

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

(In, Ga, Al)As ДГС РО ЛАЗЕРЫ  
 НА ДЛИНУ ВОЛНЫ 1.1 МКМ С (In, Ga)As  
 НАПРЯЖЕННОЙ КВАНТОВОЙ ЯМОЙ,  
 ОГРАНИЧЕННОЙ КОРОТКОПЕРИОДНОЙ СВЕРХРЕШЕТКОЙ

Алфёров Ж. И., Иванов С. В., Копьев П. С.,  
 Леденцов Н. Н., Мельцер Б. Я., Шапошников С. В.

Использование напряженных слоев (НС) в полупроводниковых гетероструктурах привлекает к себе в настоящее время большое внимание. Это связано с тем, что, во-первых, напряжения способны существенно изменять свойства материала, используемого для создания НС, — ширину запрещенной зоны, взаимное расположение минимумов зоны проводимости и максимумов валентной зоны, массу носителей заряда, времена излучательной рекомбинации и др. — и таким образом влиять на свойства приборных структур. Во-вторых, напряженные слои могут быть использованы как альтернатива слоям с согласующимися параметрами решетки при создании приборов. В настоящее время на основе (In, Ga, Al)As-гетероструктур на GaAs-подложках получены, например, низкопороговые ДГС РО лазеры с (In, Ga)As напряженной квантовой ямой [1, 2]. Лазеры были выращены методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Наибольшая длина волны генерации, реализованная для структур подобного типа, составила 1.03 мкм [2].

Данное сообщение посвящено выращиванию методом молекулярно-лучковой эпитаксии [3] ДГС РО лазера на длину волны 1.1 мкм с (In, Ga)As напряженной квантовой ямой, ограниченной короткопериодной GaAs—Al<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As-сверхрешеткой.

Структура была выращена на подложке GaAs, легированной цинком ( $p = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ), с ориентацией (100) и состояла из буферного слоя (0.2 мкм) GaAs : Ве ( $p = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ), широкозонного эмиттера Al<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>As, легированного бериллием ( $p = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ), толщиной 1.5 мкм, слоя (Al, Ga)As изменяющегося состава  $x$  от 0.8 до 0.4 ( $p = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) толщиной 1000 Å. Все вышеперечисленные слои были выращены при температуре подложки 630 °С. Затем температура подложки повышалась до 700 °С с остановкой роста в потоке мышьяка, и при этой температуре выращивалась короткопериодная сверхрешетка (КПСР) с периодом 40 Å. Специального легирования КПСР не осуществлялось. Соотношение толщин слоев GaAs и Al<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As в КПСР изменялось с тем, чтобы получить параболическое изменение эффективной ширины запрещенной зоны  $x_{\text{эфф}}$  от 0.4 до 0.2. Затем температура подложки опускалась до 550 °С с остановкой роста в потоке мышьяка, и выращивались слои GaAs толщиной 200 Å, слой In<sub>0.33</sub>Ga<sub>0.67</sub>As толщиной 50 Å и слой GaAs толщиной 200 Å, умышленного легирования не осуществлялось. После выращивания активной области температура подложки снова поднималась до 700 °С, и в обратной последовательности выращивались слои (Al, Ga)As симметричной геометрии. Верхний эмиттер легировался кремнием ( $n = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ). Контактный слой GaAs (0.5 мкм) легировался кремнием до  $n = 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Энергетическая диаграмма структуры представлена на рис. 1.

После выращивания производилось утоньшение пластин при помощи механической шлифовки и полирующего травления до  $\sim 100$  мкм. После изготовления омических контактов из пластин выкалывались полосы шириной  $\sim 1000$  мкм, из которых скрайбированием изготавливались лазеры с широким полоском размером  $(400 \times 1000)$  мкм.

Спектр электролюминесценции при 300 К и спектр фотолюминесценции после травливания контактного слоя при 77 К представлены на рис. 2, а и б соответственно. Пороговая плотность тока выращенных лазеров составила  $900 \text{ А/см}^2$  (300 К), длина волны генерации 1.1 мкм.

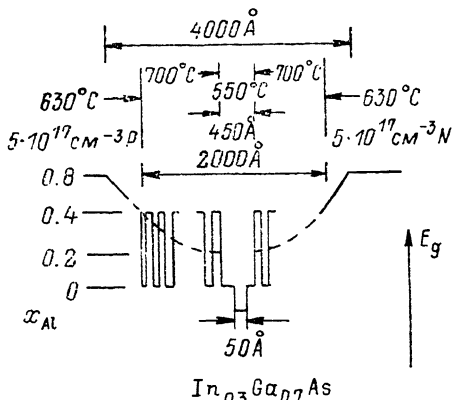


Рис. 1. Энергетическая диаграмма лазера. Цифры слева — значения  $x$ .

Последняя, согласно нашим данным, является наибольшей величиной для субкилоамперных (In, Ga, Al)As-лазеров на GaAs-подложках.

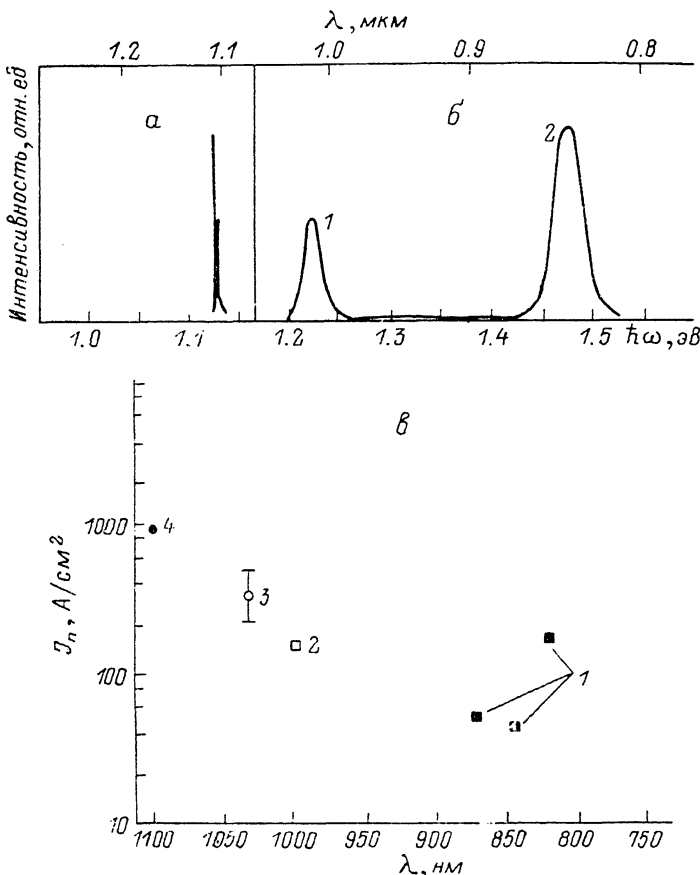


Рис. 2. Спектр электролюминесценции при 300 К (а) и фотолюминесценции активной области структуры при 77 К после травливания контактного слоя (б); пороговые плотности тока для (In, Ga, Al)As-гетеролазеров с различными длинами волны генерации (в).

а)  $J_n = 910 \text{ А/см}^2$ ; б) плотность возбуждения  $5 \text{ Вт/см}^2$  (1 — КЯ  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ , 2 — GaAs : Ве); в) 1 — результаты для (Al, Ga)As-лазеров, 2 — результат работы [1], 3 — [2], 4 — данной работы.

На рис. 2, в представлены экспериментальные результаты для пороговой плотности тока (In, Ga, Al)As-лазеров для различных длин волн генерации. В случае (Al, Ga)As ДГС РО лазеров, выращенных в нашей установке, мини-

малые пороговые плотности токов 175 (ширина квантовой ямы GaAs 50 Å), 43 (100 Å), 50 А/см<sup>2</sup> (200 Å) для длин резонаторов 2000—3000 мкм (рис. 2, в, 1). Методика выращивания лазеров описана в [4]. Согласно [1], для длины волны генерации ~1.0 мкм минимальная пороговая плотность тока составила 152 А/см<sup>2</sup> (рис. 2, в, 2). Толщина In<sub>0.37</sub>Ga<sub>0.63</sub>As квантовой ямы 40 Å. Вместе с тем для длины волны генерации 1.03 мкм пороговая плотность тока составила уже 300—600 А/см<sup>2</sup> [2] (рис. 2, в, 3). Таким образом, увеличение пороговой плотности тока до 900 А/см<sup>2</sup> (рис. 2, в, 4) для длины волны генерации 1.1 мкм не является неожиданным.

Дальнейшая работа необходима для снижения пороговой плотности тока ДГС РО лазеров с напряженными слоями (In, Ga)As на длины волн генерации  $\lambda > 1.1$  мкм.

#### Список литературы

- [1] Fekete D., Chan K. T., Ballantyne J. M., Eastman L. F. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 49. N 24. P. 1659—1660.
- [2] Baillargeon J. N., York P. K., Zmudzinski C. A., Fernandez G. E., Beernink K. J., Coleman J. J. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 53. N 6. P. 457—459.
- [3] Копьев П. С., Леденцов Н. Н. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 10. С. 1729—1742.
- [4] Алфёров Ж. И., Васильев А. М., Иванов С. В., Копьев П. С., Леденцов Н. Н., Луценко М. Э., Устинов В. М. // Письма ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 19. С. 1803—1807.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Получено 29.08.1989  
Принято к печати 6.09.1989

ФТП, том 24, вып. 2, 1990

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ РЕЗОНАНСНОМ ТУННЕЛИРОВАНИИ

### В (Al, Ga)As—GaAs-ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С ДВОЙНЫМ БАРЬЕРОМ

Алфёров Ж. И., Журавлева В. В., Иванов С. В., Копьев П. С.,  
Корольков В. И., Леденцов Н. Н., Мельцер Б. Я., Табаров Т. С.

С развитием твердотельной электроники важное значение приобрело исследование эффектов туннелирования электронов через тонкие и сверхтонкие барьеры [1].

В настоящее время наиболее перспективными для сверхбыстродействующей микроэлектроники и СВЧ техники с потенциальными временами переключения в субпикосекундном диапазоне считаются приборы на основе гетероструктур с квантовой ямой, ограниченной двумя барьерами (ДБГС). В таких структурах наблюдается резонансное туннелирование носителей заряда — твердотельный аналог эффекта Рамзауера [2]. Задача о резонансном туннелировании частиц подробно рассмотрена в квантовой механике [3]. Применительно к твердотельным приборам использование туннелирования электронов через двойной барьер было предложено, насколько нам известно, в [4]. Вскоре [5] были теоретически рассмотрены эффекты, связанные с резонансным туннелированием электронов в таких структурах. Аналогичный вопрос обсуждался в [6] в предположении, что высота барьера определяется шириной запрещенной зоны диэлектрической прослойки. Исходя из современных представлений [7] высота барьеров определяется величиной разрыва зоны проводимости для электронов или величиной разрыва валентной зоны для дырок и может быть как существенно меньше, так и больше ширины запрещенной зоны материала барьера.

Подробно эффекты резонансного туннелирования рассматривались Эсаки [1, 7], который экспериментально продемонстрировал их для GaAs—(Al, Ga)As—