

УДК 621.315.592:621.373

## ТОНКАЯ И ГРУБАЯ СТРУКТУРЫ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ ПРИ МЕДЛЕННОЙ ДЕГРАДАЦИИ

© 2024 г. В. В. Близнюк<sup>1, \*</sup>, В. А. Паршин<sup>1</sup>, А. Г. Ржанов<sup>2</sup>, О. И. Семенова<sup>1</sup>, А. Е. Тарасов<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 образования  
“Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова”, физический факультет, Москва, Россия

\*E-mail: 40595141@mail.ru

Поступила в редакцию 29.08.2023 г.

После доработки 15.09.2023 г.

Принята к публикации 29.09.2023 г.

Показано, что в спектре излучения мощного лазерного диода можно выделить тонкую и грубую структуру. Установлена и экспериментально проверена связь между характеристиками спектра и внутренними параметрами структуры лазера, что наблюдалось в процессе деградации прибора. Показано влияние потерь в резонаторе и когерентности излучения лазера как на тонкую, так и на грубую структуру его спектра.

DOI: 10.31857/S0367676524010054, EDN: SBDHRY

### ВВЕДЕНИЕ

Благодаря стремительному развитию технологии изготовления мощных полупроводниковых лазерных диодов (МЛД) стало возможным значительно улучшить их технические параметры и, как следствие, расширить область применения МЛД [1]. Эффективность использования МЛД во многом зависит от его важнейшего технико-экономического параметра — срока службы. Поэтому разработке новых методик прогнозирования срока службы МЛД уделяется самое пристальное внимание.

К настоящему времени разработан целый ряд методик контроля состояния МЛД и прогнозирования их срока службы [2–11]. Чаще других используется классическая методика, основанная на измерении мощности излучения МЛД при постоянном значении тока накачки. Срок службы в этом случае определяется как время, через которое мощность падает до определенного, заранее установленного уровня [9].

С измерениями мощности излучения МЛД связана еще одна методика, когда время наработки определяется как время, через которое поддержание мощности на постоянном уровне путем увеличения тока накачки становится невозможным [9]. Значительно реже для прогнозирования срока службы МЛД используются методы, основанные на временной зависимости диаграммы направленности излучения [10], и методика, основанная на

анализе временных зависимостей степени линейной поляризации излучения (контраста) [11].

Рассмотренные выше методики позволяют определить срок службы некоторого числа экземпляров из партии МЛД, а потом распространить полученные результаты на всю партию [6]. Однако реализация перечисленных выше методик связана со значительным расходом ресурса лазеров и необходимостью использования статистических методов обработки большого массива данных.

Первые признаки деградации МЛД проявляются через две-три тысячи часов наработки. Поэтому для диагностики используется метод ускоренного старения приборов при повышенной температуре окружающей среды. В ходе ускоренных испытаний на старение МЛД стремительно расходуется их ресурс, что не позволяет решить проблему определения качества конкретного МЛД без расходования значительной части ресурса лазеров [12].

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ МОЩНОГО МЛД ПО ЧИСЛУ КАНАЛОВ ГЕНЕРАЦИИ

Определенные шаги для решения этой проблемы были сделаны в работе [3] при тестировании партии МЛД, изготовленных в едином технологическом цикле. Использовалась методика определения состояния гетероструктуры МЛД по числу каналов генерации. При этом ранее разработанные

методы определения состояния гетероструктуры МЛД по его спектру могут быть использованы только в том случае, если имеет место режим генерации на фундаментальной моде [3]. Но для МЛД характерен сложный вид спектра излучения. Поэтому анализ этого спектра проводился путем разложения его на квазиодномодовые компоненты с последующим анализом их временной трансформации. Показано, что увеличение числа каналов генерации обусловлено уменьшением длины когерентности излучения МЛД — явным признаком деградации лазера [3].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СОСТОЯНИЯ ПАРТИИ МОЩНЫХ МЛД МОДЕЛИ KLM-N980-120-5

В экспериментах, проведенных за последний год, мы впервые анализировали деградацию лазера, основываясь не только на грубой структуре спектра, но и на тонкой. Исследовался спектр излучения пяти МЛД модели KLM-N980-120-5, изготовленных в едином технологическом цикле. Лазеры, согласно сведениям, приведенным в их технических паспортах, имели порядковые номера 126, 127, 128, 129 и 130. Спектр измерялся через 10 часов наработки и через 90 часов ускоренных испытаний на старение при температуре 45°С (что эквивалентно 250 часам работы в штатном режиме). Для измерения спектра был использован спектрометр МДР-23 с разрешением 0.05 нм по длине волны.

У всех пяти МЛД штатная мощность излучения была  $P = 120$  мВт при штатном токе накачки 300 мА. Пороговые токи варьировались в пределах от 74.6 до 75.3 мА.

Процесс деградации МЛД рассмотрим на примере МЛД 129. На рис. 1 и 2 представлены спектры этого прибора до и после наработки. Видно, что спектр излучения МЛД 129 лежит в диапазоне, указанном в паспорте, —  $980 \pm 5$  нм. В этом же диапазоне длин волн находится спектр излучения и остальных МЛД. Спектр в основном представляет собой эквидистантно расположенные линии, что характерно для резонатора Фабри-Перо. Это позволяет определить тонкую структуру спектра как структуру, состоящую из пиков продольных мод МЛД. В тонкой структуре наблюдаются группы продольных мод с пиками большой интенсивности. Огибающие таких групп пиков представляют собой элементы грубой структуры спектра МЛД, соответствующие разным пространственным каналам генерации, рассмотренным нами ранее в работах [5, 6]. В процессе деградации МЛД 129 наблюдаются два процесса: появление в грубом спектре двух новых огибающих групп пиков большой интенсивности и увеличение спектральной ширины линий продольных мод. На рис. 2 также видно, что внутри огибающих одновременно происходит уширение

линий тонкой структуры спектра — резонансов продольных мод. Заметим, что общее число генерируемых продольных мод МЛД при деградации увеличивается и составляет для рассматриваемого лазера несколько десятков штук.

На момент начала тестирования партии лазеров время наработки всех приборов не превышало 10 часов. Анализ спектров излучения пяти МЛД показал, что в спектре излучения лазеров с порядковыми номерами 126 и 129 можно выделить один и два канала генерации соответственно, а в спектре излучения лазеров с порядковыми номерами 127, 128 и 130 — три канала генерации.

Через 90 ч ускоренных испытаний партии лазеров в спектре МЛД 126 сохранялся один канал генерации, в спектре МЛД 129, как это было отмечено выше, возникло еще два канала генерации (рис. 2). До четырех возрастало и число каналов генерации МЛД с порядковыми номерами 127, 128 и 130. Таким образом, для всех МЛД, кроме МЛД 126, наблюдалось увеличение числа каналов генерации.

Распад излучения на отдельные каналы генерации в случае увеличения количества этих каналов указывает, по нашему мнению, на ухудшение состояния гетероструктуры. Характерно, что этот распад протекает на начальной стадии эксплуатации лазеров. Это позволяет сделать вывод, что методика определения состояния гетероструктуры конкретного серийного мощного диодного лазера по количеству каналов генерации излучения применима для быстрой ресурсосберегающей диагностики излучения диодных лазеров.

Как будет показано ниже, объясняется это тем, что в процессе деградации увеличиваются потери  $\alpha_{\text{внутр}}$  в резонаторе и в связи с этим уменьшается средняя длина когерентности  $L_{\text{ког}}$  излучения продольных мод [5].

Подробное изучение спектров МЛД позволяет не только определить изменения коэффициента внутренних потерь и средней длины когерентности излучения МЛД в процессе деградации, но и сделать выводы о таких параметрах лазера, как длина резонатора  $L$ , ширина активной области  $W$ , толщина квантовой ямы  $d$ , средний эффективный показатель преломления лазерного волновода  $n_{\text{эфф}}$ , коэффициенты отражения зеркал  $R_1$  и  $R_2$ . При этом точность будет составлять величину 10–20%, которая тем не менее вполне подходит для оценок. В силу довольно большого технологического разброса материальных и геометрических параметров многослойной структуры МЛД такую точность оценок можно считать удовлетворительной. Далее для определенности в оценках примем значения  $R_1 = 0.3$ ,  $R_2 = 0.98$ ,  $n_{\text{эфф}} = 3.6$ , характерные для МЛД на соединениях InGaAs, рассчитанных на длину волны излучения в диапазоне 950–1000 нм в зависимости от пропорций составляющих слоев

атомов [8]. Выбор коэффициентов отражения об- суждается далее. Остановимся для определенности на спектрах МЛД 129.

### РАЗМЕРЫ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ ЛАЗЕРНОГО РЕЗОНАТОРА И СПЕКТРЫ

#### Продольные моды — тонкий спектр

Измерения показали, что расстояние между продольными модами Фабри-Перо в среднем равно  $\Delta\lambda_{\text{ФП}} \approx 0.4$  нм, и это соответствует длине резонатора  $L = 330$  мкм и  $\lambda_0 = 980$  нм, согласно известному соотношению:

$$L \approx \frac{\lambda_0^2}{2n_{\text{эфф}}\Delta\lambda_{\text{ФП}}}, \quad (1)$$

что соответствует продольной моде с номером  $M = 2445$ :

$$M \approx \frac{2n_{\text{эфф}}L}{\lambda_0}, \quad (2)$$

или

$$M \approx \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda_{\text{ФП}}}. \quad (3)$$

Ширина спектральных пиков продольных мод  $\Delta\lambda_{\text{рез}}$  на половине интенсивности может быть определена по имеющимся у нас данным только приблизительно:  $\Delta\lambda_{\text{рез}} \approx 0.08 - 0.11$  нм. Эта величина связана с добротностью  $Q_x$  и внутренними потерями  $\alpha_{\text{внутр}}$  холодного резонатора МЛД [13]:

$$Q_x = \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda_{\text{рез}}}, \quad (4)$$

$$Q_x = M\pi \left( L\alpha_{\text{внутр}} + \frac{1}{2} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right)^{-1}, \quad (5)$$

откуда из (4) мы получаем значения  $Q_x = 8900 - 12250$ . Определим значения  $\Delta\lambda_{\text{рез}}$  и  $Q_x$  более точно. При условии отсутствия внутренних потерь ( $\alpha_{\text{внутр}} = 0 \text{ см}^{-1}$ ) из (5) получаем возможные значения коэффициентов отражения зеркал в пределах  $R_1 \cdot R_2 = 0.2 - 0.5$ . Положим  $R_1 = 0.3$ ,  $R_2 = 0.98$ , что будет соответствовать случаю, когда первое зеркало не имеет отражающего покрытия, а второе обладает практически полным отражением. С точки зрения технологичности изготовления МЛД такой вариант представляется вполне реальным. Будем считать этот вариант предельной по потерям точкой. Согласно (5), этот набор параметров соответствует максимальной добротности  $Q_x \approx 12545$  при  $\alpha_{\text{внутр}} = 0 \text{ см}^{-1}$  и  $\Delta\lambda_{\text{рез}} \approx 0.078$  нм. Реальной картине работы МЛД соответствует  $\alpha_{\text{внутр}} > 0 \text{ см}^{-1}$ . Так, если начальные значения внутренних потерь

составят, например,  $\alpha_{\text{внутр}} = 5 \text{ см}^{-1}$ , то  $Q_x \approx 9860$ , что будет соответствовать  $\Delta\lambda_{\text{рез}} \approx 0.099$  нм, что вполне укладывается в измеренные значения. Тем самым мы определили возможные значения параметров  $R_1 = 0.3$ ,  $R_2 = 0.98$ ,  $\alpha_{\text{внутр}} = 5 \text{ см}^{-1}$ . Эти значения мы будем использовать в дальнейших оценках.

#### Каналы генерации — грубый спектр

Мы выяснили, что частотный спектр МЛД состоит из нескольких групп линий, ширина и добротность которых определяются потерями в резонаторе  $\alpha_{\text{внутр}}$  и коэффициентами отражения зеркал  $R_1$  и  $R_2$  (5). Каждая спектральная группа соответствует одному из пространственных каналов генерации, число которых  $N_{\text{кан}}$  зависит от средней длины когерентности излучения канала  $L_{\text{ког}}$  и ширины активной области  $W$  [14]:

$$N_{\text{кан}} \approx W \sqrt{\frac{2\pi n_{\text{эфф}}}{\lambda_0 L_{\text{ког}}}}, \quad (6)$$

откуда длина когерентности:

$$L_{\text{ког}} \approx \frac{2\pi n_{\text{эфф}}}{\lambda_0} \left( \frac{W}{N_{\text{кан}}} \right)^2, \quad (7)$$

где  $\lambda_0 = 980$  нм — средняя длина волны излучения МЛД в вакууме.

На рис. 1 мы наблюдаем две группы мод излучения, поэтому будем полагать число каналов генерации равным двум. Ширину области генерации мы точно не знаем, но попробуем ее оценить, исходя из следующих соображений. Сначала оценим среднюю длину когерентности излучения МЛД, основываясь на величинах  $Q_x = 9860$  и  $\Delta\lambda_{\text{рез}} \approx 0.099$  нм:

$$L_{\text{ког}} \approx Q_x \lambda_0, \quad (8)$$

откуда имеем  $L_{\text{ког}} = 0.97$  см.

Теперь, исходя из соотношений (6), (7) можно определить ширину каналов генерации и тем самым сделать оценку всей ширины активной области МЛД [14, 15]:

$$w_0 = \sqrt{\frac{\lambda_0 L_{\text{ког}}}{2\pi n_{\text{эфф}}}}, \quad (9)$$

$$W = N_{\text{кан}} \sqrt{\frac{\lambda_0 L_{\text{ког}}}{2\pi n_{\text{эфф}}}}. \quad (10)$$

Ранее мы выяснили, что в начале исследования число каналов генерации было равно двум ( $N_{\text{кан}} = 2$ ). В результате оценки, исходя из соотношений (5), (9), (10), получается ширина контакта (области генерации) МЛД  $W \approx 40$  мкм, а ширина одного канала генерации  $w_0 \approx 20$  мкм.

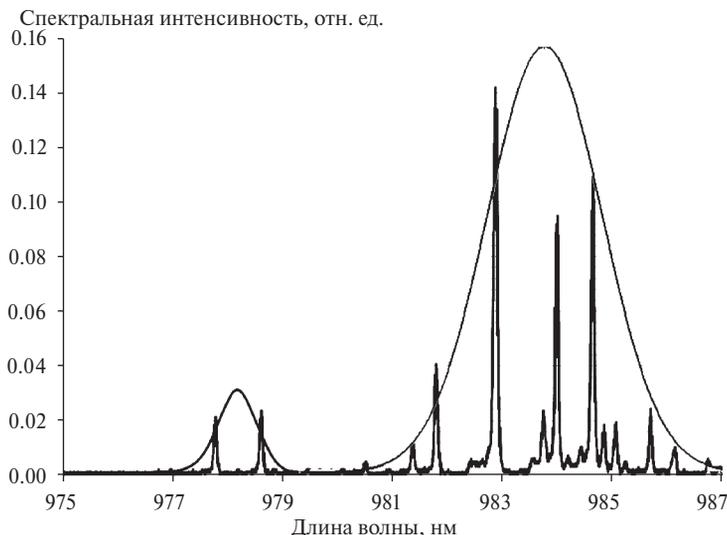


Рис. 1. Спектральные характеристики МЛД 129 модели KLM-N980-120-5 на начальном этапе эксплуатации.

### Толщина слоя квантовой ямы

Использование в качестве активного слоя квантовых ям вызвано тем, что энергетическая зона, в которой концентрируются неравновесные носители, выбирается в  $10^2-10^3$  раз тоньше, чем у объемного активного слоя. Толщина квантовой ямы однозначно задает максимальную ширину спектра МЛД. В спектрах, изображенных на рис. 1, 2, эта ширина составляет  $\Delta\lambda_{\text{общ}} \approx 8-10$  нм, что при рассматриваемых параметрах МЛД соответствует пространственной толщине квантовой ямы  $d_{\text{кя}} \approx 18-20$  нм.

Таким образом, в данном разделе по экспериментальным данным о спектре лазера (рис. 1) мы приблизительно определили тип МЛД и базовые характеристики его структуры.

### СПЕКТР И ПАРАМЕТРЫ МЛД ПОСЛЕ НАРАБОТКИ

Обратимся к рис. 2. Как отмечалось выше, мы наблюдаем несколько основных особенностей, связанных с деградацией МЛД. Во-первых, это появление в спектре большого количества новых пиков, которые образуют уже не две, а четыре группы линий ( $N_{\text{кан}} = 4$ ) излучения, отвечающих за каналы генерации. Во-вторых, одновременно с обогащением спектра происходит уширение спектральных линий продольных мод. В-третьих, появляются неэквидистантные составляющие спектра, отвечающие либо за поперечные латеральные моды, либо за взаимодействие между каналами. Мы остановимся только на первых двух особенностях.

Самое простое объяснение трансформации спектра при деградации МЛД заключается в том, что

постоянный нагрев области квантовой ямы, где происходит генерация излучения, вызывает образование в ее кристаллической структуре и в соседних с ней слоях дислокаций, число которых растет со временем. Это сначала приводит к росту внутренних потерь  $\alpha_{\text{внутр}}$ , а затем к изменениям значений параметров, рассчитанных в предыдущем разделе.

Величины  $W = 40$  мкм,  $L = 330$  мкм,  $R_1 = 0.3$ ,  $R_2 = 0.98$  измениться не могли. Величины  $M = 4995$ ,  $d_{\text{кя}} = 18$  нм и  $n_{\text{эфф}} = 3.6$  при оценках имеют средние значения, поэтому изменяются незначительно. Существенные изменения претерпевают лишь величины  $\Delta\lambda_{\text{рез}}$  и  $N_{\text{кан}}$  и связанные с ними  $L_{\text{ког}}$ ,  $Q_x$ ,  $w_0$ .

Начнем с  $N_{\text{кан}} = 4$ . Использование формул (3-10) дает следующие новые значения параметров излучения:  $L_{\text{ког}} = 0.68$  см (6),  $Q_x = 6900$  (7),  $w_0 \approx 10$  мкм (8),  $\Delta\lambda_{\text{рез}} \approx 0.142$  нм (4).

Для расчета внутренних потерь воспользуемся формулой, которая получается из предыдущих соотношений (1)-(10):

$$\alpha_{\text{внутр}} = \frac{\lambda_0}{w_0^2} - \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2}. \quad (11)$$

При выводе соотношения (11) мы использовали также выражение для постоянной распространения  $\beta_M$  фундаментальной продольной моды порядка  $M$  [14]:

$$\beta_M = \frac{M\pi}{L} + \frac{i}{2} \left[ \alpha_{\text{внутр}} + \frac{1}{2L} \ln \left( \frac{1}{R_1 R_2} \right) \right] \quad (12)$$

и еще одно выражение для добротности  $Q_x$ :

$$Q_x = \frac{\text{Re}(\beta_M)}{2\text{Im}(\beta_M)}. \quad (13)$$

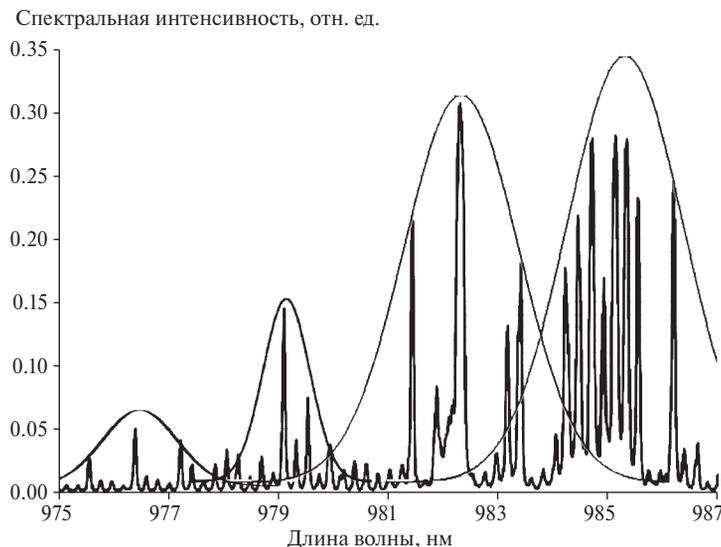


Рис. 2. Спектральные характеристики МЛД 129 модели KLM-N980–120–5 через 90 ускоренных испытаний на старение.

Получаем после наработки МЛД вместо значений  $\alpha_{\text{внутр}} = 5 \text{ см}^{-1}$ ,  $Q_x = 9860$  и  $\Delta\lambda_{\text{рез}} \approx 0.099 \text{ нм}$  значения  $\alpha_{\text{внутр}} = 79 \text{ см}^{-1}$ ,  $Q_x = 6900$  и  $\Delta\lambda_{\text{рез}} \approx 0.142 \text{ нм}$ . Все указанные величины отвечают экспериментальным данным.

Приведенные выше рассуждения носят приближенный характер, однако при наличии более подробной информации о составе полупроводниковых слоев и геометрии МЛД приведенный в работе комплекс теоретических выкладок даст более точную картину физических процессов и закономерностей, проявляющихся при длительной работе мощных лазеров.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, при деградации МЛД происходит существенный рост внутренних потерь, что выражается в ухудшении когерентности излучения, обогащении спектра излучения, появлении новых пространственных структур в виде новых несвязанных по фазе каналов генерации, уширении спектральных линий продольных мод. В данной работе мы продемонстрировали указанные явления экспериментально.

Мы установили два новых фактора, которые можно использовать для быстрой диагностики выработки ресурса лазерного диода по спектру его излучения: это ширина спектра отдельной продольной моды и количество пиков грубой структуры спектра. Одновременное использование двух (с мощностью — трех) критериев старения значительно увеличит степень достоверности и точности определения момента начала неприемлемой для данного прибора деградации и связанной с этой необходимостью замены МЛД.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков А.Е. Физика и технология полупроводниковых наноструктур. СПб.: Элмор, 2007. 304 с.
2. Воробьев Л.Е., Софронов А., Фирсов Д. и др. // Фотоника. 2012. Т. 31. № 1. С. 20.
3. 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.
4. Близнюк В.В., Паршин В.А., Ржанов А.Г., Тарасов А.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 2. С. 255; Bliznyuk V.V., Parshin V.A., Rzhanov A.G., Tarasov A.E. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 2. P. 184.
5. Близнюк В.В., Паршин В.А., Ржанов А.Г. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 11. С. 1598; Bliznyuk V.V., Parshin V.A., Rzhanov A.G. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 11. P. 1324.
6. Близнюк В.В., Паршин В.А., Ржанов А.Г., Тарасов А.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 7. С. 1008; Bliznyuk V.V., Parshin V.A., Rzhanov A.G., Tarasov A.E. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 7. P. 837.
7. Адамов А.А., Баранов М.С., Храмов В.Н. // Научн.-техн. вестн. ИТМО. 2018. Т. 18. № 3. С. 356.
8. Тарасов И.С. // Квант. электрон. 2010. Т. 40. № 8. С. 661; Tarasov I.S. // Quant. Electron. 2010. V. 40. No. 8. P. 661.
9. Кейси Л., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. Т. 2. М.: Мир, 1981. 299 с.
10. Мифтахутдинов Д.Р., Богатов А.П., Дракин А.Е. // Квант. электрон. 2010. Т. 40. № 7. С. 583;

- Miftakhutdinov D.R., Bogatov A.P., Drakin A.E.* // Quant. Electron. 2010. V. 40. No. 7. P. 583.
11. *Близнюк В.В., Костина О.О., Крайнов И.В. и др.* // Сб. докл. XXII межд. конф. “Лазеры. Измерения. Информация”. СПб., 2012. С. 224.
12. *Сидоров В.Г., Шмидт Н.М.* // Научн.-техн. вед. СПбГПУ. Физ.-мат. науки. 2013. № 2 (170). С. 71.
13. *Ржанов А.Г.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 2. С. 250; *Rzhanov A.G.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 2. P. 180.
14. *Ржанов А.Г.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 2. С. 169; *Rzhanov A.G.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 2. P. 220.
15. *Ржанов А.Г.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 4. С. 510; *Rzhanov A.G.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 4. P. 588.

## Fine and rough structure of the frequency spectrum of high-power laser diodes during slow degradation

V. V. Bliznyuk<sup>a, \*</sup>, V. A. Parshin<sup>a</sup>, A. G. Rzhanov<sup>b</sup>, O. I. Semenova<sup>a</sup>, A. E. Tarasov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, 111250 Russia*

<sup>b</sup>*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University*

*Moscow, 119991 Russia*

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

It is shown that a fine and rough structure can be distinguished in the radiation spectrum of a powerful laser diode. The relationship between the spectrum characteristics and the internal parameters of the laser structure was established and experimentally verified, which was observed during the degradation of the device. The effect of losses in the resonator and coherence of laser radiation on both the fine and rough structure of its radiation spectrum is shown.

*Keywords:* semiconductor laser, high-power laser diode, frequency spectrum, degradation, coherence.