

06;07

Генерационные характеристики лазеров с вертикальным резонатором на основе $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ квантовых ям

© В.А. Гайслер, А.И. Торопов, А.К. Бакаров, А.К. Калагин,
Н.Т. Мошегов, Д.А. Тэннэ, М.М. Качанова, О.Р. Копп,
Л.А. Ненашева, А.С. Медведев

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск

Поступило в Редакцию 12 мая 1999 г.

Разработаны и изготовлены полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором с высокой внешней квантовой эффективностью и большой мощностью излучения. На лазерах с апертурой $500 \mu\text{m}$ в импульсном режиме получена мощность до 10 W при $T = 300 \text{ K}$ и 20 W при $T = 250 \text{ K}$.

В последние годы прогресс в развитии полупроводниковых лазеров в значительной мере определяется разработкой и созданием лазеров с вертикальным резонатором (ЛВР). Рекордные результаты по параметрам порогового тока, частоты токовой модуляции и расходимости излучения, полученные на ЛВР [1–5], существенно расширяют представления о возможных полупроводниковых излучателях и стимулируют дальнейшие исследования в этой области. В данной работе представлены результаты исследования генерационных характеристик ЛВР, структура которых оптимизирована для достижения высокой внешней квантовой эффективности и больших мощностей излучения.

Исходные лазерные структуры выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на n^+ (001) GaAs подложках. Лазерные структуры содержат легированные активные области шириной λ , включающие в себя три 8-нм квантовые ямы $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, а также зеркальные области p - и n -типа легирования, образующие интерферометр Фабри-Перо и состоящие из многократно повторяемых $\lambda/4$ слоев GaAs и $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ (по 20 и 22.5 периода для p - и n -зеркала соответственно). Инжекция носителей в активную область осуществляется через p - и n -зеркала. Слои GaAs и $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ зеркал легировались до уровня $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Для снижения омического сопротивления зеркальных областей границы

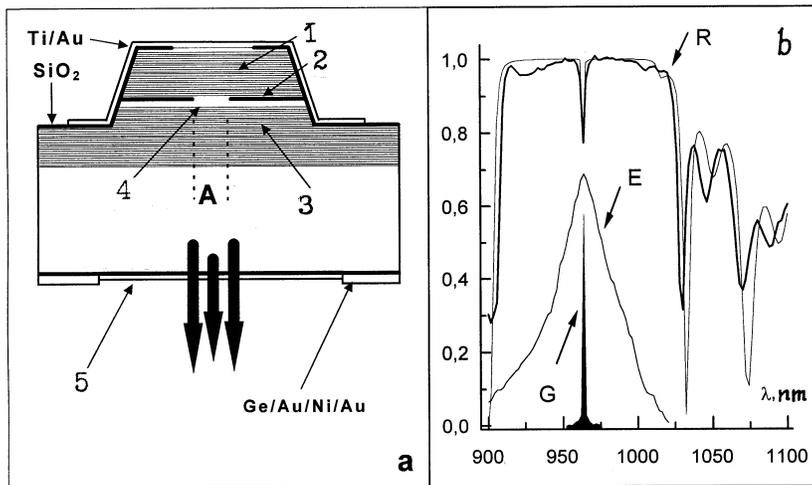


Рис. 1. *a* — схема лазера с вертикальным резонатором: 1 — *p*-зеркало, 2 — Al_xO_y -кольцо, 3 — *n*-зеркало, 4 — активная область *n*-GaAs, 5 — просветляющее покрытие; *b* — спектры отражения, электролюминесценции и генерации ЛВР.

GaAs- $\text{Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}$ содержат 15-нм вставки с градиентом по составу Al и высоким уровнем легирования (Be или Si: $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). Верхнее *p*-зеркало заканчивается дополнительным 47-нм сильнолегированным (Be: $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) GaAs-слоем, выполняющим функцию контактной области и обеспечивающим согласование фаз света, отраженного от Ti (2 nm)/Au (120 nm) металлического покрытия и полупроводниковых гетерограниц. Схема ЛВР представлена на рис. 1, *a*. Апертура (A) ЛВР задается внутренним диаметром Al_xO_y -кольца, получаемого селективным окислением слоев AlAs [6]. Для этой цели предусмотрен слой 66-нм AlAs, расположенный вблизи активной области. Параметр A варьировался в широком интервале значений от 2 до $1000 \mu\text{m}$. Излучение ЛВР выводится через просветленную подложку GaAs.

На рис. 1, *b* представлены спектры отражения (R) лазерной структуры, спектр электролюминесценции (E) и спектр излучения ЛВР (G). Измеренный спектр отражения (жирная линия) хорошо соответствует расчетному (тонкая линия) и содержит резонанс интерферометра

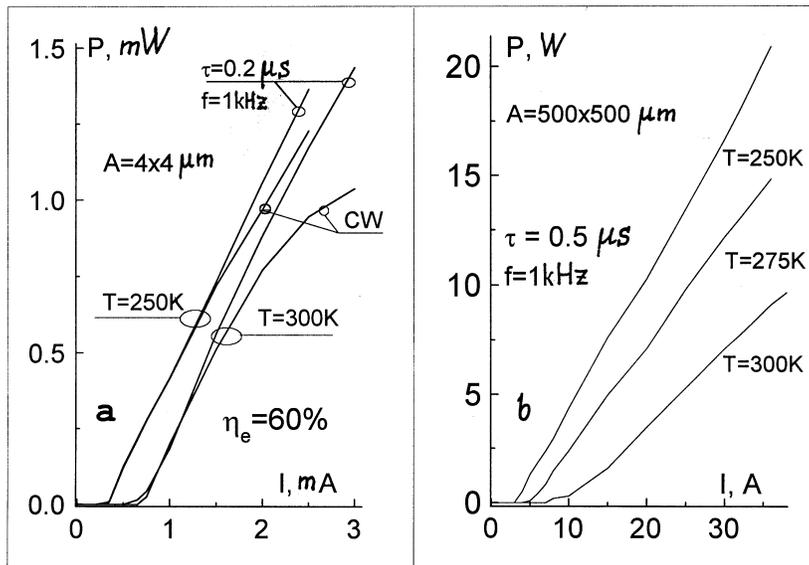


Рис. 2. Ватт-амперные зависимости лазеров с вертикальным резонатором: *a* — для лазера с $A = 4 \mu\text{m}$, *b* — для лазера с $A = 500 \mu\text{m}$.

Фабри-Перо вблизи 965 nm , положение которого совпадает с максимумом спектра электролюминесценции. Длина волны генерации ЛВР соответствует положению резонанса интерферометра.

Высокая внешняя дифференциальная квантовая эффективность η_e разработанных нами ЛВР обеспечивается большим значением внутренней квантовой эффективности $\eta_i > 0.9$, а также оптимальным соотношением коэффициентов отражения зеркал: верхнее зеркало характеризуется предельно высоким значением коэффициента отражения R_t , близким к 1, а нижнее (выходное) зеркало — относительно невысоким $R_b = 0.99$.

В случае, если R_t близок к 1 и выполняется неравенство $(1 - R_t) \ll (1 - R_b)$, параметр η_e ЛВР задается выражением [7]:

$$\eta_e = \eta_i(1 - R_b)(\alpha L + 1 - R_b)^{-1}, \quad (1)$$

где αL описывает оптические потери в резонаторе, α — коэффициент поглощения, L — длина резонатора. В соответствии с (1) при η_i ,

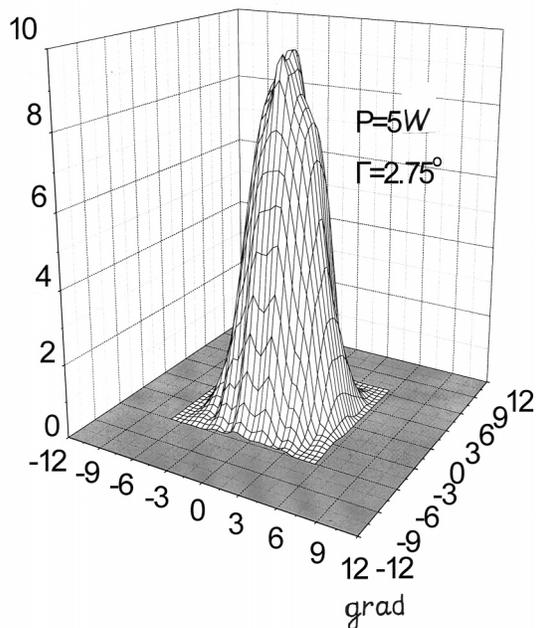


Рис. 3. Угловое распределение мощности ЛВР с $A = 500 \mu\text{m}$.

близкой к 1, и $R_b = 0.99$ может быть достигнута η_e , превышающая 80%. Коэффициент отражения выходного зеркала $R_b = 0.99$, с нашей точки зрения, является оптимальным для достижения высокого η_e , так как дальнейшее уменьшение R_b приводит к возрастанию порогового значения коэффициента усиления до уровня, не достижимого на практике.

В наших структурах коэффициенты отражения зеркал близки к указанному оптимуму: расчетное значение коэффициента отражения верхнего зеркала (без учета поглощения на свободных носителях) составляет $R_t = 0.9999$, в то время как для нижнего (выходного) зеркала это значение составляет $R_b = 0.9916$.

Максимальное значение внешней дифференциальной квантовой эффективности η_e на уровне 60% получено нами на ЛВР с $A = 4 \mu\text{m}$, ватт-амперные зависимости которого представлены на рис. 2, а. Снижение экспериментально достигнутого η_e в сравнении с отмеченным выше

80%-ным уровнем обусловлено поглощением около 20% излучения в $350 \mu\text{m}$ $n\text{-GaAs}$ -подложке.

На рис. 2, *b* приведены ватт-амперные зависимости для лазера большой апертуры $A = 500 \mu\text{m}$, на котором получено рекордно высокое значение выходной мощности для ЛВР (до 10 W при $T = 300 \text{ K}$ и 20 W при $T = 250 \text{ K}$, импульсный режим).

Излучение всех исследованных нами ЛВР характеризуется узкой диаграммой направленности. Для ЛВР с апертурой $A = 3 \mu\text{m}$ расходимость лазерного излучения по уровню половины мощности (полуширина на полувысоте) составляет $\Gamma = 4.7^\circ$, а для ЛВР с большей апертурой этот параметр не превышает 3° . Примечательным является тот факт, что излучение лазеров большой апертуры, работающих в режиме высокой мощности, также характеризуется узкой диаграммой направленности. На рис. 3 представлено угловое распределение мощности ЛВР с $A = 500 \mu\text{m}$ при выходной мощности $P = 5 \text{ W}$, расходимость излучения составляет $\Gamma = 2.75^\circ$.

Таким образом, представленные в работе экспериментальные результаты демонстрируют возможность создания ЛВР с высокой внешней квантовой эффективностью и большой мощностью излучения, что открывает новые перспективы для применений лазеров данного типа.

Список литературы

- [1] *Huffaker D.L., Graham L.A., Deng H.* et al. // IEEE Photonics Techn. Lett. 1996. V. 8. N 8. P. 974–976.
- [2] *Huffaker D.L., Deppe D.G.* // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. N 11. P. 1449–1451.
- [3] *Thibeault B.J., Bertilsson K., Hegblom E.R.* et al. // IEEE Photonics Techn. Lett. 1997. V. 9. N 1. P. 11–13.
- [4] *Grabherr M., Miller M., Jager R., Ebeling K.J.* // Electronics Lett. 1998. V. 34. N 12. P. 1227–1228.
- [5] *Morgan R.A., Kojima K., Asom M.T.* et al. // Electronics Lett. 1993. V. 29. N 2. P. 206–207.
- [6] *Yang G.M., Lim D.H., Kim J.H.* et al. // Jpn. J. Appl. Phys. 1998. V. 37. P. 1391–1393.
- [7] *Geels R.S., Corzine S.W., Coldren L.A.* // IEEE J. Quant. Electr. 1991. V. 27. N 6. P. 1359–1367.