

УДК 621.373.8

© Д. В. Дворцов, В. А. Парфенов

ПЕРЕХОДНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ КРАСНОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

Данная статья посвящена переходному (многомодовому) режиму работы лазерных диодов с Фабри—Перо резонатором (FP-лазерные диоды) красного диапазона спектра. В статье рассмотрены вопросы регистрации режима и его характеристики. Также сообщается как минимум о двух отличающихся видах реализации переходного режима.

Кл. сл.: лазерный диод, полупроводниковый лазер, одночастотный режим работы, продольная мода, многомодовый режим

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время FP-лазерные диоды (с резонатором Фабри—Перо) красного диапазона спектра с длинами волн 630–660 нм широко используются при решении многих прикладных задач. За последнее десятилетие выходные характеристики излучения таких лазеров значительно улучшились. В том числе улучшилось качество создаваемого ими излучения. Теперь они работают в режиме основной, TEM_{00} , моды.

В значительной степени это связано с использованием при их изготовлении новых технологий. Лазеры, выпускаемые в настоящее время, как следует из их технических характеристик, изготавливаются на основе высокоэффективных InGaAlP квантоворазмерных гетероструктур.

Как показали исследования [1], направленные на выяснение спектральных характеристик лазерных диодов с номинальной мощностью 5–10 мВт, они работают в одночастотном режиме (режим генерации одной продольной моды) в большей части диапазона значений рабочего тока и температуры. Интерес к одночастотному режиму работы лазеров всех типов вызывается узким спектром генерируемого при этом излучения.

В случае FP-лазерных диодов одночастотный режим реализуется в виде совокупности чередующихся при изменении температуры или рабочего тока областей генерации, соответствующих разным продольным модам лазера. Между этими областями наблюдается переходный режим генерации.

Как следует из анализа спектров излучения лазерных диодов [2], полученных с помощью сканирующего интерферометра, в одночастотном режиме в излучении доминирует одна продольная мода с уровнем мощности ближайших к ней боковых

мод, не превосходящих по величине 2–3 процентов от основной.

Согласно тем же спектрам, в переходном режиме нет четкого преобладания одной моды. Лазер генерирует несколько продольных мод, отличающихся по частоте на величину, кратную многомодовому интервалу. Частоты мод и их состав меняются с изменением тока и температуры. Амплитуды мод испытывают значительные колебания. Переход из одного режима в другой происходит самопроизвольно, без каких-либо внешних проявлений. Обычно диапазон изменения температуры (или тока), в пределах которого реализуется переходный режим, значительно меньше области существования одночастотного режима.

Можно отметить, что уровень мощности излучения лазера в переходном режиме, по крайней мере в пределах нестабильностей на уровне долей процента в полосе частот наблюдения (в нашем случае до 10 МГц [3]), не проявляет заметных колебаний, которые могли быть в связи с амплитудными колебаниями мод.

Такая картина генерации в целом соответствует представлениям, базирующимся на результатах исследований одночастотного режима работы лазерных диодов с длиной волны 850 нм. Однако ряд важных для практики моментов не получил отражения в известных нам работах [4–6], в том числе касающихся лазеров с длинами волн 630–660 нм.

С точки зрения одночастотной генерации лазера переходный режим нежелателен. Поэтому важно представлять формы реализации переходного режима и его связь с одночастотным режимом работы лазера. С целью выяснения этих вопросов были поставлены экспериментальные исследования переходного режима работы лазерных диодов, в данном случае красного диапазона спектра.

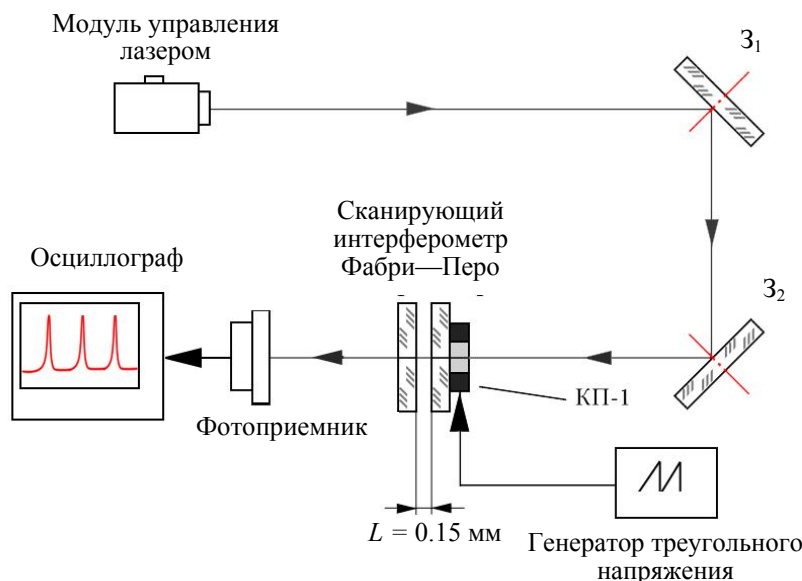


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.
 Z_1 , Z_2 — отклоняющие зеркала; КП-1 — пьезокерамический преобразователь

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для получения данных о переходном режиме использовалась экспериментальная установка, показанная на рис. 1.

Излучение лазера с помощью отклоняющих зеркал направлялось в сканирующий интерферометр Фабри—Перо с малой базой ($L = 0.15$ мм), одно из зеркал которого располагалось на пьезокерамическом корректоре КП-1. На него могло подаваться напряжение треугольной формы с частотой 20–30 Гц либо постоянное регулируемое напряжение от отдельного источника. На выходе интерферометра установлен фотоприемник, с выхода которого сигнал поступал на осциллограф.

При подаче на пьезокерамический преобразователь напряжения треугольной формы обеспечивался периодический просмотр спектра излучения лазера. Замена треугольного напряжения постоянным регулируемым напряжением позволяла вручную настраивать интерферометр на определенные моды из спектра генерации лазера.

В качестве исследуемых лазеров использовались серийные лазерные диоды фирм Arima Diode Lasers и Hitachi Lasers мощностью 5–10 мВт с длинами волн 635 и 655 нм, создающие излучение основной моды.

Как известно, лазерные диоды чувствительны к обратной связи [5, 7]. С целью исключения влияния обратного отраженного излучения на работу лазера измерения с интерферометром Фабри—Перо проводились в режиме линий равного наклона. В таком случае необходимость в специ-

альной оптической развязке отсутствует.

Изменение температуры лазерного модуля контролировалось с помощью схемы терморегулирования с точностью не хуже 0.02 °С. Сама температура могла перестраиваться в пределах (15–30) °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 2 представлены осциллограммы, иллюстрирующие процесс перехода лазера из одной области одночастотной генерации в другую на примере лазера ADL-65055.

Как видно из приведенных осциллограмм, при температуре, близкой к границе области одночастотного режима (рис. 2, б), амплитуда соседней моды начинает расти, и после установления переходного режима моды явно конкурируют между собой. При дальнейшем увеличении температуры вновь появляется тенденция и последующий переход к одночастотному режиму, но уже на другой моде (рис. 2, в, г).

Наблюдаемое в осциллограммах переходного режима распределение мощности излучения по модам не соответствует приведенным выше представлениям о постоянстве среднего уровня мощности и его медленном изменении с температурой. Более того, в процессе наблюдения одночастотного и переходного режимов других лазеров было замечено, что при генерации нескольких мод, каждая из конкурирующих мод может достигать уровня мощности, соответствующего одночастотному режиму.

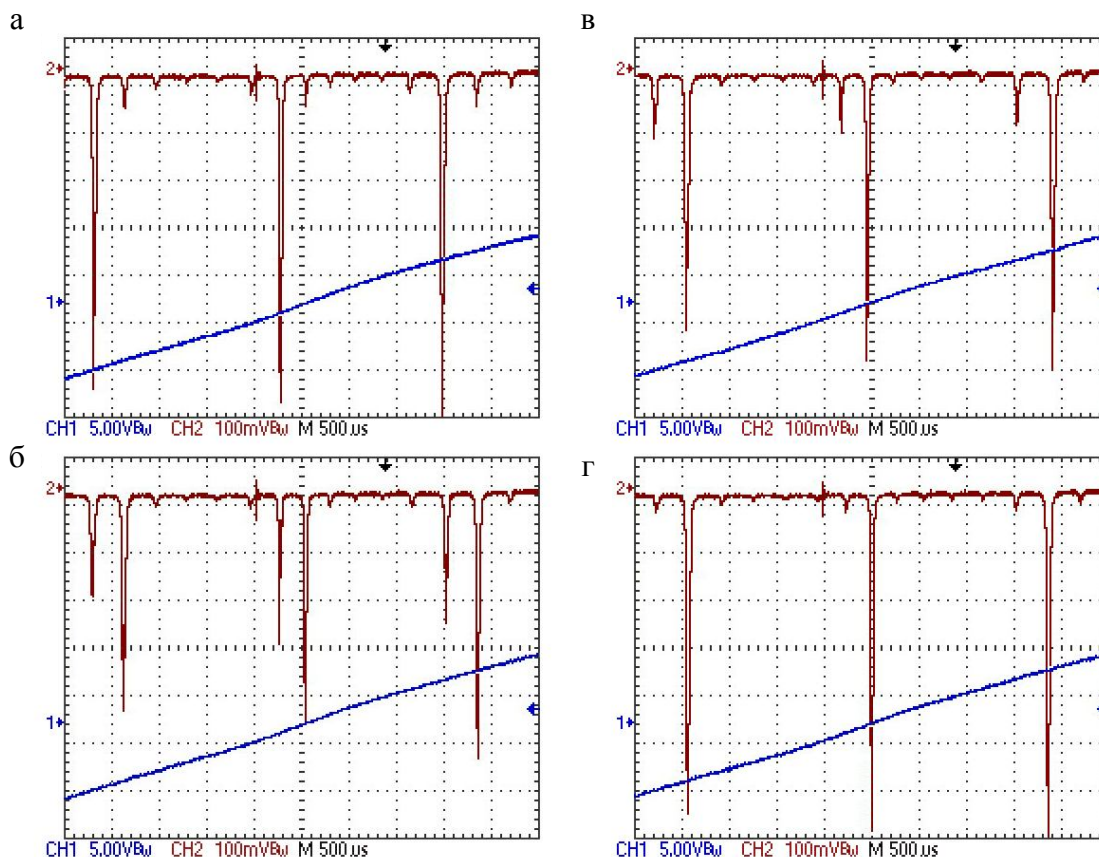


Рис. 2. Спектр излучения лазерного диода ADL-65055.

Осциллограммы (рис. 1, "Осциллограф"): а — одночастотный режим работы; б — переходный режим работы, доминантная мода уменьшается по величине; в — мода, которая была доминирующей, продолжает снижаться по амплитуде; г — одночастотный режим на соседней моде; 1 — сканирующее напряжение; 2 —развертка спектра излучения лазерного диода

Для выяснения этого вопроса схема наблюдений переводилась в режим ручной настройки на определенную моду. Корректируя настройку частоты интерферометра по максимуму мощности наблюдаемой спектральной компоненты, можно было отслеживать ее изменение, например, с температурой.

Оказалось, что в данном случае моды лазера не генерируются одновременно. В наблюдаемом переходном режиме генерация мод происходила поочередно: то одной, то другой конкурирующей моды. Таким образом, можно говорить о переключении мод. Рис. 3 иллюстрирует обсуждаемую ситуацию.

Как видно, в переходном режиме каждая мода генерируется (находится во "включенном" состоянии) в течение некоторого короткого временного промежутка, в то время как другая мода не генерируется ("выключена"). По прошествии этого

промежутка ситуация меняется на противоположную, т. е. моды переключаются.

Промежутки "включения/выключения" составляют от долей мкс до 10 мкс и более. При этом нижнее значение длительности регистрируемых импульсов ограничивается быстродействием фотоприемника и осциллографа. Чем ближе по температуре система находится к области одночастотного режима, тем дольше промежутки "включения" доминирующей моды и соответственно короче период "выключенного состояния" у других мод. В середине переходного режима промежутки "включения/выключения" для мод выравниваются.

В ходе измерений, было обнаружено как минимум два типа проявления переходного режима. Первый описан выше. Отличие второго состоит в том, что "включение" и "выключение" мод происходят в виде коротких импульсов.

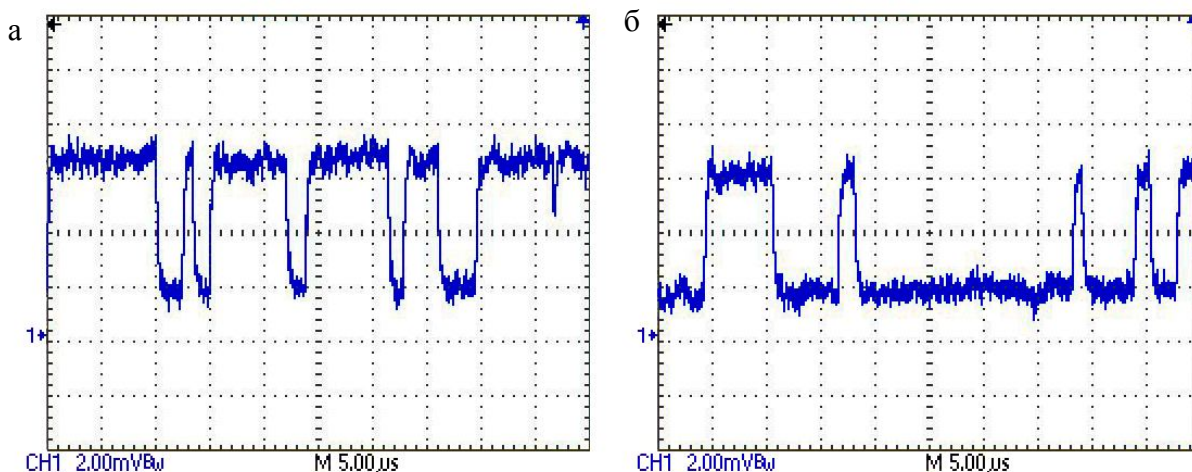


Рис. 3. Осциллограммы, иллюстрирующие переключение конкурирующих мод в переходном процессе лазера ADL-65055.

а — основная мода, находящаяся большую часть времени во "включенном" состоянии; б — неосновная мода

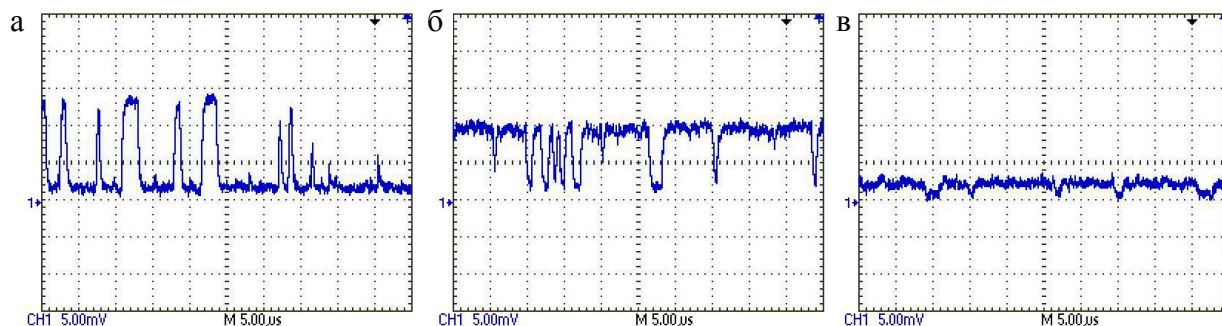


Рис. 4. Переключения мод в переходном режиме для лазера HL-6358 (случай генерации трех мод).

а — неосновная мода; б — основная мода; в — еще одна дополнительная мода, малая по амплитуде, но находящаяся большую часть времени во "включенном" состоянии

По мере приближения и удаления от границ переходного режима менялась не продолжительность этих импульсов, а частота их появления от очень частого до полного отсутствия в одночастотном режиме. Импульсы можно видеть на рис. 4. Приведенная осциллограмма интересна также тем, что в данном случае генерируются три моды.

Научный интерес представлял также вопрос о том, когда прекращают наблюдаться переключения генерируемых мод.

Для ответа на этот вопрос были поставлены специальные эксперименты.

Предварительно определялся диапазон температур, соответствующий области одночастотной генерации. Далее, переходя в режим наблюдения за доминирующей в этой области продольной модой, изменением температуры генерация лазера переводилась в переходный режим вблизи границы одночастотного режима. Затем снова медленно изменяли температуру, но уже в обратную сторону, возвращаясь к одночастотному режиму.

При приближении к области одночастотной генерации переключения становились реже. Далее отслеживать переключения можно было только по запуску осциллографа от импульса переключе-

ний на развертке сигнала генерируемой моды. Следует подчеркнуть, что частота генерации после переключения, как и мода, возвращалась к своему прежнему значению.

Далее частота переключений становилась меньше 10 Гц, а потом регистрация переключений и в такой форме совсем прекращалась.

В ряде статей [8] отмечалось, что наличие переходного режима работы проявляется в наличии колебаний уровня мощности излучения. Для проверки возможности такого подхода к нахождению границ одночастотного режима проводились специальные измерения.

Как показали эксперименты, действительно, можно наблюдать наличие в переходном режиме слабые пульсации напряжения сигнала излучения на уровне 10^{-4} от постоянной составляющей сигнала, соответствующей уровню мощности излучения лазера. Однако интересующий сигнал мог уменьшаться, а иногда и совсем пропадать в шумах, например, при изменении температуры в некотором интервале, скорее всего, по причине сильного ослабления, несмотря на продолжающуюся работу лазера в переходном режиме.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. ВЫВОДЫ

Как показали эксперименты, переходный режим работы лазера представляет собой случайную временную последовательность импульсов генерации двух и более мод, сменяющих друг друга во времени. При этом уровень суммарной мощности генерируемых мод остается практически постоянным.

В разных лазерах характер переключений может быть разным. Было зарегистрировано как минимум два отличающихся типа реализации переходного режима.

В области одночастотной генерации, вблизи границы с переходным режимом, когда уровни основной моды и ближайших к ней боковых мод становятся практически постоянными на осциллограммах спектра излучения, возможно переключение генерации на соседнюю моду на очень короткое время ~ 1 мкс с последующим возвратом на прежнюю моду. Оно становится все реже по мере движения в область одночастотного режима. Потенциально нельзя исключить таких переключений на более короткие времена, например ~ 1 –10 нс, не регистрируемые в наших экспериментах.

Регистрация переходного режима по слабым пульсациям уровня мощности излучения в силу особенностей их проявления не может служить основой для контроля наличия переходного режима.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дворцов Д.В., Парфенов В.А. Одночастотный режим работы лазерных диодов // НТВ СПбГПУ. 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. 42–48. URL: <http://213.170.69.26/mag/2014/full3/Art6.pdf>.
3. Дворцов Д.В., Парфенов В.А. Исследование зависимости мощности излучения лазерных диодов от режима работы // Сб. док. 24-й Межд. конф. "ЛАЗЕРЫ, ИЗМЕРЕНИЯ, ИНФОРМАЦИЯ", т. 2. 2014. СПб.: Изд-во Политех ун-та, 2014. С. 153–157.
4. Camparo J.C. The diode laser in atomic physics // Contemp. Phys. 1985. Vol. 26, no. 5. P. 443–477.
5. Wieman C.E., Hollberg L. Using diode lasers for atomic physics // Rev. Sci. Instrum. 1991. Vol. 62, no. 1. P. 1–20.
6. Fox R.W., Hollberg L., Zibrov A.S. Semiconductor Diode Lasers // Experimental Methods in the Physical Sciences. Vol. 29, part C, Atomic, Molecular, and Optical Physics: Electromagnetic Radiation / Eds F.B. Dunning and R.G. Hulet. Elsevier, 1997. P. 77–102. Doi: 10.1016/S0076-695X(08)60613-4.
7. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. М.: Техносфера, 2006. 496 с.
8. Acsente T. Laser diode intensity noise induced by mode hopping // Romanian Reports in Physics. 2007. Vol. 59, no. 1. P. 87–92.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ Петра Великого)

Контакты: Парфенов Владимир Александрович,
ppparfen@mail.ru

Материал поступил в редакцию: 2.12.2016

MULTIMODE REGIME OF RED LASER DIODES

D. V. Dvortsov, V. A. Parfenov

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Russia

Multimode lasing regime of red laser diodes with Fabry—Perot resonator (FP-laser diodes) is considered in the paper. This regime is usual between the areas of single-frequency generation and it is not acceptable for many practical applications. Interest in this issue is associated with the possibility to determine the boundaries of the single-frequency generation regime. It is shown that multimode regime can be realized in differently for different types of lasers. It is found that there are at least two different types of realization of multimode generation. In one case there was a switching of two competing longitudinal modes, in the other case — switching of three modes. Short-time switches of generating mode with following return of lasing regime may occur for a short (about 1 μ s) time at almost steady single frequency regime.

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

REFERENCES

1. Dvortsov D.V., Parfenov V.A. [Single-frequency operating mode of laser diodes]. *NTV SPbGPU. Fiz.-mat. nauki* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics], 2013, no. 2 (170), pp. 89–96. (In Russ.).
2. Dvortsov D.V., Parfenov V.A. [Spectral characteristics of single-frequency mode of operation of diode lasers]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2014, vol. 24, no. 3, pp. 42–48. URL: <http://213.170.69.26/mag/2014/full3/Art6.pdf>. (In Russ.).
3. Dvortsov D.V., Parfenov V.A. [Research of dependence of emissive power of laser diodes on an operation mode]. *Sbornik dokumentov 24-i Mezhdunarodnoj konfirencii "LAZERY, IZMERENIYA, INFORMACIYA", t. 2* [Proc. 24th International conference "LASERS, MEASUREMENTS, INFORMATION", vol. 2]. Saint-Petersburg, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University Publ., 2014, pp. 153–157. (In Russ.).
4. Camparo J.C. The diode laser in atomic physics. *Contemp. Phys.*, 1985, vol. 26, no. 5, pp. 443–477. Doi: 10.1080/00107518508210984.
5. Wieman C.E., Hollberg L. Using diode lasers for atomic physics. *Rev. Sci. Instrum.*, 1991, vol. 62, no. 1, pp. 1–20. Doi: 10.1063/1.1142305.
6. Fox R.W., Hollberg L., Zibrov A.S. Semiconductor Diode Lasers. *Experimental Methods in the Physical Sciences*, vol. 29, part C, Atomic, Molecular, and Optical Physics: Electromagnetic Radiation, Eds F.B. Dunning and R.G. Hulet, Elsevier, 1997. P. 77–102. Doi: 10.1016/S0076-695X(08)60613-4.
7. Friman R. *Volonno-opticheskie sistemy svyazi* [Fiber-optical communication systems]. Moscow, Associate printing-and-publication centre Technosphaera, 2006. 496 p. (In Russ.).
8. Acsente T. Laser diode intensity noise induced by mode hopping. *Romanian Reports in Physics*, 2007, vol. 59, no. 1, pp. 87–92.

Contacts: *Parfenov Vladimir Aleksandrovich*,
ppparfen@mail.ru

Article received in edition: 2.12.2016