

## ИЗМЕРЕНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ОСИ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ

© 2016 г. Д. В. Дворцов, аспирант; В. А. Парфёнов, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

E-mail: pparfen@mail.ru

Исследована нестабильность углового положения оси диаграммы направленности излучения лазерных диодов с резонатором Фабри–Перо, работающих в диапазоне длин волн 635–660 нм. Полученные результаты дают представление об “уходах” оси и их зависимости от условий работы лазеров.

*Ключевые слова:* лазерный диод, одночастотный режим, ось диаграммы направленности излучения, нестабильность положения оси.

Коды OCIS: 250.5960

Поступила в редакцию 17.11.2015

### Введение

Интерес к данному вопросу связан с изучением потенциальных возможностей применения лазерных диодов (ЛД) с резонатором Фабри–Перо в диапазоне длин волн 635–660 нм. За последние годы выходные характеристики лазеров этого диапазона существенно улучшились. При этом важно отметить, что ЛД такого типа имеют малые размеры, энергопотребление, низкую стоимость и надежны в работе.

Исследования выходных характеристик серийно выпускаемых ЛД мощностью 5–10 мВт показывают, что в настоящее время практически все лазеры создают излучение основной моды хорошего качества. Более того, в большей части диапазонов рабочих токов и температур они работают в одночастотном режиме [1, 2]. Уровень мощности остаточных продольных мод не превышает (1–2)% от основной моды. В ряде случаев он составляет доли процента. Наблюдаемые при этом особенности генерации [1, 2] в основном повторяют отмечавшиеся ранее особенности работы ЛД ближнего инфракрасного диапазона [3]. Частота излучения таких лазеров может стабилизироваться по доплеровски уширенным линиям поглощения йода, и тогда она будет иметь воспроизводимое конкретное значение [4].

Вопрос о нестабильности оси диаграммы направленности (ОДН) излучения лазеров изучался применительно к лазерам разных типов,

прежде всего, имеющим резонатор Фабри–Перо со сферическими зеркалами или ему эквивалентным [5–7]. Знание этой характеристики необходимо для многих применений. В частности, в интерференционных измерениях, в которых используются одночастотные лазеры.

Целью настоящей работы являлось получение данных об угловой нестабильности ОДН излучения ЛД с длинами волн в диапазоне 635–660 нм.

### Схема экспериментальной установки

В работе исследовались промышленно выпускаемые ЛД таких фирм, как *Hitachi Laser Diodes* и *Arima Lasers*, с номинальной выходной мощностью 5 и 10 мВт. Мощности излучения такого уровня представляются достаточными для решения многих практических задач, например с использованием интерференционных измерений, и в то же время позволяют ограничить возможные варианты выбора лазеров.

Обращение к серийным образцам обусловлено необходимостью использовать в измерениях лазеры с определенным уровнем завершенности, в стандартных корпусах, с повторяющимися воспроизводимыми характеристиками. В первую очередь это необходимо для исследования одночастотного режима работы. Кроме того, полученные в таких условиях данные могут непо-

средственно служить основой для анализа возможности практического использования ЛД.

При проведении экспериментов использовалась обычная модульная конструкция крепления ЛД. Конструктивно диоды были выполнены в стандартных корпусах диаметром 5,6 мм. Поэтому они запрессовывались в одинаковые посадочные места, предусмотренные в изготовленных для этого корпусах. 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 в пределах (15–30) °С. Выбранная температура поддерживалась с точностью порядка 0,01 °С.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

Она включает непосредственно фотоприемник (ФП), электронный блок, а также исследуемый лазер. Измерения проводились с использованием четырехквadrантного фотодиода. Фототоки, регистрируемые сегментами 1–4 фотодиода, преобразуются в напряжения  $U_1$ – $U_4$  с помощью усилителей с высоким входным сопротивлением и поступают в электронный блок, где из них формируются напряжения  $U_x$  и  $U_y$ , пропорциональные смещению пятна излучения по осям  $x$  и  $y$ , а также напряжение  $U_p$ , пропорциональное мощности излучения. Последнее напряжение получается суммированием напряжений со всех 4-х квадрантов. Оно необходимо для нормирования сигналов на мощность излучения, так как она меняется с изменением рабочего тока и температуры.

Оси  $x$ ,  $y$  привязаны к центру фотодиода, как показано на рис. 1, и ориентируются, соответственно, параллельно ( $x$ ) и перпендикулярно плоскости ( $y$ ) оптического стола. Положение плоскости  $p$ – $n$  перехода ЛД в ходе экспериментов также контролировалось. Она ориентировалась либо параллельно столу (параллельно оси  $x$ ), либо перпендикулярно оптическому столу (параллельно оси  $y$ ).

Фотоприемник устанавливался на двухкоординатной подвижке. Она позволяла перемещать его вдоль направлений  $x$  и  $y$  с микронной точностью. В результате, при перемещении ФП с помощью подвижки перпендикулярно направлению распространения излучения можно было получить зависимость напряжений  $U_x$  и  $U_y$ , возникающих при смещении пятна излучения

по той или иной координате, от размера этого смещения. Таким образом, получались две калибровочные кривые, позволявшие определять смещение пятна излучения, возникающее из-за нестабильности ОДН.

На рис. 2 приведен пример калибровочных зависимостей, полученных для лазера ADL-65055TL при рабочем токе 27 мА. По вертикали указан масштаб в вольтах, по горизонтали – смещение пучка относительно начала координат в миллиметрах. Разный наклон калибровочных кривых на рис. 2 вызван разницей в размерах пучка по этим осям. В обсуждаемом случае плоскость перехода ориентирована вертикально столу, параллельно оси  $y$ . Соответствующие крутизны  $S_x$  и  $S_y$  равны  $S_x = \Delta U_x / \Delta x = 1,023$  В/мм и  $S_y = \Delta U_y / \Delta y = 2,278$  В/мм. Им будут соответствовать угловые отклонения в секундах по оси  $x$   $\Delta\phi_x = 1,7''$  на 10 мВ и по оси  $y$   $\Delta\phi_y = 0,75''$  на 10 мВ. Расстояние  $L$  от лазера до ФП во всех измерениях выбиралось равным 1,2 м.

При каждом новом измерении калибровочная кривая определялась заново.

Под диаграммой направленности обычно принимают угловое распределение мощности излучения на бесконечности или в дальней зоне.

Известно, что в фокальной плоскости линзы при падении на нее лазерного излучения фор-

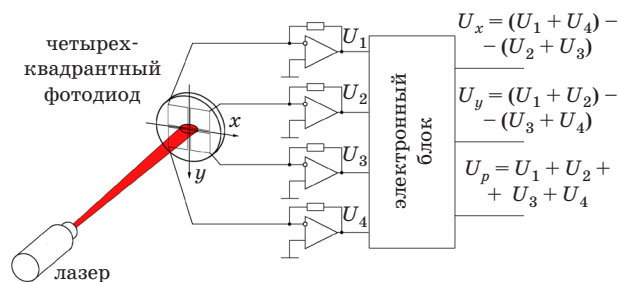


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

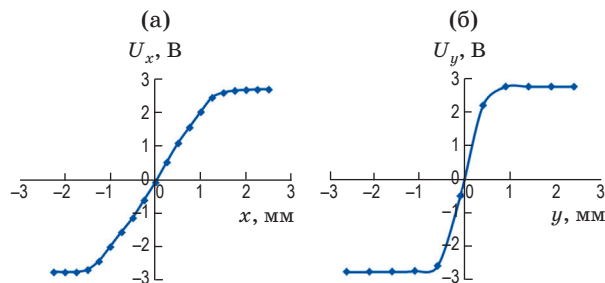


Рис. 2. Пример калибровочных кривых в случае лазера ADL-65055.

мируется распределение поля, соответствующее угловому спектру плоских волн, на которое может быть разложено это излучение [8]. Поэтому измерение диаграммы направленности обычно проводят путем анализа распределения поля в фокальной плоскости линзы.

При симметричном распределении поля выходного пучка лазера ось пучка совпадает с энергетическим центром пучка. После линзы симметрия поля сохраняется. Поэтому ось диаграммы направленности по-прежнему совпадает с осью пучка, и ее положение проще всего может быть определено с помощью четырехквadrантного фотодиода.

В рассматриваемом случае лазер генерирует основную поперечную моду, поле которой симметрично относительно оси пучка. Из-за большой расходимости пучка, создаваемого ЛД, провести обсуждаемые измерения без коллимации излучения невозможно. В данном случае она осуществлялась линзой с фокусным расстоянием  $f = 4,5$  мм.

Анализ поля излучения в фокальной плоскости такой линзы не даст результата. Колебания ОДН приводят к слишком малым смещениям возникающего распределения поля. Так как распространение поля за линзой сохраняет симметрию пучка относительно оси, то регистрируемое ФП на расстоянии  $L$  смещение оси будет в  $L/f$  раз больше, чем в фокальной плоскости.

### Результаты экспериментов

Как показывают результаты измерений, в стационарном состоянии, т.е. при постоянном рабочем токе  $I_{op}$  и температуре термостата  $T_t$ , положение ОДН остается постоянным в пределах  $\pm 0,5''$ .

На рис. 3 приведены примеры такой зависимости, полученной для лазера ADL-65055TL. Наблюдаемые колебания измеряемых значений имеют шумовой характер и могут являться результатом воздействия многих факторов, в том числе и собственной точности измерений квадрантным ФП. Последняя величина, по нашим оценкам, составляет  $0,3''$ . Поэтому значение  $\pm 0,5''$  может рассматриваться как оценка стабильности диаграммы направленности в данных условиях.

После выключения и последующего включения лазера положение оси восстанавливается. Отсюда следует, что оно зависит от температуры. Поэтому время восстановления исходного

состояния связано с установлением рабочей температуры и в рассматриваемом случае не превышает нескольких минут.

Эту сторону наблюдаемых явлений иллюстрирует рис. 4. В процессе измерений ток  $I_{op}$  через диод поддерживался постоянным. Изменялась только температура термостатирования  $T_t$ . Приведенные на рисунке данные нормированы на уровень мощности излучения, который меняется с температурой. Начальные углы на рис. 3–7 определяются начальным направлением излучения ЛД относительно четырехквadrантного фотодиода.

Угловое положение ОДН вдоль оси  $x$  (перпендикулярно  $p-n$  переходу) монотонно изменяется с температурой со скоростью около  $1''$  на градус. Скорость изменения положения вдоль оси  $y$  существенно меньше, и оно менее характерно определено в пространстве.

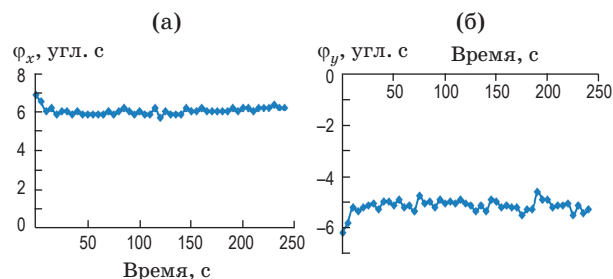


Рис. 3. Зависимости углового положения ОДН излучения лазера ADL-65055TL от времени при токе  $I_{op} = 27$  мА и  $T_t = 22$  °С. По оси ординат отложено угловое положение ( $\phi_x, \phi_y$ ) ОДН, по оси абсцисс – время с момента включения лазера. Значения  $+6''$  по  $x$  и  $-5,2''$  по  $y$  соответствуют стационарному положению оси пучка. Плоскость  $p-n$  перехода ориентирована параллельно оси  $y$ .

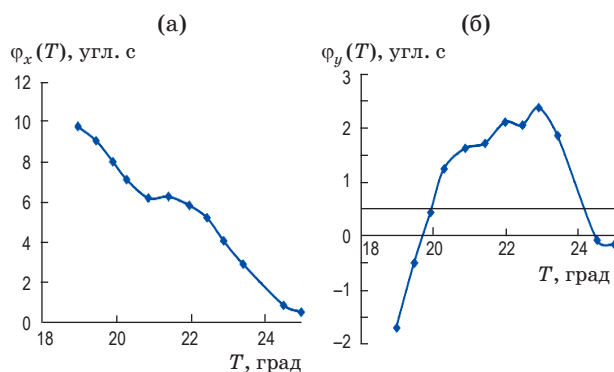
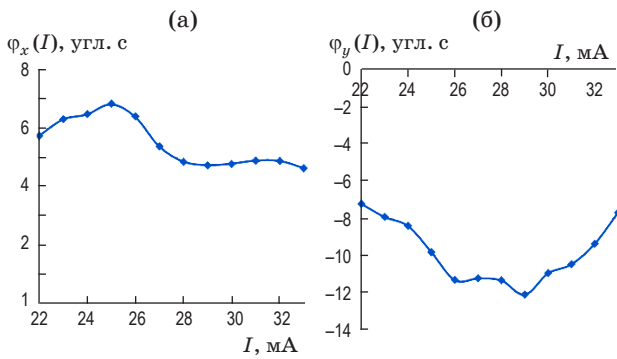
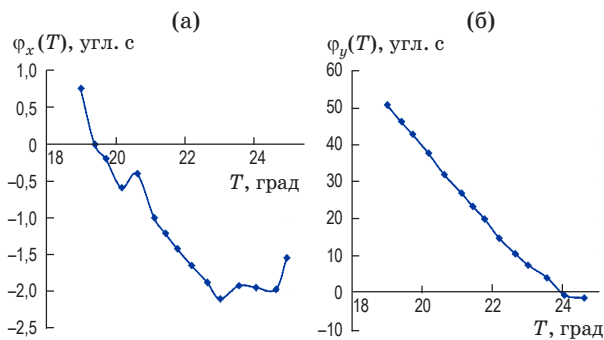


Рис. 4. Зависимости углового положения ( $\phi_x, \phi_y$ ) ОДН излучения лазера ADL-63055TL от температуры.  $I_{op} = 27$  мА. Плоскость  $p-n$  перехода ориентирована параллельно оси  $y$ .



**Рис. 5.** Зависимости углового положения ( $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$ ) ОДН излучения лазерного диода ADL-65055 TL от рабочего тока. Температура термостата  $T_t = 22$  °C. Плоскость  $p$ - $n$  перехода ориентирована параллельно оси  $y$ .



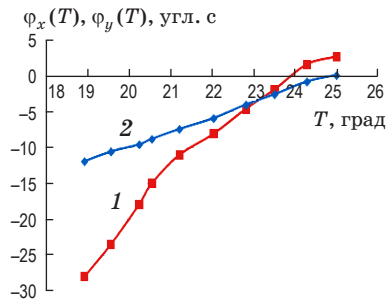
**Рис. 6.** Зависимости углового положения ( $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$ ) ОДН лазера ADL-63102TL от температуры.  $I_{op} = 55$  мА. Плоскость  $p$ - $n$  перехода ориентирована параллельно оси  $y$ .

Характеристика положения оси пучка в зависимости от тока  $I_{op}$  представлена на рис. 5. При этом температура термостата поддерживалась постоянной. Диапазон изменения рабочих токов сравнительно небольшой. Он ограничивается либо достижением предельной мощности излучения, или максимально допустимым значением тока  $I_{op}$ . Представленные данные, как и в предыдущем случае, прошли нормирование по мощности излучения, которая меняется с изменением тока.

Как видно из рис. 5, влияние тока обнаруживается, но оно слабее, чем влияние температуры. Угловые отклонения оси составляют единицы угловых секунд.

Аналогичные характеристики были получены и для лазеров мощностью 10 мВт (рис. 6).

\* \* \* \* \*



**Рис. 7.** Зависимости углового положения ( $\varphi_x - 1$ ,  $\varphi_y - 2$ ) ОДН излучения лазерного модуля LDPM12-655-3 от температуры. Плоскость  $p$ - $n$  перехода ориентирована параллельно оси  $y$ .

Кроме того, для расширения представлений по рассматриваемому вопросу также были исследованы серийно выпускаемые лазерные модули типа LDPM12-655-3 и LDPM12-655-5 мощностью, соответственно, 3 и 5 мВт. Некоторые из характеристик приведены на рис. 7.

Особенность этого случая состоит в том, что стандартные лазерные модули имеют стабилизацию мощности излучения, осуществляемую за счет изменения рабочего тока  $I_{op}$ . Поэтому измерение “уходов” диаграммы направленности с изменением температуры отражает совокупное влияние  $I_{op}$  и  $T_t$ . Контроль диаграммы направленности в стационарном режиме генерации – с постоянной температурой и мощностью, показывает постоянство положения оси в пределах  $\pm 1''$ .

## Заключение

Результаты проведенных исследований показали, что положение ОДН излучения ЛД с резонатором Фабри–Перо не является постоянным. В зависимости от условий работы отклонения могут составлять десятки угловых секунд.

Положение ОДН изменяется в процессе выхода лазера на рабочий режим работы, при изменении рабочей температуры, изменении температуры окружающей среды и тока накачки.

В работе исследовались лазеры разных типов, что, однако, не исключает возможного влияния на наблюдаемые явления температурной деформации крепления ЛД, осуществляемого во всех случаях по одной схеме.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дворцов Д.В., Парфенов В.А. Одночастотный режим работы лазерных диодов // НТВ СПб. 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.
3. Wieman C.E., Hollberg L. Using diode lasers for atomic physics // Rev. Sci. Instr. 1991. V. 62. P. 1–20.
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.
5. Бронников В.И. Измерение нестабильности оси диаграммы направленности излучения лазеров // ОМП. 1983. № 9. С. 5–6.
6. Якушкин С.В., Суханов И.И., Троицкий Ю.И. Измерение и стабилизация направления оси лазерного пучка // Приборы и техника эксперимента. 1987. № 4. С. 181–183.
7. Сакаян А.С. Исследование флуктуаций радиуса и положения центра гауссова пучка излучения одномодового лазера ЛГ-52-2 // ОМП. 1989. № 12. С. 24–26.
8. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 364 с.