

УДК 621.315.592,621.373

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ МОЩНЫХ ДИОДНЫХ ЛАЗЕРОВ ПО СПЕКТРУ ИХ ИЗЛУЧЕНИЯ НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

© 2020 г. В. В. Близнюк<sup>1</sup>, \*, О. И. Коваль<sup>1</sup>, В. А. Паршин<sup>1</sup>, А. Г. Ржанов<sup>2</sup>,  
А. Е. Тарасов<sup>1</sup>, В. С. Григорьев<sup>1</sup>

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

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

\*E-mail: 4059541@mail.ru

Поступила в редакцию 26.08.2019 г.

После доработки 13.09.2019 г.

Принята к публикации 28.10.2019 г.

Предлагается метод прогнозирования срока службы мощных лазерных диодов с широким контактом на основе спектральных измерений в начальные часы эксплуатации этих приборов. Рассматриваются вопросы формирования спектров и каналов генерации в этих устройствах при разной нагрузке и сроке эксплуатации.

DOI: 10.31857/S0367676520020064

### ВВЕДЕНИЕ

Мощные полупроводниковые лазерные диоды (ЛД) с гетероструктурами квантовых размеров широко используются в разных областях науки, техники и медицины. К таким лазерам принято относить ЛД с мощностью непрерывной генерации от нескольких сотен милливатт до 20 Вт – максимального значения мощности, достигнутой в настоящее время [1–5]. Исследования показывают, что срок службы ЛД мощностью 0.5–2 Вт не превышает 5000 ч [6]. Известны несколько методик прогнозирования срока службы мощных ЛД [1, 5, 7]. Однако их использование связано со значительным расходом ресурса лазеров, применением дорогостоящей контрольно-измерительной аппаратуры и прерыванием работы ЛД. В связи с этим актуальной становится задача прогнозирования срока службы мощных ЛД не только за малое время, но и на начальном этапе их работы.

В процессе тестирования партии ЛД, изготовленных в 2012 г., нами наблюдалась трансформация их спектра излучения [7, 8]. Она проявлялась в переходе от трех ярко выраженных контуров линий, огибающих спектр излучения ЛД и соответствующих трем пространственным каналам генерации в активной области лазерного диода, к че-

тырем линиям, то есть к переходу генерации в четырех каналах.

Изменения в спектре излучения ЛД мы связываем с пространственными вариациями, которые касаются коэффициента нелинейной рефракции полупроводника квантовой ямы и длины когерентности излучения ЛД. Проведенные нами расчеты показали, что меньшее число каналов генерации соответствует большей степени когерентности излучения ЛД, а уменьшение длины когерентности  $L_{\text{ког}}$  приводит к увеличению числа каналов  $N_{\text{кан}}$  [7]:

$$N_{\text{кан}} \approx nW \sqrt{\frac{2\pi}{\lambda L_{\text{ког}}}}, \quad (1)$$

где  $n$  – эффективный показатель преломления лазерного волновода,  $W$  – ширина активной области,  $\lambda$  – длина волны излучения.

В данной работе приведены результаты исследований спектральной характеристики партии ЛД, изготовленной в 2017 г. Они имеют ту же конструкцию, что и ЛД из предыдущей партии. В первые несколько часов их эксплуатации были зафиксированы только два канала генерации с центральными частотами  $\nu_{01}$  и  $\nu_{02}$ . В соответствии с (1) это позволяет заключить, что длина когерентности ЛД из новой партии приборов больше,

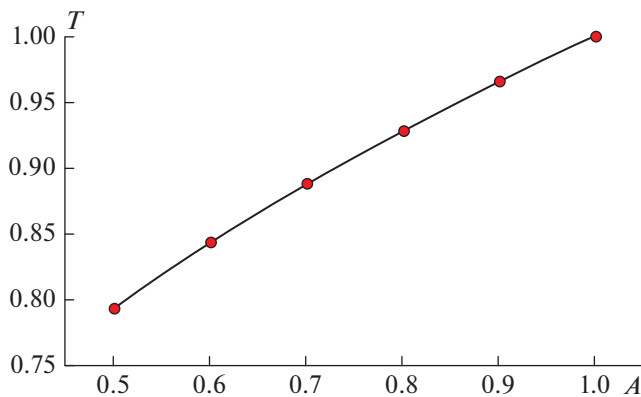


Рис. 1. Зависимость параметра  $T$  от значения параметра  $A$  в начальной стадии эксплуатации ЛД.

чем у ЛД из предыдущей партии, когда наблюдались три контура.

Через 240 ч эксплуатации в спектре ЛД  $f_{\text{эксп}}(\nu)$  возникли три канала генерации  $f_{\text{расч.}i}\left(\frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$ , каждому из которых соответствовала линия, огибающая спектр излучения с центральной частотой  $\nu_{01} < \nu_{02} < \nu_{03}$ . Анализ функций  $f_{\text{расч.}i}\left(\frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$  показал, что все три линии симметричны относительно частот  $\nu_{01}$ ,  $\nu_{02}$ ,  $\nu_{03}$ , а в тех областях спектра, где происходит их наложение, выполняется условие:

$$f_{\text{эксп}}(\nu) = \sum_{i=1}^N f_{\text{расч.}i}\left(\frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right), \quad (2)$$

где  $N$  – число каналов генерации.

После увеличения наработки ЛД до 350 ч в спектре излучения ЛД возникают 4–5 каналов генерации (рис. 1а, 1б). Согласно (1) это означает, что длина когерентности уменьшается.

Увеличение числа каналов приводит к увеличению числа полос в спектрах. Это объясняется тем, что контур усиления имеет довольно большую ширину (около 6 нм по длине волны) и должен быть заполнен линиями излучения, соответствующими разным каналам.

Для прогнозирования срока службы мощного ЛД предлагается использовать ранее разработанную методику связи срока службы со значением параметра  $A_i$  [9] в каждом канале генерации отдельно.

Для количественного анализа функций  $f_{\text{расч.}i}\left(\frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$  их сравнивали с гауссовой функцией

ей  $f_G\left(\frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$  в пределах ширины  $i$ -ой линии  $\Delta\nu_i$ .

Для проведения такого анализа в пределах каждого канала генерации был введен интегральный спектральный параметр  $A_i$ , значение которого рассчитывал по формуле:

$$A = 1 - \int_{\frac{\nu_{1/2}^{\min}}{2}}^{\frac{\nu_{1/2}^{\max}}{2}} \frac{\left|D\left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu}\right) - 1\right| d\nu}{\Delta\nu}, \quad (3)$$

где  $\frac{\nu_{1/2}^{\min}}{2}$  и  $\frac{\nu_{1/2}^{\max}}{2}$  – частоты, которые определялись из условия:

$$\begin{aligned} f_{\text{расч.}i}\left(\frac{\nu_{1/2}^{\min}}{2}\right) &= f_{\text{расч.}i}\left(\frac{\nu_{1/2}^{\max}}{2}\right) = \\ &= f_G\left(\frac{\nu_{1/2}^{\min}}{2}\right) = f_G\left(\frac{\nu_{1/2}^{\max}}{2}\right) = 0.5, \end{aligned} \quad (4)$$

$$D\left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu}\right) = \frac{f_{\text{эксп}}\left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu}\right)}{f_G\left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu}\right)}, \quad (5)$$

где  $\nu_{0i}$  – центральная частота  $i$ -го диапазона частот  $\nu_i$ , в котором сравнивались гауссова функция  $f_G\left(\frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$  и функция  $f_{\text{расч.}i}\left(\frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$ .

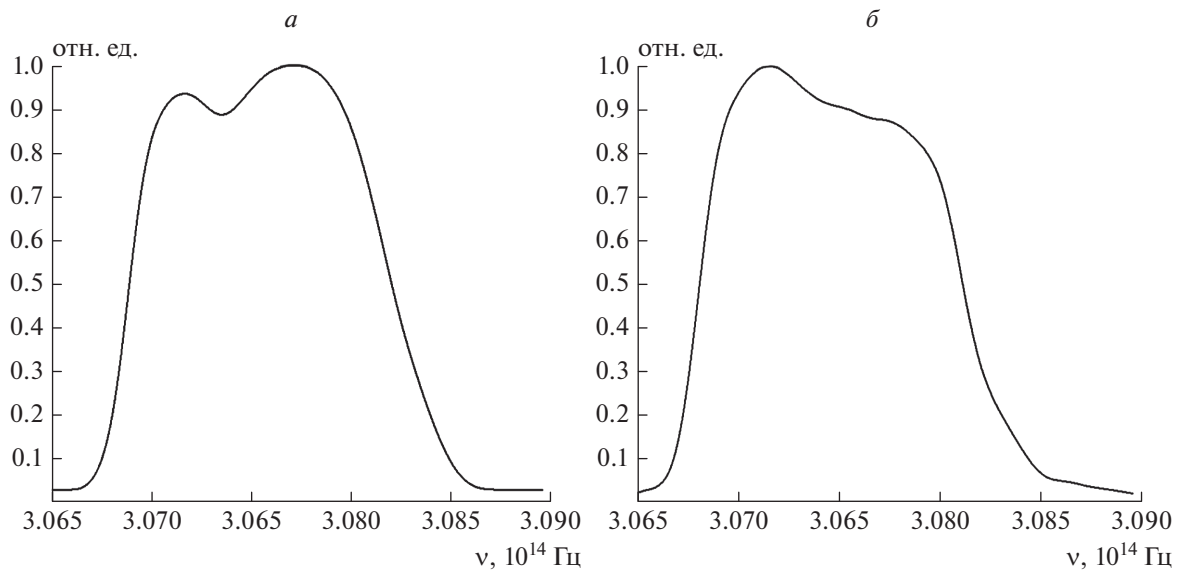
Значение частоты  $\nu_{0i}$  определялось по формуле:

$$\nu_0 = \frac{1}{2}\left(\nu_{1/2}^{\max} + \nu_{1/2}^{\min}\right), \quad (6)$$

а нормированная гауссова функция имела следующий вид:

$$f_G\left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu}\right) = \exp\left[-4 \ln 2 \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu}\right)^2\right]. \quad (7)$$

Из (3) и (5) следует, что значение параметра  $A_i$  стремится к единице, когда функцию  $f_{\text{расч.}i}\left(\frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$  можно аппроксимировать гауссовой функцией. Методика расчета параметра  $A_i$  в разных каналах генерации универсальна, однако вид функции  $f_{\text{расч.}i}\left(\frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$  зависит от тока накачки. Так, на рис. 2 видно, что форма кривой  $f_{\text{эмп}}\left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu}\right)$ , описывающей линию, огибающую спектр излучения ЛД, заметно изменяется при увеличении тока накачки от 940 до 980 мА.



**Рис. 2.** Огибающая нормированного спектра излучения ЛД с наработкой 350 ч при двух характерных значениях тока накачки: *a* –  $I_H = 940$ , *б* –  $I_H = 980$  мА.

При возрастании количества каналов генерации увеличивается и число анализируемых по формулам (3)–(7) функций  $f_{расч.i} \left( \frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta \nu_i} \right)$ , что, впрочем, не нарушает критерия определения срока службы ЛД по параметру *A*.

При определении срока службы ЛД из партии приборов, изготовленных групповым методом в одном и том технологическом цикле, установлено, что он может варьироваться в пределах от 2500 до 3500 ч. Поэтому для определения качества каждого экземпляра ЛД из той или иной партии приборов наряду с параметром *A* использовался параметр *T*:

$$T = \frac{\tau}{\tau_{max}}, \tag{8}$$

где  $\tau$  – срок службы конкретного экземпляра ЛД из определенной партии приборов в масштабе реального времени;  $\tau_{max}$  – максимальное время наработки некоторого ЛД из той же партии приборов.

Также экспериментально установлено (рис. 1), что параметры *T* и *A* при  $A > 0.855$ , т.е. в режиме генерации лазерного диода на фундаментальной моде, связаны между собой следующим соотношением:

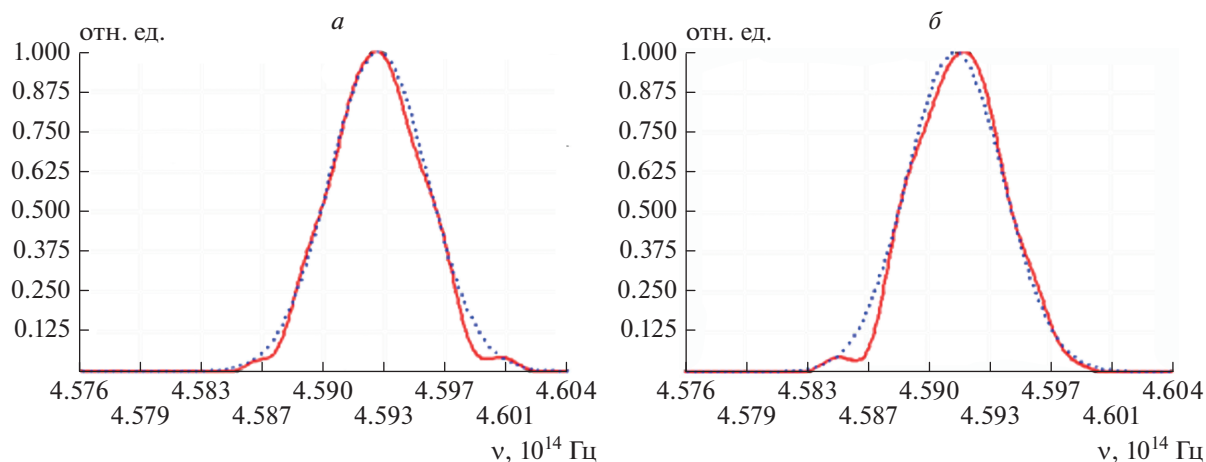
$$T = A^{1/3}. \tag{9}$$

Особенностью проводимых в рамках настоящей работы исследований является то, что линии, огибающие спектр излучения ЛД, с центральными частотами  $\nu_{0i}$  анализируются в широ-

ком диапазоне значений тока накачки: от 940 до 980 мА. Выбор этого диапазона обусловлен тем, что в его границах наблюдается значительная трансформация спектра излучения ЛД.

На рис. 2 приведены спектральные линии излучения при двух характерных значениях тока накачки: 940 и 980 мА. При токе накачки 940 мА наблюдаются 4 канала генерации, а при токе накачки 980 мА – 5 каналов. Появление 5-го канала генерации приводит к тому, что часть энергии излучения, ранее перераспределявшаяся между 4-мя каналами генерации, переходит в пятый канал с самым большим значением  $\nu_{0i=5}$ , что и объясняет картину трансформации спектра излучения. На рис. 3 в качестве примера определения коэффициента  $A_i$  изображен контур линии с центральной частотой  $3.072 \cdot 10^{14}$  Гц при токах накачки ЛД 940 и 980 мА.

Анализ функций  $f_{расч.i} \left( \frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta \nu_i} \right)$  показал, что они близки к гауссовой функции, а значения  $A_i$  лежат в интервале от 0.89 до 0.95. Согласно (9) параметр *T* при этом изменяется от 0.962 до 0.983. Принимая во внимание, что значение  $\tau_{max}$  в партии ЛД, к которой относится и рассматриваемый прибор, равно 3450 ч, можно предположить, что его срок службы должен быть близок к 3390 ч. В настоящее время ЛД проходят ускоренные испытания с целью определения реального срока службы мощного ЛД, который исследовался в данной работе.



**Рис. 3.** Контур линии, огибающей спектр излучения в первом канале генерации LDD-10 с центральной частотой  $3.072 \cdot 10^{14}$  Гц и шириной  $0.573 \cdot 10^{12}$  Гц, при токе накачки: *a* – 940; *б* – 980 мА.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен метод прогнозирования срока службы мощных лазерных диодов путем измерений спектра излучения в первые часы их эксплуатации. Спектр излучения представляет собой суперпозицию нескольких спектров излучения отдельных каналов генерации. Анализ спектра излучения в каждом канале генерации позволяет определить значение параметра  $A_i$ , характеризующего отличие контура линии, огибающей спектр излучения в канале, от гауссова распределения. По найденным значениям параметра  $A_i$  можно прогнозировать срок службы мощных диодных лазеров.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богатов А.П., Дракин А.Е., Стратонников А.А., Коняев В.П. // Квант. электрон. 2000. Т. 30. № 5. С. 401; Bogatov A.P., Drakin A.E., Strattonnikov A.A., Konayev V.P. // Quant. Electron. 2000. V. 30. № 5. P. 401.
2. Слипченко С.О., Бондарев А.Д., Винокуров Д.А. и др. // ФТП. 2009. Т. 43. № 1. С. 119; Slipchenko S.O., Bondarev A.D., Vinokurov D.A. et al. // Semiconductors. 2009. V. 43. № 1. P. 112.
3. Слипченко С.О., Винокуров Д.А., Пихтин Н.А. и др. // ФТП. 2004. Т. 38. № 12. С. 1477; Slipchenko S.O., Vinokurov D.A., Pikhtin N.A. et al. // Semiconductors. 2004. V. 38. № 12. P. 1430.
4. Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Фетисова Н.В. и др. // ФТП. 2009. Т. 43. № 12. С. 1646; Lyutetskiy A.V., Pikhtin N.A., Fetisova N.V. et al. // Semiconductors. 2009. V. 43. № 12. P. 1602.
5. Жуков А.Е. Физика и технология полупроводниковых наноструктур. СПб.: Элмор, 2007.
6. Воробьев Л., Софронов А., Фирсов Д. и др. // Фотоника. 2012. № 1(31). С. 20.
7. Близнюк В.В., Брит М.А., Гадаев И.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 12. С. 1666; Bliznyuk V.V., Brit M.A., Gadaev I.S. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. № 12. P. 1453.
8. Близнюк В.В., Коваль О.И., Паршин В.А. и др. // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2018. № 6. С. 1860501.
9. Близнюк В.В., Паршин В.А., Коваль О.И. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 11. С. 1504; Bliznyuk V.V., Parshin V.A., Koval O.I. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. № 11. P. 1367.