

## **О возможности исследования процесса деградации лазерных диодов путем измерений показателя преломления волновода**

*В. В. Близнюк, А. Е. Тарасов*

*Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14*

*e-mail: 4059541@mail.ru*

*Аннотация.* Показана возможность контроля деградации лазерной гетероструктуры путем анализа диаграммы направленности лазерного диода с использованием экспериментально определенного значения показателя преломления волноводного слоя.

*Ключевые слова:* деградация, лазерная гетероструктура, диаграмма направленности.

### **1. Введение**

Благодаря компактности, простоте способа накачки и высокому коэффициенту полезного действия лазерные диоды (далее — ЛД) нашли широкое применение в различных оптико-электронных комплексах и системах (далее — ОЭК). Важнейшим технико-экономическим параметром ОЭК является срок службы. Прогнозирование этого параметра представляет собой сложную техническую задачу, так как связано с проведением ресурсных испытаний всех узлов ОЭК. Одним из таких узлов является ЛД.

Несмотря на то что ЛД имеют уже полувековую историю, проблема прогнозирования их срока службы по-прежнему актуальна.

Самые первые работы, посвященные решению этой проблемы, появились практически сразу же после создания ЛД, работающих в непрерывном режиме при комнатной температуре, от которых требовалось функционирование в течение не менее  $10^5$  часов.

Подробный анализ этих работ дан в [1]. Изложенные в них методы прогнозирования срока службы ЛД базируются на измерениях энергетических, пространственно-энергетических и спектральных характеристик излучения как при комнатных, так и при повышенных температурах.

### **2. Типы ресурсных испытаний**

Известны ресурсные испытания ЛД двух типов: в реальном масштабе времени и ускоренные.

Испытания первого типа использовались в начальный период развития технологии изготовления ЛД, когда их срок службы не превышал нескольких сотен часов. В настоящее время такие испытания проводятся для отбраковки ЛД со скрытыми дефектами, проявляющимися в отказе некоторой части изделий на начальном (как правило, не превышающем нескольких десятков часов) этапе эксплуатации в нормальном режиме работы.

С учетом достижений современной технологии изготовления ЛД ускоренные испытания являются единственной возможностью прогнозирования их срока службы.

Чаще всего ускоренные испытания ЛД проводятся путем измерений их мощности излучения и тока накачки при повышенной температуре окружающей среды. Используется режим автоматической стабилизации мощности генерации за счет изменения тока накачки. Ток накачки служит в этом случае контролируемым параметром, характеризующим степень деградации ЛД. Есть и другой вариант контроля состояния ЛД, когда постоянным является ток накачки, а контролируется мощность генерации.

Известны также методики проведения ускоренных испытаний ЛД, базирующиеся на измерениях их диаграммы излучения. К сожалению, область их использования ограничена диагностикой только тех ЛД, излучение которых характеризуется малой расходимостью [2–4].

### **3. Особенности анализа излучения ЛД с большой расходимостью**

Для определения модовой структуры излучения ЛД с большой расходимостью используются нестандартизованные методики [5]. Но для их реализации необходимы измерения распределения интенсивности излучения в ближней зоне поля.

При помещении ЛД в климатическую камеру измерения в ближней зоне исключаются, и для определения режима генерации излучения ЛД на фундаментальной моде приходится ограничиться анализом распределения интенсивности излучения  $f(\theta)$  в дальней зоне.

Нахождение функции, описывающей двумерную диаграмму направленности излучения ЛД в явном виде, не представляется возможным из-за астигматизма лазерного пучка. Поэтому приходится рассматривать поле излучения ЛД в дальней зоне отдельно в плоскости, перпендикулярной  $p$ - $n$ -переходу (далее — вертикальной плоскости), и в плоскости  $p$ - $n$ -перехода (далее — горизонтальной плоскости).

В [6] было установлено, что в случае генерации ЛД на фундаментальной моде во всем диапазоне значений полярного угла  $\theta$  в каждой из этих плоскостей выполняется условие:

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

где  $G^2(\theta)$  — квадрат углового фактора Гюйгенса, который в случае генерации на фундаментальной моде  $TE_0$  определяется по формуле [7]

$$G^2(\theta) = \left( \frac{1 + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} \cos\theta \right)^2, \quad (2)$$

где  $n$  — показатель преломления материала, из которого выполнен волновод;

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

где  $\theta_{1/2}$  — значение полярного угла  $\theta$ , при котором функция  $f(\theta)$  равна 0.5, т. е. половина полного угла расходимости излучения ЛД.

Из (1)–(3) видно, что вид функции  $f(\theta)$  определяется однозначно, если известен параметр  $\theta_{1/2rad}$  и показатель преломления волновода.

Угол  $\theta_{1/2rad}^\perp$ , а значит, и параметр  $\theta_{1/2}$  находятся по диаграмме направленности на уровне 0.5 с использованием стандартизированной методики [8]. На рисунке приведена диаграмма направленности излучения одномодового ЛД в вертикальной плоскости и показано, как определяются  $\theta_{1/2rad}^\perp$  и  $\theta_{1/2}$  в этой плоскости. Таким же образом эти параметры находят и в горизонтальной плоскости.

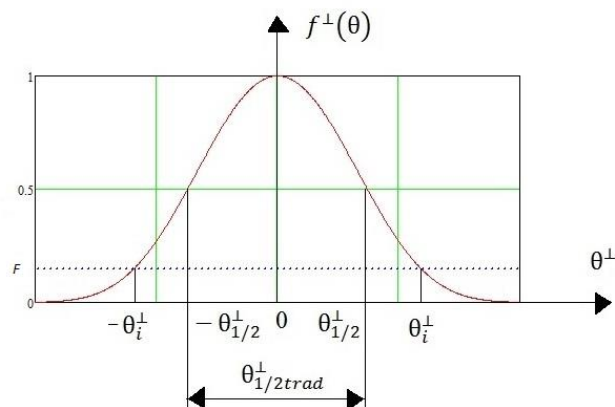


Рисунок. Диаграмма направленности излучения одномодового ЛД в вертикальной плоскости

#### 4. Методика определения параметра $n$

Параметр  $n$  не всегда известен. Он зависит от многих факторов: во-первых, от температуры волноводного слоя; во-вторых, от равновесных концентраций в волноводном слое электронов и дырок и, в третьих, от ширины запрещенной зоны [1]. При одномодовом режиме генерации можно задать функцию  $f(\theta)$ , описывающую диаграмму направленности, на уровнях  $F_i$  и  $1/2$ , а затем найти из массива чисел, полученного при натуральных измерениях диаграммы направленности значения,  $\theta_i$  и  $\theta_{1/2}$ . Из (1)–(3) можно вывести следующее соотношение:

$$G(\theta_i) = \frac{1 + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}} \cos \theta_i = \sqrt{F_i} \left( \sqrt{2} \frac{1 + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_{1/2}}}{\cos \theta_{1/2} + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_{1/2}}} \cos \theta_{1/2} \right)^{\frac{\sin^2 \theta_i}{\sin^2 \theta_{1/2}}}. \quad (4)$$

При подстановке  $\theta_i$  и  $\theta_{1/2}$  в (4) получаем трансцендентное уравнение. Решением этого уравнения будет искомая величина параметра  $n$ . Контроль процесса деградации гетероструктуры ЛД может быть осуществлен благодаря тому, что мы знаем значение  $n$ . Следует заметить, что при определении  $n$  не требовалось учитывать условия, при которых измерялись диаграммы направленности излучения лазеров, так как только требовалась уверенность в том, что имеет место одномодовая генерация на фундаментальной моде.

Как правило, под одномодовым режимом генерации подразумевают генерацию на фундаментальной моде. Этот режим может реализоваться в достаточно широком диапазоне температур окружающей среды. При возрастании температуры уменьшается ширина запрещенной зоны, и это приводит к смещению спектра излучения в длинноволновую область. Вариация температуры окружающей среды сопровождается и изменением показателя преломления  $n$  волноводного слоя [1].

Диаграмма направленности излучения ЛД, согласно (1)–(3), при изменении показателя преломления также изменяется.

#### 5. Количественный анализ диаграммы направленности излучения

Изложенная методика определения параметра  $n$  позволяет проводить количественный анализ диаграммы направленности излучения. Однако для использования значения параметра  $n$  при проведении такого анализа необходимо соблюдать условия эксперимента, близкие к тем, при которых измерялся параметр.

Благодаря этому открывается возможность исследования процесса деградации ЛД, изготовленных в одной партии.

При нарушении одномодового режима генерации изменяется диаграмма направленности излучения. Исследование всей диаграммы направленности является трудоемким процессом. Поэтому актуальным становится предложенный в [6] простой и быстрый метод контроля вида этой диаграммы.

Метод базируется на том, что известна величина параметра  $n$ . Это позволяет точно определять вид углового фактора Гюйгенса и параметр  $A^2$ , который находится в показателе степени экспоненциального множителя в (1).

С целью упрощения реализации этого метода представим (1) в следующем виде [9]:

$$f^\perp(\theta) = G^2(\theta^\perp) \exp(-A^2 z^2), \quad (5)$$

где  $G^2(\theta^\perp)$  и  $A^2$  — параметры, имеющие тот же смысл, что и в (2), и в (3) соответственно,

$$z^2 = \sin^2 \theta^\perp, \quad (6)$$

$z$  — абсцисса точки гауссовой кривой  $\varphi_g(z) = \exp(-A^2 z^2)$  в декартовой системе координат. Точки перегиба гауссовой кривой имеют координаты  $\pm 1/(A\sqrt{2}); 1/\sqrt{e}$  [8]. Это позволяет упростить анализ гауссовой функции. Для чего учтем, что если  $\pm z_p$  — абсциссы этих точек, то  $z_p^2 = 1/(2A^2)$ . Тогда

$$f^\perp(\theta_p^\perp) = G^2(\theta_p^\perp) \exp(-1/2). \quad (7)$$

Из условия, что  $A^2 z_p^2 = 1/2$ , с учетом (3) и (6), рассчитываем параметр  $\theta_p^\perp$  по формуле

$$\sin^2 \theta_p^\perp = \sin^2 \theta_{1/2}^\perp / (2 \ln[2G^2(\theta_{1/2}^\perp)]). \quad (8)$$

Так как теперь известны параметры  $\theta_p^\perp$  и  $n$ , то по формуле (2) можно рассчитать квадрат углового фактора  $G^2(\theta_p^\perp)$ .

Генерация ЛД на фундаментальной моде имеет место в том случае, когда экспериментально найденные значения  $f^\perp(-\theta_p^\perp)$  и  $f^\perp(\theta_p^\perp)$  равны правой части (7). Таким же образом анализируется часть диаграммы направленности при значениях гауссовой функции  $1/e$  и  $1/e^2$ .

Начальная стадия деградации ЛД, как показывает практика, проявляется в нарушении условия равенства экспериментально измеренных и расчетных величин функции, описывающей диаграмму направленности при трех значениях экспоненциального множителя в (5).

## 6. Заключение

Описана методика определения показателя преломления  $n$  волновода ЛД по диаграмме направленности одномодового излучения в свободное пространство. Показано, что вид функции  $f(\theta)$ , описывающей диаграмму направленности, в случае определения параметра  $n$  однозначно задан в явной форме. Установлено, что контроль деградации ЛД может быть осуществлен в этом случае путем измерений значений  $f(\theta)$  при трех значениях ее аргумента, связанных простыми соотношениями со значениями абсцисс точек перегиба гауссовой кривой. Это позволяет быстро определять изменение вида диаграммы направленности, а значит, и обеспечивать высокую чувствительность к изменениям состояния гетероструктуры, обусловленным деградационными процессами.

## Литература

- [1] Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. — М. : Мир, 1981. Т. 1. 299 с., Т. 2. 364 с.
- [2] ГОСТ Р ИСО11146-1-2008. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширины, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. Ч. 1. Стигматические (гомоцентрические) и слабоастигматические пучки. — М. : Стандартинформ, 2010. 20 с.
- [3] ГОСТ Р ИСО11146-2-2008. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширины, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. Ч. 2. Астигматические пучки. — М. : Стандартинформ, 2010. 17 с.
- [4] 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.
- [5] Богатов А. П., Дракин А. Е., Стратонников А. А., Коняев В. П. Яркость и филаментация оптического потока мощных квантоворазмерных InGaAs/GaAs-лазеров, работающих в непрерывном режиме // *Квантовая электроника*. 2000. Т. 30. № 5. С. 401–405.
- [6] Близнюк В. В., Березовская Н. В., Брит М. А., Коваль О. И., Паршин В. А., Ржанов А. Г. Анализ диаграммы направленности излучения диодного лазера по экспериментальным данным // *Ученые записки физического факультета*. 2016. Т. 5. С. 165302–165303.
- [7] Thompson G. H. B. // *Physics of semiconductor laser devices*. 1980. P. 185–186.
- [8] ГОСТ Р 50471-93. Излучатели полупроводниковые. Метод измерения угла излучения. — М. : Издательство стандартов, 1993. 6 с.
- [9] Близнюк В. В., Березовская Н. В., Паршин В. А., Тарасов А. Е. Методика количественного анализа диаграммы направленности излучения лазерного диода на фундаментальной

*В. В. Близнюк,  
А. Е. Тарасов*

*О возможности исследования процесса  
деградации лазерных диодов путем измерений  
показателя преломления волновода*

*моде // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики: Серия «Естественные и технические науки». 2016. № 7. С. 45–50.*

***Авторы:***

*Владимир Васильевич Близнюк* — кандидат технических наук, доцент кафедры физики им. В. А. Фабриканта, Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Александр Евгеньевич Тарасов* — старший преподаватель кафедры физики им. В. А. Фабриканта, Национальный исследовательский университет «МЭИ»

## About the possibility of the research process of laser diodes degradation by measurements of the wave guide refraction index

V. V. Bliznuk, A. E. Tarasov

National Research University "Moscow Power Engineering Institute"  
Krasnokazarmennaya, 14, Moscow, Russia 111250

e-mail: 4059541@mail.ru

*Abstract.* Possibility of laser heterostructure degradation control through the use of laser diode radiation pattern with observed indicator value of wave guide layer refraction.

*Key words:* degradation, laser heterostructure, radiation pattern.

### References

- [1] *Keysi Kh., Panish M.* (1981) *Lazery na geterostrukturakh*. Moscow, Mir. 1: 299, 2: 364. [In Rus]
- [2] GOST R ISO11146-1-2008. *Lazery i lazernye ustanovki (sistemy). Metody izmereniy shirin, uglov raskhodimosti i koeffitsientov rasprostraneniya lazernykh puchkov.* (2010) P. 1. Stigmaticheskie (gomotsentricheskie) i slaboastigmaticheskie puchki. Moscow, Standartinform, 20. [In Rus]
- [3] GOST R ISO11146-2-2008. *Lazery i lazernye ustanovki (sistemy). Metody izmereniy shirin, uglov raskhodimosti i koeffitsientov rasprostraneniya lazernykh puchkov.* (2010) P. 2. Astigmaticheskie puchki. Moscow, Standartinform. 17. [In Rus]
- [4] GOST R/TR ISO11146-3-2008. *Lazery i lazernye ustanovki (sistemy). Metody izmereniy shirin, uglov raskhodimosti i koeffitsientov rasprostraneniya lazernykh puchkov* (2010) P. 3. Stigmaticheskie (gomotsentricheskie) i slaboastigmaticheskie puchki. Moscow, Standartinform, 24. [In Rus]
- [5] *Bogatov A. P., Drakin A. Ye., Stratonnikov A. A., Konyaev V. P.* (2000) *Kvantovaya elektronika*. **30**(5):401–405. [In Rus]
- [6] *Bliznyuk V. V., Berezovskaya N. V., Brit M. A., Koval O. I., Parshin V. A., Rzhanov A. G.* (2016) *Uchenye zapiski fizicheskogo fakulteta*. 5:165302–165303. [In Rus]
- [7] *Thompson G. H. B.* (1980) *Physics of semiconductor laser devices*. P. 185–186.
- [8] GOST R 50471-93. *Izluchateli poluprovodnikovye. Metod izmereniya ugla izlucheniya* (1993) Moscow, Izdatelstvo standartov. 6. [In Rus]
- [9] *Bliznyuk V. V., Berezovskaya N. V., Parshin V. A., Tarasov A. Ye.* (2016) *Sovremennaya nauka: aktualnye problemy teorii i praktiki. Seriya «Yestestvennye i tekhnicheskie nauki»*. 7:45–50. [In Rus]