

- [3] Алферов Ж.И., Антонишкис Н.Ю., Арсентьев И.Н., Гарбузов Д.З., Колышкин В.И., Налет Т.А., Стругов Н.А., Тикуннов А.В. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 6. С. 1031-1034.
- [4] Гарбузов Д.З., Тикуннов А.В., Жигулин С.Н., Соколова З.Н., Халфин В.Б. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 6. С. 1035-1039.

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

Поступило в Редакцию  
10 мая 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 15

12 августа 1989 г.

06.3; 07

НИЗКОПороГОВЫЕ ЛАЗЕРЫ 3-3.5 мкм  
НА ОСНОВЕ ДГС  $InAsSbP/In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}Sb_y$

М. Айдаралиев, Н.В. Зотова,  
С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев,  
Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин

Полупроводниковые лазеры в области 3-4 мкм вызывают в настоящее время повышенный интерес в связи с перспективой их применения в оптических линиях связи, газоаналитической аппаратуре и др.

В работе [1] сообщалось о получении низкопорогового стимулированного излучения  $\lambda = 3$  мкм в ДГС  $n-InAsSbP(n-InAs)$   $p-InAsSbP$ , полученных методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на подложках  $InAs(111)A$ . Интерес к дальнейшему исследованию этой структуры вызван, во-первых, тем, что на ней впервые была получена непрерывная генерация  $\lambda = 3.1$  мкм (77 К), во-вторых, возможностью получения более длинноволнового излучения при дообавлении в активную область атомов сурьмы [2] и галлия [3].

Исследовались структуры, в которых активная область состояла из нелегированных слоев  $n-InAs$ ,  $n-InAs_{0.93}Sb_{0.07}$ ,  $n-In_{0.98}$

$Ga_{0.02}As$ ,  $n-In_{0.93}Ga_{0.07}As_{0.935}Sb_{0.065}$ . Ограничивающие широкозонные слои  $n$ - и  $p-InAs_{1-x-y}Sb_xPy$  ( $0.05 \leq x \leq 0.062$ ;  $0.10 \leq y \leq 0.19$ ) с толщинами 3-5 мкм имели меньший, чем у активного слоя, показатель преломления ( $\Delta n = 0.02-0.05$ ).

В таблице приведены значения длины волны излучения, величины импульсного порогового тока ( $\tau = 5$  мкс,  $f = 500$  Гц) для лазеров с широким контактом ( $250 \times 300$  мкм<sup>2</sup>) и результаты рентгенотопографических измерений, которые для большинства

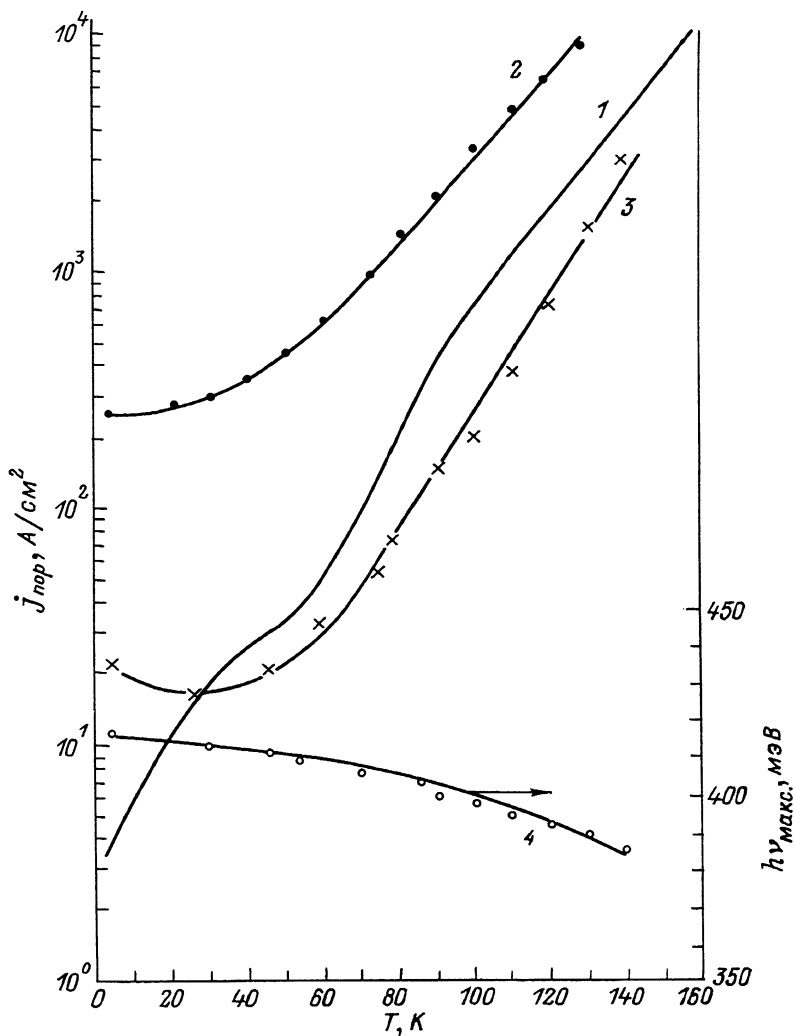
№№	Состав $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}Sb_y$		Наличие ДН	$\lambda$ (77 К)  мкм	$I_{пор}$ (77 К)	
	х	у			имп. реж.	непр. реж.
	мол.доля	мол.доля			А/см <sup>2</sup>	А/см <sup>2</sup>
36(1)	0	0	есть	3.06	64	103
37(1)	0	0	есть	3.08–3.10	72	100
37(2)	0	0	есть	3.05–3.07	76	120
23(2)	0	0	нет	3.05	140	–
38(1)	0	0	нет	3.07	70	116
40(1)	0.012	0	есть	3.04	100	–
41(2)	0.02	0	есть	3.04	310	–
56(1)	0	0.07	–	3.55	117	–
56(2)	0	0.07	–	3.55	87	130
60(1)	0.07	0.065	–	3.23	39	60
60(2)	0.065	0.065	–	3.29	60	–

образцов показали наличие сетки 60-градусных дислокаций несоответствия (ДН). Видно отсутствие корреляции между фактом наличия ДН и величиной порогового тока. Причиной этого может быть различное местоположение сеток ДН в исследованных структурах, а также различие в величине деформации активного слоя и неодинаковое ее влияние на рекомбинационные свойства материала, содержащего ДН [4].

В работе [5] было показано, что для узкозонных твердых растворов соединений  $A^3B^5$  в режиме лазерного возбуждения с  $\lambda \gg \gg 2.5$  мкм основным механизмом безизлучательной рекомбинации является СНСС-процесс, когда два электрона в зоне проводимости взаимодействуют с одной дыркой из тяжелой валентной зоны, оставляя электрон с высокой энергией в зоне проводимости. В рамках этого предположения в работе [6] была подсчитана температурная зависимость порогового тока ДГС-лазера  $InAsSbP/InAs$  и приведены экспериментальные значения (см. рисунок). Экспериментальные точки лежат значительно выше расчетной кривой, особенно в области низких температур ( $T \leq 60$  К). Наши экспериментальные данные значительно ближе к теоретическим значениям и практически повторяют ход расчетной температурной зависимости порогового тока. На этом рисунке приведена температурная зависимость энергии кванта лазерного излучения, которая совпадает с температурным изменением ширины запрещенной зоны в арсениде индия.

С целью получения более длинноволнового излучения нами были созданы ДГС с активным слоем из твердого раствора  $p-InAs_{0.93}Sb_{0.07}$ , которые имели перепад  $E_g$  на гетерогранице  $\sim 130$  мэВ, толщину активного слоя – 3 мкм, эмиттерного слоя  $InAsSbP$  – 4 мкм.

В лазерах на основе этих ДГС нами наблюдалось стимулированное излучение 3.55 мкм при 77 К – наиболее длинноволновое в



Температурные зависимости пороговой плотности тока (1, 2, 3) и энергии кванта лазерного излучения (4) для ДГС  $\text{InAsSbP}/n\text{-InAs}$ . 1 - теория [6], 2 - эксперимент [6], 3 - экспериментальные значения данной работы.

настоящее время для подобных структур из  $\text{A}^3\text{B}^5$ . Величина порогового тока составляла  $86 \text{ A/cm}^2$ . Лазерные осцилляции наблюдались до  $140 \text{ K}$ ; характеристическая температура порогового тока  $T_0 = 17 \text{ K}$ . Достигнут непрерывный режим генерации при пороговой плотности тока  $130 \text{ A/cm}^2$  при  $77 \text{ K}$ .

Для лазеров на основе ДГС с активным слоем из четверного твердого раствора  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$  ( $x = 0.07, y = 0.065$ )

было получено стимулированное излучение в интервале температур 4.2–160 К ( $T_0 = 22.6$  К). Длина волны излучения при 77 К и импульсном режиме питания составляла 3.23 мкм, пороговый ток – 39 А/см<sup>2</sup>. Достигнут непрерывный режим генерации при пороговой плотности тока 60 А/см<sup>2</sup> (77 К).

Таким образом, в работе показано, что использование ДГС  $InAsSbP/In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}Sby$  ( $x \leq 0, y \leq 0.07$ ) позволяет создать низкопороговые лазеры во всем интервале длин волн от 3.05 до 3.55 мкм.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Айдаралиев М.Ш., Зотова Н.В., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 17. С. 1617–1620.
- [2] Mani H., Joullie A., Boissier G., Tournie E. et al. // Electron. Lett. 1988. V. 24. N 25. P. 1542–1543.
- [3] Horikoshi Y., Kobayashi N. Jap. pat. n 567–41833.
- [4] Матвеев Б.А., Петров В.И., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., Шабалин А.В. // ФТП. 1988. Т. 22. № 7. С. 1244–1247.
- [5] Sugimura A. // IEEE J. Quantum Electron. 1982. QE–18. P. 352.
- [6] Horikoshi Y. // Semicond. and Semimetals. Academic Press, New York. 1985. V. 22. P. 93–147.

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

Поступило в Редакцию  
18 апреля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 15

12 августа 1989 г.

06.3

#### ИЗГИБНЫЕ ПОТЕРИ ПОЛЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

С.В. Азизбекян, В.Г. Артюшенко,  
К.И. Калайджян, М.М. Миракян,  
И.Л. Пыльников

В работах [1–3.5] было показано, что проблема передачи мощного излучения СО и СО<sub>2</sub> лазеров в лазерных установках медицинского и технологического профиля может быть решена с помощью