

УДК 621.315.592:621.373

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ МОЩНОГО ИК ДИОДНОГО ЛАЗЕРА ПО ТОКОВОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЕГО СПЕКТРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

© 2022 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. И. Смирнов<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 30.06.2022 г.

После доработки 15.07.2022 г.

Принята к публикации 22.07.2022 г.

Предложена методика определения качества гетероструктуры серийного мощного лазерного диода с широким контактом по токовой зависимости количества каналов генерации излучения на начальной стадии эксплуатации. Показано, что распад излучения на отдельные нефазированные каналы генерации связан с изменением длины когерентности излучения.

DOI: 10.31857/S0367676522110060

### ВВЕДЕНИЕ

Мощные полупроводниковые лазерные диоды (ЛД) с выводом излучения через оптическое волокно широко используются в разных областях науки, техники и медицины. К таким лазерам принято относить ЛД с мощностью непрерывной генерации от сотен милливатт до нескольких ватт, а также ЛД, с полосы электрического контакта которых шириной 1 мкм снимается излучение мощностью от 10 мВт [1–5].

Современные методики тестирования гетероструктуры мощных ЛД основаны на анализе временной зависимости медленно изменяющихся параметров лазерного излучения: мощности, диаграммы направленности и степени линейной поляризации (контраста) [6–8]. При нормальном режиме работы ЛД первые признаки деградации их гетероструктуры проявляются не ранее, чем через две–три тысячи часов наработки. Поэтому в настоящее время для тестирования гетероструктуры ЛД проводятся испытания по ускоренному старению выборки приборов из партии лазеров при повышенных значениях температуры окружающей среды и тока накачки. Однако в ходе ускоренного старения ЛД они практически полностью вырабатывают свой ресурс, что не позволяет решить главную проблему, остро стоящую при серийном производстве лазеров – проблему определения качества конкретного отдельно взя-

того активного элемента ЛД из партии приборов без расходования значительной части ресурса лазера [9–14].

В данной работе предлагается методика определения состояния гетероструктуры отдельно взятого экземпляра ЛД практически без расходования его ресурса. В ее основу положена разработанная ранее методика тестирования гетероструктуры одномодовых лазерных диодов по токовой зависимости их спектральной характеристики на начальном этапе эксплуатации [13].

### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ

Мощные многомодовые ЛД с широким контактом и квантовой ямой в отличие от одномодовых ЛД, характеризуются сложной формой спектральной характеристики  $f_{\text{эксп}}(\lambda)$  (рис. 1). Поэтому анализ спектра излучения мощных ЛД  $f_{\text{эксп}}(\lambda)$  проводится путем разложения его на  $N$  составляющих ( $N$  каналов генерации) с расчетными профилями спектральных линий  $f_{\text{расч},i} \left( \frac{\lambda - \lambda_{0i}}{\Delta\lambda_i} \right)$ , характерными для излучения одномодового лазера с центральной длиной волны  $\lambda_{0i}$  [13–15]:

$$f_{\text{эксп}}(\lambda) = \sum_{i=1}^N f_{\text{расч},i} \left( \frac{\lambda - \lambda_{0i}}{\Delta\lambda_i} \right), \quad (1)$$

где  $\Delta\lambda_i$  – ширина спектра длин волн излучения  $i$ -го канала генерации.

Полученные в результате разложения расчетные профили спектральных линий  $f_{\text{расч},i}(\lambda)$  во всех каналах генерации в диапазонах  $\Delta\lambda_i$  отличаются от гауссовых кривых  $f_{G,i}\left(\frac{\lambda - \lambda_{0i}}{\Delta\lambda_i}\right)$ , характерных для излучения одномодового лазера с центральной длиной волны  $\lambda_{0i}$  [15].

Физическое обоснование такого подхода к анализу спектральной характеристики  $f_{\text{эксп}}(\lambda)$  состоит в том, что процесс разделения излучения мощных ЛД на  $N$  независимых каналов генерации наблюдался экспериментально. Разделение излучения на  $N$  независимых каналов генерации можно объяснить следующим образом [16–19]. Для того чтобы поле излучения в определенной части волновода, например, на краю активной области, могло быть связано по фазе с полем на другом краю этой области, волновому лучу необходимо несколько раз обойти резонатор. Если длина когерентности меньше оптического пути при таком обходе, то излучение разделяется на нефазированные каналы генерации. Из этого следует, что необходимым условием разделения излучения является, в первую очередь, малая (примерно до 5 см) длина когерентности ЛД [6, 15, 20], а также превышение порога генерации по всей ширине контакта  $W$  и в пределах всего спектрального контура усиления квантовой ямы. Кроме того, на формирование канала влияет нелинейный динамический эффект пространственной самофокусировки за счет зависимости рефракции от концентрации неравновесных носителей и соответствующей трансформации латерального профиля инверсии (и показателя преломления). В процессе работы лазера происходит уменьшение длины когерентности излучения. Одним из механизмов, влияющих на величину длины когерентности излучения ЛД, является диссипация излучения внутри лазерного резонатора. Увеличение потерь в резонаторе вызвано возрастанием дефектности гетероструктуры, то есть ухудшением ее качества. С другой стороны число каналов генерации однозначно связано с когерентностью. Таким образом, в качестве критерия состояния гетероструктуры конкретного лазера целесообразно использовать наблюдаемое число каналов генерации, о котором можно судить по числу основных линий в измеренном спектре излучения ЛД.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МОЩНЫХ ЛД KLM-H980-120-5

В настоящей работе анализ функции  $f_{\text{эксп}}(\lambda)$  был проведен для партии из пяти лазерных диодов KLM-H980-120-5 с порядковыми номерами с 121 по 125. У всех ЛД из этой партии ширина кон-

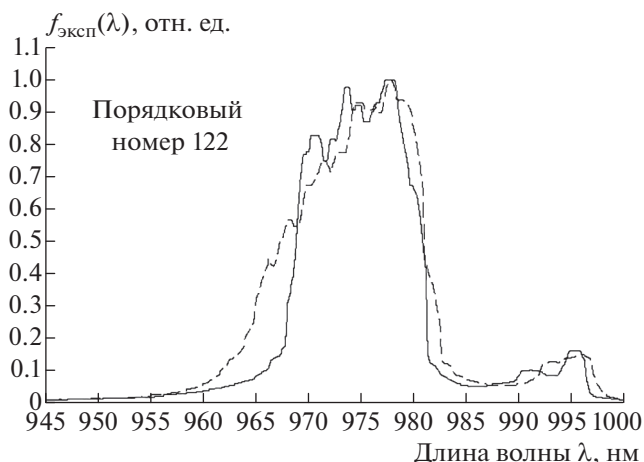


Рис. 1. Спектральные характеристики мощных ЛД модели KLM-H980-120-5 на начальном этапе эксплуатации при разных токах накачки – лазер с порядковым номером 122. Сплошная линия – ток  $I = 244$  мА, пунктирная линия –  $I = 278$  мА.

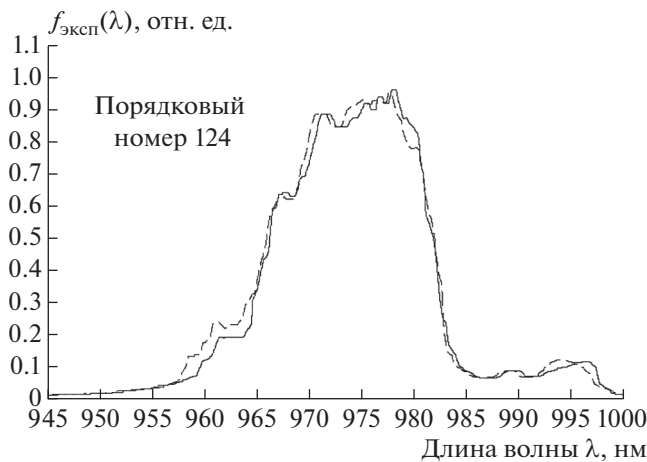
такта была равна  $W = 100$  мкм, а штатная мощность излучения –  $P = 120$  мВт.

На момент начала тестирования лазеров время наработки всех приборов не превышало 20 ч. В процессе тестирования ЛД наблюдалось существенное отличие формы спектральной линии ЛД  $f_{\text{эксп}}(\lambda)$  для приборов с разными порядковыми номерами. Анализ спектров излучения пяти ЛД по методике, изложенной в [13], показал, что в спектре излучения лазеров с порядковыми номерами 121 и 124 можно выделить три канала генерации, а в спектре излучения лазеров с порядковыми номерами 122, 123 и 125 – четыре канала.

Как было указано выше, такого рода различия спектров излучения ЛД мы связываем с вариациями от прибора к прибору коэффициента нелинейной рефракции полупроводника квантовой ямы, либо показателя потерь излучения в лазерном резонаторе, что влияет на длину когерентности излучения в каналах генерации ЛД. Наиболее вероятным механизмом уменьшения со временем длины когерентности следует считать связь между потерями излучения и добротностью лазерного резонатора, которая зависит как от коэффициентов отражения зеркал, так и от внутренних потерь в резонаторе.

Проведенные нами расчеты показали, что меньшее число каналов генерации  $N_{\text{кан}}$  соответствует большей длине когерентности излучения ЛД  $L_{\text{ког}}$ , и, наоборот, увеличение числа каналов означает, что длина когерентности излучения в каналах уменьшается [16, 17]:

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



**Рис. 2.** Спектральные характеристики мощных ЛД модели KLM-H980-120-5 на начальном этапе эксплуатации при разных токах накачки — лазер с порядковым номером 124. Сплошная линия — ток  $I = 259$  мА, пунктирная линия —  $I = 284$  мА.

где  $\lambda_0$  — средняя длина волны излучения ЛД в вакууме,  $n$  — эффективный показатель преломления фундаментальной моды.

При значениях  $n = 3.56$ ,  $W = 100$  мкм и  $\lambda_0 = 975$  нм, согласно выражению (2), для ЛД с порядковыми номерами 121 и 124 длина когерентности получается равной  $L_{\text{ког}} = 2.56$  см. Для лазеров с порядковыми номерами 122, 123 и 125 —  $L_{\text{ког}} = 1.43$  см. Таким образом, результаты расчетов указывают на низкое качество гетероструктуры ЛД с порядковыми номерами 122, 123 и 125 [13].

Ранее нами было экспериментально установлено, что с ростом тока накачки спектральная характеристика мощных ЛД  $f_{\text{эксп}}(\lambda)$  трансформируется, что приводит к изменению числа и амплитуды спектральных составляющих излучения [14, 16–19]. Такого рода трансформация спектра оказалась характерной для лазеров с порядковыми номерами 122, 123 и 125. Напротив, для лазеров с порядковыми номерами 121 и 124 наблюдается практически полное отсутствие токовой зависимости спектра излучения.

В качестве иллюстрации к сказанному на рис. 1 и 2 приведены кривые  $f_{\text{эксп}}(\lambda)$  для лазеров с порядковыми номерами 122 и 124 при разных токах накачки. Выбор этих приборов обусловлен тем, что среди всех пяти лазеров токовая зависимость спектральной характеристики ЛД с порядковым номером 122 (рис. 1) проявляется сильнее всего, а в ЛД с порядковым номером 124 (рис. 2) — практически отсутствует.

Спектры излучения всей партии ЛД измерялись после испытаний по ускоренному старению при температуре  $45^\circ\text{C}$  в течение 90 ч. Экспериментально установлено, что после таких испыта-

ний вариация спектра излучения лазеров с номерами 121 и 124 при разных токах накачки не превышает погрешности измерений, а значит, число каналов генерации остается постоянным в течение долгого времени и процесс деградации гетероструктуры протекает медленно. В спектрах излучения лазеров 122 и 123 после завершения процесса ускоренного старения отмечено формирование четвертых и пятых каналов генерации, что указывает на изначально низкое качество гетероструктуры этих лазеров.

Таким образом, нами показано, что в качестве параметра, по которому можно определить состояние гетероструктуры ЛД, наряду с временной зависимостью количества каналов генерации излучения можно использовать токовую зависимость спектра излучения в первые часы эксплуатации ЛД, что существенно упрощает и удешевляет диагностику ЛД на предмет их долговечности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами было показано, что предложенная методика определения качества гетероструктуры конкретного серийного мощного диодного лазера по токовой зависимости количества нефазированных каналов генерации излучения применима для быстрой ресурсосберегающей диагностики излучения диодных лазеров. Диагностика возможна на начальной стадии эксплуатации лазеров. Показано, что распад излучения на отдельные каналы генерации в случае увеличения количества этих каналов указывает на ухудшение состояния гетероструктуры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков А.Е. Физика и технология полупроводниковых наноструктур. СПб.: Элмор, 2007. 304 с.
2. Богатов А.П., Дракин А.Е., Стратонников А.А., Конаев В.П. // Квант. электрон. 2000. Т. 30. № 5. С. 401; Bogatov A.P., Drakin A.E., Strattonnikov A.A., Konayev V.P. // Quantum Electron. 2000. V. 30. No. 5. P. 401.
3. 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. No. 1. P. 112.
4. Слипченко С.О., Винокуров Д.А., Пухтин 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. No. 12. P. 1430.
5. Лютецкий А.В., Пухтин 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. No. 12, P. 1602.
6. Кейсу Л., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. Т. 2. М.: Мир, 1981. 299 с.
7. Мифтахутдинов Д.Р., Богатов А.П., Дракин А.Е. // Квант. электрон. 2010. Т. 40. № 7. С. 583; Miftakhut-

- dinov D.R., Bogatov A.P., Drakin A.E.* // Quantum Electron. 2010. V. 40. No. 7. P. 583.
8. *Близнюк В.В., Костина О.О., Крайнов И.В. и др.* // Сб. докл. XXII межд. конф. "Лазеры. Измерения. Информатика—2012" (Санкт-Петербург, 2012). С. 224.
  9. *Сидоров В.Г., Шмидт Н.П.* // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Физ.-мат. науки. 2013. № 2(170). С. 71.
  10. *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.
  11. *Близнюк В.В., Коваль О.И., Паршин В.А. и др.* // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2018. № 6. С. 1860501.
  12. *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.
  13. *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.
  14. *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.
  15. *Адамов А.А., Баранов М.С., Храмов В.Н.* // Науч.-тех. Вестн. ИТМО. 2018. Т. 18. № 3. С. 356.
  16. *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.
  17. *Ржанов А.Г.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 2. С. 220; *Rzhanov A.G.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 2. P. 169.
  18. *Rzhanov A.G.* // EPJ Web Conf. 2019. V. 220. Art. No. 02013.
  19. *Koval O.I., Rzhanov A.G., Solovyev G.A.* // Phys. Wave Phenom. 2013. V. 21. No. 4. P. 287.
  20. <http://www.holography.ru/files/holmich.htm#top>.

## A method for determining the heterostructure condition of a high-power IR diode laser based on the current dependence of its spectral characteristics

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

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

<sup>b</sup>Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

\*e-mail: 40595141@mail.ru

A method is proposed for determining the quality of the heterostructure of a serial high-power laser diode with a wide contact based on the current dependence of the number of radiation channels at the initial stage of operation. It is shown that the decomposition of radiation into separate non-phased generation channels is associated with a change in the coherence length of the radiation.