

Спектры и когерентность лазерных диодов с широким контактом в надпороговом режиме генерации

А.Г. Ржанов

Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова

rjanov@mail.ru

В последних работах нами изучались теоретически и экспериментально спектры излучения лазерных диодов (ЛД) с широким контактом (ШК), мощность излучения которых составляла от десятых долей до единиц ватт [1-7]. Это были исследования возможности установления степени деградации ЛД с помощью детального изучения экспериментальных спектров излучения с последующей их привязкой к постепенному изменению параметров ЛД, которые являются свидетельством деградации. Прежде всего, это относится к величине внутренних потерь излучения в резонаторе $\alpha_{\text{внутр}}$ и средней длине когерентности излучения ЛД $L_{\text{ког}}$. Рассмотрение проводилось в предположении штатного режима работы при котором ЛДШК имеет срок службы не менее 10 000 часов и при этом рабочая точка на ватт-амперной характеристике (ВтАХ) находится примерно в середине линейного участка. Такой режим выбирается из лучших потребительских свойств устройства. Для установки штатного режима генерации используют драйвер: стабилизированный источник, рассчитанный на штатную величину тока накачки $I_{\text{ш}}$.

Для рассматриваемого теоретически ЛДШК штатный ток составлял примерно $I_{\text{ш}}=1$ А при мощности излучения $P_{\text{ш}}=0.5$ Вт, пороговом токе $I_{\text{пор}}=0.5$ А и средней длине волны $\lambda_0 = 981$ нм. Эти и подобные им ЛД с несколько другими параметрами были рассмотрены нами при разных часах наработки в штатном режиме [8]. Пример такого спектра ЛДШК в штатном режиме показан на рис. 1.

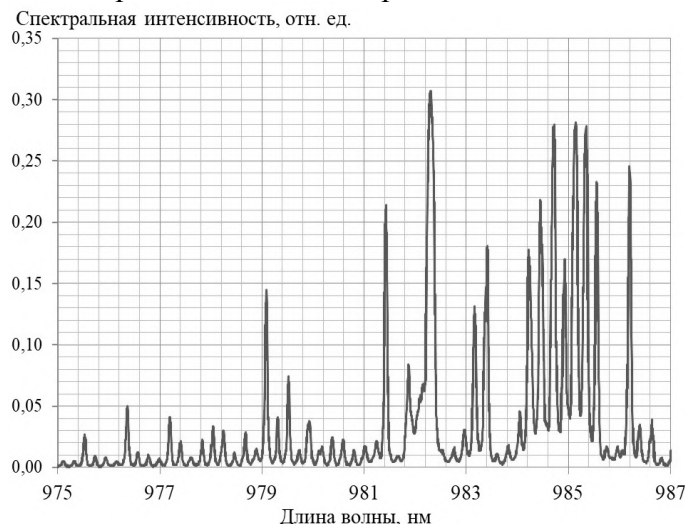


Рис. 1. Пример спектра излучения ЛДШК при штатном токе накачки [8].

В штатном режиме работы спектры излучения ЛДШК отличаются большой насыщенностью, связанной с наличием продольных, поперечных мод резонатора ЛД, а также присутствием в резонаторе генерации в нескольких когерентных, но не связанных по фазе излучения пространственных каналах. Кроме перечисленных типов оптических колебаний в сложной структуре полей активного лазерного резонатора возможно существование динамики излучения, которая может существенно обогащать спектр ЛД. Экспериментально при спектральных измерениях выделить такую динамику сложно. Возможность таких исследований открывают только методы

пространственной и спектральной хронографии. В конечном итоге все указанные особенности излучения связаны с нелинейным характером взаимодействия излучения с активной средой резонатора ЛДШК.

В приведённом на рис. 1 спектре излучения довольно сложно точно идентифицировать отдельные когерентные моды и выделить группы мод, соответствующие разным каналам генерации. Оценки параметров такого ЛД были сделаны нами в работе [9]. Для прояснения и упрощения анализа деградации ЛД мы предлагаем проводить анализ спектров, полученных при небольшом (5-10%) превышении порога генерации. Такой режим называют надпороговым.

Особенностью надпороговой генерации является, во-первых, отсутствие в каналах латеральных мод высших порядков. Во-вторых, эффективные внутренние потери $\alpha_{\text{внутр}}$ в резонаторе оказываются меньше за счёт того, что фактор оптического ограничения Γ по трансверсальной оси x (поперёк слоёв структуры) при малых значениях мощности светового излучения оказывается меньше, чем при больших. Коэффициент оптического ограничения Γ фундаментальной моды для тонких планарных волноводов можно оценивать по формуле [10]:

$$\Gamma \approx 2\pi^2 (n_2^2 - n_1^2) \frac{d_{\text{кя}}^2}{\lambda_0^2}, \quad (1)$$

где $d_{\text{кя}}$ - толщина слоя квантовой ямы, n_2 и n_1 - показатели преломления активного (квантовая яма) и соседних волноводных слоёв соответственно.

Например, для значений $d_{\text{кя}}=12$ нм, $n_1=3.4$ и $n_2=3.8$ в системе $\text{In}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}_{0.47}\text{P}_{0.53}$ / $\text{In}_{0.14}\text{Ga}_{0.86}\text{As}$ выражение (1) даёт приближённое значение $\Gamma=0.009$. Зная коэффициент нелинейной рефракции для $\text{In}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}_{0.47}\text{P}_{0.53}$ и соотношение между токами накачки в надпороговом и штатном режимах генерации ЛД мы можем оценить разницу значений Γ и внутренних потерь $\alpha_{\text{внутр}}$:

$$\alpha_{\text{внутр}} = \Gamma \alpha_{\text{кя}} + (1-\Gamma) \alpha_{\text{волновод}}, \quad (2)$$

где $\alpha_{\text{кя}}$ и $\alpha_{\text{волновод}}$ - потери в квантовой яме и в расширенной волноводной структуре лазера. Таким образом, параметры Γ и $\alpha_{\text{внутр}}$ определяют среднюю длину когерентности $L_{\text{ког}}$ лазерного излучения, а в конечном итоге и спектрально-пространственные характеристики излучения [8]:

$$n_{\text{эфф}} = \Gamma n_2 + (1-\Gamma) n_1, \quad (3)$$

$$L_{\text{ког}} = \frac{2\pi n_{\text{эфф}}}{\alpha_{\text{внутр}} + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2}}, \quad (4)$$

где $n_{\text{эфф}}$ - эффективный показатель преломления лазерного волновода, L - длина ЛД, R_1 , R_2 - коэффициенты отражения зеркал по мощности. Как правило, в промышленных ЛД средней мощности до 200-300 мВт величина $R_1 R_2=0.3$, а для мощности более 0.5 Вт $R_1 R_2=0.02$.

Остаётся плохо изученным вопрос о величине эффективного показателя преломления, с которым напрямую связан межмодовый спектральный интервал Фабри-Перо $\Delta\lambda_{\text{ФП}}$ ЛД [9, 10]:

$$\Delta\lambda_{\text{ФП}} = \frac{\lambda_0^2}{2n_{\text{эфф}} L}. \quad (5)$$

В выражении (3) от накачки зависят все величины, причём влияние это может быть довольно большим. Поэтому величина $\Delta\lambda_{\text{ФП}}$ при одной и той же длине лазерного резонатора в разных режимах может существенно различаться. Это наблюдалось в эксперименте. Применительно к ЛД на рис.1 имеем $L=670$ мкм. К сожалению, не всегда бывает известен точный состав слоёв ЛДШК и коэффициент нелинейной рефракции в системе с квантовой ямой и расширенным волноводом, что делает расчёты крайне неточными. Однако можно рассмотреть проблему с другой стороны: зная межмодовое расстояние $\Delta\lambda_{\text{ФП}}$ в надпороговом режиме оценить величину длины резонатор (5), а затем, используя данные спектральных измерений в штатном режиме, оценить изменения $n_{\text{эфф}}$, Γ и коэффициент нелинейной рефракции $A = \left| \frac{\partial n_{\text{эфф}}}{\partial N} \right|$, где N - концентрация избыточных носителей в квантовой яме. Для расчётов удобно воспользоваться экспериментальной ВТАХ и формулами, следующими из кинетических уравнений:

$$\partial J = \frac{ed}{\tau_{\text{cn}}} \partial N, \quad (6)$$

$$A = \frac{\partial n_{\text{эфф}}}{\partial I} \bigg/ \frac{\partial N}{\partial I}, \quad (7)$$

где e - заряд электрона, d - толщина квантовой ямы, I , J - ток накачки и его плотность, N , τ_{cn} - концентрация и время жизни избыточных носителей в квантовой яме.

Параметры (1)-(5) является определяющим в ЛДШК для фиксации качества и степени деградации ЛДШК [8].

Как было показано в работах [8, 9], для ЛДШК характер спектра излучения, пространственная структура и количество каналов генерации существенно зависят от внутренних потерь $\alpha_{\text{внутр}}$. Это является причиной различия распределении излучения по каналам генерации и числа этих каналов. Поэтому следует ожидать в эксперименте токовую зависимость числа широких пиков в частотных спектрах ЛДШК: чем выше ток накачки, тем большее число широких пиков (1-3 нм по длине волны) должно появляться в спектре излучения лазера.

Таким образом, в работе предлагается способ определения качества гетероструктуры мощных ЛДШК по виду их надпороговых спектров.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Г. Ржанов // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 1. С. 6.
2. А.Г. Ржанов // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 2. С. 250.
3. А.Г. Ржанов // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 2. С. 221.
4. A.G. Rzhанov // EPJ Web of Conferences. 2019. V. 220, P. 02013-1.
5. O.I. Koval et al. // Physics of Wave Phenomena. 2013. V. 21. No. 4. P. 287.
6. В. В. Близнюк и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 12. С. 1666.
7. А.Г. Ржанов // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 11. С. 1508.
8. V. V. Bliznyuk et al. // Bull.Rus.Acad.Sci.:Phys. 2024. V. 88, No. 1. P. 21.
9. А.Г. Ржанов и др. // Самарцевские Чтения (ФЭКС/IWQO-2023): Сборник тезисов. г. Светлогорск, 18 – 22 сентября 2023 г. С. 174.
10. Х. Кейси, М. Паниш "Лазеры на гетероструктурах. Основные принципы. Т.1" М.: Мир, 1981.