

УДК 62–1.373

© Д. В. Дворцов, В. А. Парфенов

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛА ОШИБКИ ПРИ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ЛАЗЕРНОГО ДИОДА

В работе рассматривается вопрос формирования сигнала ошибки в системе автоматической подстройки частоты лазерного диода. Показано, что из-за особенностей характеристик лазерных диодов в экстремальной системе регулирования с введением пробного сигнала будет возникать сдвиг нуля сигнала ошибки. Получена оценка величины сдвига.

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

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в связи с практическим интересом к использованию полупроводниковых лазерных диодов с Фабри—Перо резонатором (FP лазерные диоды) "красного" диапазона спектра (длины волн 635–660 нм) существенно улучшились их выходные характеристики. Практически все выпускаемые лазеры мощностью единицы–десятки милливатт создают излучение нулевой моды хорошего качества.

Как показывают результаты проведенных исследований, такие лазерные диоды могут устойчиво работать в одночастотном режиме генерации и позволяют перестраивать частоту генерации [1–3].

Интерес к использованию одночастотного режима работы лазерного диода возрастает при наличии возможности стабилизации частоты генерации. В работе [4] было показано, что значение частоты таких лазеров может быть стабилизировано по доплеровски уширенным линиям поглощения $^{127}\text{I}_2$ иода.

Вместе с тем этому типу лазеров свойственны определенные особенности работы, отличающие его от других лазеров. Одна из них связана с тем, что изменения рабочего тока и температуры лазера приводят не только к изменению мощности и режима генерации, но и частоты генерации. Как показывает анализ, это обстоятельство должно приниматься во внимание при стабилизации частоты лазерных диодов.

FP лазерный диод имеет предельно простую оптическую схему. Также просто реализуется и его конструктивное воплощение: активная среда и два зеркала на ее торцах. В этом состоит основа его механической стабильности, малых габаритов, надежности.

Эта же особенность ограничивает методы и средства активного управления частотой лазера регулировкой рабочего тока, т. к. изменение температуры является медленным процессом.

Тем не менее само наличие возможности перестройки частоты генерации позволяет использовать для стабилизации частоты излучения наиболее распространенную, экстремальную систему регулирования с введением пробного сигнала. В данном случае управление частотой генерации лазера и ее модуляция пробным сигналом будут осуществляться изменением тока.

С другой стороны, как отмечалось выше, выходная мощность излучения лазерного диода также зависит от величины рабочего тока. Поэтому модуляция тока неизбежно вызовет модуляцию мощности. Это приведет к тому, что в режиме автоматической подстройки частоты (АПЧ) на сигнал модуляции мощности с частотой пробного сигнала, вызванный отстройкой частоты излучения лазера от максимума реперной характеристики (сигнал ошибки), будет накладываться сигнал "паразитной" модуляции мощности, вызванный той же модуляцией тока на частоте пробного сигнала. В итоге сформируется единый измерительный сигнал.

Обработка уходов частоты системой АПЧ сводится к уменьшению сигнала ошибки. В то же время "паразитный" сигнал будет оставаться постоянным. Это приведет к неизбежному сдвигу рабочей точки (нуль сигнала ошибки) с максимума реперной характеристики.

Для получения представлений о величине возникающих при этом ошибок требуется более детально рассмотреть возникающую ситуацию.

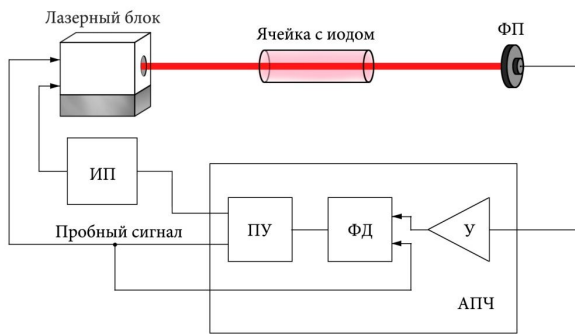


Рис. 1. Функциональная схема лазерного диода со стабилизацией частоты по линиям поглощения иода.

Лазерный блок: лазерный диод, коллимирующая линза, термостат; ИП — источник питания лазерного диода; ФП — фотоприемник; АПЧ — блок автоматической подстройки частоты: У — усилитель, ФД — фазовый детектор, ПУ — плата управления

ОЦЕНКА СДВИГА РАБОЧЕЙ ТОЧКИ

Типовая схема лазера с автоматической стабилизацией частоты генерации приведена на рис. 1.

Излучение лазера мощностью P_L , проходя установленную на выходе ячейку с молекулярным иодом при комнатной температуре ($\sim 25^\circ\text{C}$), испытывает поглощение. Форма линии поглощения представляет собой экстремальную зависимость от частоты излучения, точно неизвестна. Она определяется совокупностью доплеровского (неоднородного) и столкновительного (однородного) уширения. На нее оказывает влияние сверхтонкая структура линий поглощения иода и ширина линии излучения лазера. Модуляция частоты лазера пробным сигналом обеспечивает получение сигнала ошибки, т. е. напряжения, величина и знак которого несут информацию о величине и направлении уходов частоты генерации от частоты максимума линии поглощения. Сформированное после фазового детектирования напряжение используется в системе АПЧ для формирования сигнала управления током накачки. Оно подается на специальный вход ИП и тем самым изменяет частоту генерации.

Система АПЧ обеспечивает ее локализацию вблизи максимума линии поглощения. Это позволяет аппроксимировать контур линии поглощения в этой области квадратичной зависимостью. Конкретный вид экстремальной зависимости поглощения от частоты будет оказывать слабое влияние на конечный результат оценки. Основной вклад в сигнал ошибки будет вносить ее ширина. Поэтому для простоты вычислений зависимость мощности

излучения $P_{\Pi}(\nu)$, поглощенного при прохождении кюветы с иодом, можно выбрать в виде однородно уширенной линии, т. е.

$$P_{\Pi}(\nu) = \frac{P_L \cdot \alpha}{1 + \left(\frac{2 \cdot (\nu - \nu_0)}{\Delta \nu_L} \right)^2}, \quad (1)$$

где ν — частота излучения лазера, ν_0 — частота максимума линии поглощения, $\Delta \nu_L$ — ширина линии поглощения, P_L — мощность лазера, α — коэффициент поглощения в максимуме.

Мощность генерации лазерного диода пропорциональна рабочему току

$$P_L = S_P \cdot (I_L - I_{\text{пр}}), \quad (2)$$

где I_L — рабочий ток лазерного диода, $I_{\text{пр}}$ — пороговый ток при данной температуре, S_P — крутизна зависимости мощности генерации от тока.

Для изменения частоты генерации на величину $\Delta \nu_{\text{мод}}$ требуется изменение рабочего тока на величину ΔI

$$\Delta \nu_{\text{мод}} = S_I \cdot \Delta I, \quad (3)$$

где S_I — крутизна зависимости изменения частоты генерации от рабочего тока. И наоборот,

$$\Delta I = \frac{\Delta \nu_{\text{мод}}}{S_I}. \quad (4)$$

Собирая все выражения (1)–(4) вместе, имеем

$$P_{\Pi}(\nu) = \frac{\alpha \cdot S_P \cdot \left(I_L + \frac{\Delta \nu_{\text{мод}}}{S_I} - I_{\text{пр}} \right)}{1 + \left(\frac{2 \cdot (\nu + \Delta \nu_{\text{мод}} - \nu_0)}{\Delta \nu_L} \right)^2}. \quad (5)$$

Считая, что $|\Delta \nu_{\text{мод}}|, |(v - \nu_0)|, |(v + \Delta \nu_{\text{мод}} - \nu_0)| \ll \Delta \nu_L$, и обозначив $(\nu - \nu_0) = \Delta \nu$, упростим соотношение (5):

$$P_{\Pi} = \alpha \cdot \left(P_L + \frac{S_P \cdot \Delta \nu_{\text{мод}}}{S_I} \right) \cdot \left(1 - 4 \cdot \frac{(\Delta \nu + \Delta \nu_{\text{мод}})^2}{\Delta \nu_L^2} \right). \quad (6)$$

Упрощая далее, выделим из сигнала поглощения составляющую мощности $P_{\Pi \text{мод}}$, пропорциональную $\Delta \nu_{\text{мод}}$. Тогда получим

$$P_{\Pi \text{мод}} = \alpha \cdot \left(\frac{S_P}{S_I} - 8 \cdot P_L \cdot \frac{\Delta \nu}{\Delta \nu_L^2} \right) \cdot \Delta \nu_{\text{мод}}. \quad (7)$$

Отсюда следует, что сигнал ошибки равен нулю при расстройке частоты генерации лазера относительно

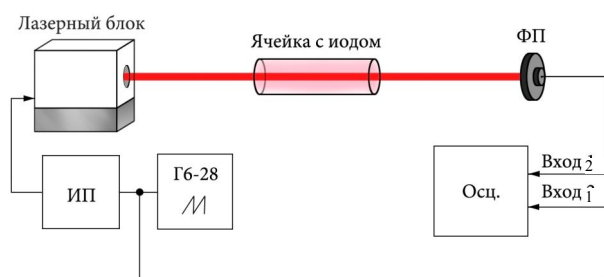


Рис. 2. Схема регистрации линий поглощения йода.

ИП — источник питания лазерного диода; ФП — фотоприемник; Осц. — осциллограф; Г6-28 — генератор

максимума поглощения на

$$\Delta\nu = \frac{S_p}{S_I} \cdot \frac{\Delta\nu_{\text{л}}^2}{8 \cdot P_{\text{л}}} \quad (8)$$

Для оценки величины $\Delta\nu$ требуется знать ширину линии поглощения $\Delta\nu_{\text{л}}$. Для ее определения был поставлен эксперимент, в котором лазерное излучение направлялось на фотоприемник через кювету с йодом (рис. 2). Линии поглощения наблюдались при перестройке частоты излучения лазера. Для этого на вход источника питания лазерного диода подавалось треугольное напряжение с генератора Г6-28 с частотой 30 Гц, которое вызывало соответствующие изменения тока накачки.

Они в свою очередь проявлялись в колебаниях мощности генерации и частоты излучения лазера.

Результаты эксперимента иллюстрирует рис. 3. На нем приведены осциллограмма напряжений, поступающих на входы 1 и 2 осциллографа Осц. На вход 1 (развертка 1) поступает треугольное напряжение с выхода генератора. Вход 2 осциллографа соединен с выходом фотоприемника ФП (развертка 2). Величина отображаемого напряжения пропорциональна мощности излучения, прошедшего через кювету с йодом. Видно, что в области перестройки частоты присутствует одна линия поглощения йода.

Эксперимент проводился при постоянном среднем токе накачки и стабилизации температуры лазера.

Зная крутизну зависимости тока источника питания от напряжения на входе подачи треугольного напряжения (10 мА/В), а также крутизну управления частотой генерации лазера по току накачки (~ 8 ГГц/мА), можно было оценить диапазон сканирования частоты (~ 8.5 ГГц).

Для повышения точности определения ширины линии сигнал с фотоприемника пропусклся через специальную плату, которая позволяла компенсировать треугольную составляющую напряжения, вызванную модуляцией мощности лазера. Осциллограмма полученного напряжения показана на рис. 4. Ширина линий на осциллограмме (рис. 4) по половинному уровню составляет ~ 800 МГц.

Используя формулу (8) для лазера ADL-65055TL, например, при мощности излучения $P_{\text{л}} = 3$ мВт, $S_p = 0.8$ мВт/мА, $S_I = 8$ ГГц/мА, $\Delta\nu_{\text{л}} = 0.8$ ГГц, получим значение $\Delta\nu = 2.5$ МГц.

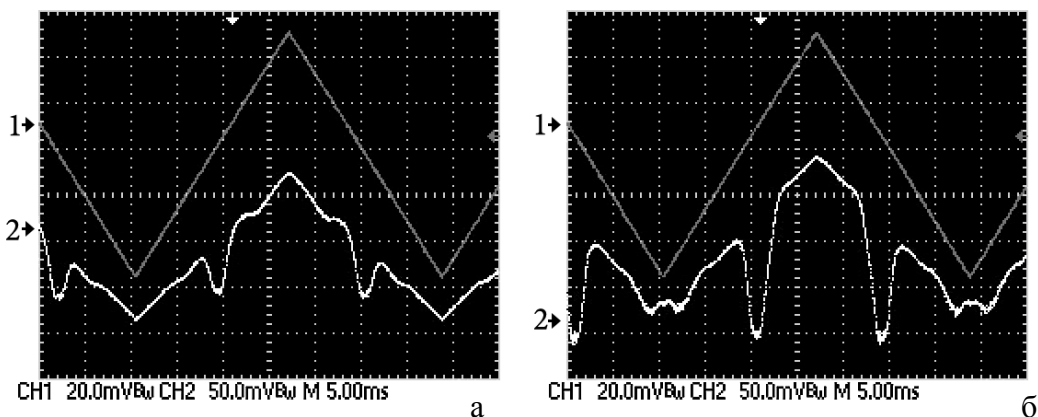


Рис. 3. Осциллограммы линий поглощения йода, попадающих в область перестройки частоты излучения лазерного диода с длиной волны 655 нм.

Получены при различных температурах лазера (отличаются частотой излучения): а — температура 21.6 °С, б — 16.6 °С.

Развертка 1 — сигнал с генератора Г6-28. Развертка 2 — линии йода, регистрируемые фотоприемником ФП (рис. 2)

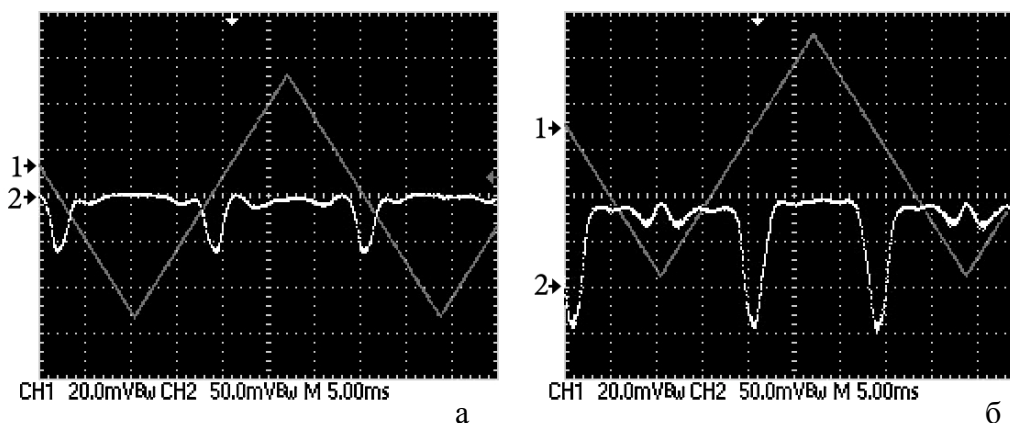


Рис. 4. Осциллограммы линий поглощения иода, попадающих в область перестройки частоты излучения лазерного диода с длиной волны 655 нм, после компенсации модуляции мощности.

Получены при различных температурах лазера (отличаются частотой излучения): а — температура 21.6 °С, б — 16.6 °С.

Развертка 1 — сигнал с генератора Г6-28. Развертка 2 — линии иода

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, моделирование описанной выше ситуации показывает, что величина частотного сдвига рабочей точки обратно пропорциональна уровню мощности выходного излучения и зависит от крутизны ватт-амперной и перестроечной характеристик лазера. Для обычных условий эксплуатации лазера оценка сдвига составляет величину порядка 3 МГц.

Из результатов расчета (см. формулу (8)) также следует, что скомпенсировать сдвиг или выделить сигнал ошибки, используя первую гармонику пробного сигнала, практически невозможно, т. к. оба сигнала присутствуют одновременно в виде линейной комбинации.

Реальнее всего уменьшить величину сдвига можно путем повышения выходной мощности лазерного диода, точнее путем повышения мощности излучения, проходящего через кювету с иодом, что не всегда бывает удобно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wieman C.E., Hollberg L. Using diode lasers for atomic physics // Rev. Sci. Instrum. 1991. Vol. 62, No. 1. P. 1–20.
2. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложение.

М.: Физматлит, 2009. 512 с. (С. 281–295).

3. Дворцов Д.В., Парфенов В.А. Спектральные характеристики одночастотного режима работы лазерных диодов // Научное приборостроение. 2014. Т. 24, № 3. С. 17–23.
4. Дворцов Д.В., Парфенов В.А., Фомин А.С. Стабилизация частоты излучения лазерных диодов по линиям поглощения изотопа иода $^{127}\text{I}_2$ // Оптический журнал. 2015. Т. 82, № 3. С. 9–12.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Контакты: Парфенов Владимир Александрович,
ppparfen@mail.ru

Дворцов Денис Валерьевич,
otenki@mail.ru

Материал поступил в редакцию: 20.02.2015

GENERATION FEATURES OF AN ERROR SIGNAL OF FREQUENCY STABILIZATION LASER DIODES SYSTEM

D. V. Dvorzov, V. A. Parfenov

Saint-Petersburg Polytechnic University, Russia

Forming the error signal in system of automatic tuning of laser diode radiation frequency is considered in the paper. It is shown that zero shift of the error signal will be formed in the extreme regulation system with entering the probe signal due to features of characteristics of laser diodes. The shift value has been estimated.

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

REFERENCES

1. Wieman C.E., Hollberg L. Using diode lasers for atomic physics. *Rev. Sci. Instrum.*, 1991, vol. 62, no. 1, pp. 1–20.
2. Rile F. *Standarty chastoty. Prinzipy i prilozheniya* [Standards of frequency. Principles and appendices]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 512 p. (pp. 281–295). (In Russ.).
3. Dvorzov 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. 17–23. (In Russ.).
4. Dvorzov D.V., Parfenov V.A., Fomin A.S. [Stabilization of frequency of radiation of laser diodes on lines of absorption of an isotope of iodine $^{127}\text{I}_2$]. *Opticheskiy zhurnal* [Optical magazine], 2015, vol. 82, no. 3, pp. 9–12. (In Russ.).

Contacts: *Parfenov Vladimir Alexandrovich*,
ppparfen@mail.ru;

Dvorzov Denic Valerievich,
otenki@mail.ru

Article received in edition: 20.02.2015