

Исследование надежности полупроводниковых излучателей с различной конструкцией резонаторов

© А.В. Иванов, В.Д. Курносов, К.В. Курносов, Ю.В. Курнявко, А.В. Лобинцов, А.С. Мешков, В.Н. Пенкин, В.И. Романцевич, М.Б. Успенский, Р.В. Чернов

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт „Полус“ им. М.Ф. Стельмаха»,
117342 Москва, Россия
e-mail: webeks@mail.ru

(Поступило в Редакцию 9 июля 2015 г. В окончательной редакции 16 февраля 2016 г.)

Представлены результаты исследований наработки лазерных диодов обычной конструкции и диодов с неинжектируемыми выходными секциями. Обсуждены причины уменьшения наработки диодов с одной просветленной гранью резонатора по сравнению с диодами с двумя защитными покрытиями и излучателями с волоконной брэгговской решеткой.

Введение

Для накачки и детектирования эталонного квантового перехода в квантовых стандартах частоты на пучках и парах атомов цезия в работах [1–3] предложена и исследована конструкция одночастотного излучателя с волоконной брэгговской решеткой (ВБР). Конструкция включает лазерный диод (ЛД), выходная грань которого имеет защитное покрытие, а грань резонатора ЛД, обращенная к ВБР, имеет просветляющее покрытие.

Исследованию надежности и деградации ЛД, светодиодов и оптических приборов посвящены монографии [4,5 и ссылки в них]. Причины внезапных отказов полупроводниковых лазеров рассмотрены в работе [6]. В работе [7] предложена методика расчета, позволяющая оценить, какой вклад в общий процесс деградации излучателя вносят по отдельности процессы старения лазерного диода и оптической системы. Подробно причины деградации ЛД и зеркал резонатора рассмотрены в работах [8–11].

Настоящая работа посвящена исследованию надежности двух конструкций резонаторов диодов, изображенных на рис. 1. На рис. 1, *a, b* представлены как ЛД с двумя защитными покрытиями, так и ЛД с одной защитной и одной просветленной гранью резонатора (далее ЛД с ОПГР), которые используются в составе излучателя с ВБР.

Первая конструкция ЛД представляет прямой мезаполосок, перпендикулярный сколотым граням резонатора (далее фигурирует как обычный ЛД). Вторая конструкция представляет ЛД с неинжектируемыми выходными секциями, изображенная на рис. 1, *b*. В первой конструкции ЛД накачивается весь мезаполосок, а во второй — часть мезаполоска.

На рис. 1, *a, b* представлены диоды с резонатором Фабри-Перо, мезаполосок которых перпендикулярен сколотым граням кристалла. В диодах с резонатором Фабри-Перо получить коэффициент отражения меньше

чем 0.5% за счет напыления просветляющих пленок представляет большие технологические трудности. Наличие резонатора Фабри-Перо в составе излучателя с ВБР может приводить к нестабильности генерируемой им длины волны излучения, поэтому необходимо уменьшать коэффициент отражения ЛД с ОПГР, входящего в состав излучателя с ВБР.

В настоящей работе представлены результаты исследования наработки двух конструкций диодов с одинаковой длиной резонатора, изображенных на рис. 1. Для оценки качества гетероструктуры (ГС) проводились испытания на наработку ЛД с двумя защитными покрытиями граней резонатора ($R_1 = R_2 = 30\%$). Для отбраковки потенциально ненадежных ЛД с ОПГР ($R_1 = 30\%$ и $R_2 \leq 0.5\%$) также проводились их испытания на наработку. Обнаружено, что наработка одиночных ЛД с ОПГР более чем на два порядка ниже аналогичных ЛД с ОПГР, но входящих в состав излучателя с ВБР и значительно ниже наработки ЛД с защитными покрытиями. Анализируется причина такого поведения наработки ЛД с ОПГР.

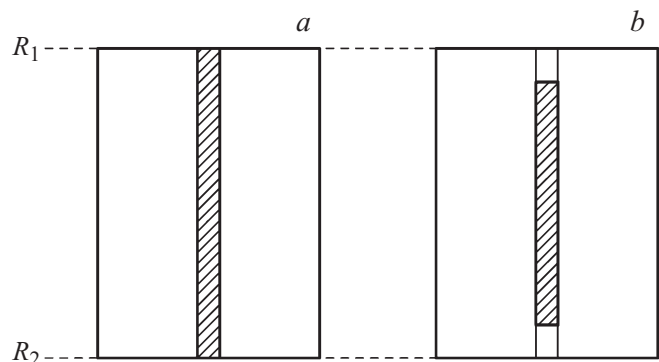


Рис. 1. Конструкции излучателей: *a* — обычная, *b* — с неинжектируемыми выходными секциями. Накачиваемые области показаны штриховкой, R_1, R_2 — коэффициенты отражения граней резонатора.

Эксперимент

Для экспериментальных исследований наработки излучателей, изображенных на рис. 1, *a, b*, использовались ЛД, изготовленные из одной и той же ГС, но имеющие различные диэлектрические покрытия зеркал резонатора. ГС выращивались по МОС-гидридной технологии в системе GaAs/AlGaAs с толщиной активной области 90 Å. С двух сторон активной области располагались волноведущие слои ($x = 0.31$) толщиной 0.12 μm, а также *p*- и *n*-эмиттеры ($x = 0.37$) толщиной 1.4 и 2.4 μm соответственно. Высоколегированный p^+ -слой использовался для создания омического контакта. Активная область и волноведущие слои были нелегированными. Длина резонатора была 600 μm, ширина мазополоска 2.5 μm. Использовалась стандартная конструкция ridge-диода.

Конструкция ЛД с неинжектурируемыми выходными секциями, представленная на рис. 1, *b*, имела стравленный с двух сторон p^+ -слой на длину 20 μm. В обычной конструкции ЛД, изображенной на рис. 1, *a*, p^+ -слой был по всей длине резонатора 600 μm. Диоды напаивались на медную контактную пластину активной областью вверх. В качестве припоя использовался индий.

Лазерные диоды устанавливались в установку для ресурсных испытаний. Для всех ЛД температура испытаний составляла 33°C (минимальная температура в установке для ресурсных испытаний). При проведении испытаний на наработку ток накачки для всех диодов был неизменным и равным 100 mA.

На рис. 2, *a* представлены зависимости изменения мощности излучения от времени наработки в течение 3400 h ЛД с двумя защитными покрытиями с неинжектурируемыми выходными секциями. На рис. 2, *b* представлены зависимости наработки для обычного ЛД с двумя защитными покрытиями, а на рис. 2, *c* — ЛД с ОПГР. Анализ кривых, изображенных на рис. 2, показывает резкое уменьшение наработки ЛД с ОПГР.

Для сравнения результатов наработки ЛД использовалась линейная экстраполяция экспериментальных зависимостей:

$$P = A + Bt, \tag{1}$$

где P — относительная мощность излучения, A и B — константы, t — время.

Результаты экстраполяции времени наработки ЛД для случая уменьшения мощности излучения на 50%

| 1. ЛД с неинжектурируемыми секциями $R_1 = R_2 = 30\%$ | | 2. Обычный ЛД $R_1 = R_2 = 30\%$ | | 3. ЛД с просветляющим покрытием $R_1 = 30\%, R_2 < 0.5\%$ | |
|--|--------------------|----------------------------------|--------------------|---|--------------------|
| № ЛД | время наработки, h | № ЛД | время наработки, h | № ЛД | время наработки, h |
| 07 | 464 500 | 04 | 31 420 | 35 | 480 |
| 17 | 314 180 | 14 | 23 430 | 15 | 420 |
| 27 | ∞ | 24 | 18 060 | 45 | 360 |
| 37 | 104 600 | 34 | 29 930 | 25 | 310 |
| 47 | ∞ | 44 | 33 270 | 05 | 250 |

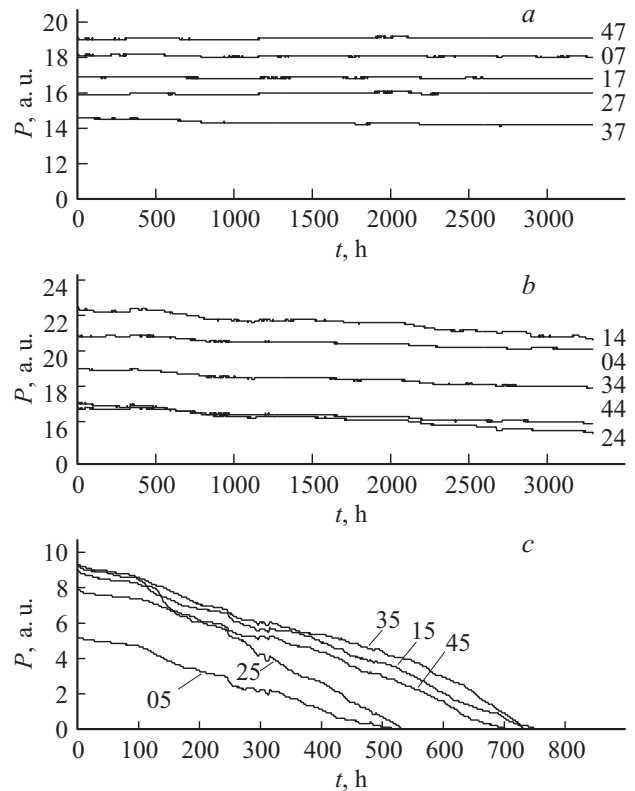


Рис. 2. Зависимости наработки: *a* — ЛД с неинжектурируемыми выходными секциями с $R_1 = R_2 = 30\%$ (приборы № 07, 17, 27, 37, 47), *b* — обычные ЛД с $R_1 = R_2 = 30\%$ (приборы № 04, 14, 24, 34, 44), *c* — ЛД с просветленной гранью $R_1 = 30\%, R_2 < 0.5\%$ (приборы № 05, 15, 25, 35, 45).

Результаты экстраполяции времени наработки ЛД для случая уменьшения мощности излучения на 50% представлены в таблице.

Анализ первого столбца таблицы для случая ЛД с неинжектурируемыми выходными секциями (рис. 1, *b*) с коэффициентами отражения $R_1 = R_2 = 30\%$ показывает, что из 5 приборов два прибора (со знаком ∞) либо не изменяли выходную мощность излучения, либо, наоборот, увеличили мощность излучения в процессе испытаний на наработку. Таким образом, наработка приборов с неинжектурируемыми выходными секциями с защитными покрытиями превышает 10^5 h.

Во втором столбце таблицы представлены результаты наработки обычного ЛД (рис. 1, *a*) с коэффициентами отражения двух граней резонатора $R_1 = R_2 = 30\%$. Видно, что наработка в среднем более чем на порядок уступает наработке ЛД с неинжектурируемыми выходными секциями.

В третьем столбце таблицы представлены результаты наработки ЛД с ОПГР. При нанесении просветляющего покрытия на одну из граней резонатора диод работает в лазерном режиме, но с большей величиной порогового тока генерации. Обращает на себя внимание резкое уменьшение времени наработки просветленных диодов по сравнению с ЛД с защитными покрытиями (столбцы 2 и 3 таблицы).

Обсуждение полученных результатов

1. Сравнение результатов, представленных в таблице, показывает, что средняя наработка ЛД с защитными покрытиями $R_1 = R_2 = 30\%$ с неинжектурируемыми выходными секциями на порядок превышает наработку обычного ЛД с аналогичными защитными покрытиями, изготовленных из одной и той же ГС (таблица, столбцы 1 и 2).

2. Средняя наработка ЛД с ОПГР (столбец 3 таблицы) приблизительно в 75 раз ниже средней наработки диодов, изготовленных из одной и той же ГС, но имеющих защитные покрытия с $R_1 = R_2 = 30\%$ (таблица, столбец 2).

Для объяснения результатов наработки ЛД с ОПГР (рис. 1, а) было высказано предположение, что просветляющее покрытие, представляющее двухслойную пленку ($0.07\lambda \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.2\lambda \text{ ZrO}_2$), является причиной малой наработки приборов. Предполагалось, что оксид циркония (ZrO_2) при нагреве кристалла диода за счет протекающего тока накачки и нагреве зеркал резонатора за счет поглощения лазерного излучения, выделяет атомы кислорода. Атомы кислорода через „тонкую“ пленку $0.07\lambda \text{ Al}_2\text{O}_3$ проникают в активную область диода и приводят к уменьшению мощности излучения. Однако испытания показали, что просветляющее диэлектрическое покрытие ($0.07\lambda \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.2\lambda \text{ ZrO}_2$), которое используется в ЛД с ОПГР не является причиной уменьшения наработки диодов.

Использование в качестве просветляющих покрытий Si_3N_4 и ZnSe , не содержащих в своем составе атомов кислорода, незначительно увеличили наработку просветленных приборов. Зависимости наработки ЛД с просветляющими покрытиями одной грани ZnSe с очисткой в потоке водорода представлены на рис. 2, с.

Многочисленные экспериментальные исследования наработки ЛД показали, что первопричиной деградации ЛД является сильный нагрев зеркал резонатора за счет большей величины тока накачки, протекающего через прилегающие к зеркалам области, и большей величины плотности фотонов на выходных гранях резонатора по сравнению с центральной частью диода.

Распределение спектральной плотности фотонов по длине резонатора ЛД показано на рис. 3 и может быть записано по аналогии с работами [11,12] в виде

$$N_{\Sigma}(z, E) = N_{\Sigma}^{+}(z, E) + N_{\Sigma}^{-}(z, E), \quad (2)$$

где N_{Σ}^{+} , N_{Σ}^{-} — спектральные плотности фотонов, распространяющихся в положительном и отрицательном направлениях оси z ,

$$N_{\Sigma}^{+}(z, E) = \frac{Gr_{sp}(E)}{2v_{gr}} \frac{\exp[(\Gamma g(E) - \alpha_0)z] - 1}{\Gamma g(E) - \alpha_0},$$

$$N_{\Sigma}^{-}(z, E) = \frac{Gr_{sp}(E)}{2v_{gr}} \frac{\exp[(\Gamma g(E) - \alpha_0)(L - z)] - 1}{\Gamma g(E) - \alpha_0}, \quad (3)$$

где g — коэффициент усиления, α_0 — нерезонансные потери, $v_{gr} = c/n_{gr}$ — групповая скорость света, n_{gr} —

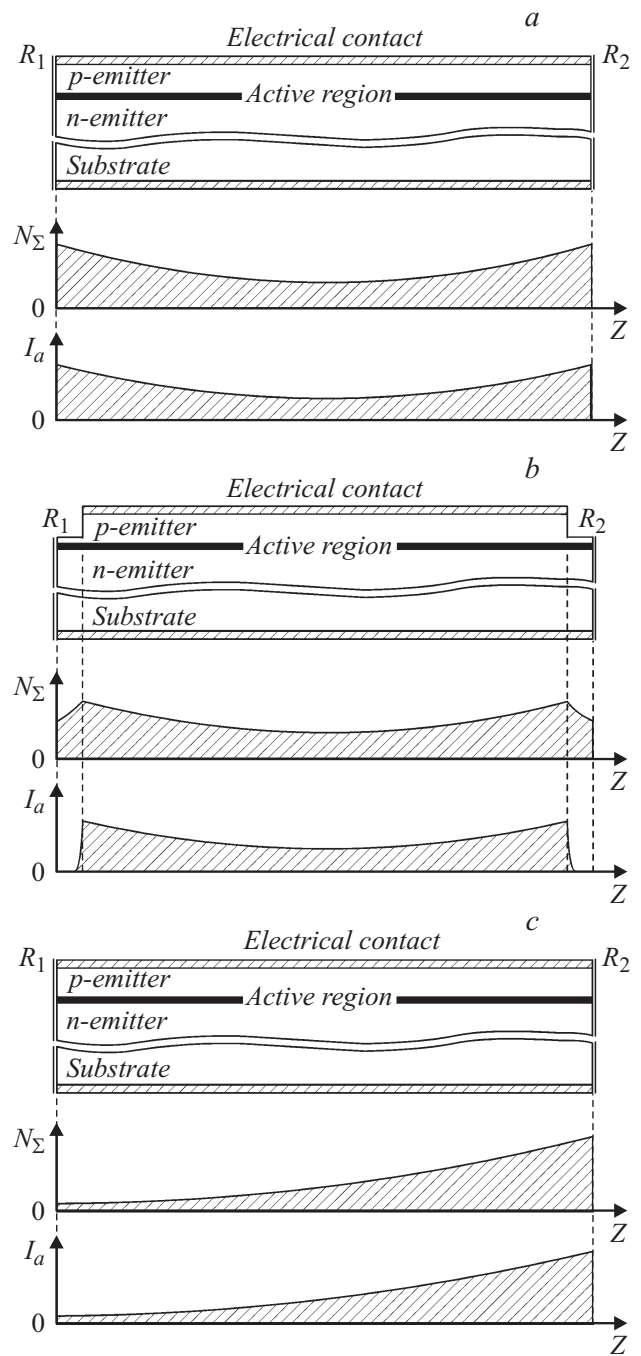


Рис. 3. Распределение плотности фотонов и тока накачки вдоль резонатора ЛД: а — в случае симметричных коэффициентов отражения зеркал $R_1 = R_2$, с электрическим контактом на всей полоске, б — в случае симметричных коэффициентов отражения зеркал $R_1 = R_2$ для ЛД с неинжектурируемыми выходными секциями, с — распределение плотности фотонов и тока накачки вдоль резонатора ЛД в случае несимметричных коэффициентов отражения зеркал $R_2 < R_1$ с электрическим контактом на всей полоске.

групповой показатель преломления, c — скорость света, $r_{sp}(E)$ — скорость спонтанного испускания фотонов, Γ — коэффициент оптического ограничения.

Уравнение для плотности носителей в активной области ЛД может быть записано в виде

$$\frac{I_a(z)}{eV_a} = R_a(z) + v_{gr} \times \int_{E_g + E_{c1} + E_{v1}}^{\infty} \Gamma g(E) \cdot [N_{\Sigma}^+(z, E) + N_{\Sigma}^-(z, E)] dE, \quad (4)$$

где I_a — ток накачки, проходящий через активную область, e — заряд электрона, R_a — скорость излучательной и безызлучательной рекомбинации, $V_a = S_a \cdot L$ — объем активной области.

Уравнения (2)–(4) показывают, что плотность фотонов и ток накачки имеют неоднородное распределение вдоль длины резонатора ЛД, при этом величина тока накачки в выделенном сечении тем больше, чем больше плотность фотонов в данном сечении.

На рис. 3 сверху схематично представлены конструкция ЛД и распределение плотности фотонов и тока накачки вдоль длины резонатора ЛД. Из рис. 3 видно, что при одинаковых коэффициентах отражения зеркал ЛД $R_1 = R_2$ имеем симметричное распределение плотности фотонов и тока накачки относительно центра резонатора ЛД. Ток накачки на торцевых гранях ЛД выше, чем в центре. При этом, чем больше локальный нагрев зеркал, тем меньше ширина запрещенной зоны активной области ЛД, тем больше поглощение в этой области и тем больше нагрев зеркал.

Распределение плотности фотонов и тока накачки в случае ЛД с неинжектируемыми выходными секциями представлено на рис. 3, *b*. Видно, что в этом случае ток накачки не проходит через области, прилегающие к зеркалам ЛД, и, следовательно, не нагревает их. Мощность излучения на выходе ЛД меньше, чем в случае рис. 3, *a*, так как часть излучения поглощается в неинжектируемых секциях. Однако, наработка ЛД в этом случае выше по сравнению с ЛД рис. 3, *a*, несмотря на большую плотность тока инжекции (накачивается часть кристалла), приводящего к нагреву ЛД, и к увеличению длины волны генерации.

На рис. 3, *c* представлено распределение плотности фотонов и тока накачки для случая, когда коэффициент отражения зеркала R_2 меньше, чем коэффициент отражения зеркала R_1 . Видно несимметричное распределение как плотности фотонов, так и тока накачки. При этом большая часть тока накачки приходится на просветленное выходное зеркало R_2 , что приводит к локальному разогреву этой области. При этом, чтобы компенсировать потери на вывод излучения, необходимо увеличить величину квазиуровня Ферми, что приводит к укорочению длины волны генерации. Нагрев зеркала ЛД за счет увеличенного тока накачки и более сильного поглощения коротковолнового излучения приводит к дополнительному нагреву зеркала ЛД и к уменьшению наработки ЛД.

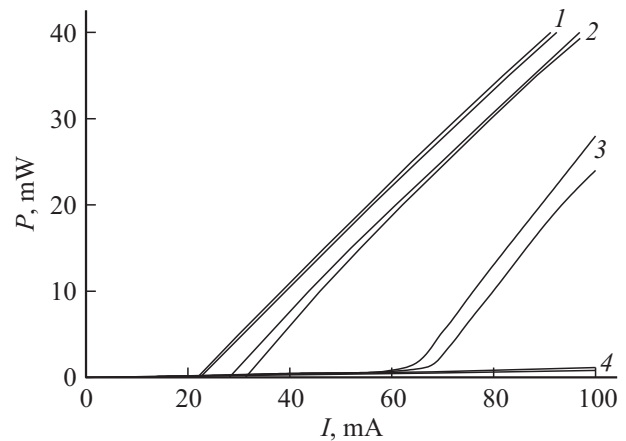


Рис. 4. Ватт-амперные характеристики: обычные ЛД с $R_1 = R_2 = 30\%$ (1), ЛД с неинжектируемыми выходными секциями $R_1 = R_2 = 30\%$ (2), обычные ЛД с $R_1 = 30\%$, $R_2 < 0.5\%$ (3), ЛД с неинжектируемыми выходными секциями $R_1 = 30\%$, $R_2 < 0.5\%$ (4).

Область нарушенной кристаллической решетки, образующаяся при скалывании кристаллов, со временем расширяется вглубь активной области диода, приводя к деградации выходной мощности излучения. Электронный спектр вблизи сколотой грани существенно отличается от спектра в его толще. Возникновение новых состояний способствует появлению безызлучательных центров рекомбинации, переводящих энергию электронно-дырочной пары в тепло. С увеличением мощности излучения ЛД увеличивается скорость деградации. Подробно причины деградации ЛД рассмотрены в работах [8–11].

На рис. 4 представлены ватт-амперные характеристики (ВтАХ) обычных ЛД с $R_1 = R_2 = 30\%$ (кривые 1), ЛД с неинжектируемыми выходными секциями с $R_1 = R_2 = 30\%$ (кривые 2), ЛД с ОПГР (кривые 3) и ЛД с неинжектируемыми выходными секциями с $R_1 = 30\%$, $R_2 < 0.5\%$ (кривые 4). Чтобы не загромождать рисунок, вместо пяти характеристик в каждой выборке представлены две крайних характеристики. Из рис. 4 видно, что порог генерации для ЛД с неинжектируемыми выходными секциями (кривые 2) выше, чем порог генерации ЛД (кривые 1), у которых отсутствуют ненакачиваемые области. Дифференциальный наклон ВтАХ практически остался неизменным, и кривые идут параллельно друг другу. Пороговые токи накачки были в районе 20–25 и 30–35 мА у ЛД с неинжектируемыми выходными секциями. Нанесение просветляющего покрытия на одну грань резонатора (рис. 1, *a*) привело к увеличению порога генерации до величин 65–70 мА и увеличению дифференциальной эффективности (рис. 4, кривые 3). Нанесение просветляющего покрытия на ЛД с неинжектируемыми выходными секциями привело к увеличению порога генерации свыше 100 мА (рис. 4, кривые 4).

На рис. 5 представлены спектральные характеристики диодов, нумерация которых соответствует ВтАХ, приведенных на рис. 4. Все спектральные характеристики

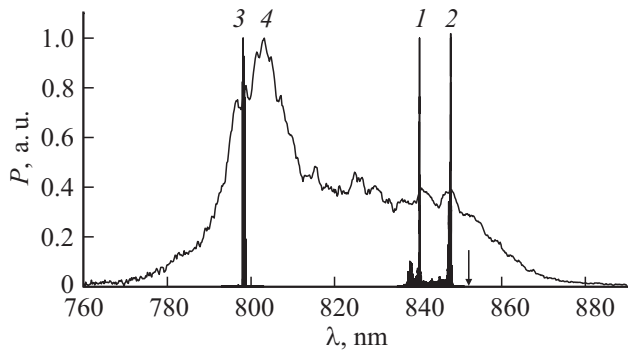


Рис. 5. Спектральные характеристики: обычные ЛД с $R_1 = R_2 = 30\%$ (1), ЛД с неинжектируемыми выходными секциями $R_1 = R_2 = 30\%$ (2), обычные ЛД с $R_1 = 30\%$, $R_2 < 0.5\%$ (3), ЛД с неинжектируемыми выходными секциями $R_1 = 30\%$, $R_2 < 0.5\%$ (4). Стрелкой отмечена длина волны излучения 852.12 nm ЛД с ВБР, соответствующая свечению паров цезия в ячейке.

сняты при одном и том же токе накачки, равном 100 мА, и нормированы на максимальную величину.

Анализ характеристик по наработке диодов, представленных на рис. 2 и в таблице, показывает корреляцию наработки с неоднородным распределением фотонов, тока накачки (рис. 3) и со спектральными характеристиками. Из рис. 5 следует, что ЛД с неинжектируемыми выходными секциями с двумя защитными зеркалами (спектр 2) соответствует максимальной наработке и максимальной длине волны излучения, несмотря на повышенную плотность тока, так как накачивается не весь полюсок. Длина волны излучения, соответствующая обычным ЛД с двумя защитными зеркалами, представленная спектром 1 на рис. 5, короче длины волны ЛД с неинжектируемыми выходными секциями (спектр 2), и обычные ЛД имеют на порядок меньшую наработку. При нанесении просветляющего покрытия на обычные ЛД длина волны излучения сдвигается в еще более коротковолновую область (спектр 3), и эти ЛД имеют минимальную наработку. Широкий спектр излучения ЛД с неинжектируемыми выходными секциями с одной просветленной гранью, представленный кривой 4 на рис. 5, соответствует режиму отсутствия генерации, что видно из кривых 4 рис. 4.

Для анализа полученных результатов был проведен расчет спектральных характеристик ЛД для системы GaAs/AlGaAs по аналогии с методикой работы [13]. Расчет проводился с использованием модели излучательных переходов без выполнения правила отбора по волновому вектору. При расчетах учитывалось сужение ширины запрещенной зоны AlGaAs в активной области E_{ga} и в волноведущих слоях E_{gb} при накачке током лазерной структуры ($i = a, b$):

$$E_{gi} = E_g(x_i) - k_g(n_i^{1/3} + p_i^{1/3}), \quad (5)$$

где n_a, p_a, n_b, p_b — плотности электронов и дырок в активной области и волноводе, $E_g(x_i) = 1.424 + 1.247x_i$ и $k_g = 1.65 \cdot 10^{-8} \text{ eV} \cdot \text{cm}$.

Потери в лазере составляют

$$\alpha_\Sigma = \alpha + L^{-1} \ln \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}}, \quad (6)$$

где $\alpha = 15 \text{ cm}^{-1}$ включает нерезонансные потери и потери на свободных носителях в активной области, волноведущих и эмиттерных слоях; L — длина резонатора лазера; R_1, R_2 — коэффициенты отражения зеркал.

Если взять $R_1 = R_2 = 0.3$, когда диод работает в лазерном режиме с двумя защитными гранями резонатора (спектр 1 на рис. 5), то расчеты показывают, что основной вклад в величину коэффициента усиления дают переходы с первого квантового уровня зоны проводимости на уровни тяжелых и легких дырок валентной зоны.

Если взять $R_1 = 0.3, R_2 = 0.005$, когда диод работает в лазерном режиме с одной просветленной гранью резонатора, то резко возрастают потери на вывод излучения (см. формулу (6)). Квазиуровень Ферми поднимается вверх и включаются в коэффициент усиления переходы со второго квантового уровня в зоне проводимости на уровни тяжелых и легких дырок валентной зоны. Длина волны излучения сдвигается в коротковолновую область (спектр 3 на рис. 5), и ЛД с ОПГР имеют минимальную наработку (см. таблицу).

В то же время испытания ЛД с ОПГР с волоконной брэгговской решеткой (излучатель с ВБР), изготовленные из одной и той же ГС, и с приблизительно одинаковой с одиночным ЛД с ОПГ мощностью излучения имели экстраполированную наработку, превышающую 10^5 h . То есть имели не менее чем на два порядка большую наработку по сравнению со столбцом 3 таблицы. Коэффициент отражения ВБР был равен 90%. Шаг брэгговской решетки выбирался из условия, чтобы после стыковки длина волны генерации ЛД с ВБР была равна 852.12 nm (отмечено стрелкой на рис. 5), что обеспечивало попадание в D_2 -линию цезия. При этом наблюдалось яркое свечение паров цезия в ячейке. Расчеты показывают, что в этом случае можно считать равномерным распределением тока накачки ЛД и основной вклад в величину коэффициента усиления дают переходы с первого квантового уровня зоны проводимости на уровни тяжелых и легких дырок валентной зоны и приборы работают на длинноволновом краю коэффициента усиления. Длина волны излучения ЛД с защитными покрытиями $R_1 = R_2 = 30\%$ с неинжектируемыми выходными секциями имеет большую длину волны излучения (спектр 2 на рис. 5) и отсутствует ток накачки через зеркала ЛД. Лазерные диоды имеют на порядок большую наработку по сравнению с обычным ЛД с защитными покрытиями (спектр 1 на рис. 5), изготовленными из одной и той же ГС.

Таким образом, можно считать, что причиной резкого уменьшения наработки одиночного ЛД с ОПГР является увеличение тока накачки, протекающего через просветленное зеркало, и укорочение длины волны генерации. Сдвиг длины волны излучения в коротковолновую область способствует дополнительному нагреву зеркал

резонатора за счет более сильного поглощения излучения в областях, прилегающих к граням резонатора, по сравнению с диодами с двумя защитными гранями резонатора и ЛД с ОПГР с волоконной решеткой, работающими с более длинными волнами излучения.

Заключение

1. Нарботка ЛД с неинжектируемыми выходными секциями, изготовленных из одной и той же ГС, на порядок выше наработки обычных ЛД с одинаковыми защитными покрытиями.

2. Уменьшение времени наработки одиночного ЛД с ОПГР связано с перераспределением плотности фотонов и тока накачки к просветленной грани резонатора и с укорочением длины волны излучения.

Список литературы

- [1] Журавлева О.В., Иванов А.В., Курносков В.Д. и др. // Квант. электрон. 2008. Т. 38. № 4. Р. 319–324.
- [2] Иванов А.В., Курносков В.Д., Курносков К.В. и др. // Квант. электрон. 2011. Т. 41. № 8. С. 692–698.
- [3] Жолнеров В.С., Иванов А.В., Курносков В.Д. и др. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 6. С. 63–68.
- [4] Fukuda M. Reliability and Degradation of Semiconductor Lasers and LEDs. London: Artech House Boston, 1991. P. 342.
- [5] Ueda O. Reliability and Degradation of III–V Optical Devices. London: Artech House Boston, 1996. P. 353.
- [6] Елисеев П.Г. Причины внезапных отказов полупроводниковых лазеров. Итоги науки и техники. Сер. Электроника. Том 23. М.: ВИНТИ, 1989. С. 1–52.
- [7] Журавлева О.В., Иванов А.В., Курносков В.Д. и др. // ФТП. 2010. Т. 44. Вып. 3. С. 377–382.
- [8] Мифтахутдинов Д.Р., Богатов А.П., Дракин А.Е. // Квант. электрон. 2010. Т. 40. № 7. С. 583–588.
- [9] Мифтахутдинов Д.Р., Богатов А.П., Дракин А.Е. // Квант. электрон. 2010. Т. 40. № 7. С. 589–595.
- [10] Fukuda M., Okayasu M., Tamayo J., Nakano J. // IEEE J. Quant. Electron. 1994. Vol. 30. N 2. P. 471–476.
- [11] Higashi T., Ogita S. et al. // IEEE J. Quant. Electron. 1993. Vol. 29. N 6. P. 1918–1923.
- [12] Журавлева О.В., Курносков В.Д., Курносков К.В. и др. // Квант. электрон. 2004. Т. 34. № 1. С. 15–19.
- [13] Иванов А.В., Курносков В.Д., Курносков К.В. и др. // Квант. электрон. 2006. Т. 36. № 10. С. 918–924.