

ОБ ОПТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЗЕРКАЛ ВЫСОКОМОЩНЫХ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ С РАЗДЕЛЬНЫМ ОГРАНИЧЕНИЕМ, РАБОТАЮЩИХ В НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ

© *Ж.И.Алферов, Н.И.Кацавец, В.Д.Петриков,
И.С.Тарасов, В.Б.Халфин*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
(Получена 22 мая 1995 г. Принята к печати 31 мая 1995 г.)

Произведен расчет локальной температуры активной области на зеркалах лазерных диодов с отдельным ограничением. Показано, что максимальная оптическая плотность лазерной моды на зеркале, которую можно получить до его катастрофической деградации, зависит от фактора оптического ограничения структуры (Γ -фактора) и толщины приповерхностного слоя активной области с повышенной скоростью безызлучательной рекомбинации. Проведены детальные исследования локальной температуры активной области на зеркалах квантово-размерных содержащих Al (AlGaAs/GaAs, InGaAs/AlGaAs/GaAs) и свободных от него (InGaAsP/GaAs) лазерных диодов с различной величиной Γ -фактора, которые хорошо согласуются с расчетными данными.

Введение

Развитие технологии получения квантово-размерных лазерных структур отдельного ограничения позволило значительно увеличить предельную оптическую мощность лазерных диодов (ЛД), работающих в непрерывном режиме [1]. Плотность оптического потока в ЛД на основе таких структур достигает величины порядка нескольких МВт/см². При этом основным фактором, ограничивающим выходную мощность и время жизни ЛД становится деградация зеркал, обусловленная локальным разогревом активного слоя в приповерхностной области.

Температура зеркал ЛД в системе AlGaAs/GaAs была предметом как экспериментальных [2–5], так и теоретических [6–8] работ, в которых показано, что на поверхности зеркала работающего ЛД наблюдается скачок температуры — «перегрев» зеркала, связанный с поглощением собственного лазерного излучения приповерхностным слоем

активной области (АО). В большинстве работ при объяснении такого перегрева использовалась модель поверхностной рекомбинации [2,6], согласно которой безызлучательная рекомбинация неравновесных носителей заряда, диффундирующих по АО, имеет место только на поверхности зеркала, а поглощение лазерного излучения и генерация неравновесных носителей заряда происходят в примыкающем к поверхности зеркала обедненном неравновесными носителями слое АО. Толщина этого слоя не превышает длину амбиполярной диффузии и уменьшается с увеличением оптической плотности излучения на зеркале. При этом сверхлинейный характер зависимости перегрева зеркал от выходной оптической мощности, $\Delta T_{\text{opt}}^m = f(P)$, объяснялся усилением поглощения лазерной моды, вызванным сужением запрещенной зоны в перегретой приповерхностной части АО [2].

Однако в случае тонкой (квантово-размерной) АО такой механизм поверхностной рекомбинации должен приводить к сублинейной зависимости $\Delta T_{\text{opt}}^m = f(P)$ [8], что не согласуется с рядом экспериментальных данных для ЛД, как широко распространенных AlGaAs/GaAs, так и не содержащих алюминий InGaAsP/GaAs [9].

В работе [9] нами была предложена модель тепловыделения на зеркале ЛД, предполагающая существование на поверхности зеркала ЛД слоя АО с повышенной скоростью безызлучательной рекомбинации и, как следствие, пониженной концентрацией неравновесных носителей заряда. В этом случае поглощение лазерного излучения и безызлучательная рекомбинация неравновесных носителей заряда имеют место в слое толщиной L , которая не зависит от оптической плотности энергии на зеркале, а определяется только материалом АО, способом пассивации поверхности зеркала и временем работы ЛД. Такая модель хорошо объясняет суперлинейную зависимость $\Delta T_{\text{opt}}^m = f(P)$ в квантово-размерных ЛД с отдельным ограничением.

Цель настоящей работы — детальное исследование поведения локальной температуры АО на зеркалах квантово-размерных ЛД, работающих в непрерывном режиме и изготовленных на основе свободных от Al (InGaAsP/GaAs) и содержащих Al (AlGaAs/GaAs, InGaAs/AlGaAs/GaAs) гетероструктур, в зависимости от оптической плотности излучения ЛД на зеркале, а также исследование факторов, оказывающих определяющее влияние на оптическую прочность зеркал ЛД.

Исследуемые образцы и методика измерения локальной температуры

Локальная температура АО на зеркалах ЛД измерялась с помощью фотолюминесцентного метода, основанного на измерении сдвига полосы фотолюминесценции (ФЛ) эмиттеров и подробно описанного в [9]. При этом точность измерения локальной температуры превышала точность измерения этой величины широко распространенным методом рамановской спектроскопии [5] и составляла $\pm 2^\circ\text{C}$.

Структурная схема методики измерения локальной температуры АО на зеркалах ЛД представлена на рис. 1, а. Возбуждение ФЛ осуществлялось модулированным излучением аргонового лазера с длиной

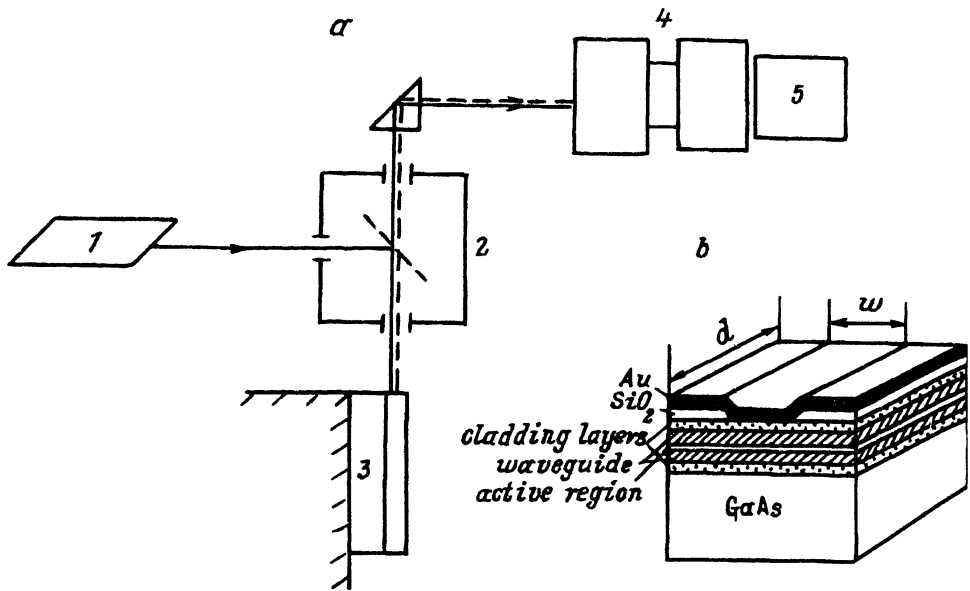


Рис. 1. Структурная схема методики по измерению локальной температуры активной области на зеркалах ЛД (а) и схематическое изображение полоскового ЛД (б).

волны 4880 \AA (1), которое с помощью оптического микроскопа (2) фокусировалось на переднем зеркале ЛД (3) в пятно диаметром 3 мкм. Мощность возбуждающего излучения не превышала 1 мВт, а разогрев поверхности образца возбуждающим излучением — 2°C . Излучение эмиттеров фокусировалось на щель двойного монохроматора $2 \times \text{МДР-23}$ (4) и измерялось с помощью фотоэлектронного умножителя на GaAs ФЭУ-157 (5). Пространственное разрешение при изменении локальной температуры в направлении, перпендикулярном $p-n$ переходу, определялось толщиной эмиттеров и составляло $1 \div 2$ мкм.

В работе исследовались полосковые ЛД с шириной страйпа $W = 100$ мкм (рис. 1, б). ЛД изготавливались на основе квантово-размерных гетероструктур InGaAsP/GaAs , AlGaAs/GaAs , $\text{InGaAs/AlGaAs/GaAs}$ раздельного ограничения с длиной волны генерации 0,8, 0,85, 0,98 мкм соответственно, выращенных методами модифицированной жидкофазной эпитаксии [10] (гетероструктуры InGaAsP/GaAs) и газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОСVD) (гетероструктуры AlGaAs/GaAs и $\text{InGaAs/AlGaAs/GaAs}$) [11].

ЛД спаивались на теплоотвод как n -стороной (подложкой), так и p -стороной. При спаечке n -стороной на теплоотвод в ряде случаев в верхнем p -контакте изготавливались специальные окна шириной 10 мкм для измерения локальной температуры АО в объеме ЛД. Температура теплоотвода ЛД стабилизировалась с помощью регулятора температуры на уровне $+15^\circ\text{C}$ с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$, и локальная температура на зеркале ЛД (ΔT_m) измерялась как превышение температуры эмиттеров по отношению к температуре теплоотвода. Темпера-

тура в объеме ЛД (ΔT_b) измерялась либо через окна в p -эмиттере, либо на зеркале в $5 \div 10$ мкм от страйпа. В обоих случаях измеренная температура хорошо совпадала с температурой, вычисленной с помощью выражения $\Delta T_b = R_t(IU - P)$, где I — ток накачки ЛД, U — электрическое напряжение на ЛД, R_t — тепловое сопротивление ЛД, рассчитываемое из начального участка зависимости $\Delta T_m = f(I)$ в виде $R_t = \Delta T_m / IU$. Величина перегрева зеркала рассчитывалась как разность $\Delta T_{opt}^m = \Delta T_m - \Delta T_b$.

Результаты расчетов

Если предположить, что

- 1) эффектами, связанными с конечной шириной страйпа W можно пренебречь и рассматривать задачу ЛД с бесконечно широким страйпом с линейной плотностью излучения θ ;
- 2) вблизи области тепловыделения вместо реальной геометрии можно ввести условия, соответствующие цилиндрической симметрии: область тепловыделения рассматривать как полуцилиндр радиуса L (рис. 2, *a*), а слои твердых растворов, имеющих пониженную теплопроводность заменить цилиндрическим слоем с радиусом D , равным суммарной толщине слоев твердых растворов, отделяющих АО от хорошо проводящей тепло GaAs-подложки;
- 3) единственным стоком тепла можно считать теплоотвод, обеспечивающий постоянство температуры в плоскости подложки на расстоянии b от области тепловыделения — то уравнение теплопроводности, связывающее локальную температуру на зеркале ЛД и скорость тепловыделения, с точностью 50% может быть аппроксимировано следующим

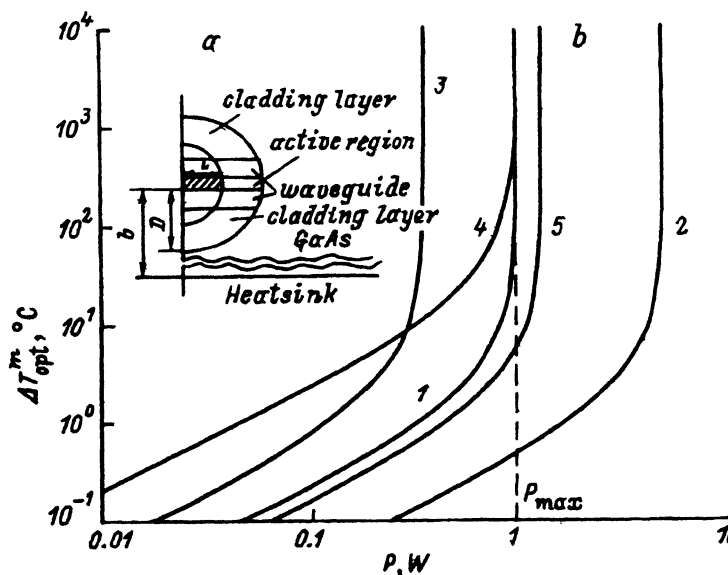


Рис. 2. *a* — упрощенная модель лазерного диода, используемая при проведении расчетов тепловыделения на зеркалах. *b* — расчетные зависимости $\Delta T_{opt}^m(P)$. Параметры расчета: $w = 100$ мкм, $D = 3$ мкм, $\partial E_g / \partial T = 5 \cdot 10^{-4}$ эВ/град, $\partial k_0 / \partial h\nu = 10^3$ (см \cdot мэВ) $^{-1}$, остальные — см. табл. 1.

соотношением:

$$\Delta T_{\text{opt}}^m = \frac{\theta}{\pi} \left(\frac{1}{\lambda_c} \ln \frac{D}{L} + \frac{1}{\lambda_s} \ln \frac{b}{D} \right),$$

где θ — линейная плотность мощности теплового источника, λ_c — теплопроводность слоев твердых растворов, которая независимо от их состава принимается равной 1/4 теплопроводности GaAs-подложки, $\lambda_s = 0.45$ Вт/град·см [12].

Для расчета величины θ может быть использовано следующее соотношение:

$$\theta = \frac{AP}{W} \Gamma k_T^0 L,$$

где A — коэффициент, определяющий соотношение между излучаемой мощностью (P) и мощностью лазерной моды внутри ЛД вблизи выходного зеркала ($A = 2$ для непокрытого зеркала с коэффициентом отражения $R = 0.3$), Γ — фактор оптического ограничения, L — толщина примыкающего к зеркалу поглощающего слоя в АО, k_T^0 — коэффициент поглощения для лазерного излучения в поглощающем слое, зависящий от его температуры,

$$k_T^0 = k_0 + \frac{\partial k_0}{\partial h\nu} \frac{\partial E_g}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \theta} \theta,$$

причем величина $\partial k_0 / \partial h\nu$ может быть определена, например, из работы [13], а $\partial E_g / \partial T$ из [12].

Таким образом, зная Γ -фактор лазерной структуры и используя L и k_0 как подгоночные параметры, можно построить теоретические зависимости $\Delta T_{\text{opt}}^m = f(P)$.

На рис. 2, *b* представлены результаты расчета $\Delta T_{\text{opt}}^m(P)$ при различных параметрах Γ , L , k_0 и b (см. табл. 1), от величины оптической мощности на зеркале ЛД с шириной страйпа 100 мкм. Как видно из кривых, относительно медленный рост ΔT_{opt}^m с увеличением оптической мощности на зеркале при подходе к некоторой критической величине P_{max} , зависящей от параметров гетероструктуры, сменяется разким подъемом. При этом даже незначительный рост оптической мощности на зеркале приводит к увеличению температуры зеркала выше температуры плавления материала АО ($T \sim 1000^\circ\text{C}$), т.е. к оптическому пробою зеркала ЛД.

Таблица 1. Расчетные параметры кривых рис. 2, *b*

Номер кривой	b , мкм	Γ	k_0 , см ⁻¹	L , мкм
1	100	0.05	10 ³	0.2
2	100	0.01	10 ³	0.2
3	100	0.05	10 ³	1.0
4	100	0.05	10 ⁴	0.2
5	3	0.05	10 ³	0.2

Анализ кривых $\Delta T_{\text{opt}}^m(P)$ при различных параметрах гетероструктур и ЛД показывает, что на величину P_{max} существенное влияние оказывает Γ -фактор (кривые 1, 2) и толщина обедненного слоя L (кривые 1, 3). В то же время изменение k_0 приводит только к изменению ΔT_{opt}^m при малых плотностях P , практически не влияя на величину P_{max} (кривые 1, 4).

Как показывает расчет, способ напайки ЛД на теплоотвод (p - или n -стороной) также незначительно влияет на поведение $\Delta T_{\text{opt}}^m(P)$ (кривые 1, 5).

Сравнение результатов расчета и экспериментальных данных

Рис. 3 содержит экспериментальные зависимости $\Delta T_{\text{opt}}^m(P)$ для ЛД AlGaAs/GaAs, InGaAsP/GaAs и InGaAs/AlGaAs/GaAs без специальных пассивирующих покрытий на зеркалах. Гетероструктуры, из которых были изготовлены ЛД, имели одинаковый Γ -фактор.

Как видно из рисунка, ΔT_{opt}^m в ЛД AlGaAs/GaAs значительно превышает эту величину в свободных от алюминия ЛД InGaAsP/GaAs. Если в качестве материала АО в структурах AlGaAs/GaAs вместо GaAs использовать $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ (структуры InGaAs/AlGaAs/GaAs), то перегрев АО резко снижается, практически приближаясь к ΔT_{opt}^m в ЛД InGaAsP/GaAs.

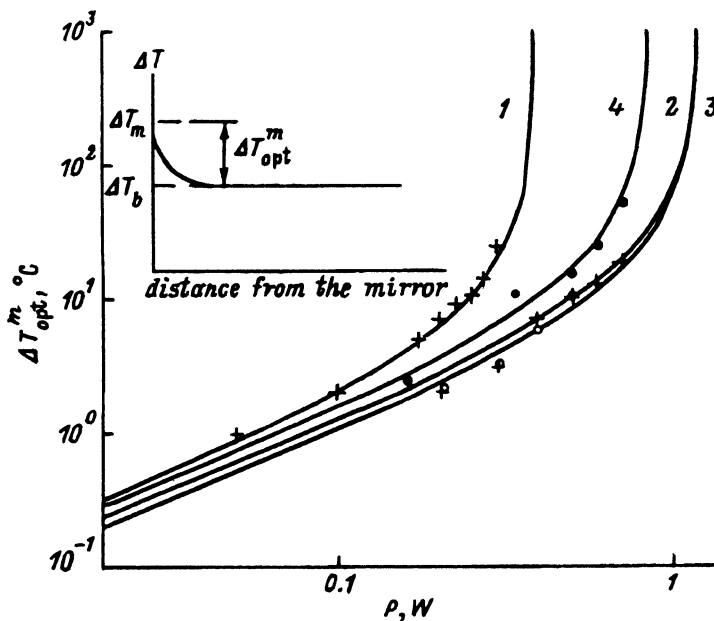


Рис. 3. Экспериментальные данные (точки) и расчетные зависимости (линии) $\Delta T_{\text{opt}}^m(P)$ для ЛД на основе различных гетероструктур: 1 — AlGaAs/GaAs, 2 — InGaAsP/GaAs, 3 — InGaAs/AlGaAs/GaAs, 4 — AlGaAs/GaAs(Al_2O_3). На вставке — зависимость скачка температуры в АО (ΔT) от расстояния от зеркала ЛД.

Таблица 2. Расчетные параметры кривых рис. 3

Номер кривой	Γ	$k_0, 10^3 \text{ см}^{-1}$	$L, \text{ мкм}$
1	0.04	10	1.0
2	0.04	6	0.2
3	0.04	7	0.2
4	0.04	6	0.4

Существенного уменьшения ΔT_{opt}^m можно также добиться путем пассивации зеркала ЛД AlGaAs/GaAs с помощью диэлектрического покрытия Al₂O₃ (см. рис. 3), что согласуется с данными работы [4].

Расчет $\Delta T_{\text{opt}}^m(P)$, выполненный с использованием величин L и k_0 как подгоночных параметров (см. табл. 2 и рис. 3), хорошо описывает все экспериментальные данные. При этом, если в ЛД AlGaAs/GaAs без пассивации зеркала величина максимальной оптической мощности ЛД до оптического пробоя зеркала (P_{max}) не превышает 400 мВт (при ширине страйпа 100 мкм), то в ЛД InGaAsP/GaAs и InGaAs/AlGaAs/GaAs она составляет величину порядка 1 Вт. Относительно малая величина P_{max} в ЛД AlGaAs/GaAs обусловлена большой толщиной обедненного слоя ($L = 1 \text{ мкм}$) в GaAs, материале АО, по сравнению с InGaAsP и InGaAs ($L = 0.2 \text{ мкм}$). Такое значение толщины обедненного слоя АО на поверхности зеркал ЛД AlGaAs/GaAs, по-видимому, объясняется деградационными процессами, происходящими на поверхности GaAs под воздействием мощных оптических потоков.

На рис. 4 приведены результаты исследований ΔT_{opt}^m (точки) от длины резонаторы ЛД d при оптической мощности 100 мВт на зеркале. При $d > 1 \text{ мм}$ перегрев зеркала практически не зависит от длины резонатора, при $d < 1 \text{ мм}$ перегрев зеркала резко возрастает. Такое поведение ΔT_{opt}^m , по-видимому, объясняется увеличением k_0 с повышением энергии кванта лазерного излучения (т.е. с уменьшением длины волны генерации ЛД λ). Расчет зависимости ΔT_{opt}^m от длины волны генерации ЛД в рамках предложенной модели (кривая на рис. 4) хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Экспериментальные исследования перегрева поверхности АО в ЛД InGaAsP/GaAs с различными величинами Γ -фактора (рис. 5) показали резкую зависимость $\Delta T_{\text{opt}}^m(P)$ от Γ -фактора, что согласуется с теоретическими расчетами (кривые на рис. 5). Значения Γ -фактора гетероструктур и величины подгоночных параметров представлены в табл. 3. Из анализа поведения кривых $\Delta T_{\text{opt}}^m(P)$ видно, что уменьшение Γ -фактора до 0.015 путем выращивания лазерных гетероструктур

Таблица 3. Расчетные параметры кривых рис. 5

Номер кривой	Γ	$k_0, 10^3 \text{ см}^{-1}$	$L, \text{ мкм}$
1	0.08	10	0.15
2	0.04	7	0.15
3	0.015	5	0.15

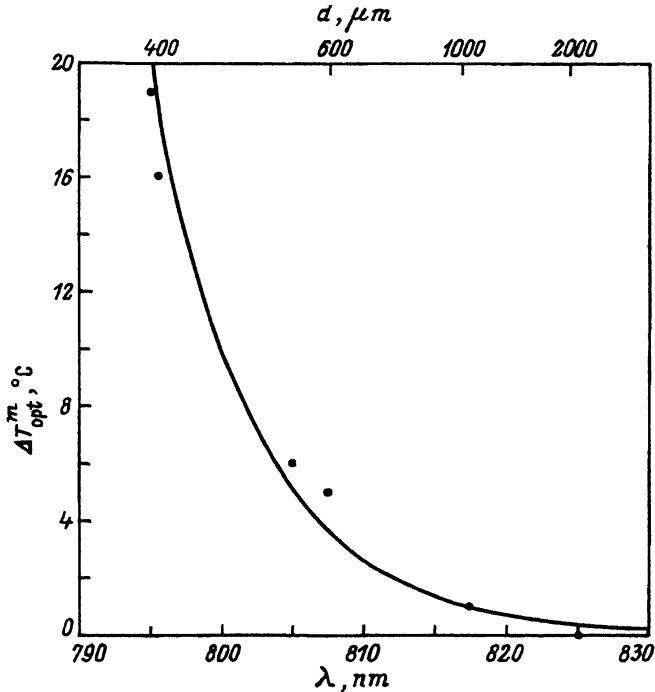


Рис. 4. Экспериментальные данные и расчетная кривая $\Delta T_{opt}^m(P)$ от длины резонатора (d) и длины волны генерации (λ) ЛД.

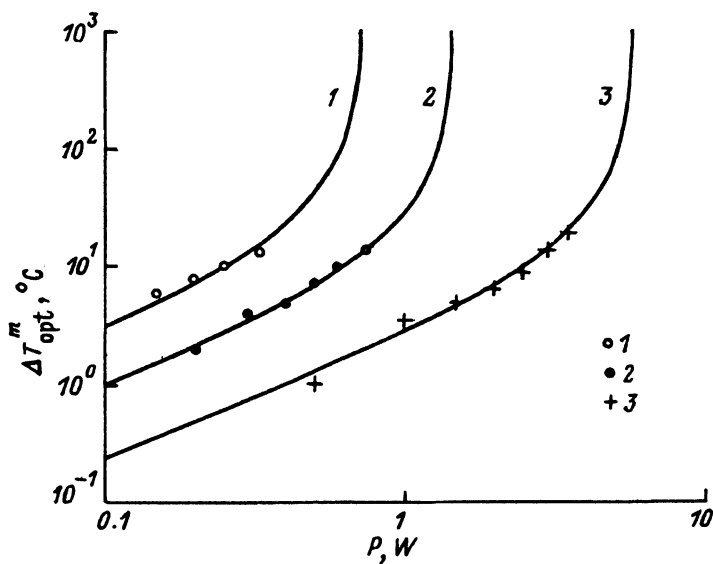


Рис. 5. Экспериментальные данные (точки) и расчетные зависимости (линии) $\Delta T_{opt}^m(P)$ для ЛД InGaAsP/GaAs с различными величинами Γ -фактора: 1 — 0.08, 2 — 0.04, 3 — 0.015.

с большой точностью водноводных слоев позволяет достичь максимальных оптических плотностей 5 МВт/см^2 на зеркале ЛД InGaAsP/GaAs , что соответствует ранее полученным плотностям в таких ЛД [10].

Кроме того необходимо отметить, что путем сопоставления экспериментальных данных на начальном участке зависимости $\Delta T_{\text{opt}}^m(P)$ и теоретических расчетов можно оценить предельные оптические мощности, которые могут выдержать зеркала ЛД, изготовленных из данной лазерной гетероструктуры. Причем величины P_{max} , полученные таким образом, хорошо согласуются с экспериментальными значениями для ЛД на основе различных материалов.

Заключение

Таким образом, в настоящей работе:

— произведен расчет поведения локальной температуры на зеркалах квантово-размерных ЛД, связанный с поглощением собственного излучения ЛД приповерхностным обедненным неравновесными носителями заряда слоем активной области с повышенной скоростью безызлучательной рекомбинации;

— на основании этого расчета определены предельные оптические мощности на зеркалах ЛД до их катастрофической деградации;

— показано, что предельная оптическая мощность зависит от материала АО, Γ -фактора и может быть существенно увеличена путем соответствующей пассивации поверхности;

— проведены детальные экспериментальные исследования поведения перегрева зеркал полосковых ЛД на основе содержащих и не содержащих Al материалов с различными параметрами гетероструктур и ЛД (Γ -фактор и длина резонатора Фабри-Перо), результаты которых хорошо согласуются с теоретическими расчетами.

Работа выполнена при поддержке Международного научного фонда (грант № RL000).

Список литературы

- [1] H.G. Casey, M.B. Panish. *Heterostructure Lasers* (Academic Press, N. Y., 1978).
- [2] C.H. Henry, P.M. Petroff, R.A. Logan, F.R. Merrit. *J. Appl. Phys.*, **50**, 3721 (1979).
- [3] S. Todoroki, M. Sawai, K. Aiki. *J. Appl. Phys.*, **58**, 1124 (1985).
- [4] H. Brugger, P.W. Epperlein. *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 1149 (1990).
- [5] W.C. Tang, H.J. Rosen, P. Vettiger, D.J. Webb. *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 557 (1991).
- [6] J.S. Yoo, H.H. Lee, P. Zory. *IEEE J. Quant. Electron.*, **28**, 635 (1992).
- [7] J.V. Cole, H.H. Lee. *IEEE J. Quant. Electron.*, **29**, 322 (1993).
- [8] G. Chen, C.L. Tien. *J. Appl. Phys.*, **74**, 2167 (1993).
- [9] D.Z. Garbuzov, N.I. Katsavets, A.V. Kochergin, V.B. Khalfin. *Proc. Joint Soviet-American Workshop on the Physics of Semiconductor Lasers* (Leningrad, 1991) p. 6.
- [10] D.Z. Garbuzov, N.Yu. Antonishkis, A.D. Bondarev, A.B. Gulakov, S.V. Zhigulin, N.I. Katsavets, A.V. Kochergin, E.V. Rafailov. *IEEE J. Quant. Electron.*, **27**, 1531 (1991).
- [11] A.V. Belov, E.M. Dianov, D.D. Gusovsky, V.I. Karpov, V.E. Khopin, A.S. Kurkov, Y.M. Shernyakov, B.S. Yavich. *Soviet Lightwave Commun.*, **3**, 3 (1990).
- [12] П.И. Баранский, В.П. Клочков, И.В. Потыкевич. *Полупроводниковая электроника* (Киев, 1975).
- [13] G. Lengyel, Kevin W. Jelly, W.H. Engeiman. *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-26**, 2, 286 (1990).

On optical mirror facet strength of SQW SCH laser diodes CW operated

Zh.I. Alferov, N.I. Katsavets, V.D. Petrikov, I.S. Tarasov, V.B. Khalfin

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

In this study the calculation of local mirror facet overheating of the laser diode active region based on separate confinement heterostructures has been made. It is shown that the optical strength of the mirror facet before its optical damage depends on the optical confinement factor (Γ -factor) and on the thickness of the surface active region layer where the nonradiative recombination rate is enhanced. Detailed investigations of the local mirror facet temperature in both Al-containing (AlGaAs/GaAs, InGaAs/AlGaAs/GaAs) and Al-free (InGaAsP/GaAs) single quantum well laser diodes were carried out using a technique based on the shift of the cladding layer photoluminescence band. Experimental results are in good agreement with the calculation data.
