УДК 621.317.08

В.В. Близнюк, Н.В. Березовская, В.А. Паршин, А.Е. Тарасов

Определение режима генерации лазерного диода на фундаментальной моде

Рассмотрена методика экспресс-анализа диаграммы направленности излучения лазерных диодов, позволяющая быстро определить режим генерации лазерного диода на фундаментальной моде. Установлено, что для определения такого режима генерации достаточно связать координаты точек перегиба гауссовой кривой, найденные путем натурных измерений угла расходимости излучения, с ходом касательных к кривой в этих точках.

Ключевые слова: лазерный диод, фундаментальная мода, диаграмма направленности излучения, ближняя зона поля, дальняя зона поля.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-3-55-58

Благодаря компактности, простоте способа накачки и высокому коэффициенту полезного действия лазерные диоды (далее – ЛД) нашли широкое применение в различных оптико-электронных комплексах и системах. Актуальным является использование ЛД в качестве базового элемента передающего оптоэлектронного модуля в волоконно-оптических линиях связи (далее – ВОЛС).

При выборе ЛД прежде всего учитывают следующие требования: длина волны излучения должна попадать в одно из окон прозрачности волокна – 1300 или 1550 нм; быстродействие источника излучения должно обеспечивать частоту модуляции, необходимую для передачи информации на требуемой скорости; большая часть излучения должна попадать в волокно с минимальными потерями. При проектировании сверхпротяженных безретрансляционных участков ВОЛС с одномодовым волокном со смещенной дисперсией предпочтение отдается ЛД, генерирующим излучение на длине волны 1,55 мкм, поскольку наименьшее затухание в таком волокне обеспечивается именно на этой длине волны. Однако в последние годы в магистральных ВОЛС, работающих на длине волны 1,55 мкм, все чаще используются ступенчатые одномодовые волокна, удельная хроматическая дисперсия которых на этой длине волны возрастает до 17 (пс/нм)/км. Единственной возможностью увеличения полосы пропускания волокна с такой дисперсией является уменьшение ширины спектра излучения передающего оптоэлектронного модуля. Поэтому к перечисленным выше требованиям, предъявляемым к источнику излучения, добавляется еще одно, крайне важное: ширина его спектра излучения должна быть как можно меньше.

Минимальная ширина спектра излучения обеспечивается в случае одночастотной генерации. Такой режим генерации идеально реализуется в инжекционном полупроводниковом лазере с вертикальным резонатором VCSEL. Однако типичные значения мощности генерации таких источников излучения находятся в диапазоне десятых долей милливатта, чего явно недостаточно для функционирования магистральных ВОЛС. Одночастотный режим генерации с шириной спектральной линии в

несколько мегагерц характерен и для лазеров с распределенной обратной связью (РОС-лазеров). При этом мощность генерации РОС-лазеров на два-три порядка больше, чем у лазеров с вертикальным резонатором, а длина волны излучения слабо зависит от температуры. Именно поэтому чаще всего в ВОЛС используются РОС-лазеры.

Одночастотный режим генерации является частным случаем генерации на фундаментальной моде, когда спектр излучения состоит из одной продольной моды. Поэтому нарушение режима генерации РОС-лазера на фундаментальной моде сигнализирует о нарушении одночастотной генерации, а значит, и об уширении спектра излучения передающего оптоэлектронного модуля в ВОЛС, что приводит к существенному ухудшению параметров линии передачи.

Именно по этой причине при проведении как пусконаладочных работ, так и регламентных работ по проверке режима функционирования ВОЛС особое внимание уделяется анализу модовой структуры излучения РОС-лазеров. При этом особую роль играет фактор времени.

В практической метрологии лазерного излучения задача определения генерации на фундаментальной моде занимает доминирующее положение. Методы решения этой задачи для остронаправленного излучения подробно рассмотрены в ряде стандартов [1–3], а средства измерений коэффициентов распространения лазерных пучков M^2 , в которых реализуются эти методы, уже более десяти лет выпускаются мелкими партиями фирмами Ophir и Coherent.

Значительно хуже выглядит ситуация с решением задачи определения генерации на фундаментальной моде в случае диагностики сильно расходящегося излучения ЛД. В настоящее время нет стандартизованных методов определения параметра M^2 , характеризующего распространение излучения с большими углами расходимости, и, как следствие, стандартизованных средств измерений параметров такого излучения.

Использование нестандартизованных методик диагностики излучения ЛД базируется на измерениях распределения его интенсивности в ближней и

дальней зоне в плоскости, перпендикулярной p - n -переходу (далее – вертикальной плоскости), и в плоскости p - n -перехода (далее – горизонтальной плоскости). Измерения распределения интенсивности излучения в ближней зоне являются наиболее сложным и в то же время необходимым этапом реализации таких методик при нахождении параметра M^2 . Однако при определении режима генерации излучения ЛД на фундаментальной моде измерения параметра M^2 можно исключить и ограничиться анализом распределения интенсивности излучения $f(\theta)$ в дальней зоне.

Целью данной работы является разработка методики экспресс-анализа диаграмм направленности излучения ЛД, описываемых функцией $f(\theta)$. Остановимся на анализе распределения интенсивности излучения $f^\perp(\theta)$ в дальней зоне в вертикальной плоскости.

Методика исследования

При разработке методики воспользуемся тем, что при генерации излучения на фундаментальной моде нормированное распределение интенсивности излучения ЛД в вертикальной плоскости в дальней зоне имеет вид [4]

$$f^\perp(\theta) = G^2(\theta^\perp) \exp(-A^2 z^2), \quad (1)$$

где $G^2(\theta^\perp)$ – квадрат углового фактора Гюйгенса [5]:

$$G^2(\theta^\perp) = \left[\frac{m^2 + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta^\perp}}{m^2 \cos \theta^\perp + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta^\perp}} \right]^2 \cos^2 \theta^\perp, \quad (2)$$

где $m = 1$ для ТЕ-мод или $m = n$ для ТМ-мод, а n – показатель преломления волновода;

$$A^2 = \frac{\ln[2G^2(\theta_{1/2}^\perp)]}{\sin^2 \theta_{1/2}^\perp}; \quad (3)$$

$$z^2 = \sin^2 \theta^\perp; \quad (4)$$

$G^2(\theta_{1/2}^\perp)$ – квадрат углового фактора при $\theta = \theta_{1/2}^\perp$, рассчитываемый по формуле (2); $\theta_{1/2}^\perp$ – половинный угол расходимости излучения в вертикальной плоскости; z – абсцисса точки гауссовой кривой $\phi_g(z) = \exp(-A^2 z^2)$ в декартовой системе координат.

Из (1)–(4) следует, что функция $f^\perp(\theta)$, описывающая диаграмму направленности излучения ЛД на фундаментальной моде, является четной, сама диаграмма симметрична относительно оси лазерного пучка, а для определения ее вида в каждом конкретном случае необходимо измерить угол расходимости излучения диагностируемого лазера.

При разработке методики экспресс-анализа диаграммы направленности излучения ЛД в первую очередь измеряется распределение плотности мощности его излучения. Измерение проводится на ус-

тановке, аналогичной описанной в [6], согласно методике измерений распределения плотности мощности, включающей сканирование сечения пучка одноканальным приемником с пинхолом [7]. Особое внимание уделяется обеспечению пространственной и временной стабильности пучка излучения.

Затем находится вид функции $f^\perp(\theta)$ для каждого диагностируемого ЛД. Для этого, согласно методу, изложенному в [8], по экспериментально найденной диаграмме направленности излучения на уровне 1/2 от максимальной интенсивности излучения определяется полный угол расходимости излучения диагностируемого ЛД $\theta_{1/2}^\perp \text{trad}$. При этом с целью уменьшения погрешности измерений обеспечивается выполнение требований, предъявляемых к приемно-усилительным устройствам согласно [7].

В случае симметричных диаграмм направленности излучения ЛД функция $f^\perp(\theta)$ принимает некоторое значение i при двух аргументах $\theta_i^\perp$, равных по модулю, но противоположных по знаку. Именно поэтому для удобства проведения количественного анализа таких диаграмм в настоящей работе используется половинный угол расходимости $\theta_{1/2}^\perp$, определяемый по формуле

$$\theta_{1/2}^\perp = 0,5 \theta_{1/2}^\perp \text{trad}, \quad (5)$$

где $\theta_{1/2}^\perp \text{trad}$ – полный угол расходимости излучения.

Точки перегиба гауссовой кривой имеют координаты $\pm 1/(A\sqrt{2})$, $1/\sqrt{e}$ [9], а касательные к кривой в этих точках описываются функцией

$$\Theta(z) = \exp(-1/2)(2 - |z|/|z_p|), \quad (6)$$

где $\pm z_p$ – абсциссы точек перегиба.

Так как $z_p = \pm 1/(A\sqrt{2})$, то $|z_p| = 1/(A\sqrt{2})$.

Тогда (6) принимает вид

$$\Theta(z) = \exp(-1/2)(2 - A\sqrt{2}|z|), \quad (7)$$

где, с учетом (4), $-1 \leq z \leq 1$.

Далее, с учетом (7), проводится операция по определению вида функции $\Theta(z)$, используемой при анализе диаграммы направленности излучения диагностируемого ЛД. Для этого в (3) подставляется экспериментально определенное значение угла $\theta_{1/2}^\perp$, а затем рассчитывается значение параметра A .

Для проведения экспресс-анализа функции $f^\perp(\theta)$ с использованием функции $\Theta(z)$ определяем из (7) связь этой функции и z :

$$|z| = [2 - \sqrt{e}\Theta(z)]/(A\sqrt{2}). \quad (8)$$

После ряда простых преобразований, находим, что

$$A^2 z^2 = 2 - 2\sqrt{e}\Theta(z) + \frac{e\Theta^2(z)}{2}. \quad (9)$$

Тогда (1) принимает следующий вид:

$$f^{\perp}(\theta) = G^2(\theta^{\perp}) \exp \left[-\frac{e\Theta^2(z)}{2} + 2\sqrt{e}\Theta(z) - 2 \right]. \quad (10)$$

Задавая некоторое значение $\Theta(z_i)$, из (10) находим, что

$$f^{\perp}(\theta_i) = G^2(\theta_i^{\perp}) \exp \left[-\frac{e\Theta^2(z_i)}{2} + 2\sqrt{e}\Theta(z_i) - 2 \right], \quad (11)$$

где, согласно (4), $z_i = |\sin \theta_i^{\perp}|$.

Далее, пользуясь (4) и тем, что функция $\Theta(z)$ линейна, определяем аргумент z_i , а значит, и угол $\theta_i^{\perp}$, при котором эта функция принимает значение $\Theta(z_i)$:

$$\sin^2 \theta_i^{\perp} = \sin^2 \theta_{1/2}^{\perp} \frac{2 - 2\sqrt{e}\Theta(z_i) + \frac{e\Theta^2(z_i)}{2}}{\ln \left[2G^2(\theta_{1/2}^{\perp}) \right]}. \quad (12)$$

Как уже отмечалось выше, расчетный параметр $\theta_i^{\perp}$ имеет два значения. Модули этих значений равны, а знаки противоположны. Используя найденные из (12) значения $\theta_i^{\perp}$, по массиву экспериментально определенных значений нормированной функции углового распределения интенсивности излучения ЛД в свободное пространство определяем соответствующие им значения $f^{\perp}(\theta_i^{\perp})$. В случае симметричной диаграммы направленности эти значения должны быть равными с точностью, определяемой погрешностью измерений.

Зная $\theta_i^{\perp}$ и используя (2), находим квадрат углового фактора $G^2(\theta_i^{\perp})$ и численное значение функции $f^{\perp}(\theta_i^{\perp})$:

$$f_{\text{расч}}^{\perp}(\theta_i^{\perp}) = G^2(\theta_i^{\perp}) \exp \left[-\frac{e\Theta^2(z_i)}{2} + 2\sqrt{e}\Theta(z_i) - 2 \right]. \quad (13)$$

Если значение $f^{\perp}(\theta_i^{\perp})$, найденное из массива чисел, полученного при измерениях нормированной функции углового распределения интенсивности излучения ЛД, равно правой части (13) при любых значениях параметра $\theta_i^{\perp}$ (а значит, и соответствующих им значениях параметра z_i), при которых возможно измерение диаграммы направленности излучения с погрешностью, не превышающей 5%, имеет место генерация ЛД на фундаментальной моде. В ходе выполнения настоящей работы установлено, что при углах расходимости излучения ЛД, равных 12–15°, верхняя граница диапазона значений параметра $\theta_i^{\perp}$, определяемая с использованием такого условия, равна 40–42°.

Методика экспресс-анализа диаграммы направленности излучения ЛД в свободное пространство использована нами для определения режима генера-

ции пяти экземпляров ЛД типа KLM-D650-5-5 с длиной волны 650 нм и мощностью излучения 5 мВт и шести ЛД типа KLM-H980-200-5 с длиной волны 980 нм и мощностью излучения 200 мВт. Все ЛД изготовлены фирмой «ФТИ-ОПТРОНИК» (г. Санкт-Петербург). Углы расходимости излучения ЛД типа KLM-D650-5-5 варьируются в диапазоне значений от 12,5 до 12,7°, а ЛД типа KLM-H980-200-5 – от 14,5 до 14,9°.

Экспериментально установлено, что условие (13) выполняется при всех значениях параметра $\theta_i^{\perp}$ вплоть до 40° для всех ЛД типа KLM-D650-5-5 и вплоть до 42° для четырех ЛД типа KLM-H980-200-5.

У двух ЛД типа KLM-H980-200-5 с углами расходимости 14,5 и 14,8° верхняя граница диапазона значений $\theta_i^{\perp}$, при которых выполняется условие (13), равна 22 и 24°. Из чего следует, что режим генерации этих лазеров не является одномодовым.

Определение верхней границы рабочего диапазона значений $\theta_i^{\perp}$ является крайне необходимым и важным этапом конструирования узла связи источника лазерного излучения и одномодового оптического волокна.

Заключение

Разработана методика экспресс-анализа диаграммы направленности излучения ЛД, позволяющая быстро определить их режим генерации на фундаментальной моде. Установлено, что для определения такого режима генерации достаточно связать координаты точек перегиба гауссовой кривой, найденные путем натурных измерений угла расходимости излучения, с ходом касательных к кривой в этих точках. Для описания диаграммы направленности излучения ЛД использована функция, полученная нами ранее в явном виде. Установлено, что в качестве аргумента такой функции целесообразно использовать значения функции, описывающей касательные к гауссовой кривой в точках ее перегиба. Такой подход позволил разработать простой алгоритм определения режима генерации на фундаментальной моде. Установлено, что у некоторых ЛД экспериментально найденные значения $f^{\perp}(\theta_i^{\perp})$ в периферийной области лазерного пучка отличаются от расчетных, что говорит о нарушении режима генерации на фундаментальной моде, а значит, и изменении условий ввода излучения ЛД в оптическое волокно. Это необходимо учитывать при конструировании узла согласования излучения с оптическим волокном.

Литература

1. ГОСТ Р ИСО11146-1-2008. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширин, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. – Ч. 1: Стигматические (гомоцентрические) и слабоастигматические пучки. – М.: Стандартинформ, 2010. – 20 с.
2. ГОСТ Р ИСО11146-2-2008. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширин, углов рас-

ходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. – Ч. 2. Астигматические пучки. – М.: Стандартинформ, 2010. – 17 с.

3. ГОСТ Р/ТР ИСО11146-3–2008. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширины, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. – Ч. 3: Стигматические (гомоцентрические) и слабоастигматические пучки. – М.: Стандартинформ, 2010. – 24 с.

4. Non-standardized measurement methods and measuring instruments for parameters and characteristics of laser diodes radiation and their standardization prospects / V. Bliznyuk, N. Berezovskaya, V. Parshin, A. Tarasov // Proceedings of the International Academic Forum AMO–SPITSE–NESEFF. – Smolensk: Universum, 2016. – P. 85–86.

5. Thompson G.H.B. Physics of semiconductor laser devices. – N.Y.: J. Wiley and Sons, 1980. – P. 185–186.

6. Яркость и филаментация оптического потока мощных квантоворазмерных InGaAs/GaAs-лазеров, работающих в непрерывном режиме / А.П. Богатов, А.Е. Дракин, А.А. Стратонников, В.П. Коняев // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30, № 5. – С. 401–405.

7. ГОСТ Р ИСО 13694–2010 (Е). Оптика и оптические приборы. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений распределения плотности мощности (энергии) лазерного пучка. – М.: Стандартинформ, 2010. – 20 с.

8. ГОСТ Р 50471-93. Излучатели полупроводниковые. Метод измерения угла излучения. – М.: Госстандарт России, 1993. – 6 с.

9. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. – М.: АСТ, 2006. – 991 с.

Близнюк Владимир Васильевич

Канд. техн. наук, доцент каф. физики им. В.А. Фабриканта Национального исследовательского университета «МЭИ»
Тел.: +7-916-608-86-83
Эл. почта: 4059541@mail.ru

Березовская Наталия Витальевна

Аспирант каф. физики
Тел.: +7-926-134-02-14
Эл. почта: Natalia.Berezovskaya@inbox.ru

Паршин Василий Алексеевич

Студент каф. физики
Тел.: +7-915-289-94-47
Эл. почта: ParshinVasA@gmail.com

Тарасов Александр Евгеньевич

Ст. преп. каф. физики
Тел.: +7-915-353-46-62
Эл. почта: TarasovAY01@gmail.com

Bliznyuk V.V., Berezovskaya N.V., Parshin V.A., Tarasov A.E.

Method of rapid analysis of radiation pattern of the laser diode

The method of rapid analysis of the radiation pattern of laser diodes allows to quickly determine the mode of generation of the laser diode on the fundamental mode. It was found that for the determination of the lasing, is enough to link the coordinates of inflection points of the Gaussian curve, found by in-situ measurements of the angle of radiation divergence, with the progress of the tangent to the curve at these points.

Keywords: laser diode, fundamental mode, directional radiation pattern, the near-field zone, the far-field zone.