

Я. ААРИК, Я. БЕРГМАНН,  
П. ЛЫУК, Я. ФРИДЕНТАЛ

### ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК $\text{AlGaAsSb—GaSb}$ - ГЕТЕРОЛАЗЕРОВ ОТ СТЕПЕНИ СОГЛАСОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕШЕТОК НА ГЕТЕРОГРАНИЦАХ

J. AARIK, J. BERGMANN, P. LOUK, J. FRIEDENTHAL.  $\text{AlGaAsSb—GaSb}$  HETEROLASERITE KAKTERISTIKUTE SÕLTUVUS VÕREPARAMEETRI SOBITAMISEST HETEROSTRUKTUURIS

J. AARIK, J. BERGMANN, P. LOUK, J. FRIEDENTHAL. DEPENDENCE OF  $\text{AlGaAsSb—GaSb}$  DH LASER CHARACTERISTICS ON LATTICE MATCHING IN HETEROSTRUCTURE

(Представил К. К. Ребане)

В [1] сообщалось о создании инжекционных лазеров с двусторонней гетероструктурой на основе четырехкомпонентных соединений  $\text{AlGaAsSb}$ , излучающих в диапазоне 1,5—1,78 мкм. Получение генерации при сравнительно невысоких плотностях порогового тока  $j_{\text{пор}} = 6,2 \text{ кА/см}^2$  при 300 К свидетельствует о достаточном совершенстве гетерограниц в использованных структурах. Однако более детальные данные о влиянии гетерограниц на характеристики этих лазеров отсутствуют. Поэтому нам представлялось интересным исследовать этот вопрос. Для изменения степени рассогласования параметров решеток варьировалось содержание мышьяка в широкозонных эмиттерах из  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ .

Двусторонние гетероструктуры были получены методом жидкостной эпитаксии. Выращивание осуществлялось при 570 °С в режиме принудительного охлаждения раствора-расплава со скоростью 0,3 град/мин. На подложку  $p$ -типа с ориентацией (100) наращивали эмиттер из  $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ , активную область из  $p\text{-GaSb}$  и эмиттер из  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ . Толщина активной области  $d$  исследованных лазеров составляла 0,8—2 мкм.

Зависимость приведенной плотности порогового тока  $j_{\text{пор}}/d$  от содержания мышьяка в эмиттерах лазера показана на рис. 1 (кривая 1). Эта зависимость имеет минимум при  $y = y_{\text{опт}}$ . В целях выяснения причин увеличения плотности порогового тока при отклонении от  $y_{\text{опт}}$  исследовались вольтамперные характеристики лазерных диодов, квантовый выход люминесценции, внутренние оптические потери, а также параметры, определяющие оптическое усиление.

Оказалось, что плотности обратных и прямых токов этих диодов при малых смещениях ( $\sim 0,1 \text{ В}$ ) сильно зависят от  $y$  и имеют минимальные значения при  $y = y_{\text{опт}}$ . Исследование формы и температурной зависимости вольтамперных характеристик показало, что значительную роль в протекании тока играет, по-видимому, туннельно-реком-



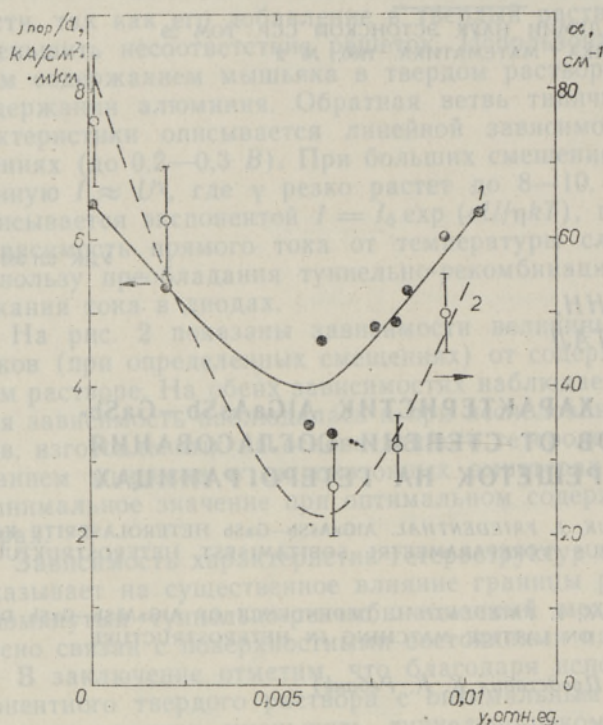


Рис. 1. Зависимость приведенной плотности порогового тока (1) и внутренних оптических потерь (2) от содержания мышьяка в эмиттерах

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}\text{-GaSb}$ -лазеров ( $x = 0,21 \pm 0,02$ ).

бинационный механизм [2]. Резкая зависимость величины тока от  $y$  свидетельствует об участии в последнем процессе локальных состояний, возникающих на гетерогранице из-за несоответствия параметров решеток. В пользу этого говорят и ваттамперные характеристики спонтанной электролюминесценции, показанные на рис. 2. Кривая 1 соответствует случаю  $y = y_{\text{опт}}$ , при котором

наблюдается максимальное значение квантового выхода люминесценции  $\eta_{\text{сп}}$ . При отклонении содержания мышьяка в эмиттерах от оптимального  $\eta_{\text{сп}}$  значительно уменьшается. Особенно сильно это проявляется в области малых токов, где относительная доля туннельной составляющей больше. Более подробно характер зависимости  $\eta_{\text{сп}}$  от  $y$  изображен на рис. 3 (кривая 1).

С возрастанием прямого смещения преобладающей становится инжекционная составляющая тока. Об этом свидетельствует возрастание с током крутизны ваттамперных характеристик спонтанной электролюминесценции (рис. 2) и наблюдаемое при этом ослабление зависимости квантового выхода от  $y$ . Вблизи порога генерации зависимость квантового выхода люминесценции  $\eta_{\text{сп}} \sim \beta$ , где  $\beta$  — «удельное» усиление, уже весьма слабая (рис. 3, кривая 2).

В целях выяснения влияния несоответствия параметров решеток на свойства активного оптического волновода в условиях сильного возбуждения исследовались характеристики лазерных диодов в режиме генерации. По известным зависимостям плотности порогового тока  $j_{\text{пор}}$  и внешней дифференциальной эффективности  $\eta_d$  от внешних оптических потерь  $\alpha_p$  [3-5]:

$$j_{\text{пор}} = j_0 + (1/\beta)(\alpha + \alpha_p)^m \quad (1)$$

и

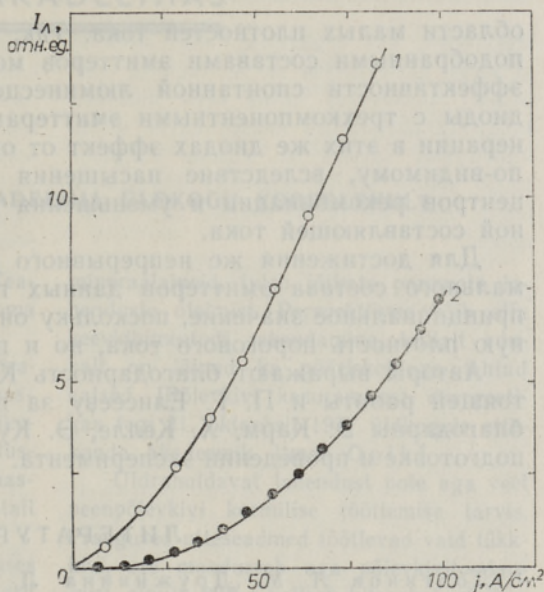
$$\eta_d = \eta_{\text{ст}}(1 + \alpha/\alpha_p)^{-1} \quad (2)$$

( $j_0$  и  $m$  — параметры, характеризующие зависимость коэффициента оптического усиления от тока накачки) определялись коэффициент внутренних оптических потерь  $\alpha$ , «удельное» усиление  $\beta$  и внутренний



Рис. 2. Зависимость интенсивности спонтанной электролюминесценции

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}-\text{GaSb}$ -лазеров при  $y = y_{\text{опт}}$  (1) и  $y = 0$  (2) от плотности тока. Оба лазера имели одинаковую геометрию — длина резонатора составляла 300 мкм, ширина 124 мкм, толщина активной области 1,4 мкм.



квантовый выход стимулированного излучения  $\eta_{\text{ст}}$ . При этом коэффициент внешних оптических потерь  $\alpha_p = (1/L)\ln(1/R)$  ( $L$  — длина резонатора и  $R$  — коэффициент отражения зеркал) варьировался путем постепенного укорачивания длины резонатора.

Оказалось, что в интервале приведенных плотностей тока от 5 до 17 кА/см²·мкм  $j_{\text{пор}}$  является линейной функцией от  $\alpha_p$  (т. е.  $m = 1$ ) независимо от  $y$ . Установлено, что не только  $\beta$ , но и  $\alpha$  зависит от  $y$  и имеет минимум при  $y = y_{\text{опт}}$  (рис. 1, кривая 2). Следовательно, снижение порога генерации при уменьшении рассогласования параметров решеток на гетерограницах связано как с уменьшением внутренних оптических потерь, так и с небольшим увеличением «удельного» усиления. Интересно также отметить, что внутренний квантовый выход стимулированного излучения не зависит от  $y$ .

Итак, проведенные нами исследования показывают, что точным согласованием параметров решеток в гетероструктурах

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}-\text{GaSb}$  с небольшим содержанием Al ( $x \leq 0,23$ ) можно заметно улучшить характеристики лазерных диодов как в режиме генерации, так и в спонтанном режиме. Особенно это касается

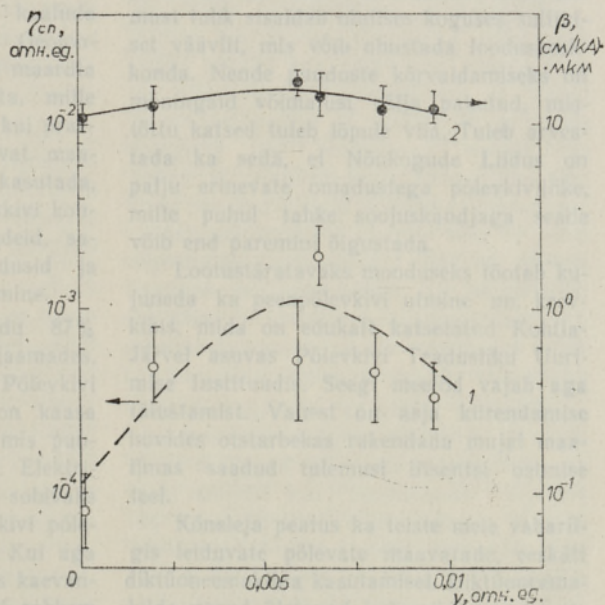


Рис. 3. Зависимость квантового выхода спонтанной люминесценции при  $j/d = 15$  А/см²·мкм (1) и «удельного» усиления  $\beta \sim \eta_{\text{сп}}$  вблизи порога генерации (2) от содержания мышьяка в эмиттерах  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}-\text{GaSb}$ -лазеров.

области малых плотностей тока. Так, например, диоды с оптимально подобранными составами эмиттеров могут превосходить по квантовой эффективности спонтанной люминесценции более чем на порядок диоды с трехкомпонентными эмиттерами ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ ). В режиме генерации в этих же диодах эффект от оптимизации значительно слабее, по-видимому, вследствие насыщения связанных с гетерограницами центров рекомбинации и уменьшения доли туннельно-рекомбинационной составляющей тока.

Для достижения же непрерывного режима генерации выбор оптимального состава эмиттеров данных гетероструктур имеет, вероятно, принципиальное значение, поскольку он обеспечит не только минимальную плотность порогового тока, но и предупредит деградацию.

Авторы выражают благодарность К. К. Ребане за поддержку настоящей работы и П. Г. Елисееву за полезные замечания. Мы также благодарны Э. Карм, Х. Келле, Э. Куус и А. Вирро за помощь при подготовке и проведении эксперимента.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Долгинов Л. М., Дружинина Л. В., Елисеев П. Г., Мильвидский М. Г., Сverdlov Б. Н., Квант. электроника, 3, № 2, 465—466 (1976).
2. Milnes, A. G., Feucht, D. L., Heterojunctions and metal-semiconductor junctions, Academic Press, New York—London, 1972.
3. Lasher, G. J., IBM J. Res. Develop., 7, № 1, 58—61 (1963).
4. Biard, J. R., Carr, W. N., Reed, B. S., Trans. AIME, 230, 286—290 (1964).
5. Грибковский В. П., Теория поглощения и испускания света в полупроводниках, Минск, «Наука и техника», 1975.

Институт физики  
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
3/1 1980