

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

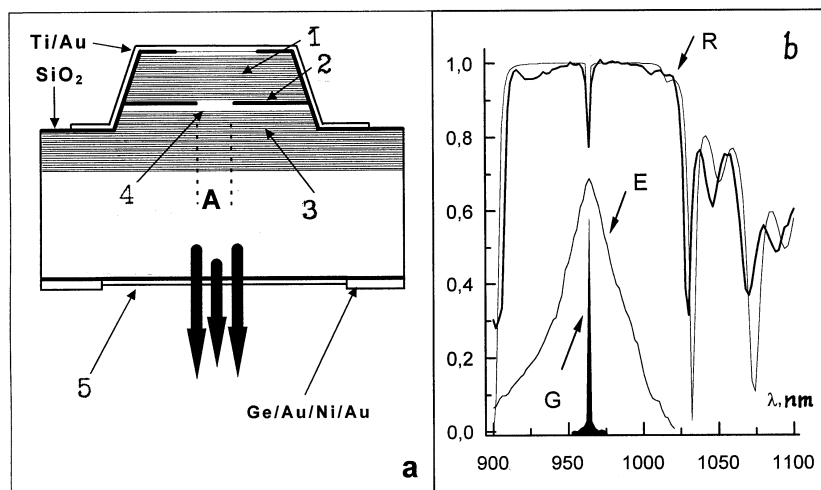
Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск

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.

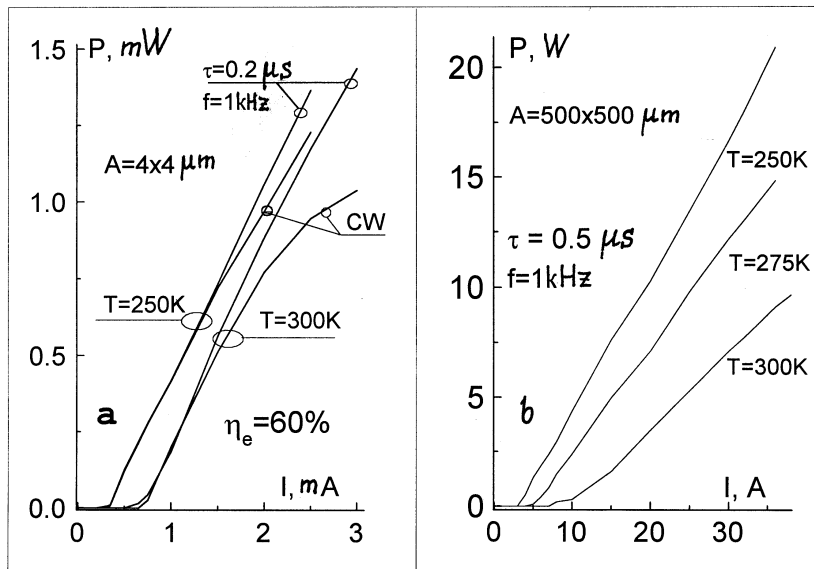
Исходные лазерные структуры выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на  $n^+$  (001) GaAs подложках. Лазерные структуры содержат легированные активные области шириной  $\lambda$ , включающие в себя три 8-нм квантовые ямы  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ , а также зеркальные области  $p$ - 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 —  $\text{Al}_x\text{O}_y$ -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  $\text{Al}_x\text{O}_y$ -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  $965 \text{ nm}$ , положение которого совпадает с максимумом спектра электролюминесценции. Длина волны генерации ЛВР соответствует положению резонанса интерферометра.

Высокая внешняя дифференциальная квантовая эффективность  $\eta_e$  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  $\eta_e$  ЛВР задается выражением [7]:

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

где  $\alpha L$  описывает оптические потери в резонаторе,  $\alpha$  — коэффициент поглощения,  $L$  — длина резонатора. В соответствии с (1) при  $\eta_i$ ,

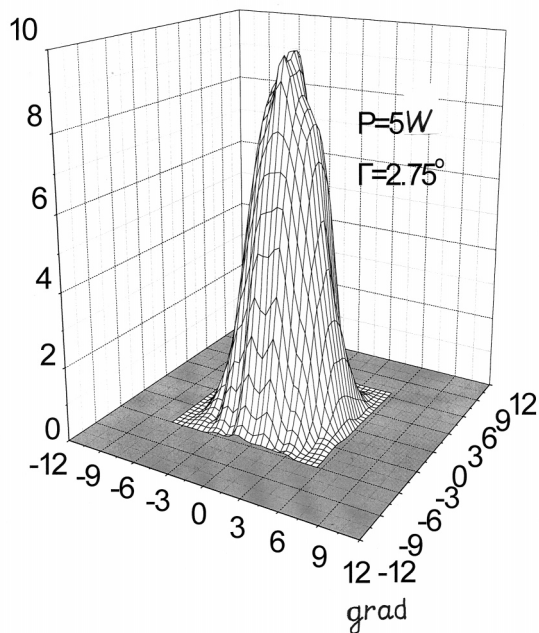


Рис. 3. Угловое распределение мощности ЛВР с  $A = 500 \mu\text{m}$ .

близкой к 1, и  $R_b = 0.99$  может быть достигнута  $\eta_e$ , превышающая 80%. Коэффициент отражения выходного зеркала  $R_b = 0.99$ , с нашей точки зрения, является оптимальным для достижения высокого  $\eta_e$ , 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  $\eta_e$  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  $\eta_e$  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  $3^\circ$ . 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.