

УДК 62–1.373

© Д. В. Дворцов, В. А. Парфенов

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОЧАСТОТНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ

Работа посвящена исследованию одночастотного режима работы лазерных диодов с длиной волны излучения 635 и 655 нм. Экспериментально исследованы вопросы, касающиеся спектральных характеристик работы лазера. Они включают контроль наличия одночастотного режима, измерение межмодового расстояния, наблюдение перестройки частоты генерации с температурой, измерение уходов среднего значения частоты генерации во времени.

Кл. сл.: полупроводниковый лазер, лазерные диоды, одночастотный режим работы, одна продольная мода, перестройка частоты

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые лазерные диоды представляют интерес для многих практических применений не только из-за малых размеров, энергопотребления, стоимости, но и из-за спектральных характеристик. Уже сейчас они предоставляют разработчикам аппаратуры достаточно широкий набор рабочих длин волн в видимом, инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах спектра [1]. Спектральные характеристики лазерных диодов важны не только с научной, но и с практической точки зрения, прежде всего для научного приборостроения. Вопросы получения одночастотного режима генерации таких лазеров, перестройки частоты, повышения когерентности излучения нашли отражение в научной периодике, а результаты этих исследований вошли в известные обзоры и монографии, например, [2, 3], [4, с. 281–295].

Развитием этих работ стало создание специализированных лазеров для решения конкретных задач. Например, лазеры DFB и DBR предназначены в основном для волоконно-оптических линий связи [5, с. 95–96, 113–117]. Сюда же можно отнести и лазеры с волоконной брэгговской решеткой [6]. Лазеры серии DL-100 ориентированы на спектроскопические исследования [7].

Сохраняется интерес к получению одночастотной генерации обычных лазерных диодов с FP резонатором. Наличие доступных одночастотных лазеров является также предпосылкой для появления новых применений [8, 9].

Данный тип лазеров в последние годы демонстрировал повышение выходных характеристик. Практически все лазеры имеют нулевую моду излучения, снижается порог генерации, растут на-

дежность и длительность работы, появляются новые образцы приборов. В значительной степени это связано с внедрением новых, в том числе MQW, технологий.

Вопросы работы лазерных диодов в одночастотном режиме и его характеристики, как уже отмечалось выше, подробно обсуждались в публикациях [2–4].

Возможность работы лазерных диодов в одночастотном режиме находит отражение в технических описаниях к некоторым промышленно производимым лазерам, а также в проспектах их дистрибьютеров [1]. Однако приводимая информация по данному вопросу минимальна и обычно ограничивается констатацией факта работы в таком режиме (single longitudinal mode).

По-видимому, связано это с тем, что одночастотный режим не является приоритетным для данной продукции. С другой стороны, причина может быть связана с особенностями самого режима. Одна из них состоит в том, что одночастотный режим работы существует не при всех допустимых значениях рабочих токов и температур, а только при определенных их значениях, которые можно рассматривать как зоны существования одночастотного режима. В пределах зоны непрерывную перестройку частоты генерации можно осуществлять регулировкой любого из указанных выше параметров.

Поэтому ряд важных для формирования представлений о возможности практического использования таких лазеров вопросов, таких как измерение и контроль выходных характеристик лазера, устойчивость одночастотного режима, нуждаются в дополнительном рассмотрении.

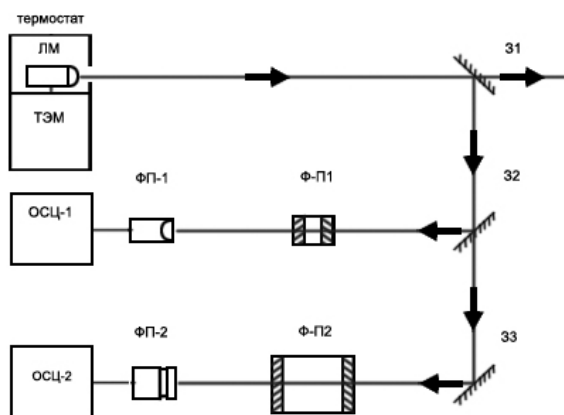


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования спектра лазерных диодов.

ЛМ — лазерный модуль; ТЭМ — термоэлектрический модуль; ФП-1, ФП-2 — сканирующие интерферометры Фабри—Перо с базой 0.14 мм и 9 см соответственно; ФП-1, ФП-2 — фотоприемники; 31, 32, 33 — отклоняющие зеркала; ОСЦ-1, ОСЦ-2 — осциллографы

Результаты проведенных в работе [10] исследований показывают, что серийно выпускаемые лазерные диоды "красного" диапазона спектра с FP-резонатором могут быть источниками одночастотного излучения, при этом сами лазеры могут не позиционироваться как одночастотные.

В настоящей работе, являющейся продолжением работы [10], ставилась задача экспериментально исследовать вопросы, касающиеся спектральных характеристик одночастотного режима работы лазерных диодов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования велись с использованием лазеров наиболее распространенной, "красной", области спектра, т. е. с длинами волн 635 и 655 нм. Они имели номинальные выходные мощности 5

и 10 мВт и были изготовлены такими фирмами, как Arima Lasers и Hitachi Laser Diodes.

Обращение к промышленно изготовленным лазерам обусловлено тем обстоятельством, что само исследование характеристик одночастотного режима работы может проводиться только на лазерных образцах с высокой степенью технологической и конструктивной законченности. При этом одновременно упрощается потенциальная возможность внедрения результатов исследований.

Лазерные диоды в экспериментах исследовались в составе лазерных модулей. Для этого лазерный диод запрессовывался в цилиндрическую втулку, в которую вворачивалась коллимирующая линза в специальной оправке. Такое решение позволяло легко устанавливать и оперативно заменять лазеры (модули) в ходе измерений, обеспечивать их термостатирование.

Температура лазеров поддерживалась на выбранном значении системой термостатирования, одновременно обеспечивавшей ее перестройку.

Питание осуществлялось от источника со стабилизацией тока накачки.

Оптическая схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

Контроль наличия одночастотного режима и исследование его характеристик в процессе перестройки частоты осуществлялись с помощью сканирующего интерферометра ФП-1 с базой 0.14 мм (постоянная интерферометра составляет 1070 ГГц). На рис. 2 приведены характерные для этого случая осциллограммы с ОСЦ-1.

Для регистрации зависимости среднего значения частоты генерации от времени использовался интерферометр ФП-2 (рис. 1) с базой, равной 9 см, (постоянная интерферометра — $\Delta\nu = 1.67$ ГГц). Он также мог работать как сканирующий интерферометр.

Особенностью интерферометра являлось то, что его аппаратная функция выбиралась заведомо шире спектра излучения лазерного диода. По данным работы [10], она не превосходит 100 МГц.

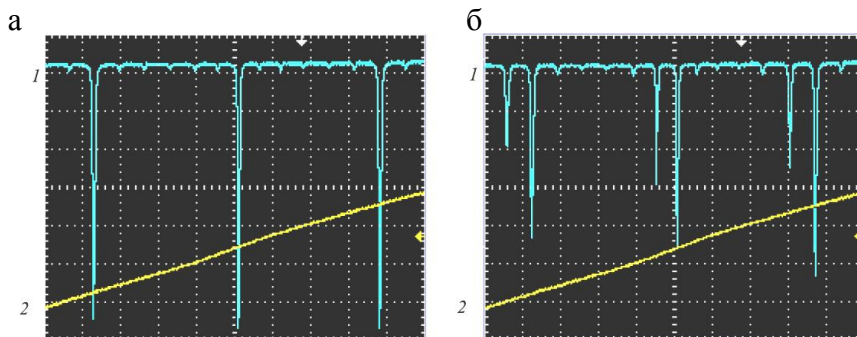


Рис. 2. Спектр излучения лазерного диода ADL65055.

Осциллограммы с ОСЦ-1 (рис. 1) в случае одночастотного режима работы (а) и многочастотного режима работы (б).

1 — развертка спектра излучения лазерного диода; 2 — сканирующее напряжение

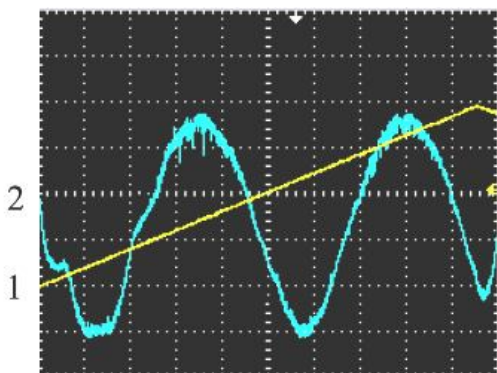


Рис 3. Калибровка интерферометра Ф-П2 (рис. 1).

Развертка 1 — зависимость сканирующего напряжения, перестраивающего собственную частоту интерферометра, от времени; развертка 2 — зависимость пропускания интерферометра (аппаратная функция) от времени (частота лазера считается постоянной)

Перед измерением интерферометр калибровался. Для этого он переводился в режим сканирования частоты. Источником излучения служил исследуемый лазер. В этой ситуации на развертке осциллографа фактически наблюдалась аппаратная функция интерферометра.

На рис. 3 показана оциллограмма с ОСЦ-2 (рис. 1), соответствующая такому случаю. На вход 1 осциллографа ОСЦ-2 подано сканирующее напряжение треугольной формы. Его развертку во времени отображает кривая 1. Вход 2 осциллографа соединен с выходом фотоприемника ФП-2. На развертке 2 зарегистрирован максимум пропускания интерферометра (отрицательная полярность; кривая 2). Кроме максимума наблюдается еще два минимума, разнесенные друг от друга по горизонтали на расстояние, равное постоянной интерферометра, что составляет 4,5 клетки. Поэтому масштаб развертки по горизонтали равен ~ 420 МГц/клетку. Наклон линейного участка кривой пропускания в данном случае находится из соотношения: 3 вертикальные клетки соответствуют одной горизонтальной. То есть изменение пропускания эталона на 1 вертикальную клетку происходит в результате изменения частоты на ~ 140 МГц.

Для измерения уходов частоты требовалось совместить линейный участок характеристики интерферометра с областью изменения частоты лазера. Для этого вместо сканирующего напряжения на интерферометр подавалось постоянное напряжение, величина которого регулировалась, обеспечивая желаемое совмещение.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

С использованием описанной выше установки были выполнены экспериментальные исследования спектральных характеристик одночастотного режима работы лазерных диодов.

Из оциллограмм, аналогичных показанной на рис. 2, была получена информация о величине межмодового интервала для продольных мод лазера.

Согласно рис. 2, в излучении лазера при одночастотном режиме генерации доминирует одна спектральная компонента, соответствующая продольной моде резонатора. Остальные моды имеют существенно меньшие мощности. В центре зоны существования одночастотного режима величина этих мод по отношению к максимальной не превосходит 3–5 %.

Для лазера с FP резонатором следует ожидать эквидистантного спектра продольных мод, что хорошо согласуется с приведенной оциллограммой. Аналитическое выражение для межмодового расстояния $\Delta\nu_{\text{мм}}$ с учетом дисперсии активной среды имеет вид

$$\Delta\nu_{\text{мм}} = \frac{c}{2Ln} \cdot \frac{1}{1 - \frac{\lambda}{n} \cdot \frac{dn}{d\lambda}}, \quad (1)$$

где c — скорость света; L — геометрическая длина резонатора; n — показатель преломления кристалла; $\frac{dn}{d\lambda}$ — дисперсия кристалла.

Из оциллограммы (рис. 2) определялись постоянная интерферометра и величина межмодового интервала в относительных единицах. Величина постоянной интерферометра, но уже в абсолютных единицах, вычислялась после измерения расстояния между зеркалами. Основываясь на этих данных, можно было оценить величину $\Delta\nu_{\text{мм}}$. У разных типов лазеров межмодовое расстояние отличается прежде всего из-за различия в длине резонатора. Для лазеров типа ADL-63054TL, ADL-65055TL, ADL-63102TL, HL-6358, использовавшихся в экспериментах, получились соответственно следующие значения межмодовых расстояний: 143 ГГц, 190, 92 и 95 ГГц.

На рис. 4 показана типичная зависимость частоты генерации лазерного диода типа ADL-63054 от температуры. Кривая построена в результате обработки оциллограмм с ОСЦ-1 (см. рис. 1), полученных в процессе перестройки температуры темпостата.

Из анализа оциллограмм следует, что при переходе из одной зоны существования одночастотной генерации в другую происходит смена генерируемой продольной моды на соседнюю или

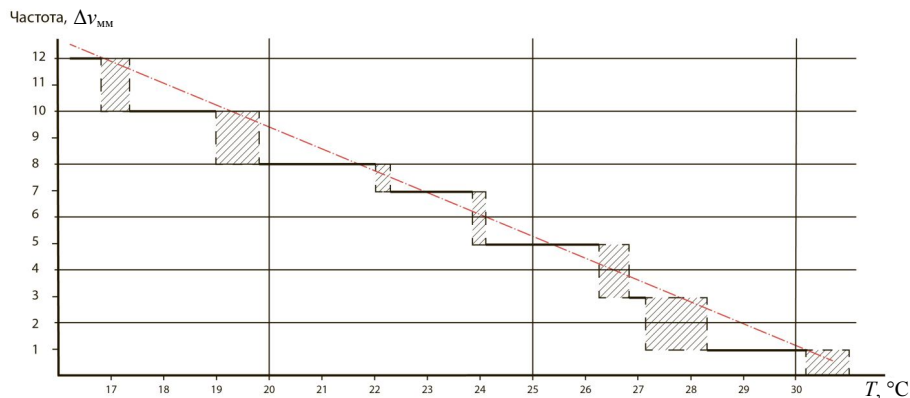


Рис 4. Зависимость частоты генерации лазера ADL-63054 от температуры. Горизонтальные линии соответствуют областям одночастотного режима, заштрихованные участки — области многочастотного режима. Линейный рост частоты генерации с уменьшением температуры на рисунке не показан из-за маленькой крутизны. Штрихпунктирная прямая представляет собой линейную аппроксимацию изменения частоты генерации

отстоящую от нее на несколько межмодовых интервалов. Другими словами, можно говорить о "скачке" частоты генерации на один или несколько межмодовых интервалов. Величина скачка $\Delta\nu_c$, выраженная в количестве межмодовых интервалов N , равна

$$\Delta\nu_c = N \cdot \Delta\nu_{\text{мм}}. \quad (2)$$

Сам переход происходит не сразу по окончании зоны. При подходе к краю зоны начинают возрастать соседние моды. Доминирование выделенной моды постепенно прекращается, и возникает многомодовый режим. Таким образом, в промежутке между двумя зонами существования одночастотного режима обязательно наблюдается многомодовый режим. Наличие таких участков отражено на рис. 4. Их протяженность, как видно из рисунка, может быть различной.

Дальнейшее изменение температуры приводит к восстановлению одночастотного режима, но доминирующая мода уже другая. Она отстоит от предыдущей моды, как уже отмечалось выше, на один или несколько межмодовых интервалов.

Изменение частоты генерации с температурой в промежутке между "скачками" происходит путем плавной перестройки частоты генерируемых мод вследствие изменения длины резонатора. Крутизна зависимости частоты генерации от температуры S_T в пределах зоны оценивалась ранее в экспериментах с интерферометром Фабри—Перо с постоянной базой. Она имеет величину ~ 29 ГГц/град [10]. В области между зонами одновременно генерируется несколько мод, и значение

частоты генерации становится неопределенным. В то же время скорость изменения частоты каждой моды с температурой, по-видимому, должна оставаться такой же, как в одночастотном режиме.

Согласно рис. 4, в целом частота генерации лазера линейно увеличивается с уменьшением температуры. Наклон такой зависимости без S_T может быть найден из приведенных данных. Для этого зависимость линейно аппроксимировалась по моментам перехода в новую зону. Полученная таким образом прямая показана на рис. 4 штрихпунктирной линией.

Аналогичная зависимость, но уже для лазера типа HL-6358, показана на рис. 5.

Оценку средней крутизны зависимости длины волны генерации от температуры S_λ в интервале температур ΔT можно получить также несколько иначе.

Пусть в результате изменения температуры на ΔT частота генерации изменилась на $\Delta\nu$. С учетом сказанного выше для $\Delta\nu$ имеем следующее соотношение:

$$N \cdot \Delta\nu_{\text{мм}} + S_T \cdot \Delta T = \Delta\nu = -\frac{c}{\lambda^2} \cdot \Delta\lambda, \quad (3)$$

где $\Delta\lambda$ — изменение длины волны, соответствующее $\Delta\nu$.

Отсюда для крутизны S_λ получим выражение

$$S_\lambda = \frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = -\left(\frac{\lambda^2}{c}\right) \cdot \left(\frac{N \cdot \Delta\nu_{\text{мм}}}{\Delta T} + S_T\right). \quad (4)$$

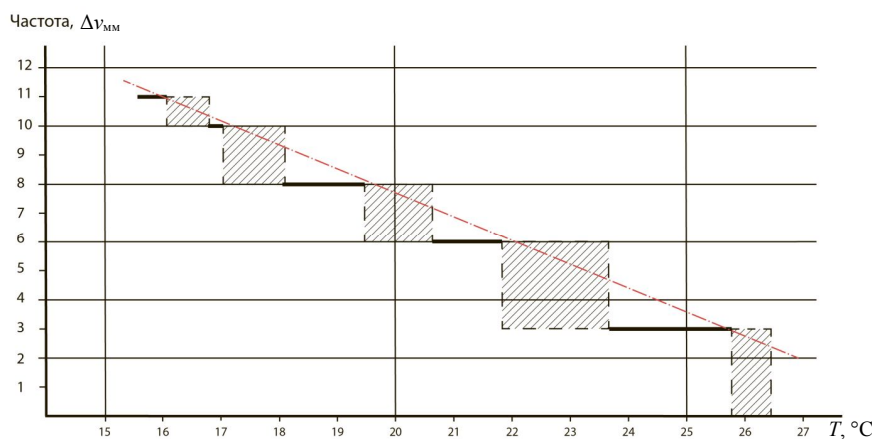


Рис. 5. Зависимость частоты генерации лазера HL-6358 от температуры

Величина S_λ для исследованных лазеров, согласно измерениям, находится в интервале 0.18–0.22 нм/град.

С другой стороны, основным фактором, приводящим к перестройке частоты генерации, является изменение с температурой частотного положения максимума линии усиления активной среды. Для лазера это означает, что средняя скорость изменения длины волны генерации с температурой S_λ должна равняться скорости сдвига максимума усиления активной среды от температуры. Длина волны генерации полупроводникового лазера может быть определена независимо в экспериментах со спектрометром. Как показали ранее проведенные измерения [10], в рассматриваемом диапазоне длин волн средняя крутизна S_λ этой зависимости имеет величину порядка ~ 0.2 нм/град.

Таким образом, с учетом точности описанных измерений, полученные данные неплохо соответствуют друг другу.

Поставленные эксперименты позволили также определить величины частотных скачков при переходе из одной зоны в другую. Для лазера ADL-65055TL характерные скачки происходят на один межмодовый интервал, для лазера ADL-63054TL — на один–два межмодовых интервала, а для ADL-63102TL и HL-63058 — на 2 или 3 интервала, но могут быть скачки и на один интервал. С учетом оценок межмодового интервала для интересующих нас скачков были получены соответственно следующие значения — 190, 145 или 290 ГГц, 95, 190 или 285 ГГц.

Важным представляется вопрос о температурном интервале существования одночастотного режима. Как видно из рис. 4 и 5, длительность температурных интервалов ΔT может быть различной, что говорит о сложности процессов, влияющих

на их образование.

В то же время величина многих температурных интервалов, в которых реализуется одночастотный режим, составляет 1.5–2 °C, а в отдельных случаях даже больше. При этом частота генерации в пределах интервала изменяется на $S_T \cdot \Delta T = 45\text{--}60$ ГГц, а положение максимум линии усиления меняется на 220–300 ГГц ($S_\lambda = 0.2$ нм/град; $\lambda = 0.635$ нм). В итоге сдвиг максимума по отношению к частотному положению мод резонатора составляет не меньше 160–240 ГГц, т. е. имеет величину, большую, чем 1–2 межмодовых интервала для этих лазеров.

В лазерных диодах активная среда занимает весь резонатор. Специальные селективные устройства отсутствуют. Поэтому одночастотный режим в таких лазерах (с линейным резонатором и однородно уширенной активной средой) должен устанавливаться за счет конкуренции продольных мод, например, вблизи зеркал резонатора. При смещении максимума линии усиления активной среды по отношению к положению генерируемой моды на $\Delta\nu_{\text{мм}}/2$ было бы естественным ожидать возникновения генерации на соседней продольной моде. В этой ситуации она оказывается в одинаковых условиях с точки зрения усиления с генерируемой модой. После чего и последует перескок. Эксперимент показывает, что это не так.

Объяснение наблюдаемого явления может состоять в том, что, поскольку зона проводимости формируется всеми атомами полупроводникового кристалла, следует учитывать влияние на генерацию межуровневой релаксации электронов в зоне проводимости. Она происходит очень быстро, за время $\ll 1$ нс [11]. Это время существенно меньше времени нарастания поля в резонаторе. Таким образом, генерируемая мода, которая под-

держивается за счет вынужденного излучения, может получать дополнительную "подпитку" в результате внутризонных переходов, компенсирующих потери инверсной заселенности, и тем самым препятствовать генерации конкурирующих с ней мод.

Как показали измерения флуктуаций среднего значения частоты генерации, возмущения частоты лазерных диодов носят низкочастотный характер. Спектр основных частотных возмущений приходится на частоты ниже одного герца. В флуктуациях выше 1 Гц возмущения частоты не превосходят 20 МГц, а спектр "уходов" частоты, не превосходящих 5–10 МГц, ограничен несколькими десятками герц. Наблюдаемые зависимости частоты от времени для всех исследованных лазеров имеют схожий характер.

Возмущения частоты прежде всего связаны с температурными уходами. При этом они могут быть значительными, что связано с большой крутизной S_T зависимости частоты генерации от температуры.

По величине возмущений частоты можно было судить о качестве работы блока термостатирования лазера и источника тока накачки, а также целенаправленно корректировать их характеристики.

Система стабилизации тока обеспечивала стабильность мощности излучения лучше, чем 10^{-3} , и вызываемые ею ухода частоты не наблюдались. Чувствительность разработанной системы активной стабилизации частоты составляла ± 0.01 °C. При этом первоначально наблюдались периодические колебания средней частоты излучения общим размахом 600 МГц с периодом 5 с. Усовершенствование системы регулирования температуры позволило устранить колебательный характер уходов частоты и уменьшить сами ухода. В итоге их величина составляла не более 500 МГц за 10 мин, а скорости уходов не превышали 10 МГц/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что излучение лазерных диодов в зависимости от его рабочих параметров может быть либо одночастотным, либо многочастотным. При этом в первом случае вся мощность излучения сосредоточена практически в одной моде, а во втором — распределена по нескольким модам.

Соответственно в первом случае спектр излучения оказывается узким, порядка 100 МГц, а во втором может составлять величину, выраженную в единицах длин волн, до 1 нм.

Механизм конкуренции мод, приводящий к одночастотному режиму работы лазера с FP-резонатором, действует достаточно эффективно и позволяет обеспечить воспроизводимость режима от включения к включению.

Использованная аппаратура позволяет достаточно надежно контролировать режим работы лазерного диода и оценивать его основные спектральные характеристики — расстояние между продольными модами, интервал перестройки частоты, смену режима генерации, ухода частоты генерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ThorLabs.
URL: (http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=7).
2. *Wieman C.E., Hollberg L.* Using diode lasers for atomic physics // *Rev. Sci. Instr.* 1991. Vol. 62, no. 1. P. 1–20.
3. *Fox R.W., Hollberg L., Zibrov A.S.* Semiconductor diode laser // *Atomic, Molecular, and Optical Physics: Electromagnetic Radiation*. Academic Press, San Diego, 1997. Vol. 29C / Eds Dunning F.B. and Hulet R.G. P. 77–102.
4. *Риле Ф.* Стандарты частоты. Принципы и приложения / Пер. с англ. Н.Н. Калачевского. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 512 с.
5. *Фриман Р.* Волоконно-оптические системы связи. Пер. с англ., 3-е, дополненное издание. М.: Техносфера, 2006. 496 с.
6. *Дураев В.П., Неделин Е.Т., Недобывайло Т.П. и др.* Полупроводниковые лазеры с волоконной брэгговской решеткой и узким спектром генерации на длинах волн 1530–1560 нм // *Квантовая электроника*. 2001. Т. 31, № 6. С. 529–530.
7. DL-100 Series — Tunable Diode Lasers.
URL: (http://www.toptica.com/products/research_grade_diode_lasers/tunable_diode_lasers/tunable_diode_lasers_370_nm_1770_nm_dl_100.html).
8. Нева Технолоджи.
URL: (<http://www.nevatec.ru/LR/index.htm>).
9. *Соболев В.С., Уткин Е.Н.* Использование режима обратной связи для оценки крутизны модуляционной характеристики полупроводниковых лазеров // *Письма в ЖТФ*. 2009. Т. 35, вып. 7. С. 28–34.
10. *Дворцов Д.В., Парфенов В.А.* Одночастотный режим работы лазерных диодов // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физ.-мат. науки*. 2013. Т. 170, вып. 2. С. 89–96.
11. *Зелто О.* Принципы лазеров. Изд. 4-е, перераб. и доп. / Пер. с англ. Д.Н. Козлова, С.Б. Созинова и К.Г. Адамович; под науч. ред. Т. А. Шмаонова. СПб.: Лань, 2008. 719 с.

*Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет*

Контакты: *Парфенов Владимир Александрович,*
ppparfen@mail.ru;
Дворцов Денис Валерьевич,
otenki@mail.ru

Материал поступил в редакцию: 7.04.2014

UDK 62 -1.373

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF SINGLE-FREQUENCY MODE OF OPERATION OF DIODE LASERS

D. V. Dvorzov, V. A. Parfenov

Saint-Petersburg Polytechnic University, RF

The researches, which have been carried by authors, are concerned with study of single-frequency mode of operation of diode lasers generating at the wavelengths of 635 and 655 nm.

In our experiments we have studied spectral characteristics of these lasers (presence of single-longitudinal-mode, inter-mode interval, range of temperature tuning of frequency of laser radiation, measurements of drift of average value of frequency in time).

Keywords: semiconductor laser, diode laser, single-frequency mode of operation, single longitudinal mode, tuning of frequency

REFERENCES

1. ThorLabs.
URL: (http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=7).
2. Wieman C.E., Hollberg L. Using diode lasers for atomic physics. *Rev. Sci. Instr.*, 1991, vol. 62, no. 1, pp. 1–20.
3. Fox R.W., Hollberg L., Zibrov A.S. Semiconductor diode laser. *Atomic, Molecular, and Optical Physics: Electromagnetic Radiation*, Academic Press, San Diego, 1997, vol. 29C, Eds. Dunning F.B. and Hulet R.G. pp. 77–102.
4. DL-100 Series — Tunable Diode Lasers.
URL: (http://www.toptica.com/products/research_grade_diode_lasers/tunable_diode_lasers/tunable_diode_lasers_370_nm_1770_nm_dl_100.html).
5. URL: (<http://www.nevatec.ru/LR/index.htm>).

Contacts: *Parfenov Vladimir Alexandrovich,*
ppparfen@mail.ru;
Dvorzov Denic Valerievich,
otenki@mail.ru

Article arrived in edition: 7.04.2014