

СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ДИОДА ПРИ ВЫХОДЕ НА РАБОЧИЙ РЕЖИМ

© 2025 г. В. В. Близнюк^{1,*}, В. А. Паршин¹, А. Г. Ржанов², О. И. Семенова¹,
А. Е. Тарасов¹, Н. А. Хлынцев¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

²Федеральное 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 14.11.2024 г.

После доработки 03.12.2024 г.

Принята к публикации 30.12.2024 г.

Предложен метод оценки качества гетероструктуры мощного лазерного диода 200 мВт на основе измерений спектров интенсивности излучения в надпороговом режиме генерации. В основе метода лежит фиксация и анализ групп мод генерации, относящихся к пространственным каналам излучения. Измерения спектров проводятся при разных токах накачки, которые ниже штатного, в течение малого (не более 30 мин) интервала времени.

Ключевые слова: полупроводниковый лазер, мощный лазерный диод, частотный спектр, деградация, когерентность.

DOI: 10.31857/S0367676525040216, EDN: GUKNNH

ВВЕДЕНИЕ

Мощные лазерные диоды (ЛД) с выводом излучения через оптическое волокно широко используются в волоконно-оптических линиях связи, для накачки лазеров, генерирующих в разных диапазонах оптического спектра, а также в медицинских лазерных аппаратах. К таким лазерам принято относить все ЛД, с полосы электрического контакта которых шириной 1 мкм снимается излучение мощностью от 10 мВт [1].

Важнейшим технико-экономическим параметром ЛД является срок службы.

Чаще всего используется классическая методика контроля состояния гетероструктуры ЛД и прогнозирования его срока службы. Она основана на анализе временных зависимостей мощности излучения при поддержании постоянного значения тока накачки. Срок службы в этом случае определяется как время, через которое мощность падает до определенного, заранее установленного уровня (как правило, в два раза по сравнению с начальным значением) [2].

Наряду с классической методикой достаточно часто используется методика определения срока службы ЛД, базирующаяся на поддержании мощности его излучения на постоянном уровне путем увеличения тока накачки. За срок службы ЛД принимается время наработки лазера, через

которое поддержание мощности на постоянном уровне становится невозможным [2].

Значительно реже для прогнозирования срока службы ЛД используются методики, основанные на анализе временных зависимостей диаграммы направленности и степени линейной поляризации излучения (контраста) [3–5]. Однако реализация перечисленных выше методик связана со значительным расходом ресурса ЛД и не позволяет решить проблему быстрого определения качества отдельно взятого лазера – фундаментальную проблему, без решения которой невозможно обеспечить высококачественное серийное производство приборов электронной техники [6].

Именно поэтому на протяжении нескольких десятилетий в ведущих научных центрах РАН: ФИАН в Москве и Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе в Санкт-Петербурге уделяется самое пристальное внимание разработкам и совершенствованию новых методик контроля состояния гетероструктуры ЛД и прогнозирования их срока службы.

Одной из ранних работ, посвященных разработке новой методики оптимизации параметров одномодовых ЛД на основе квантово-размерных гетероструктур раздельного ограничения, является работа [7]. В этой работе по-

дробно рассмотрены диаграммы направленности излучения лазера в плоскости p - n -перехода и в плоскости, перпендикулярной ей, при различных уровнях выходной оптической мощности. Также представлены спектры излучения ЛД при двух значениях длины резонатора и токе накачки, равном удвоенному пороговому току I_{th} . Сформулированы критерии определения одномодового режима генерации лазера по его диаграмме направленности и спектру излучения. Из сравнения этих критериев следует, что нарушение одномодового режима генерации ЛД, вызванное ухудшением состояния его гетероструктуры, наиболее четко проявляется в спектре лазера.

Высокая чувствительность спектральных характеристик различных типов лазерных диодов к деградиационным процессам, протекающим в их гетероструктуре, позволяет использовать временные зависимости спектров излучения ЛД при прогнозировании их срока службы.

Именно поэтому в течение последних пяти лет мы занимались разработкой новых методик контроля состояния гетероструктуры ЛД, базирующихся на измерениях и анализе их спектра излучения [8–14].

МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ДЕГРАДАЦИИ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ

В [8] рассмотрена методика измерения темпа деградации мощного непрерывного ЛД с широким контактом путем контроля состояния его гетероструктуры через каждые пятьдесят часов наработки при фиксированном значении тока накачки. В качестве контролируемого параметра предложено использовать определяемое по спектру излучения количество каналов генерации лазера. Экспериментально установлено, что при увеличении времени эксплуатации лазера число каналов генерации возрастает. Увеличение числа каналов генерации мы связываем с уменьшением длины когерентности излучения ЛД, вызванного ростом внутренних потерь, — характерным признаком деградации лазера.

Также экспериментально установлено, что темп деградации возрастает при увеличении рабочего тока накачки. Это подтверждается появлением дополнительного канала генерации ЛД при фиксированном времени его наработки.

Разработан алгоритм определения оптимального значения тока накачки ЛД, при котором обеспечивается большой срок его службы [8, 9]. При его разработке учитывается, что спектр излучения мощного ЛД характеризуется сложным видом его огибающей и представляет собой суперпозицию спектров излучения отдельных каналов генерации. Анализ спектра излучения в каждом канале генерации позволяет определить значение интегрального параметра A_i , являющегося количественной мерой отличия контура линии,

огивающей спектр излучения в канале, от гауссовой функции [5].

В [9] показано, что спектр излучения в каждом канале генерации близок к спектру генерации одномодового лазера, и поэтому ЛД формально может быть представлен как набор одномодовых лазеров с изменяющимся в процессе наработки числом излучающих элементов.

Для каждого i -го излучающего элемента нами применяется методика быстрого прогнозирования срока службы одномодового ЛД по значению интегрального параметра $A_{нач,i}$ в начальный период эксплуатации лазера [5]. Используется тот факт, что срок службы одномодового лазера тем меньше, чем меньше значение параметра $A_{нач}$. Так как уменьшение параметра $A_{нач}$, даже одного из излучающих элементов приводит к отклонению спектра излучения ЛД от оптимального, срок службы лазера определяется по наименьшему значению параметра $A_{нач,i}$.

Если значения параметра A_i во всех каналах генерации близки единице, то это свидетельствует о высоком качестве гетероструктуры ЛД и о том, что ЛД работает при оптимальном токе накачки.

Итак, установлено, что в качестве параметра, по которому можно определить состояние гетероструктуры конкретного серийного мощного ЛД, наряду с временной зависимостью количества каналов генерации излучения можно использовать токовую зависимость спектра излучения на начальном этапе эксплуатации ЛД. Это существенно упрощает диагностику ЛД на предмет их долговечности.

Методика текущего контроля состояния гетероструктуры в процессе ее медленной деградации изложена в [11, 12]. Учитывается, что заметные признаки деградации ЛД проявляются через две–три тысячи часов наработки. Поэтому временная зависимость состояния гетероструктуры определяется с использованием ускоренного старения приборов при повышенной температуре окружающей среды. Однако в ходе ускоренных испытаний на старение ЛД стремительно расходуется их ресурс, что не позволяет решить проблему определения качества конкретного ЛД без расходования значительной части ресурса лазеров. Увеличение разрешающей способности спектрального прибора МДР-23 позволило выделить в спектре излучения мощного ЛД тонкую и грубую структуру спектра [12, 13]. Благодаря этому установлена и экспериментально проверена связь между параметрами спектра и внутренними параметрами структуры лазера, изменяющимися в процессе деградации прибора. Экспериментально показано, что при деградации ЛД 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 генера-

ции, уширении спектральных линий продольных мод.

Установлено 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 позволяет значительно увеличить точность и степень достоверности определения момента начала неприемлемой для данного прибора деградации и связанной с ней необходимостью замены ЛД.

При выполнении настоящей работы основное внимание уделялось разработке методики определения качества мощного лазерного диода по токовой зависимости его спектра излучения в процессе выхода лазера на рабочий режим при токах накачки до четырехкратного превышения порога.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Результаты экспериментальных исследований спектров излучения двух ЛД из новой партии приборов приведены на рис. 1а,б и 2а,б.

Сравнение спектров излучения ЛД 1002 и 1005 при одинаковых токах накачки позволяют сделать заключение о качестве этих лазеров. Так, при токе накачки 180 мА ЛД 1002 имеет один канал генерации (рис. 1а), а ЛД 1005 — шесть каналов (рис. 2а). При токе накачки 250 мА число каналов в этих лазерах увеличивается до двух и восьми соответственно. Согласно разработанной ранее методике определения качества гетерострук-

туры [11, 12] ЛД 1002 имеет более высокое качество, чем ЛД 1005. Количественно такое отличие проявится в существенной разнице сроков службы рассматриваемых лазеров.

Трансформация спектров ЛД при изменении тока накачки позволяет сделать некоторые заключения о качестве приборов.

После преодоления порога генерации с ростом тока накачки происходит постепенное увеличение как пространственной, так и спектральной области генерации. При этом, во-первых, происходит появление и переключение новых групп продольных мод, объединенных в пространственные каналы генерации, сопровождающееся общим смещением в длинноволновую область; во-вторых, наблюдается увеличение пространственной области генерации за счет возникновения новых каналов без их сужения. Увеличивается также спектральный интервал усиления активной среды, что проявляется в появлении новых групп продольных мод.

Важным экспериментальным результатом в данном исследовании является тот факт, что ширина отдельных каналов генерации должна оставаться и остается постоянной при надпороговом изменении тока накачки. Это вызвано вполне конкретной величиной потерь в резонаторе, которые слабо зависят от накачки. В то же время эти потери различны в двух исследуемых устройствах, что мы и наблюдаем в эксперименте.

Для получения более точных оценок качества гетероструктуры мощных ЛД приведенные исследования необходимо дополнить измерениями пространственных параметров излучения ЛД, особенно в ближнем поле.

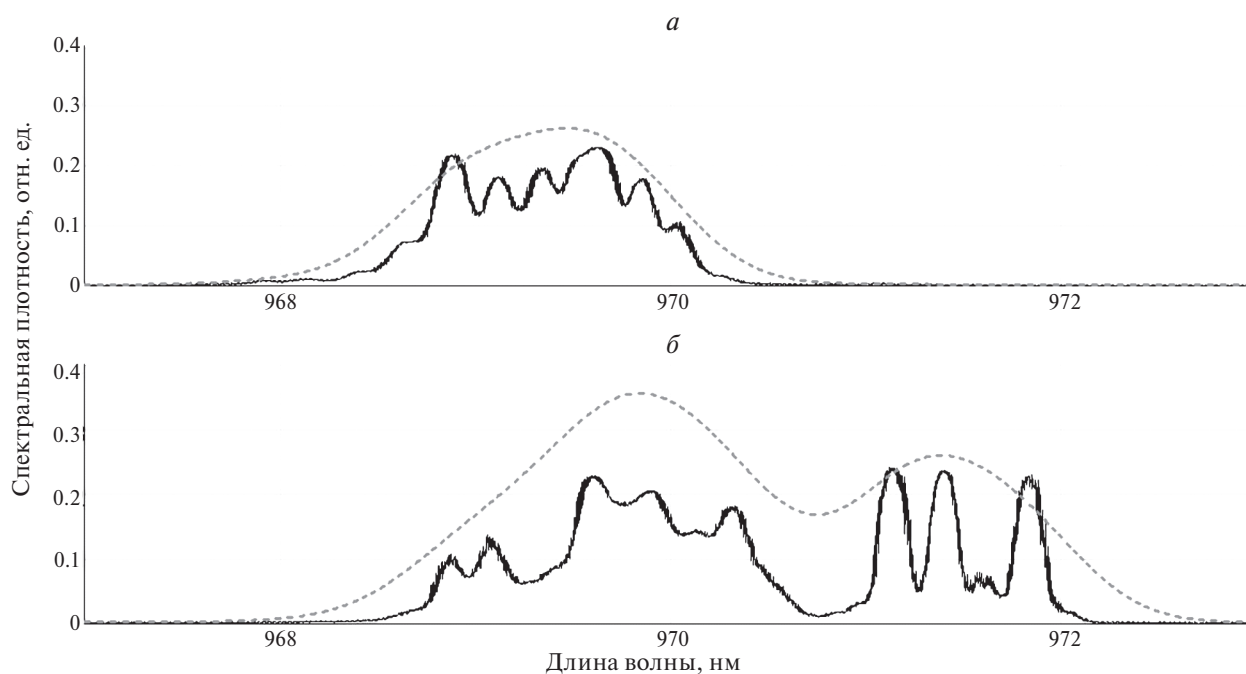


Рис. 1. Спектры ЛД 1002 при токе накачки: 180 (а) и 250 мА (б).

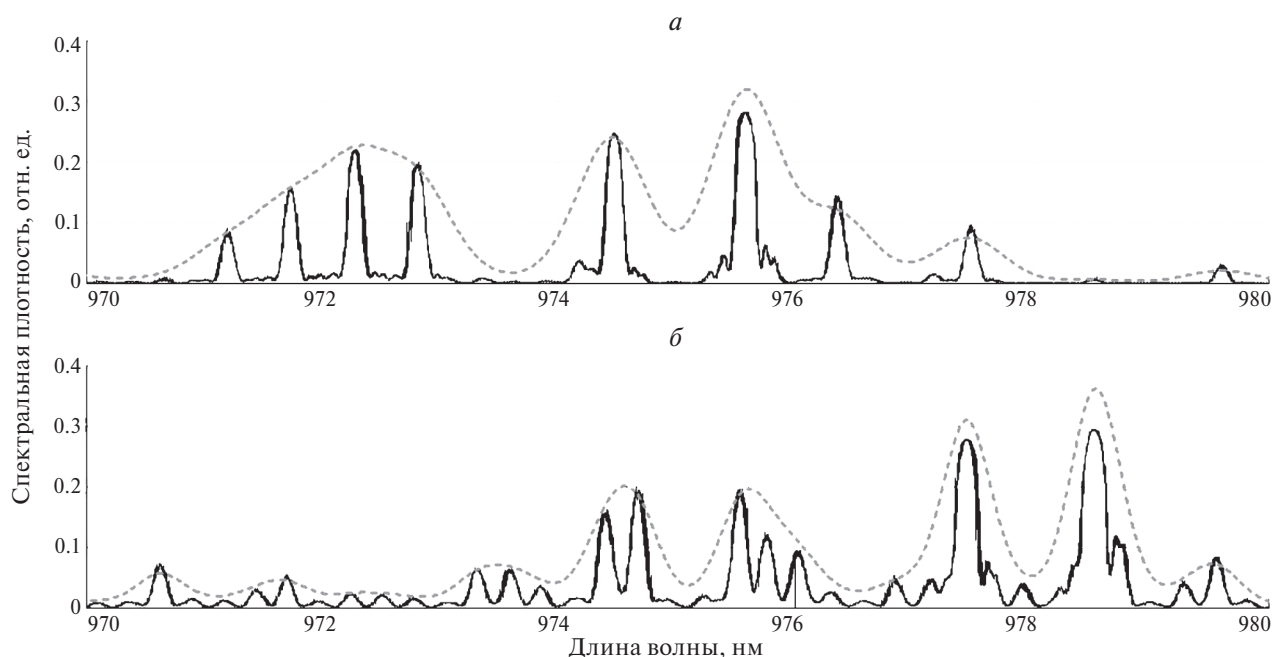


Рис. 2. Спектры ЛД 1005 при токе накачки: 180 (а) и 250 мА (б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нами был предложен метод оценки качества гетероструктуры мощного лазерного диода на основе анализа спектров интенсивности излучения, полученных при токах накачки, не превышающих четырех пороговых значений. Показано, что, используя данный метод, можно судить как о качестве гетероструктуры лазерного диода с нулевой наработкой, так и о его максимальном времени функционирования в штатном режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков А.Е. Физика и технология полупроводниковых наноструктур. СПб.: Элмор, 2007. 304 с.
2. Кейси Л., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. М.: Мир, 1981. 299 с.
3. Мифтахутдинов Д.Р., Богатов А.П., Дракин А.Е. // Квант. электрон. 2010. № 7. С. 583; Miftakhutdinov D.R., Bogatov A.P., Drakin A.E. // Quantum Electron. 2010. V. 40. No. 7. P. 583.
4. Воробьев Л.Е., Софронов А., Фирсов Д. и др. // Фотоника. 2012. Т. 31. № 1. С. 20.
5. 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.
6. Сидоров В.Г., Шмидт Н.П. // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Физ.-мат. науки. 2013. № 2(170). С. 71.
7. Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А. и др. // ФТП. 2002. Т. 36. № 12. С. 1393. Leshko A.Yu., Lyutetskiy A.V., Pikhtin N.A. et al. // Semiconductors. 2002. V. 36. No. 12. P. 1393.
8. 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.
9. Близнюк В.В., Паршин В.А., Ржанов А.Г. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 2. С. 255; Bliznyuk V.V., Parshin V.A., Rzhapov A.G. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 2. P. 184.
10. 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., Rzhapov A.G. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 11. P. 1324.
11. Близнюк В.В., Паршин В.А., Ржанов А.Г. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 7. С. 1008; Bliznyuk V.V., Parshin V.A., Rzhapov A.G. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 7. P. 837.
12. 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., Rzhapov A.G. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 11. P. 1324.
13. Близнюк В.В., Паршин В.А., Ржанов А.Г. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2024. Т. 88. № 1. С. 29; Bliznyuk V.V., Parshin V.A., Rzhapov A.G. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2024. V. 88. No. 1. P. 21.
14. Близнюк В.В., Паршин В.А., Ржанов А.Г. и др. // Сб. тезисов ФЭКС/IWQO-2023. (Светлогорск, 2023). С. 174.

Radiation spectra and the quality evaluation of a high-power laser diode when entering the operating mode

**V. V. Bliznyuk^{a,*}, V. A. Parshin^a, A. G. Rzhhanov^b, O. I. Semenova^a, A. E. Tarasov^a,
N. A. Khlyntsev^a**

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

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

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

A method for evaluating the quality of the heterostructure of a high-power 200 MW laser diode based on measurements of radiation intensity spectra in the over-threshold generation mode is proposed. The method is based on the fixation and analysis of groups of generation modes related to spatial radiation channels. The spectra are measured at different pumping currents, which are lower than the standard, for a short (no more than 30 min) time interval.

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