерных диодов, в том числе с большей выходной мощностью.

В ходе экспериментов получены оценочные значения ряда выходных характеристик лазерного излучения, важные для практического использования лазера, работающего в одночастотном режиме.

Дополнительно следует уточнить, что полученные данные не дают однозначного ответа на вопрос, будет или нет тот или иной лазер работать в одночастотном режиме. Если неизвестно, может ли лазер в нем работать, то лазер надо проверять на наличие такой возможности. Можно лишь утверждать, что если одночастотный режим есть, то особенности его реализации и характеристики будут, скорее всего, аналогичны описанным выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фриман, Р. Волоконно-оптические системы связи [Текст] / Р. Фриман. — Пер. с англ., 3-е, дополненное, издание. — М.: Техносфера, 2006. — 496 с. — ISBN 5-94836-010-5. — С. 95–96, 113–117.

2. Дураев, В.П. Полупроводниковые лазеры с волоконной брэгговской решеткой и узким спектром генерации на длинах волн 1530 —

1560 нм [Текст] / В.П. Дураев, Е.Т. Неделин, Т.П. Недобывайло [и др.] // Квантовая электроника. — 2001. — Т. 31. — № 6. — С. 529–530.

3. DL-100 Series — Tunable Diode Lasers [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.toptica.com — DL-100 Series.

4. Риле, Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения [Текст] / Ф. Риле. — Пер. с англ.

– М.: Физматлит, 2009. – 512с. – ISBN 978-5-9221-1096-9. – С. 282–292.

5. **Соболев, В.С.** Использование режима обратной связи для оценки крутизны модуляционной характеристики полупроводниковых лазеров [Текст] / В.С. Соболев, Е.Н. Ут-

кин // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35. – Вып. 7. – С. 28–34.

6. Hitachi Laser Diodes [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.thorlabs.com – Products Home – Light – Coherent Sources – Laser Diodes – Visible Laser Diodes.

ДВОРЦОВ Денис Валерьевич – аспирант кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
otenki@mail.ru

ПАРФЕНОВ Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
pprafen@mail.ru