

УДК 621.315.592:621.373

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ НАРАБОТКИ ПОПЕРЕЧНО-ОДНОМОДОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ ПО ИХ СПЕКТРАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

© 2018 г. В. В. Близнюк^{1, *}, В. А. Паршин¹, О. И. Коваль¹, А. Г. Ржанов²,
О. И. Семенова¹, А. Е. Тарасов¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова” (физический факультет), Москва, Россия

*E-mail: 40595141@mail.ru

В настоящей работе предлагается методика прогнозирования срока службы поперечно-одномо-
довых торцевых лазерных диодов, основанная на анализе формфактора огибающей его спектра излу-
чения в начальной стадии работы.

DOI: 10.1134/S036767651811008X

ВВЕДЕНИЕ

Широкое использование поперечно-одномо-
довых торцевых лазерных диодов (далее – ЛД) ак-
туализирует задачу прогнозирования их срока
службы. В настоящее время наиболее часто ис-
пользуется методика решения этой задачи, осно-
ванная на измерениях временных зависимостей
тока накачки ЛД, необходимого для поддержания
мощности излучения на определенном уровне [1].
Также используются комплексные измерения вре-
менных зависимостей профиля пучка и спектра из-
лучения ЛД [2–5]. При этом особое внимание уде-
ляется вопросу совпадения распределения интен-
сивности излучения в дальней зоне с функцией
Гаусса и появлению в спектре излучения пиков, со-
ответствующих модам высшего порядка.

Перспективной представляется сравнительно
недавно разработанная методика, в основе кото-
рой лежит измерение контраста излучения ЛД в
начальной стадии эксплуатации (в течение первых
50–100 часов наработки) [6]. Анализ параметров
излучения ЛД в начальной стадии эксплуатации
ЛД позволяет получить большой объем информа-
ции о качестве их гетероструктуры, несмотря на то
что именно в это время доминирующим механиз-
мом ее деградации является “детская смертность”
[1]. Несомненным достоинством методики являет-
ся возможность прогнозирования их срока службы
за достаточно малое время, а значит, без непродук-
тивного расходования ресурса ЛД.

С учетом отмеченного преимущества экспрес-
с-диагностики состояния гетероструктуры ЛД в на-
стоящей работе предлагается методика прогнози-
рования срока службы ЛД, основанная на анали-

зе формфактора огибающей спектра излучения в
начальной стадии работы ЛД.

ПРИБОРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛД

Реализация этой методики базируется на ис-
пользовании спектрального прибора с низкой
разрешающей способностью – монохроматора
МДР-23. Использование такого прибора не поз-
воляет измерять тонкую структуру спектра излу-
чения – линий излучения, соответствующих про-
должным модам резонатора Фабри–Перо. Однако
разрешающей способности МДР-23 достаточно,
чтобы с высокой точностью определить формфак-
тор огибающей спектра излучения.

Спектральные характеристики определялись
экспериментально с использованием шкалы в
длинах волн излучения, а затем с использованием
известного соотношения между длиной волны и
частотой излучения – с использованием частот-
ной шкалы.

Аналоговый сигнал с фотодиода, установ-
ленного за выходной щелью монохроматора,
подавался на подключенную к нему плату
32-разрядного аналого-цифрового преобразо-
вателя NI-USB 6008. Использование такой пла-
ты позволяет на базе спектрального прибора по-
строить спектрально-измерительный комплекс,
т.е. произвести сканирование по спектру в задан-
ном спектральном диапазоне с заданным шагом
сканирования с одновременной регистрацией сиг-
нала от фотоприемника. Выходной сигнал с платы
поступает непосредственно на компьютер с уста-
новленным на нем программным обеспечением

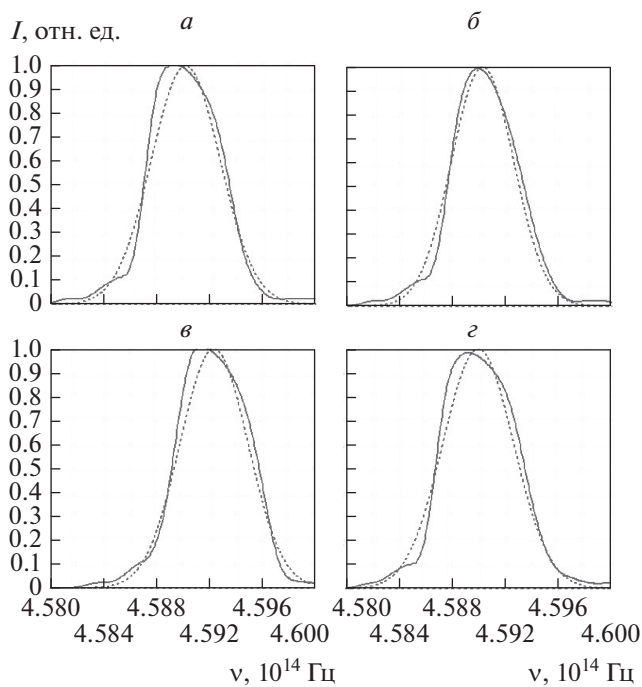


Рис. 1. Спектральная характеристика лазера ЛД 1 – сплошная линия при токе накачки: *а* – $1.05 I_{\text{пор}}$; *б* – $1.07 I_{\text{пор}}$; *в* – $1.1 I_{\text{пор}}$; *г* – $1.15 I_{\text{пор}}$; пунктирная линия – гауссова функция.

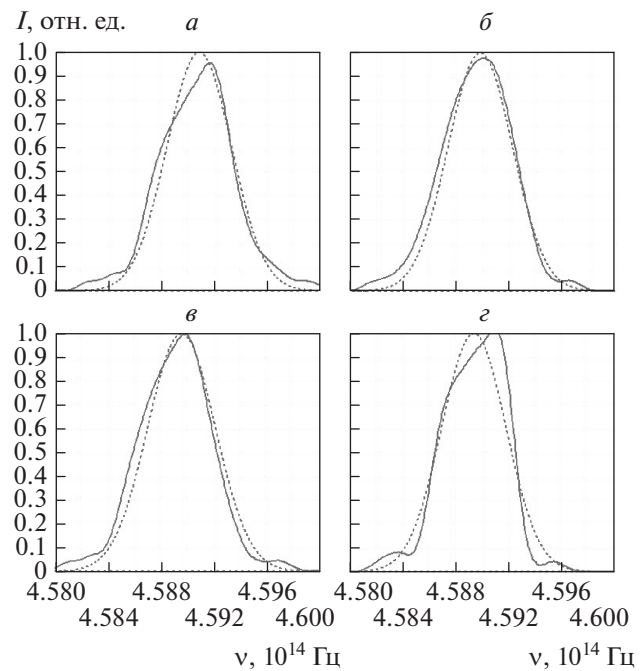


Рис. 2. Спектральная характеристика лазера ЛД 3 – сплошная линия при токе накачки: *а* – $1.05 I_{\text{пор}}$; *б* – $1.075 I_{\text{пор}}$; *в* – $1.15 I_{\text{пор}}$; *г* – $1.19 I_{\text{пор}}$; пунктирная линия – гауссова функция.

NI SignalExpress. В результате чего находится массив чисел, который отражается визуально на экране монитора в виде спектральных характеристик ЛД.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛД, ГЕНЕРИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЕ В КРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ

Путем исследований формфакторов огибающей спектра излучения более чем ста экземпляров ЛД, генерирующих на длинах волн 0.635 мкм и 0.65 мкм, установлено, что описывающие их функции $f_{\text{эксп}}(\nu)$ варьируются в широких пределах.

С учетом многообразия функции $f_{\text{эксп}}(\nu)$ для анализа каждой из них в данной работе используются три параметра:

1. Ширина линии $\Delta\nu$ огибающей спектр излучения, рассчитываемая по формуле:

$$\Delta\nu = \nu_{1/2\max} - \nu_{1/2\min}, \quad (1)$$

где $\nu_{1/2\min}$ и $\nu_{1/2\max}$ – минимальная и максимальная частоты излучения, при которых значение функции $f_{\text{эксп}}(\nu)$ равно 0.5;

2. Центральная частота этого диапазона ν_0 :

$$\nu_0 = 0.5(\nu_{1/2\max} + \nu_{1/2\min}); \quad (2)$$

3. Частота $\nu_{\text{эксп max}}$, при которой значение функции $f_{\text{эксп}}(\nu)$ максимально.

Для ЛД, генерирующих в красном диапазоне длин волн, наблюдается существенная зависимость вида функции $f_{\text{эксп}}(\nu)$ от тока накачки (рис. 1 и рис. 2).

Так, для группы из 20 ЛД, генерирующих на длине волны 0.65 мкм (будем называть ее первой группой), установлено, что при токе накачки равном $1.05 I_{\text{пор}}$, где $I_{\text{пор}}$ – значение порогового тока, частота $\nu_{\text{эксп max}}$ меньше частоты ν_0 (рис. 1, *а*); при токе накачки $1.07 I_{\text{пор}}$ частота $\nu_{\text{эксп max}}$ практически равна ей (отличается от частоты ν_0 не более чем на 0.08%) (рис. 1, *б*). При дальнейшем росте тока накачки частота $\nu_{\text{эксп max}}$ снова становится меньше частоты ν_0 (рис. 1, *в* и *г*).

Для второй группы из 35 ЛД, генерирующих на длине волны 0.65 мкм, при токе накачки равном $1.05 I_{\text{пор}}$ частота $\nu_{\text{эксп max}}$ больше частоты ν_0 (рис. 2, *а*); при токе накачки $1.075 I_{\text{пор}}$ частота $\nu_{\text{эксп max}}$ практически равна (отличается от частоты ν_0 не более чем на 0.09%) (рис. 2, *б*). При дальнейшем росте тока накачки частота $\nu_{\text{эксп max}}$ снова становится больше частоты ν_0 (рис. 1, *в* и *г*).

При режиме генерации ЛД, когда выполняется условие $\nu_{\text{эксп max}} = \nu_0$, функция $f_{\text{эксп}}(\nu)$ становится симметричной относительно частоты $\nu_{\text{эксп max}}$, и

Таблица 1. Зависимость отношения $\tau/\tau_{\max}$ от $A(\tau, \nu)$, где $\tau_{\max}$ — максимальное время наработки ЛД, $f_{\text{эксп}}(\nu)$ которых аппроксимируется гауссовой кривой

$A(\tau, \nu)$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\tau/\tau_{\max}$	0.20	0.35	0.48	0.60	0.70	0.80	0.86	0.91	0.95	0.98	1.00

возможна аппроксимация функции $f_{\text{эксп}}(\nu)$ четной функцией или суммой четных функций с центральной частотой ν_0 , совпадающей с частотой $\nu_{\text{эксп max}}$. Анализ состояния гетероструктуры ЛД и спектра их излучения в этом случае проводят с использованием лоренцевой и гауссовой функций [7]. Однако достаточно часто хороший результат дает использование симметричных контуров вида профиля Эпштейна [7]:

$$Ep(x, n) = [\sec h(x/n)]^n, \quad (3)$$

фурье-преобразование которых позволяет осуществить плавный переход от лоренцева контура

$$f_L(\nu) \text{ к гауссову } f_G(\nu) = \exp \left[\pi \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu} \right)^2 \right].$$

Если условие $\nu_{\text{эксп max}} = \nu_0$ не выполняется, то формфакторы огибающей спектра излучения не симметричны относительно частоты излучения $\nu_{\text{эксп max}}$, и функция $f_{\text{эксп}}(\nu)$ не может быть аппроксимирована четной функцией с центральной частотой ν_0 , совпадающей с частотой $\nu_{\text{эксп max}}$, что существенно затрудняет прогнозирование срока службы ЛД по виду этой функции.

Установлено, что контур линии, огибающей спектр излучения ЛД с длиной волны излучения 0.65 мкм в случае выполнения условия $\nu_{\text{эксп max}} = \nu_0$, хорошо описывается функцией вида:

$$F_S(\nu) = 0.5 \left[F_G + \sec h^8 \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu} \right) \right] \quad (4)$$

при ν меньше ν_0 и

$$F_S(\nu) = 0.5 \left[F_G + \sec h^4 \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu} \right) \right] \quad (5)$$

при ν больше ν_0 .

Обобщая (4) и (5), можно F_S представить в виде:

$$F_S(\nu) = 0.5 \left[F_G + \sec h^n \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu} \right) \right], \quad (6)$$

где $n = 8$ или 4 .

С другой стороны $f_{\text{эксп}}(\nu)$ можно представить в виде:

$$f_{\text{эксп}}(\nu) = A(\tau, \nu) f_G(\nu) + (1 + A(\tau, \nu)) f_{\text{sech}}(\nu), \quad (7)$$

где $f_{\text{sech}}(\nu) = \sec h \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu} \right)$, а значение коэффициента $A(\tau, \nu)$, эмпирически определяемое по виду

огибающей контура линии излучения, варьируется от 0 до 1, τ — прогнозируемое время жизни ЛД.

В пределах значений отношения $(\nu - \nu_0)/\Delta \nu$ от -4 до $+4$ коэффициент $A(\tau, \nu)$ практически не зависит от частоты ν , и его значение характеризует параметр τ .

Установлено, что τ имеет минимальное значение при $A(\tau, \nu)$, равном нулю. С ростом $A(\tau, \nu)$ имеет место монотонное возрастание τ . Зависимость отношения $\tau/\tau_{\max}$ от $A(\tau, \nu)$ где $\tau_{\max}$ — максимальное время наработки ЛД, $f_{\text{эксп}}(\nu)$ которых аппроксимируется гауссовой кривой, приведена в виде табл. 1.

Таким образом, максимальное время наработки $\tau_{\max}$ имеют те ЛД, у которых при времени эксплуатации, не превышающем 50 часов, экспериментально измеренная функция $f_{\text{эксп}}(\nu)$ представляет собой кривую Гаусса.

Необходимо отметить, что диаграммы направленности таких ЛД в начальный период эксплуатации также имеют гауссов профиль [5], характерный именно для одномодовых лазеров. Кроме того, им же присуща высокая степень линейной поляризации (превышающая 0.9) [4].

Известно, что в случае нарушения одномодового режима генерации профиль пучка излучения ЛД начинает отклоняться от гауссова распределения [1–3], а его степень линейной поляризации в начальный период эксплуатации не превышает значений 0.6–0.7 [6].

Как показывают проведенные в данной работе измерения $f_{\text{эксп}}(\nu)$ при этом также уменьшаются значения коэффициента $A(\tau, \nu)$, а значит, и прогнозируемое время наработки ЛД τ .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛД, ГЕНЕРИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЕ В ИК-ДИАПАЗОНЕ

В ИК-ЛД в начальной стадии эксплуатации наблюдается один контур огибающей спектра излучения, который по мере наработки трансформируется в спектральную характеристику с двумя контурами огибающей (рис. 3). Второй контур смещен относительно первоначально регистрируемого в длинноволновую область.

Практически все ЛД с длиной волны генерации 0.98 мкм и одним контуром линии излучения

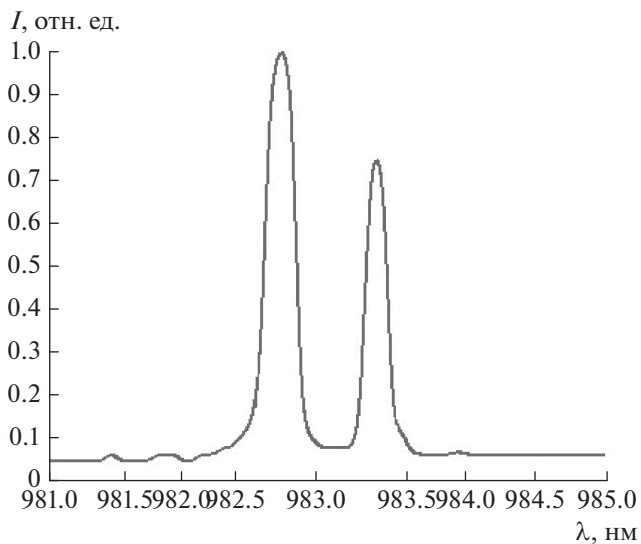


Рис. 3. Спектр излучения ИК-ЛД на начальном этапе эксплуатации, указывающий на малое время наработки такого лазера.

имели такую огибающую этого контура, которая хорошо аппроксимировалась гауссовой функцией. Срок службы таких лазеров был сопоставим со сроками службы лазеров, генерирующих в красном диапазоне. В то же время установлено, что появление второго контура огибающей спектра излучения ЛД в начальный период эксплуатации однозначно указывает на дефектность структуры. Это позволяет предположить, что таким ЛД присуще крайне ограниченное время эксплуатации, что и подтверждается экспериментально: время наработки таких лазеров не превышало 400 часов.

Таким образом, анализ спектра излучения ЛД в первые часы эксплуатации позволяет отсортировать гетероструктуры низкого качества по наличию в спектре более чем одной группы линий излучения ЛД.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ ЛД

ЛД с качественными гетероструктурами имеют одну огибающую спектра излучения продольных мод. В том случае, когда имеется один экстремум спектральной характеристики, возможны как большое, так и малое время наработки. Опре-

деляющим фактором, который можно использовать для прогнозирования службы ЛД, является форма линии, соответствующая функции $f_{\text{эксп}}(\nu)$. Для прогнозирования срока службы ЛД необходимо проводить тщательный анализ этой функции с использованием (7).

Выявлены группы ЛД, у которых коэффициенты $A(\tau, \nu)$, определенные путем такого анализа, имеют значения в определенных диапазонах. При разбросе значений коэффициента $A(\tau, \nu)$ не более 0.02 можно говорить об общем значении прогнозируемого срока службы входящих в каждый из этих групп ЛД.

Крайне важно отметить, что с приближением $f_{\text{эксп}}(\nu)$ к гауссовой функции прогнозируемые сроки службы представляются предельными для ЛД, изготовленных по единой технологии. При этом профиль пучка также определяется гауссовой функцией. Из этого следует, что предварительная отбраковка ЛД с точки зрения оптимизации прогнозируемого параметра τ может быть начата с измерений диаграммы направленности. Дополнительным фактором является степень поляризации излучения. Все ЛД, степень поляризации которых менее 0.9, должны быть отбракованы, так как их срок службы крайне ограничен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Путем определения конкретного значения коэффициента $A(\tau, \nu)$ в начальной стадии эксплуатации ЛД возможна оценка его срока службы τ . Из этого следует, что тщательный анализ функции, описывающей формфактор, дает возможность проводить экспресс-диагностику ЛД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков А.Е. Основы физики и технологии полупроводниковых лазеров. СПб: Академ.ун-та, 2016.
2. Лешко А.Ю. и др. // ФТП. 2002. Т. 36. вып.11. № 1. С. 1393.
3. Гордеев Н.Ю. и др. // ФТП. 2010. Т. 44. вып.10. С. 1401.
4. Блиznyuk В.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 1. С. 6.
5. Блиznyuk В.В. и др. // Доклады Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2016. Т. 19. № 3. С. 55.
6. Bliznyuk V.V. et al. // Phys. of Wave Phenom. 2017. V. 5. №. 2. P. 1.
7. Елисеев П.Г. и др. // ФТП. 1998. Т. 32. № 4. С. 478.