

УДК 621.315.592:621.373

КОГЕРЕНТНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ И ИХ СПЕКТРАЛЬНО-ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

© 2023 г. А. Г. Ржанов*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, физический факультет, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 28.10.2022 г.

После доработки 15.11.2022 г.

Принята к публикации 26.12.2022 г.

Рассмотрены возможные физические механизмы, влияющие на длину когерентности излучения мощных лазерных диодов при их медленной деградации. Проанализирована связь между ослаблением степени когерентности излучения при деградации лазера и пространственно-спектральным разделением излучения мощных лазеров на отдельные каналы генерации.

DOI: 10.31857/S0367676522701046, EDN: MDNSIC

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы проводятся исследования по изучению формирования излучения мощных лазерных диодов (МЛД) с широким контактом и квантовой ямой (КЯ) [1] при их постепенной деградации с течением времени [2–6]. В результате этих исследований было установлено, что определить степень наработки ресурса МЛД и необходимость его замены в рабочих установках можно по спектру и поляризации его излучения на конкретном этапе работы устройства [2, 7]. Это необходимо для экспресс-диагностики лазерных диодов, работающих на ответственных участках производства или других областей деятельности. Спектр излучения МЛД тесно связан с пространственной структурой излучения на зеркале прибора (в ближнем поле) и когерентными свойствами этого излучения. Эти параметры изменяются со временем в процессе деградации МЛД.

В данной работе мы обсуждаем связь между когерентностью излучения МЛД, его спектральными характеристиками и пространственным распределением поля на зеркале прибора с привлечением экспериментальных и аналитических оценок. Кроме того, целью исследования является установление соответствия между когерентностью и механизмами спектральной селекции в МЛД, в частности, с потерями излучения в лазерном резонаторе.

КОГЕРЕНТНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ И ПЛОТНОСТЬ СОСТОЯНИЙ

Следует отметить, что прямого соответствия между огибающей спектра излучения, которую обычно измеряют в работах по спектрометрии лазеров, и длиной когерентности излучения МЛД не обнаружено. Это говорит о том, что конвенциональная теория когерентности, описывающая связь между временем (продольной длиной) когерентности излучения, в случае лазерных диодов должна применяться с определенными оговорками. Наиболее распространенные сейчас МЛД с КЯ и расширенным волноводом имеют полную ширину частотного спектра излучения около $\Delta\lambda_{\text{кя}} = 6$ нм [8], соответствующую ширине электронного уровня (подзоны) примерно $\Delta E_{\text{кя}} = 8.3 \cdot 10^{-3}$ эВ для КЯ толщиной $d_{\text{кя}} = 12$ нм и глубиной $\Delta E_c = 0.129$ эВ в зоне проводимости. Одна из возможных энергетических структур КЯ показана на рис. 1 [1]. Если считать, что вынужденное излучение происходит с уровня, имеющего энергетическую ширину $\Delta E_{\text{кя}} = 8.3 \cdot 10^{-3}$ эВ, то согласно теории, длина когерентности должна быть равна $L_{\text{ког}} = 155$ мкм. Эта оценка отличается от экспериментальных данных более чем на 2 порядка: эксперимент показывает величину длины когерентности лазерных диодов в диапазоне около 1–5 см [9, 10]. Таким образом, когерентность излучения МЛД надо рассматривать как среднюю величину для разных компонентов, составляющих частот-

ный спектр лазера, которые должны иметь естественную ширину линии $\Delta\lambda_{\text{ког}}$ [10]:

$$\Delta\lambda_{\text{ког}} = \frac{\lambda_0^2}{L_{\text{ког}}}, \quad (1)$$

где λ_0 есть средняя длина волны излучения МЛД в вакууме. Мы используем в расчетах величину $\lambda_0 = 964$ нм [1, 8]. Длину когерентности МЛД можно оценить, согласно [11–13], через число характерных линий в спектре излучения МЛД, которые соответствуют пространственным каналам генерации $N_{\text{кан}}$:

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

где n – эффективный показатель преломления фундаментальной моды излучения канала генерации ($n = 3.6$).

В рассматриваемом нами МЛД с шириной активной области $W = 100$ мкм [1] число линий в процессе деградации изменялось от 3 до 5 [2]. Например, если в процессе работы лазера взять момент измерения, когда число каналов (линий вгибающей спектра) равно $N_{\text{кан}} = 3$, то выражения (1), (2) дают значение $\Delta\lambda_{\text{ког}} = 3.5 \cdot 10^{-2}$ нм ($\Delta E_{\text{ког}} = 4.6 \cdot 10^{-5}$ эВ, $L_{\text{ког}} = 2.7$ см). Таким образом, можно формально рассматривать спектр МЛД в виде набора из $N_{\text{ист}} = \Delta\lambda_{\text{кя}}/\Delta\lambda_{\text{ког}}$ источников со средней длиной когерентности излучения каждого $L_{\text{ког}} = 2.7$ см. Эта величина в конкретном МЛД должна быть связана с квантовыми характеристиками рабочей подзоны КЯ (рис. 1) и добротностью “холодного” (в отсутствие накачки) резонатора МЛД. Количество когерентных излучателей, приходящихся на единичный спектральный интервал, можно для сравнения связать с плотностью электронных состояний в рабочих подзонах КЯ. Следует отметить, что ширина спектральной линии резонатора Фабри–Перо (коэффициенты отражения зеркал 98 и 2%) оказывается близкой к приведенной выше полосе когерентности, о чем речь пойдет ниже.

Рассмотрим плотность состояний подробнее. Для простоты ограничимся рассмотрением зоны проводимости. Обычно вводится понятие “эффективная плотность состояний”, которое применимо в тех случаях, когда считается, что энергия уровня Ферми стремится быть равной энергии дна зоны проводимости. В нашем случае, как видно из рис. 1, это условие можно применять для дна электронной подзоны, считая, что $E - E_c = 0.04$ эВ.

В объемных полупроводниках плотность состояний рассчитывается по известной модели параболической зоны в зависимости от превыше-

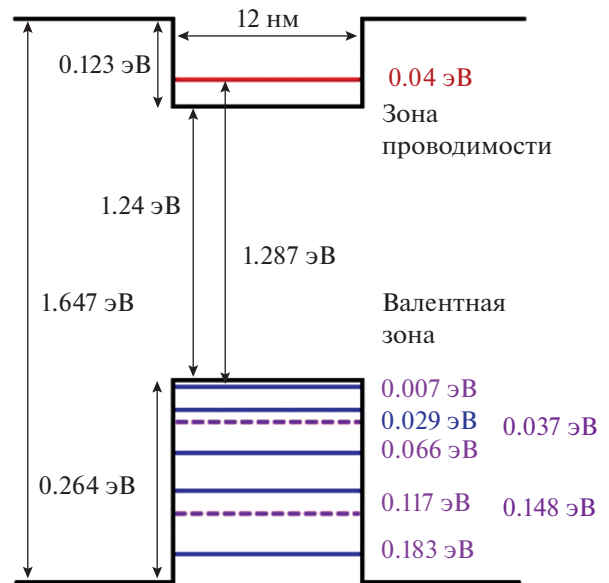


Рис. 1. Энергетическая диаграмма уровней (подзон) в квантовой яме 12 нм мощного лазерного диода. Состав слоев: $\text{In}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}_{0.47}\text{P}_{0.53}/\text{In}_{0.14}\text{Ga}_{0.86}\text{As}$. В валентной зоне сплошные линии – тяжелые дырки, пунктир – легкие дырки.

ния электронами энергии дна зоны проводимости E_c :

$$\rho(E) = \frac{V(2m_n^*)^{3/2}}{2\pi^2\hbar^3} (E - E_c)^{1/2}, \quad (3)$$

где V – объем полупроводника, m_n^* – эффективная масса электрона в данном материале.

Так как в КЯ плотность состояний одинакова в пределах подзоны, то ее можно рассчитать по формуле (3), подставив минимальное значение энергии в подзоне $E - E_c = 0.04$ эВ (см. рис. 1). Остальные значения: $m_n^* = 0.061m_0$ для $\text{In}_{0.14}\text{Ga}_{0.86}\text{As}$ [14], $m_0 = 9.1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона, $V = 2.4 \cdot 10^3$ мкм³. Объем V слоя КЯ рассчитывается из следующих величин: длина резонатора $L = 2$ мм, ширина активной области $W = 100$ мкм, толщина $d_{\text{кя}} = 12$ нм. В результате получается величина плотности состояний в конкретном МЛД: $\rho = 5.0 \cdot 10^{10}$ эВ⁻¹, что соответствует среднему интервалу между квантовыми составляющими электронного спектра $\Delta E_{\text{кв}} = 2.0 \cdot 10^{-11}$ эВ. Сравнение этой величины с шириной энергетического спектра элементарного когерентного источника $\Delta E_{\text{ког}} = 4.6 \cdot 10^{-5}$ эВ показывает, что ни толщина КЯ $d_{\text{кя}}$, ни ее объем V , не могут существенно влиять на длину когерентности МЛД. Ширина линии отдельных квазикогерентных источников оказывается на 6 порядков больше, чем расстояние между уровнями,

наполняющими энергетический спектр КЯ. Поэтому можно сделать вывод, что когерентность излучения лазерных диодов определяется либо энергетическим спектром отдельных атомов (или их композиций), составляющих полупроводниковый кристалл, либо наличием дефектов в области КЯ и волноводных слоев, то есть с диссипацией.

КОГЕРЕНТНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЛАЗЕРНЫЙ РЕЗОНАТОР

Рассмотрим вопрос о влиянии добротности лазерного резонатора Фабри–Перо на когерентность излучения МЛД. Ширина резонанса продольных мод $\Delta\lambda_{\text{рез}}$ и спектрального интервала между модами Фабри–Перо $\Delta\lambda_{\text{ФП}}$ вычисляется по известным формулам:

$$\Delta\lambda_{\text{рез}} = \frac{\lambda_0}{M\pi} \left(L\alpha_{\text{вну}} + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) \right); \quad (4)$$

$$\Delta\lambda_{\text{ФП}} = \frac{\lambda_0^2}{2nL}, \quad (5)$$

где $R_1 = 0.02$, $R_2 = 0.98$ – коэффициенты отражения зеркал МЛД по мощности, $M = 1.49 \cdot 10^4$ – номер продольной моды, соответствующей длине волны $\lambda_0 = 964$ нм, $\alpha_{\text{вну}} = 10 \text{ см}^{-1}$ – полные внутренние потери в резонаторе МЛД (оценочное значение). Расчет по формулам (4), (5) для конкретного МЛД (рис. 1) дает значения $\Delta\lambda_{\text{рез}} = 6.11 \cdot 10^{-2}$ нм и $\Delta\lambda_{\text{ФП}} = 6.45 \cdot 10^{-2}$ нм. Сравнение $\Delta\lambda_{\text{рез}} = 6.11 \cdot 10^{-2}$ нм с $\Delta\lambda_{\text{ког}} = 3.50 \cdot 10^{-2}$ нм показывает, что с высокой долей достоверности можно говорить о том, что когерентные свойства МЛД определяются в первую очередь потерями излучения внутри резонатора и на зеркалах. В процессе деградации, особенно при поддержании постоянной мощности излучения МЛД, ожидать изменений в коэффициентах отражения зеркал не придется, так как любое ухудшение их отражательной способности приведет к их мгновенному тепловому разрушению (катастрофической деградации). Поэтому можно сделать вывод, что именно изменение величины внутренних потерь в резонаторе в процессе работы МЛД является одной из главных причин изменений длины когерентности, а значит как пространственного, так и спектрального распределения излучения.

Разделим выражение (4) для $\Delta\lambda_{\text{рез}}$ на два слагаемых: $\Delta\lambda_{\text{рез вну}} = 3.06 \cdot 10^{-2}$ нм (вклад диссипации) и $\Delta\lambda_{\text{рез R}} = 3.05 \cdot 10^{-2}$ нм (вклад зеркал). Точного значения $\alpha_{\text{вну}}$ мы не знаем, но в рамках данного исследования мы можем уточнить его величину для МЛД с тремя каналами генерации. В силу аддитивности потерь можно записать, что вклад внутренних потерь в ширину линии излучения, определяющую когерентность, составит $\Delta\lambda_{\text{рез вну}} =$

$(3.50 - 3.05) \cdot 10^{-2} = 4.5 \cdot 10^{-3}$ нм что соответствует значению $\alpha_{\text{вну}} = 1.5 \text{ см}^{-1}$. Таким образом, можно проследить связь между деградацией и когерентностью излучения через внутренние потери, от которых напрямую зависит добротность холодного резонатора Фабри–Перо (4). В свою очередь изменение длины когерентности, как это было показано ранее в [12–14], определяет вид спектра и число каналов генерации в МЛД. Подлежит дальнейшему анализу связь между внутренними оптическими потерями $\alpha_{\text{вну}}$ в лазерных слоях и нелинейной рефракцией, имеющей место в активной полупроводниковой среде. Оба этих физических явления (диссипация и нелинейная рефракция) должны быть связаны между собой через наличие дефектов и неоднородностей в активном и волноводных слоях МЛД.

В то же время всевозможные попытки моделирования МЛД с применением традиционных методов [12–14], основывающихся на использовании когерентных подходов, оказываются малоэффективными, так как не могут описать одновременно весь лазерный резонатор. В пределах широкой области генерации МЛД в силу ограниченной величины длины пространственной когерентности и нелинейных свойств полупроводникового материала обязательно присутствует несколько когерентных, но несвязанных по фазе между собой каналов генерации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, мы показали, что в процессе деградации МЛД меняются диссипативные свойства кристалла, что опосредованно приводит к существенным изменениям характеристик излучения. В частности, при увеличении числа дефектов в активном и волноводных слоях МЛД происходит рост внутренних потерь, поэтому должна изменяться длина когерентности излучения лазера, а следовательно – число пространственных каналов генерации и линий в спектре излучения лазера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тарасов И.С.* // Квант. электрон. 2010. Т. 40. № 8. С. 661; *Tarasov I.S.* // Quant. Electron. 2010. V. 40. No. 8. P. 661.
2. *Близнюк В.В., Паршин В.А., Ржанов А.Г., Тарасов А.Е.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 2. С. 255; *Bli-znyuk V.V., Parshin V.A., Rzhanov A.G., Tarasov A.E.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 2. P. 184.
3. *Близнюк В.В., Коваль О.И., Паршин В.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 2. С. 225; *Bli-znyuk V.V., Koval O.I., Parshin V.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 2. P. 173.

4. Сидоров В.Г., Шмидт Н.М. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физ.-мат. науки. 2013. № 2(170). С. 71.
5. Гаркавенко А.С., Мокрицкий В.А., Маслов О.В., Соколов А.В. и др. // Наука и техника. 2020. Т. 19. № 4. С. 311.
6. Близнюк В.В., Коваль О.И., Паршин В.А. и др. // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2018. № 6. С. 1860501.
7. Близнюк В.В., Березовская Н.В., Брит М.А. и др. // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2016. № 5. С. 165303.
8. Koval O.I., Rzhanov A.G., Solovyev G.A. // Phys. Wave Phenom. 2013. V. 21. No. 4. P. 287.
9. <http://www.holography.ru/files/holmich.htm#top>.
10. Адамов А.А., Баранов М.С., Храмов В.Н. // Науч.-техн. Вест. ИТМО. 2018. Т. 18. № 3. С. 356.
11. Ржанов А.Г. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 1. С. 6; Rzhanov A.G. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 1. P. 1.
12. Rzhanov A.G. // EPJ Web Conf. 2019. V. 220. Art. No. 02013.
13. 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.
14. Пономарев Д.С., Васильевский И.С., Галиев Г.Б. и др. // ФТП. 2012. Т. 46. № 4. С. 500; Ponomarev D.S., Vasil'evskii I.S., Khabibullin R.A. et al. // Semiconductors. 2012. V. 46. No. 4. P. 484.

Coherence of high-power laser diodes radiation and their spectral-spatial characteristics

A. G. Rzhanov*

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

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

Possible physical mechanisms affecting the coherence length of the radiation of high-power laser diodes during their slow degradation are considered. The relationship between the coherence of radiation during laser degradation and the spatial-spectral separation of high-power laser radiation into separate generation channels is discussed.