

УДК 621.373.8; 535.34

© Д. В. Дворцов, В. А. Парфенов

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЛИНИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ ИОДА

В статье рассмотрены вопросы, возникающие при использовании FP (Фабри—Перо) лазерных диодов красного диапазона спектра для регистрации доплеровски уширенных линий поглощения иода ($^{127}\text{I}_2$). Они отражают особенности работы таких лазеров в одночастотном режиме. Полученные результаты могут быть использованы при регистрации других линий поглощения и стабилизации частоты излучения лазерных диодов.

Кл. сл.: лазерный диод, полупроводниковый лазер, одночастотный режим работы, одна продольная мода, линии поглощения иода, перестройка частоты

ВВЕДЕНИЕ

Как показывают исследования, практически все современные лазерные диоды с Фабри—Перо резонатором (FP-лазерные диоды) мощностью 5–10 мВт и длинами волн 635–655 нм ("красный" диапазон спектра) работают в одномодовом режиме, создавая излучение достаточно высокого качества [1, 2]. При этом они могут устойчиво работать в одночастотном режиме (single longitudinal mode regime). Такой режим и частота генерации воспроизводятся от включения к включению лазера при сохранении рабочего тока и температуры [3].

Интерес к наблюдению линий поглощения иода ($^{127}\text{I}_2$) обусловлен тем обстоятельством, что они с большой плотностью заполняют весь видимый и ближний ИК-диапазоны спектра. Наличие линий поглощения в области перестройки частоты лазерных диодов дает возможность использовать их в качестве реперных линий для стабилизации частоты излучения. В результате стабилизации частоты фиксируется значение частоты генерации лазерных диодов и (косвенно) стабилизируется само существование одночастотного режима.

Достижение такого режима обязательно подразумевает на определенном этапе регистрацию линий поглощения и последующий выбор одной из них в качестве потенциального репера. Вместе с тем одночастотный режим работы лазерных диодов обладает рядом особенностей, которые должны при этом учитываться.

Прежде всего, он наблюдается не во всем допустимом диапазоне рабочих токов и температуры, а только в определенных, следующих друг за другом областях изменения этих параметров.

В этом смысле можно говорить о зонах существования одночастотного режима по току и температуре [3, 4].

Другая особенность работы лазерных диодов состоит в том, что изменение рабочего тока и температуры приводит к изменению мощности излучения.

И, наконец, частота генерации меняется при изменении тока и температуры. Причем крутизна этих зависимостей, в особенности от температуры, велика и составляет ≈ 8 ГГц/мА и 30 ГГц/град К соответственно.

В этой связи целью настоящей работы является рассмотрение вопросов регистрации линий поглощения иода ($^{127}\text{I}_2$) с учетом особенностей работы лазерных диодов "красного" диапазона спектра.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение областей одночастотной генерации

Как было отмечено выше, одночастотный режим работы лазеров существует в определенных интервалах температур и токов накачки. В промежутках между этими областями возникает переходный режим работы.

Исследования FP-лазеров ближнего ИК-диапазона показали, что в переходном режиме лазер генерирует несколько продольных мод. Их состав, амплитуды, моменты появления и длительность генерации меняются хаотически [5, 6].

В рамках данной работы были поставлены эксперименты по наблюдению переходного режима работы серийно выпускаемых FP-лазеров с длиной волн 635–660 нм. Исследования показали

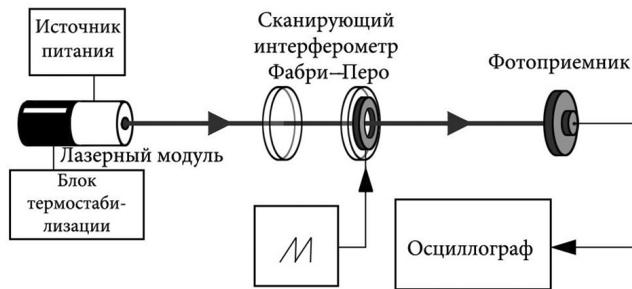


Рис. 1. Схема наблюдения спектра излучения лазерного диода

наличие у них явлений, аналогичных ранее наблюдавшимся у лазеров ИК-диапазона. Конкретное их проявление могло несколько отличаться у лазеров разных типов. Дополнительно следует отметить, что диапазон существования переходного режима обычно существенно уже области одночастотной генерации. Переход из одного режима в другой происходит самопроизвольно при изменении тока или температуры. Зависимость мощности излучения при этом, по крайней мере в пределах $\pm 0.3\%$, не реагирует на изменения режимов в частотной области (полоса фотоприемника 50 МГц).

Очевидно, что переходный режим работы лазера для регистрации линий поглощения недопустим и должен быть исключен из измерений. Схема эксперимента для нахождения областей одночастотного режима работы лазера показана на рис. 1.

При проведении измерений ток накачки лазера (I_H) стабилизировался на выбранном значении с помощью источника питания. Само значение тока накачки в ходе эксперимента могло меняться. Температура лазера также стабилизировалась, но при желании могла перестраиваться в пределах 15–27 °С. Контроль спектра излучения лазера осуществлялся с помощью сканирующего интерферометра Фабри—Перо с базой 0.15 мм.

Температурная перестройка частоты ($I_H = \text{const}$) обеспечивала существенно больший диапазон перестройки частоты, чем ток, и поэтому считалась основной.

Для определения границ существования одночастотного режима регистрировались две зависимости. Одна из них — зависимость мощности излучения лазера от температуры T . Другая — зависимость мощности мод, генерируемых в одночастотном режиме, от температуры.

Для примера на рис. 2, а, приведены такие зависимости для одного из исследованных лазеров. Зависимость, включающая линии 1–4, получена с помощью сканирующего интерферометра. Амплитуда сигнала каждой моды измерялась по экрану осциллографа в относительных единицах и была пропорциональна ее мощности. Из этих данных можно получить предварительное пред-

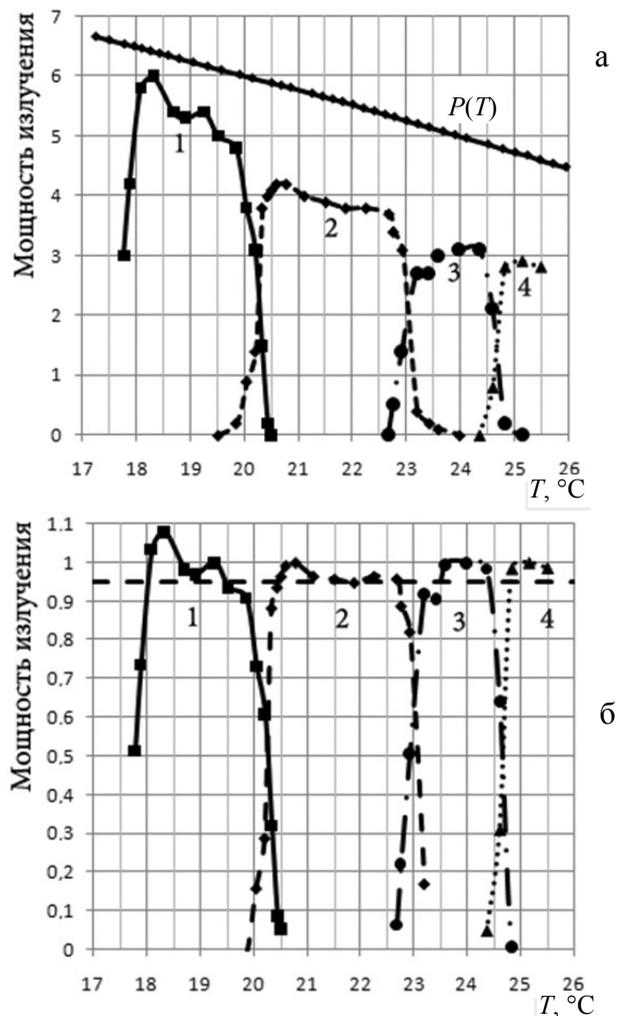


Рис. 2. Зоны существования одночастотного режима на примере лазерного диода типа ADL-63054TL.

а — зависимости мощности излучения лазера от температуры (линия $P(T)$) и мощности мод, генерируемых в одночастотном режиме (1, 2, 3, 4), от температуры; б — нормированные зависимости мощности мод, генерируемых в одночастотном режиме, от температуры (в процессе нормировки внесена поправка на зависимость мощности излучения лазера от температуры)

ставление о расположении зон одночастотного режима. Их границы уточнялись после нормировки сигналов мод на мощность излучения. Результаты обработки показаны на рис. 2, б.

Как видно из приведенных зависимостей, в некотором диапазоне изменения температур наблюдается резкое снижение мощности излучения генерируемой моды и появление дополнительных мод. В этой области как раз и наблюдается переходный режим работы, в рамках которого при продолжении изменения температуры появляется следующая доминантная мода. Частотный диапазон, приходящийся на максимальную мощность каждой из таких мод, соответствует области устойчивой одночастотной генерации. Мощность боковых мод в нем не превышает 1–3 % от максимального уровня доминирующей моды.

Можно считать, что при уровне мощности доминирующей моды 0.95 и выше наблюдается одночастотный режим с почти постоянным (нормированным) уровнем мощности. Соответствующий температурный интервал с учетом гистерезиса (подъем—спад мощности моды с изменением температуры; на рис. 2 не показаны) принимался за размер зоны. Колебания мощности на уровне 5 % рассматривались как точность проведенных измерений. Из данных о положении зон одночастотного режима определялась их протяженность. Последняя составляет 1–3 °С. Аналогично определялось положение зон по току (I_H).

Как показали эксперименты, рассмотренный метод определения положения зон наиболее простой и достоверный. Другие методы определения границ зон, например настройка на определенную моду и ее сопровождение в процессе перестройки частоты, рост амплитудных флуктуаций в переходном режиме [7, 8], сложны или не дают стабильных результатов.

С целью уточнения границ одночастотного режима, в дополнение к рассмотренному, вблизи

границ одночастотного режима контролировалась возможность кратковременного переключения лазера на генерацию другой моды. Проверка состояла в установлении наличия "игольчатых" провалов в уровне мощности генерируемой моды и появлении таких же "игольчатых" всплесков генерации на других модах. В ходе экспериментов в пределах установленных зон таких явлений практически не наблюдалось.

ПЕРЕСТРОЙКА ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Как уже отмечалось выше, температурная перестройка частоты FP-лазерного диода позволяет охватить весь частотный интервал его работы. Поэтому для просмотра линий поглощения $^{127}\text{I}_2$ с целью выбора потенциального репера для стабилизации частоты (в первом приближении это — сильнопоглощающая, удаленная от других линии поглощения) выбирался температурный вариант перестройки частоты.

В то же время нельзя было не учитывать большого значения крутизны перестроечной характеристики частоты лазерного диода по температуре, ≈ 30 ГГц/°С, и ширины линии поглощения, определяемой в первую очередь доплеровским уширением и столкновительным уширением, ≈ 800 МГц ($T = 25$ °С).

В этих условиях регистрация линий поглощения предъявляет высокие требования к точности управления температурой термостата (0.01 °С соответствуют ≈ 300 МГц) и требует много времени на ее осуществление, что делало поставленную задачу практически невыполнимой.

С целью преодоления указанных трудностей проводилась экспериментальная проверка возможности одновременной токовой и температурной перестройки частоты, схемная реализация которой поясняется рис. 3 и 4.

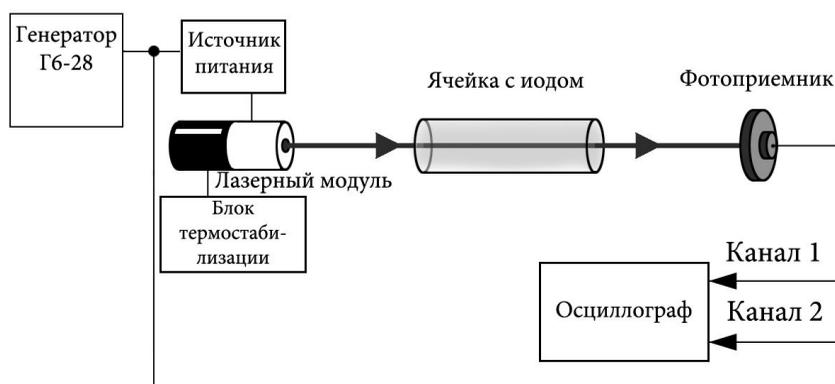


Рис. 3. Схема наблюдения линий поглощения

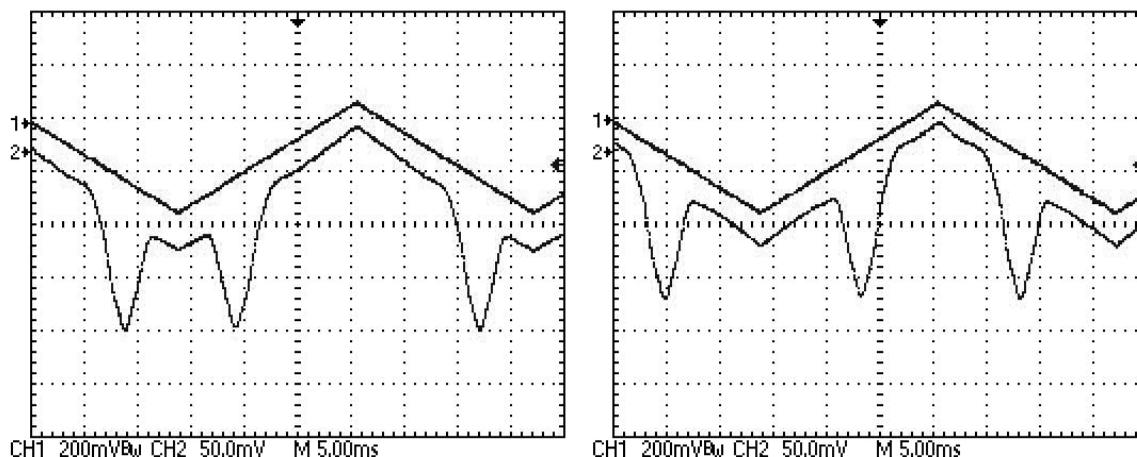


Рис. 4. Осциллограммы одной и той же линии поглощения иода, соответствующие двум близким температурам ($\Delta T \approx 0.06^\circ\text{C}$), при работе с лазером ADL-65055 (655 нм). 1 — треугольное напряжение с частотой 30 Гц, подаваемое на источник питания лазерного диода; 2 — сигнал с фотоприемника (см. рис. 3)

Согласно рис. 3, на вход источника питания, управляющего током стабилизации лазерного диода, от генератора подавалось треугольное напряжение, с частотой 30 Гц, что приводило к модуляции тока накачки. Изменения тока, в свою очередь, вызывали модуляцию мощности и частоты излучения. В ходе наблюдений, используя блок контроля температуры лазерного модуля, осуществляли дискретную перестройку температуры, переходя от одной фиксированной температуры к другой, с одновременным сканированием частоты тока. Для обеспечения непрерывности просмотра спектра достаточно, чтобы две ближайшие температурные точки входили в диапазон токовой перестройки частоты.

Выбор частоты модуляции тока (≈ 30 Гц в нашем случае) был обусловлен полосой управления током источника питания. С другой стороны, та-

кая частота сканирования позволяла устранить влияние на регистрацию медленных температурных дрейфов (в пределах точности терморегулирования) и регистрировать форму линий спектра достаточно узкополосным фотоприемником.

Описанная схема перестройки частоты была реализована и проверена в экспериментах по регистрации линий иода. Приведенная на рис. 4 осциллограмма иллюстрирует данную методику.

Зависимость мощности излучения, прошедшего кювету с иодом, от времени, регистрируемая фотоприемником (развертка 2), имеет треугольную модуляцию. На этой зависимости вследствие модуляции частоты генерации по треугольному закону присутствует провал мощности. Он соответствует линии поглощения иода (в отсутствие кюветы провал не наблюдается).

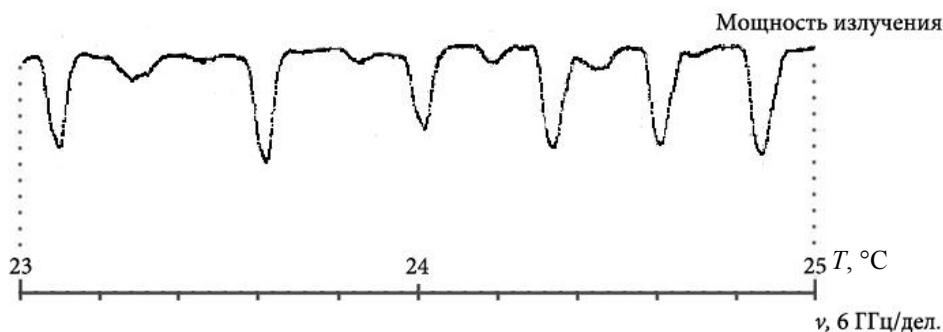


Рис. 5. Фрагмент спектра линий поглощения иода, попадающих в область перестройки частоты излучения лазерного диода типа ADL-65055 (655 нм)

С изменением температуры положение наблюдаемых линий меняется. Одни линии исчезают, другие линии появляются. При этом требования к точности установки нового значения температуры существенно ослабляются.

Диапазон перестройки частоты током в нашем случае составлял ≈ 8 ГГц.

Схема регистрации линий (рис. 3) дополнялась устройством компенсации треугольной модуляции мощности. Тогда после совмещения участков прописей спектра линий поглощения и компенсации модуляции мощности фрагменты спектра приобретают вид (рис. 5), удобный для анализа.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенных исследований опробована экспериментальная методика определения положения зон одночастотной генерации лазерных диодов.

Реализована и проверена в работе схема перестройки частоты лазеров с одновременным использованием температурной и токовой перестройки частоты лазерного диода.

Показана возможность, используя данные методики, регистрации линий поглощения иода ($^{127}\text{I}_2$), совпадающих с областью перестройки частоты лазерных диодов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thorlabs, Inc. URL: http://www.thorlabs.de/navigation.cfm?guide_id=2164.
2. Дворцов Д.В., Парфенов В.А. Одночастотный режим работы лазерных диодов // НТВ СПбПУ. Физ.-мат. науки. 2013. Вып. 2 (170). С. 89–96.

3. 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>.
4. Camparo J.C. The diode laser in atomic physics // Contemp. Phys. 1985. Vol. 26, no. 5. P. 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. P. 1–20. Doi: 10.1063/1.1142305.
6. Ohtsu M., Teramachi Y. Analyses of mode partition and mode hopping in semiconductor lasers // IEEE J. Quantum Electronics. 1989. Vol. 25, no. 1. P. 31–38. Doi: 10.1109/3.16237.
7. Gray G.R., Roy R. Bistability and mode-hopping in a semiconductor laser // J. Opt. Soc. Am. B. 1991. Vol. 8, no. 3. P. 632–638. Doi: 10.1364/JOSAB.8.000632.
8. Acsente T. Laser diode mode hopping noise // Rom. Reports in Physics. 2007. Vol. 59, no. 1. P. 87–92.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Контакты: Парфенов Владимир Александрович,
ppparfen@mail.ru

Материал поступил в редакцию: 22.12.2015

USING LASER DIODES FEATURES FOR REGISTRATION ABSORPTION LINES OF IODINE

D. V. Dvortsov, V. A. Parfenov

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Russia

The problems arising from the using of red FP (Fabry—Perot) laser diodes for registration of Doppler broadened absorption lines of iodine ($^{127}\text{I}_2$) are considered in the paper. They represent the features of single-frequency mode regime of generation of these lasers. The influence of temperature and injection current on single-frequency operation range is one of them. Another problem is associated with a considerable slope of the dependence of the generation frequency versus temperature and current. The boundaries of single longitudinal mode regime range were defined by registration of spectrum and intensity of modes by means of scanning interferometer. To make the registration of Iodine absorption lines easier we used frequency tuning with simultaneous frequency scanning by modulation of laser current and discrete temperature tuning. Obtained results can be used for registration of another gas absorption lines and stabilization of frequency of laser diodes radiation.

Keywords: laser diode, semiconductor laser, single-frequency mode of operation, single longitudinal mode regime, frequency tuning, absorption line of iodine

REFERENCES

1. Thorlabs, Inc. URL: (http://www.thorlabs.de/navigation.cfm?guide_id=2164).
2. Dvortsov D.V., Parfenov V.A. [Single-frequency operating mode of laser diodes]. *NTV SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki* [Scientific and technical sheets СПбГИИУ. Physical and mathematical sciences], 2013, no. 2 (170), pp. 89–96. (In Russ.).
3. Dvortsov D.V., Parfenov V.A. [Spectral characteristics of single-frequency mode of operation of diode lasers]. *Nauchnoe priborostroenie* [Science Instrumentation], 2014, vol. 24, no. 3, pp. 42–48. URL: <http://213.170.69.26/mag/2014/full3/Art6.pdf>. (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. Ohtsu M., Teramachi Y. Analyses of mode partition and mode hopping in semiconductor lasers. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1989, vol. 25, no. 1, pp. 31–38. Doi: 10.1109/3.16237.
7. Gray G.R., Roy R. Bistability and mode-hopping in a semiconductor laser. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, vol. 8, no. 3, pp. 632–638. Doi: 10.1364/JOSAB.8.000632.
8. Accente T. Laser diode mode hopping noise. *Rom. Reports in Physics*, 2007, vol. 59, no. 1, pp. 87–92.

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

Article received in edition: 22.12.2015