ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 2, с. 255–260

УДК 621.315.592:621.373

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ДЕГРАДАЦИИ МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ДИОДА ПО ЗАВИСИМОСТИ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ВАРИАЦИЙ ТОКА НАКАЧКИ

© 2021 г. В. В. Близнюк[1, *], В. А. Паршин[1], А. Г. Ржанов[2], А. Е. Тарасов[1]

[1]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия*

[2]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова", физический факультет, Москва, Россия*

**E-mail: 40595141@mail.ru*

Поступила в редакцию 28.08.2020 г.
После доработки 25.09.2020 г.
Принята к публикации 28.10.2020 г.

Предложена методика измерения темпа деградации мощного непрерывного лазерного диода с широким контактом путем контроля состояния его гетероструктуры через каждые пятьдесят часов наработки. В качестве контролируемого параметра используется количество и структура каналов генерации лазера. Рассмотрен механизм деградации структуры лазерного диода, проявляющийся во временно́й зависимости числа каналов генерации.

DOI: 10.31857/S036767652102006X

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые лазерные диоды (ЛД) с квантово-размерными гетероструктурами и мощностью непрерывной генерации от нескольких сотен милливатт до единиц ватт нашли широкое применение в разных областях науки и техники [1–5]. Важнейшим технико-экономическим параметром ЛД является срок службы. Именно поэтому разработке новых методик контроля состояния гетероструктуры ЛД и прогнозирования их срока службы, а также совершенствованию таких методик на протяжении нескольких десятилетий уделяется самое пристальное внимание.

Известны несколько методик контроля состояния мощных ЛД и прогнозирования их срока службы [6–10]. Чаще других используется классическая методика, основанная на измерении мощности излучения ЛД при постоянном значении тока накачки. Срок службы в этом случае определяется как время, через которое мощность падает до определенного, заранее установленного уровня. С измерениями мощности излучения ЛД связана и другая методика, когда время наработки определяется как время, через которое поддержание мощности на постоянном уровне путем увеличения тока накачки, становится невозможным [11].

Значительно реже для прогнозирования срока службы ЛД используются методика, основанная на временно́й зависимости диаграммы направленности [12], и методика, основанная на анализе временных зависимостей степени линейной поляризации излучения (контраста) [13].

Однако реализация перечисленных выше методик связана со значительным расходованием ресурса лазеров и необходимостью использования статистических методов обработки большого массива данных, полученных в результате диагностики партии приборов, изготовленных в том же технологическом цикле, что и исследуемые в настоящей работе.

Проблема определения качества отдельно взятого прибора электронной техники, каким, в частности, является активный элемент ЛД, стоит особенно остро при серийном производстве изделий [14].

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ МОЩНОГО ЛД ПО ЧИСЛУ КАНАЛОВ ГЕНЕРАЦИИ

Определенные шаги для решения этой проблемы были сделаны в работе [10] при тестировании партии мощных ЛД, изготовленных в едином технологическом цикле. При этом учитывалось, что ранее разработанная нами методика определения состояния гетероструктуры ЛД по его спектральной характеристике может быть использо-

вана только в том случае, если имеет место режим генерации на фундаментальной моде. Для мощных ЛД характерен сложный вид огибающей спектра излучения. Поэтому анализ этого спектра с целью определения состояния гетероструктуры ЛД проводился нами путем разложения его на составляющие.

На момент начала тестирования лазеров время наработки каждого прибора варьировалось от 270 до 310 ч. В течение 40–80 ч с начала тестирования контур линии $f_{\text{эксп}}(\nu)$, огибающей спектр излучения ЛД, можно было представить как суперпозицию трех контуров линий $f_{\text{расч.}i}\left(\frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$ с центральными частотами $\nu_{01} < \nu_{02} < \nu_{03}$. Каждый контур соответствовал пространственному каналу генерации в активной области лазерного диода. Анализ расчетных функций $f_{\text{расч.}i}\left(\frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$ показал, что только в том случае, когда все три линии симметричны относительно частот ν_{01}, ν_{02}, ν_{03}, выполняется условие:

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

где N – число каналов генерации. В данном случае $N = 3$.

В процессе тестирования ЛД наблюдалось изменение формы спектральной линии ЛД $f_{\text{эксп}}(\nu)$, обусловленное увеличением числа каналов генерации с трех до четырех.

Такого рода изменения спектра излучения ЛД мы связываем с вариациями коэффициента нелинейной рефракции полупроводника квантовой ямы и одновременно длины когерентности излучения в каналах при наработке часов ЛД. Проведенные нами расчеты показали, что меньшее число каналов генерации соответствует большей степени когерентности излучения ЛД. а увеличение числа каналов $N_{\text{кан}}$ означает, что длина когерентности $L_{\text{ког}}$ излучения в каналах уменьшается [7]:

$$N_{\text{кан}} = W\sqrt{\frac{2\pi n}{\lambda_0 L_{\text{ког}}}}, \quad (2)$$

где $n = 3.56$ – эффективный показатель преломления лазерного волновода для фундаментальной латеральной моды, $W = 100$ мкм – ширина активной области, λ_0 – средняя длина волны излучения ЛД. В данной работе исследовался ЛД с измеренным значением $\lambda_0 = 976$ нм (средняя частота $\nu_0 = 3.075 \cdot 10^{14}$ Гц).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СОСТОЯНИЯ СТРУКТУРЫ И ТЕМПА ДЕГРАДАЦИИ МОЩНЫХ ЛД МОДЕЛИ АТС-С200-100-980

Далее приводятся результаты исследований состояния структуры и темпа деградации ЛД модели АТС-С200-100-980 с драйвером LDD-10. Этот ЛД с контактом 100 мкм имел измеренное значение порогового тока накачки $I_{\text{пор}} = 497$ мА и штатное значение мощности излучения $P = 500$ мВт при двойном превышении порога. В качестве контролируемого параметра использовалась спектральная характеристики новой партии ЛД, изготовленных по той же технологии и имеющие ту же конструкцию, что и лазеры, исследованные в [10]. Важным фактором проведения исследований является то, что время наработки всех лазеров было известно точно и не превышало 10 ч. В первые несколько часов исследований у всех ЛД были зафиксированы только два канала генерации с центральными частотами ν_{01} и ν_{02}. Согласно (2) это означает, что излучение ЛД в начальной стадии эксплуатации характеризуется большой длиной когерентности, которая огласно (2) составляла $L_{\text{ког}} = 5.6$ см.

Через 200–250 ч эксплуатации в ЛД возникал третий канал генерации, что означает снижение длины когерентности до величины равной $L_{\text{ког}} = 2.5$ см. В [10] показано, что каждому каналу генерации с номером i в спектре излучения соответствует контур линии $f_{\text{расч.}i}\left(\frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$ с центральной частотой ν_{0i}. Поэтому появление третьего канала генерации приводит к тому, что контур линии $f_{\text{эксп}}(\nu)$, огибающей спектр излучения ЛД, представляет собой суперпозицию трех контуров линий $f_{\text{расч.}i}\left(\frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$ с центральными частотами $\nu_{01} < \nu_{02} < \nu_{03}$.

Вид функции $f_{\text{эксп}}(\nu)$, а значит, и функций $f_{\text{расч.}i}\left(\frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$ зависит от тока накачки ЛД. Анализ расчетных функций $f_{\text{расч.}i}\left(\frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$ показывает, что все три линии симметричны относительно частот ν_{01}, ν_{02} и ν_{03} только при определенном значении тока накачки. И только при этом токе расчетные функции $f_{\text{расч.}i}\left(\frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$ хорошо аппроксимируются гауссовой функцией, как показано на рис. 1.

При увеличении наработки ЛД до 350 ч при токе накачки $I = 940$ мА, что составляет $I = 1.89 \cdot I_{\text{пор}}$, в спектре излучения ЛД формируется четвертый

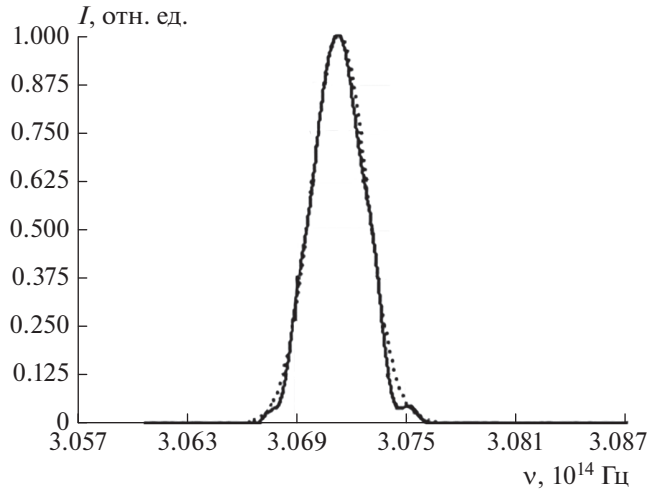

Рис. 1. Контур линии $f_{\text{расч.1}}\left(\frac{\nu-\nu_{01}}{\Delta\nu_1}\right)$, огибающей спектр излучения в первом канале генерации лазерного диода АТС-С200-100-980 с наработкой 350 ч при токе накачки 940 мА.

канал генерации (рис. 2*а*). Согласно (2) это означает, что длина когерентности излучения ЛД продолжает уменьшаться до значения $L_{\text{ког}} = 1.4$ см. Увеличение числа нефазированных каналов приводит к соответствующему увеличению числа спектральных компонентов излучения ЛД. Это связано с тем, что полоса усиления имеет довольно большую (5 нм по длине волны и 1.6 ТГц по частоте) спектральную ширину и должна заполняться новыми полосами излучения, соответствующими разным каналам, вплоть до их существенного перекрытия. Ширина спектральной полосы отдельного канала при увеличении их количества также возрастает, что видно при сравнении рис. 2*а* и 2*б*.

Представление спектра излучения ЛД как суммы спектров излучения всех каналов генерации позволяет рассчитывать параметры качества A_i в пределах каждого канала $f_{\text{расч.}i}\left(\frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$ по той же методике, по которой рассчитывался параметр A одномодового лазера в [9, 15]. Так, численный анализ функций $f_{\text{расч.}i}\left(\frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$ осуществляется путем их сравнения с гауссовыми функциями $f_G\left(\frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$ в пределах ширины i-ой линии $\Delta\nu_i$. Для проведения такого анализа в пределах каждого канала генерации вводится параметр A_i, значение которого рассчитывается по формуле:

$$A_i = 1 - \int_{\nu_{1/2i\,\min}}^{\nu_{1/2i\,\max}} \left(\frac{\left| D\left(\frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right) - 1 \right|}{\Delta\nu_i} \right) d\nu, \qquad (3)$$

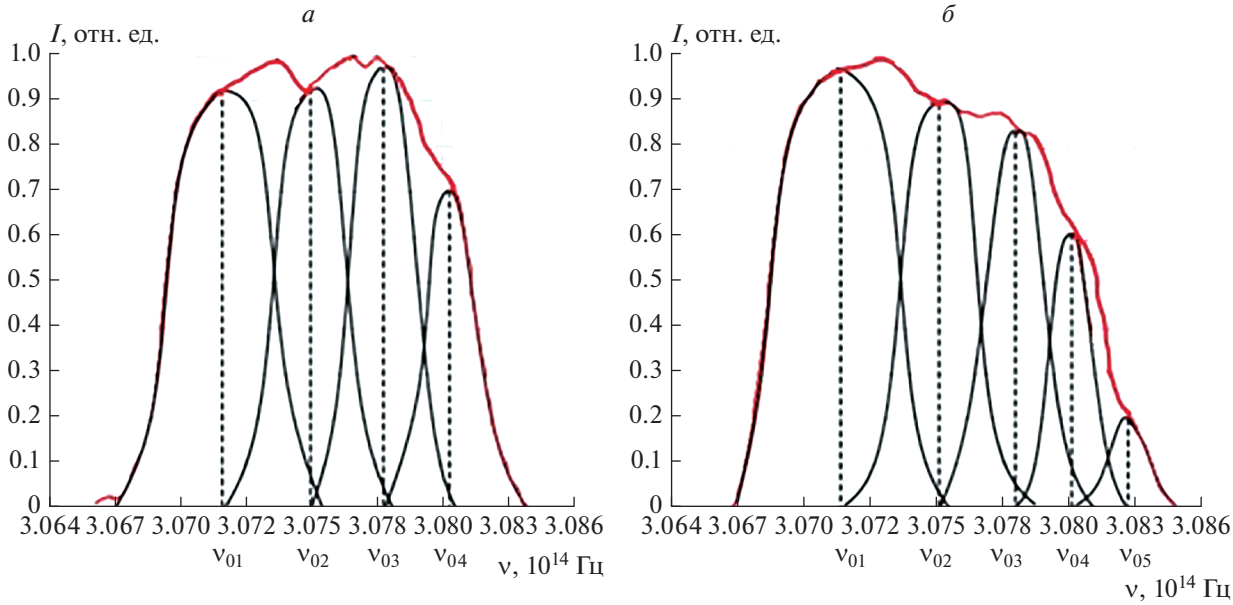

Рис. 2. Спектр излучения лазерного диода АТС-С200-100-980 с наработкой 350 ч $f_{\text{эксп}}(\nu)$, при двух характерных значениях тока накачки: (*а*) $I_{\text{нак. 1}} = 940$ мА, (*б*) $I_{\text{нак. 2}} = 980$ мА.

где $\nu_{1/2i\,\max}$ и $\nu_{1/2i\,\min}$ – частоты, которые определяются из условия:

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

и

$$D\left(\frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right) = \frac{f_{\text{расч.}i}\left(\frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)}{f_G\left(\frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)}, \quad (5)$$

где ν_{0i} – центральная частота i-го спектрального диапазона частот $\Delta\nu_i$, в котором сравниваются 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 ν_{0i} определяется по формуле:

$$\nu_{0i} = \frac{1}{2}\left(\nu_{1/2i\,\max} + \nu_{1/2i\,\min}\right). \quad (6)$$

Нормированная гауссова функция имеет вид:

$$f_G\left(\frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right) = \exp\left[-4\cdot\ln 2\cdot\left(\frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)^2\right]. \quad (7)$$

Из (3) и (5) следует, что значение параметра A_i стремится к единице, когда функция $f_{\text{расч.}i}\left(\frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$, может быть хорошо аппроксимирована гауссовой функцией (7).

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

Особенностью проводимых в рамках настоящей работы исследований является то, что линии, огибающие спектр излучения ЛД, с центральными частотами ν_{0i} анализируются при фиксированных значениях времени наработки лазера в широком диапазоне значений его тока накачки: от 940 до 980 мА. Выбор этого диапазона обусловлен тем, что в его границах наблюдается значительная трансформация спектра излучения ЛД.

При 350 ч наработки и токе накачки 940 мА наблюдаются 4 канала генерации, а при токе накачки 980 мА – уже 5 каналов (рис. 2*б*). Появление 5-го канала генерации приводит к тому, что часть энергии излучения, ранее перераспределявшаяся между четырьмя каналами генерации, переходит в пятый канал с центральной частотой ν_{05}, что и объясняет картину трансформации спектра излучения. На рис. 1 изображен контур первой линии генерации при токе накачки ЛД 940 мА с центральной частотой $3.072\cdot10^{14}$ Гц. Видно, что кривая $f_{\text{расч.}1}\left(\frac{\nu-\nu_{01}}{\Delta\nu_1}\right)$ практически полностью совпадает с функцией $f_G\left(\frac{\nu-\nu_{01}}{\Delta\nu_1}\right)$. Аналогичная картина наблюдается во всех четырех контурах генерации на рис. 2*а*. Из этого следует, что ток накачки ЛД 940 мА является оптимальным, а дальнейшие наблюдения за процессом его медленной деградации нужно проводить, поддерживая ток на этом уровне.

Численный анализ функций $f_{\text{расч.}i}\left(\frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$ при значениях $i = 1, 2, 3$ и 4, то есть во всех четырех каналах генерации показывает, что соответствующие значения A_i лежат в интервале от 0.93 до 0.95. Из этого следует, что режим генерация излучения в каждом канале близок к одномодовому, а многомодовый пучок излучения формально можно представить как одновременную генерацию несфазированных одномодовых пучков. Из теории дифракции следует, что по мере увеличения числа каналов генерации (уменьшении поперечных размеров каждого канала) должна возрастать степень дефазировки отдельных областей лазерного излучения внутри резонатора ЛД, что есть следствие уменьшения длины когерентности излучения в каждом канале ЛД. Таким образом, в качестве критерия деградации конкретного лазера целесообразно использовать наблюдаемое число каналов генерации, о котором можно судить по числу линий в измеренном спектре излучения ЛД.

Порядок проведения количественного анализа функции $f_{\text{эксп}}(\nu)$ является общим для всех мощных ЛД, рассматриваемых в настоящей работе, и поэтому подробно рассмотрен на примере лазерного диода ATC-C200-100-980 с драйвером LDD-10.

Особый интерес представляют результаты количественного анализа функции $f_{\text{эксп}}(\nu)$, описывающей форму линии, огибающей спектр излучения лазеров модели KLM-H980-200-5 с мощностью излучения 200 мВт. Для этой модификации ЛД установлено, что уже в первые часы их работы наблюдались три канала генерации. Согласно проведенным в настоящей работе исследованиям, это говорит о низкой когерентности излучения и, как следствие, об изначально низком качестве гетероструктур лазеров модели KLM-H980-200-5. Для

этих приборов был проведен численный анализ функций $f_{\text{расч}.i}\left(\frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$ при значениях $i = 1$, 2 и 3, то есть во всех трех каналах генерации. Он осуществлялся путем ее сравнения с гауссовой функцией $f_G\left(\frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$ в пределах ширины i-ой линии $\Delta\nu_i$ с использованием формул (3)–(7). Анализ показал, что ни одна из кривых $f_{\text{расч}.i}\left(\frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$ не была симметричной относительно соответствующих центральных частот каналов, которые рассчитывались по формуле (6). В такой ситуации было принято решение за оптимальное значение тока накачки принимать то, при котором асимметрия кривых $f_{\text{расч}.i}\left(\frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$ минимальна.

Следует отметить, что из-за асимметрии кривых $f_{\text{расч}.i}\left(\frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$ разложение спектра излучения на его компоненты значительно усложнилось и потребовалось проведение дополнительных итераций для выполнения условия (1). Кривые имели достаточно сложный вид, что и обусловило даже при оптимальном токе накачки малые значения параметров A_i. Характерные значения этих параметров варьировались от 0.82 до 0.86. Срок службы ЛД модели KLM-H980-200-5 определялся по методике, изложенной в [10]. При этом в расчетной формуле за значение параметра A принималось минимальное значение из четырех рассчитанных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что в качестве параметра, по которому можно определить состояние и скорость деградации ЛД с определенным временем наработки, следует использовать количество и качество спектров каналов генерации излучения. Показано, что увеличение числа каналов генерации обусловлено уменьшением длины когерентности излучения ЛД, что служит явным признаком деградации лазера.

Темп деградации возрастает при увеличении тока накачки. Это подтверждается возгоранием дополнительного канала генерации ЛД при фиксированном времени его наработки. Разработан алгоритм определения оптимального значения тока накачки. При его разработке учитывалось, что спектр излучения ЛД представляет собой суперпозицию спектров излучения отельных 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 гауссовой функции. Если все значения параметра A_i близки к единице, то это свидетельствует о высоком качестве гетероструктуры ЛД.

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., Stratonnikov A.A., Konyaev V.P.* // Quant. Electron. 2000. V. 30. No 5. P. 401.
2. *Слипченко С.О., Бондарев А.Д., Винокуров Д.А. и др.* // ФТП. 2009. Т. 43. № 1. С. 119.
3. *Слипченко С.О., Винокуров Д.А., Пихтин Н.А. и др.* // ФТП. 2004. Т. 38. № 12. С. 1477.
4. *Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Фетисова Н.В. и др.* // ФТП. 2009. Т. 43. № 12. С. 1646.
5. *Жуков А.Е.* Физика и технология полупроводниковых наноструктур. СПб.: Элмор, 2007, 304 с.
6. *Воробьев Л.Е., Софронов А., Фирсов Д. и др.* // Фотоника. 2012. Т. 31. № 1. 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. No 12. P. 1458.
8. *Близнюк В.В., Коваль О.И., Паршин В.А. и др.* // Уч. зап. физ. фак-та МГУ. 2018. № 6. С. 1860501.
9. *Близнюк В.В., Коваль О.И., Паршин В.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 11. С. 1504; *Bliznyuk V.V., Koval O.I., Parshin V.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No 11. P. 1367.
10. *Близнюк В.В., Коваль О.И., Паршин В.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 2. С. 225; *Bliznyuk V.V., Koval O.I., Parshin V.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No 2. P. 173.
11. *Кейси Л., Паниш М.* Лазеры на гетероструктурах. Т. 2. М.: Мир, 1981. 299 с.
12. *Мифтахутдинов Д.Р., Богатов А.П., Дракин А.Е.* // Квант. электрон. 2010. № 7. С. 583; *Miftakhutdinov D.R., Bogatov A.P., Drakin A.E.* // Quant. Electron. 2010. V. 40. No 7. P. 583.
13. *Близнюк В.В., Костина О.О., Крайнов И.В. и др.* // Сб. докладов XXII межд. конф. “Лазеры. Измерения. Информация–2012”. (СПб., 2012). С. 224.
14. *Сидоров В.Г.Шмидт Н.П.* // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Физ.-мат. науки. 2013. № 2(170). С. 71.
15. *Bliznyk V.V., Berezovskaya N.V., Brit M.A. et al.* // Phys. Wave Phenom. 2017. V. 25. No 3. P. 214.

Determination of the degradation rate in a high-power laser diode by the radiation spectrum dependence from the bias current variations

V. V. Bliznyuk[a, *], V. A. Parshin[a], A. G. Rzhanov[b], A. E. Tarasov[a]

[a] *National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, 111250 Russia*

[b] *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: 40595141@mail.ru*

A method is proposed for measuring the degradation rate of a high-power continuous-wave laser diode with a wide contact by monitoring the state of its heterostructure every fifty hours of operation. The number and structure of laser generation channels is used as a controlled parameter. The mechanism of degradation of the laser diode structure, which is manifested in the time dependence of the number of generation channels, is considered.