

УДК 621.315.592:621.373

КОНКРЕТИЗАЦИЯ СРОКА СЛУЖБЫ МОЩНОГО ИК ЛАЗЕРНОГО ДИОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ АВТОНОМНОГО КАНАЛА ГЕНЕРАЦИИ

© 2022 г. В. В. Близнюк^{1, *}, В. А. Паршин¹, А. Г. Ржанов², А. Е. Тарасов¹

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 14.02.2022 г.

После доработки 28.02.2022 г.

Принята к публикации 23.03.2022 г.

Предлагается методика оценочного расчета срока службы серийных мощных лазерных диодов с широким контактом по 50-часовому натурному исследованию выборки из большой партии этих приборов и спектру конкретного прибора в начале его эксплуатации. Для обоснования методики анализируется распад излучения в таких лазерах на отдельные нефазированные каналы генерации. При этом лазерные диоды представляются как набор одномодовых излучателей.

DOI: 10.31857/S0367676522070110

ВВЕДЕНИЕ

Мощные полупроводниковые лазерные диоды (ЛД) с квантово-размерными гетероструктурами широко используются в разных областях науки, техники и медицины. К таким лазерам принято относить ЛД с мощностью непрерывной генерации от сотен милливатт до десятков ватт [1–5]. При серийном производстве ЛД на первый план выходит их технико-экономический параметр — срок службы [6]. Известные методики прогнозирования срока службы ЛД основаны на использовании дорогостоящей контрольно-измерительной аппаратуры [1, 5]. В настоящее время для определения срока службы ЛД используются испытания по их ускоренному старению при повышенных значениях температуры окружающей среды и тока накачки. Это во многом обусловлено тем, что первые признаки деградации проявляются не ранее, чем через две-три тысячи часов наработки.

Современные методики прогнозирования срока службы мощных ЛД основаны на анализе временной зависимости медленно изменяющихся параметров лазерного излучения: мощности, диаграммы направленности и степени линейной поляризации (контраста). Данные методики позволяют определить срок службы некоторого числа экземпляров из партии ЛД, а потом распространить полученные результаты на всю партию [6]. Однако их реализация связана со значительным расходом ресурса лазеров и использованием трудоемких статистических методов об-

работки больших массивов чисел. Основным же недостатком подобных методик является невозможность перейти от обобщенного прогноза срока службы партии лазеров к определению срока службы конкретного экземпляра ЛД из серии. На важность определения качества отдельно взятого прибора электронной техники обращено внимание в [7–11].

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗА СРОКА СЛУЖБЫ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ С ШИРОКИМ КОНТАКТОМ

Одним из возможных решений данной проблемы является использование методики [10, 11]. Она базируется на численном анализе формы линии $f_{\text{экс}}\left(\frac{v-v_0}{\Delta v}\right)$, огибающей спектр излучения одномодовых лазерных диодов (ОЛД), и результатов измерений токовых зависимостей спектральных характеристик, полученных в ходе ускоренных испытаний контрольной партии лазерных диодов через 200 ч наработки в реальном масштабе времени, то есть на начальном этапе их эксплуатации. Применение метода иллюстрирует рис. 1. Анализ проводится путем сравнения

$f_{\text{экс}}\left(\frac{v-v_0}{\Delta v}\right)$ с нормированной гауссовой функцией. Вводится интегральный параметр $A_{\text{нач}}$, характеризующий степень отклонения функции $f_{\text{экс}}\left(\frac{v-v_0}{\Delta v}\right)$ от функции Гаусса $f_G\left(\frac{v-v_0}{\Delta v}\right)$ в пре-

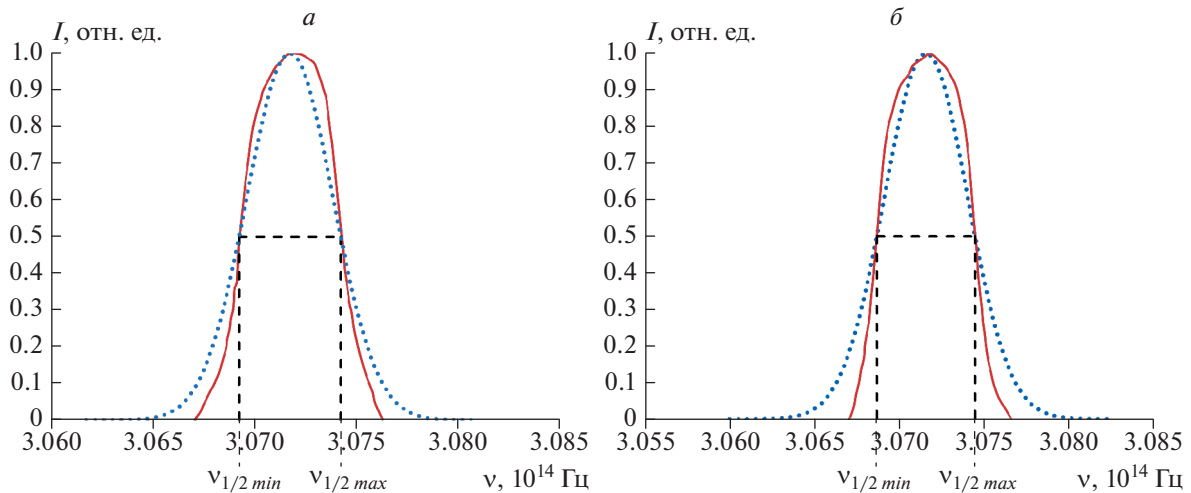


Рис. 1. Кривая $f_i\left(\frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$ (сплошная линия), характеризующая спектральное распределение интенсивности длинноволновой составляющей спектра излучения мощного лазерного диода АТС-С200-100-980 с наработкой 200 ч при токе накачки: 940 (а); 980 мА (б). Пунктирная линия – нормированная функция Гаусса.

делах ширины линии, огибающей спектр излучения, в начальной стадии эксплуатации лазера при разных токах накачки, как это изображено на рис. 1а и 1б). С математической точки зрения интегральный параметр A представляет собой норму близости нормированной экспериментальной функции огибающей спектра $f_{\text{эксп}}\left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu}\right)$ от идеализированной спектральной функции, соответствующей генерации на фундаментальной моде $f_G\left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu}\right)$:

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

где $\Delta\nu$ – полуширина линии спектра фундаментальной моды, $\nu_{1/2 \max}$ и $\nu_{1/2 \min}$ – частоты, соответствующие полуширине спектральной линии моды.

Разработанная методика прогнозирования срока службы ОЛД по его спектральной характеристике может быть использована только в том случае, если имеет место режим генерации на фундаментальной моде.

Нами предлагается распространить методику прогнозирования полезного времени наработки ОЛД [7–11] для анализа мощных ЛД с широким контактом – ЛДШК [8]. Измерение формы линии, огибающей спектр излучения ЛДШК в течение первых часов работы лазера, позволило нам

зафиксировать два-три ярко выраженных спектральных пика (линии) генерации. Каждый пик соответствовал автономному пространственному каналу генерации в активной области ЛДШК. В [11] была разработана методика, которая позволяет прогнозировать срок службы серийного изготовленного ЛДШК за время, не превышающее пятидесяти часов, в число которых входит время ускоренных испытаний на старение, соответствующее двумстам часам работы в реальном масштабе времени. Через двести часов испытаний в реальном масштабе времени, количество каналов генерации и линий в спектре излучения лазера $f_{\text{emp}}(\nu)$, возрастает от 2–3 до 4–5 (рис. 2) [11].

Мощные ЛДШК, в отличие от ОЛД, характеризуются сложной формой спектральной характеристики, что исключает простую трактовку токовой зависимости функции $f_{\text{emp}}(\nu)$ при разработке алгоритма прогнозирования срока службы конкретного экземпляра лазера. Именно поэтому в [10, 11] было предложено проводить анализ спектра ЛДШК путем разложения его на N составляющих с профилями линии $f_i\left(\frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$, характерными для излучения одномодового лазера с центральной частотой ν_{0i} .

Нами экспериментально установлено, что с ростом тока накачки спектральная характеристика ЛД $f_{\text{emp}}(\nu)$ претерпевает значительные изменения, которые проявляются в изменении соотношения амплитуд спектральных составляющих и ширины линии излучения $f_i\left(\frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$, а также чис-

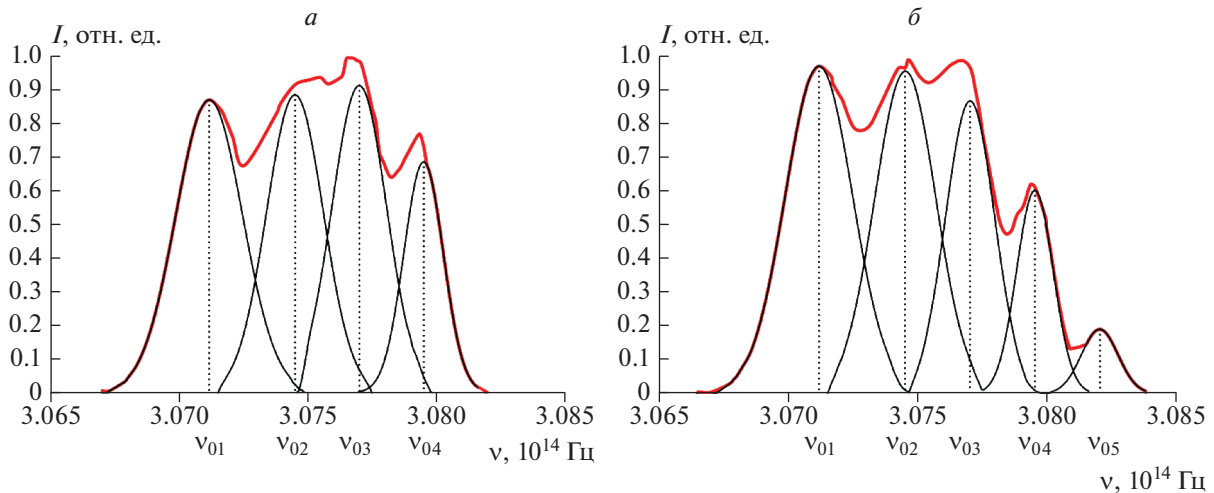


Рис. 2. Спектр излучения мощного лазерного диода АТС-С200-100-980 с наработкой 200 ч. $f_{\text{эксп}}(\nu)$, и его составляющие $f_i\left(\frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$ при двух значениях тока накачки: 940 (а); 980 мА (б).

ла таких составляющих. Так, на рис. 2 видно, что число составляющих спектра ЛДШК $f_{\text{emp}}(\nu)$ увеличивается от четырех до пяти. Численный анализ каждой из четырех кривых $f_i\left(\frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$ на рис. 2а, показывает, что соответствующие им значения A_i лежат в интервале от 0.93 до 0.95. Из анализа пяти контуров линий $f_i\left(\frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta\nu_i}\right)$ на рис. 2б следует, что им соответствуют значения параметра A_i , изменяющиеся от 0.82 до 0.86. Таким образом, увеличение тока накачки приводит в целом к уменьшению параметров A_i , а значит, согласно [11], и к уменьшению срока службы ЛДШК. Однако из-за большого числа параметров A_i возникает вопрос, по которому из них следует прогнозировать конкретный срок службы лазера. Принимая во внимание, что меньшему значению параметра A_i соответствует меньший срок службы τ , для оценки срока службы τ конкретного ЛДШК при фиксированном токе накачки предлагается использовать наименьшее из всех значений параметра A_i при каждом значении тока накачки и подставлять его в эмпирическую формулу, подобную той, которая использовалась в [10, 11]:

$$\frac{\tau}{\tau_{\text{max}}} = (A_{\text{min}})^m, \quad (2)$$

где значение параметра m находится по той же методике, что в [10, 11]. В проведенных ранее экспериментах с ОЛД средней мощности вычисленное по статистическим данным значение показателя m оказалось равным 1/3. Однако, значение этого параметра, т.е. вид конкретной функциональной

зависимости (2), в общем случае не носит универсального характера, и может отличаться для разных промышленных партий и структур ЛД. Данный аспект требует дополнительных исследований.

Для прогнозирования срока службы ЛДШК при рассмотрении партии из 100 приборов при браковочном уровне качества 10% был использован ГОСТ 16493–70 “Межгосударственный стандарт. Качество продукции. Статистический приемочный контроль по альтернативному признаку. Случай недопустимости дефектных изделий в выборке”, согласно которому, достаточно обеспечивать репрезентативную выборку из 25 экземпляров лазеров.

По результатам проведенных авторами исследований 25 ЛДШК АТС-С200-100-980 при токе накачки 940 мА из контрольной партии установлены зависимости $\tau/\tau_{\text{max}}(A_{\text{нач}})$, которые представлены на рис. 3. Стоит отметить, что из контрольной партии было отбраковано 3 экземпляра ЛДШК, у которых мощность излучения после 200 ч наработки в реальном масштабе времени уменьшилась более чем на 10% от начальной мощности. Время наработки ЛДШК варьировалось от 2230 до 2400 ч. Было определено, что погрешность определения интегрального параметра $A_{\text{нач}}$ составила 4.8%.

Анализ распада излучения в ЛДШК на отдельные нефазированные каналы генерации был проведен в работах [12–15]. В этих работах были подробно описаны причины такого распада и предложены способы аналитических и численных способов оценки количества каналов и ширины спектральных составляющих этих приборов.

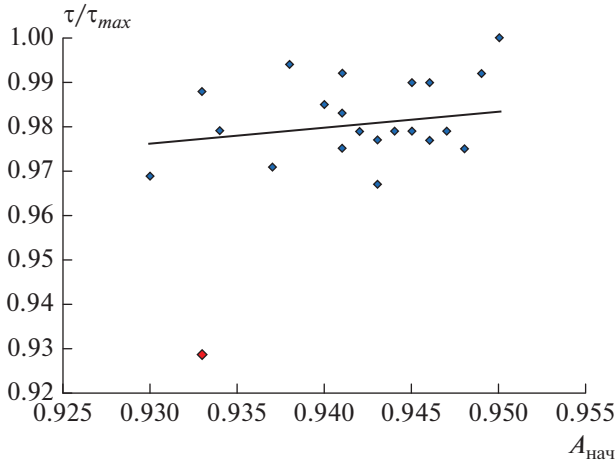


Рис. 3. Зависимости $\tau/\tau_{max}(A_{нач})$ ЛДШК из контрольной партии ($\tau_{max} = 2400$ ч) при значении тока накачки 940 мА: сплошная линия – расчетная функция $T = \sqrt[3]{A_{нач}}$; точки – результаты эксперимента.

Причиной разделения излучения на независимые каналы генерации оказывается воздействие нескольких факторов. Можно объяснить это явление следующим образом: 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 пробежать между зеркалами. Если длина когерентности меньше оптического пути такого пробега, то излучение разделяется на нефазированные каналы генерации. В ином случае распада излучения на каналы не будет. Это необходимое условие такого распада. Таким образом, это явление обусловлено, в первую очередь, малой длиной когерентности ЛД, которая составляет 2–6 см [16, 17], а также превышением порога генерации по всей площади контакта ($W = 100$ мкм), а также в пределах всего контура усиления квантовой ямы (около 8 мэВ). Кроме того, на формирование канала влияет нелинейный эффект пространственной самофокусировки за счет зависимости рефракции от концентрации неравновесных носителей, и трансформации латерального профиля инверсии, что также было проанализировано в работах [12–14].

В работе [18] была получена связь между длиной продольной когерентности излучения $L_{ког}$ и минимальной шириной когерентного канала w_0 в латеральной плоскости ЛДШК. Наиболее близкий к экспериментальным данным [4, 7, 8, 11] результат получается при использовании модели

резонатора ЛД как планарного волновода, ограниченного плоскими зеркалами [18]:

$$w_0 = \sqrt{\frac{\lambda L_{ког}}{2\pi n_{эф0}}}, \quad (3)$$

где λ и $L_{ког}$ – соответственно, длина волны и длина продольной когерентности излучения, $n_{эф0}$ – эффективный показатель преломления фундаментальной латеральной моды. Учет самофокусировки излучения посредством нелинейной рефракции в этом случае позволяет рассмотреть в качестве модельного приближения локальный волновод с квадратичным профилем, и также оценить ширину установившегося канала генерации через длину когерентности.

Превышение порога генерации ЛД хотя бы на 10–15% означает, что усредненное по времени поле излучения должно присутствовать на всей ширине активной области W . Изменения интенсивности излучения по латеральной координате могут быть заметны только в пределах длины диффузии неравновесных носителей (примерно 5–15 мкм). Это обосновывает появление каналов, разделенных в пространстве при наличии ограниченной когерентности излучения. Также подразумевается сплошное заполнение спектральной линии усиления ЛД по всей ее ширине, где есть превышение порога генерации (см. рис. 2). Это объясняет разнесение каналов по спектру (отсутствие вырождения по частоте), что наблюдалось в эксперименте [7, 15], и определяет связь между заполнением каналами генерации как в пространственной, так и в спектральной областях. В пределах ограничений, накладываемых пространственной диффузией и внутризонной термализацией носителей, излучение должно заполнять соответствующие области относительно равномерно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом показано, что для конкретизации срока службы ЛДШК его следует рассматривать как набор ОЛД с изменяющимся в процессе наработки числом излучающих элементов. При этом для каждого элемента можно использовать методику быстрого прогнозирования срока службы ОЛД по токовой зависимости интегрального параметра $A_{нач}$ в начальный период эксплуатации лазера. В этом случае срок службы ЛДШК определяется по наименьшему из всей совокупности A_i значению этого параметра. Максимальный срок службы, равный 2400 часам, был определен в ходе ускоренных испытаний ЛДШК с наибольшим значением $A_{нач} = 0.95$ из контрольной партии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богатов А.П., Дракин А.Е., Стратонников А.А., Кожнев В.П. // Квант. электрон. 2000. Т. 30. № 5. С. 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., 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. // Учен. 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. 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. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 2. P. 184.
12. 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.
13. 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.
14. *Rzhanov A.G.* // EPJ Web Conf. 2019. V. 220. Art. No. 02013.
15. *Koval O.I., Rzhanov A.G., Solovyev G.A.* // Phys. Wave Phenom. 2013. V. 21. No. 4. P. 287.
16. <http://www.holography.ru/files/holmich.htm#top>.
17. Адамов А.А., Баранов М.С., Храмов В.Н. // Научн.-техн. вестн. ИТМО. 2018. Т. 18. № 3. С. 356.
18. Ржанов А.Г. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 11. С. 1508; *Rzhanov A.G.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 11. P. 1371.

Specification of the service life of a high-power IR laser diode using the model of an autonomous generation channel

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 Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: 40595141@mail.ru

A method is proposed for estimating the service life of serial high-power laser diodes with a wide contact based on a 50-hour field study of a sample from a large batch of these devices and the spectrum of a particular device at the beginning of its operation. To approve the method, the decay of radiation in such lasers into separate non-phased generation channels is analyzed. In this case, laser diodes are represented as a set of single-mode emitters.