

06.2;06.3;07;12

## **Инфракрасный лазер ( $\lambda = 3.2$ мкм) на основе разъединенной $p-n$ гетероструктуры II типа с улучшенной температурной характеристикой**

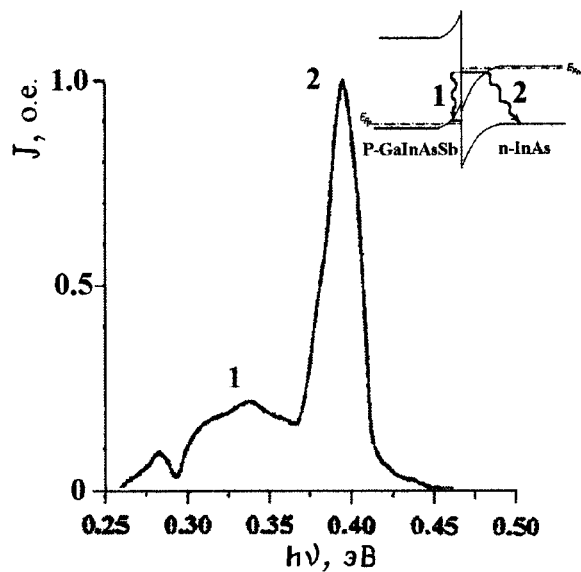
© К.Д. Моисеев, М.П. Михайлова, О.Г. Ершов, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 24 октября 1996 г.

Предложена и исследована лазерная структура на основе разъединенного гетероперехода II типа  $p - \text{GaInAsSb}/n - \text{InGaAsSb}$  в активной области. Получена генерация на длинах волн 3.2–3.4 мкм в диапазоне 77–195 К. Пороговый ток составил  $400 \text{ A}/\text{cm}^2$  при 77 К и значение характеристической температуры  $T_0 = 47$ .

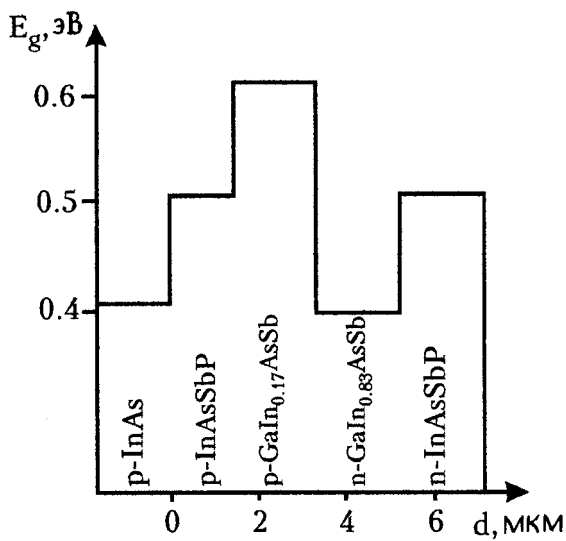
Ранее мы сообщали о создании и исследовании нового туннельно-инжекционного лазера [1], в активной области которого был помещен разъединенный изотипный гетеропереход II типа  $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs}$ . Основной особенностью данного лазера было то, что генерация обеспечивалась за счет непрямых, сопровождаемых туннелированием излучательных переходов электронов и дырок на гетерогранице. При этом рабочий ток поддерживался за счет туннельной инжекции электронов из объема узкозонного полупроводника. В такой лазерной структуре наблюдалось подавление Оже-рекомбинации на гетерогранице и ослабление температурной зависимости порогового тока [2]: в области температур 80–110 К наблюдалось высокое значение характеристической температуры  $T_0 = 40\text{--}60$  К. Одномодовая генерация была получена в интервале температур 77–125 К. При  $T = 77$  К длина волны стимулированного излучения составляла  $\lambda = 3.26$  мкм, плотность порогового тока достигала  $2 \text{ kA}/\text{cm}^2$ . Дальнейшее улучшение пороговых характеристик такого лазера лимитируется несколькими основными причинами. Во-первых, большим током утечки дырок из валентной зоны широкозонного полупроводника в валентную зону узкозонного через узкий барьер на гетерогранице, обусловленный зонной энергетической диаграммой  $p-p$  гетероструктуры при обратном смещении [2].



**Рис. 1.** Спектр электролюминесценции для гетероструктуры  $p$ -GaInAsSb/ $n$ -InAs при прямом смещении при  $T = 77$  К. Полосы излучения соответствуют излучательным переходам с участием гетерограницы (1) и объема  $n$ -InAs (2). На врезке приведена зонная энергетическая диаграмма разъединенного гетероперехода II типа  $p$ -GaIn<sub>0.17</sub>As<sub>0.22</sub>Sb/ $n$ -InAs при приложении прямого смещения. Стрелками показаны возможные рекомбинационные переходы.

Во-вторых, в указанной гетероструктуре излучательная рекомбинация и генерация возникают в узкой области вблизи гетерограницы. Из-за наличия беспорогового Оже-процесса [3] неосновные носители локализуются вблизи интерфейса и это приводит к усилению внутризонного поглощения, экспоненциально зависящего от температуры.

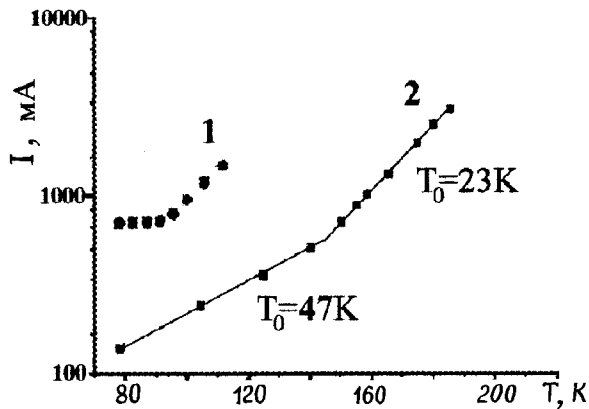
В данной работе мы предложили новый подход к созданию лазерной структуры на гетеропереходе II типа, поместив в активную область разъединенный  $p$ - $n$  гетеропереход, зонная диаграмма которого представлена на рис. 1. Предполагалось, что в такой структуре в отличие от  $p$ - $p$  гетероперехода будет значительно уменьшена утечка дырок через гетерограницу при сохранении больших разрывов зон, обеспечивающих



**Рис. 2.** Послойное изображение новой лазерной структуры с разьединенным  $p-n$  гетеропереходом II типа в активной области.

хорошее электронное ограничение. Ожидалось также, что эти факторы позволят уменьшить пороговый ток и повысить рабочую температуру лазера.

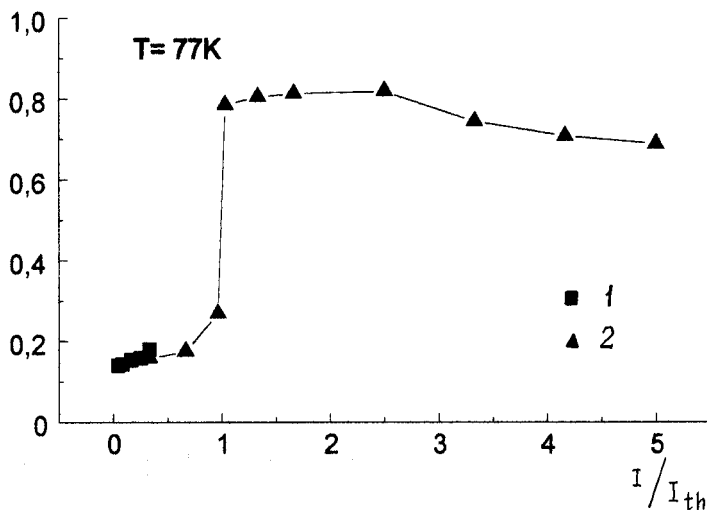
Вначале была создана модельная  $p-n$  гетероструктура и изучены ее люминесцентные свойства. Нелегированный четверной широкозонный слой  $\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}_{0.22}\text{Sb}_{0.78}$  с концентрацией дырок  $p = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  был выращен методом ЖФЭ на слаболегированной подложке  $n\text{-InAs}$  (100) ( $n = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ). При приложении к такой структуре прямого смещения  $U > 0.4 \text{ В}$  при  $T = 77 \text{ К}$  наблюдалась интенсивная электролюминесценция (рис. 1), состоящая из двух полос: узкой, с энергией фотона в максимуме излучения  $h\nu_1 = 392 \text{ мэВ}$ , и длинноволновой, менее интенсивной и более широкой,  $h\nu_2 = 333 \text{ мэВ}$ . Максимум энергии полосы  $h\nu_1$  был близок к ширине запрещенной зоны  $n\text{-InAs}$ ,  $E_g = 412 \text{ мэВ}$ , так что можно было считать, что за появление данной полосы ответственны излучательные переходы в объеме  $n\text{-InAs}$ . Вторая полоса может быть связана с рекомбинацией электронов из квантовой ямы на стороне InAs



**Рис. 3.** Температурная зависимость порогового тока для двух лазерных структур с разьединенным  $p-p$  (1) и  $p-n$  (2) гетеропереходом II типа в активной области.

с Оже-дырками в широкозонном слое. Действительно, в отличие от  $p-p$  гетероструктуры в  $p-n$  разьединенном гетеропереходе при слабом уровне легирования ( $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) яма у гетерограницы должна быть достаточно размытой и электронные состояния в ней образуют широкий спектр. Эти результаты были использованы нами при создании новой лазерной структуры с разьединенным  $p-n$  гетеропереходом II типа в активной области.

Нами была изготовлена пятислойная структура с отдельным электронным и оптическим ограничением, представленная на рис. 2, которая была выращена методом ЖФЭ на подложке  $p\text{-InAs}$  (100). В качестве накрывающих слоев использовались четверные твердые растворы  $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_y\text{P}_x$  ( $x = 0.30$ ). Активная область была сформирована из двух твердых растворов  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$  — широкозонного ( $E_g = 640 \text{ мЭВ}$ ) и узкозонного ( $E_g = 390 \text{ мЭВ}$ ), с содержанием In в слоях 0.17 и 0.83 соответственно. Эти твердые растворы образуют между собой гетеропереход II типа, близкий к разьединенному (щель между валентной зоной широкозонного полупроводника и зоной проводимости узкозонного составляет, по нашим оценкам, порядка  $\Delta \sim 40\text{--}60 \text{ мЭВ}$ ). При расчете  $\Delta$  использовалась линейная интерполяция значений электронного сродства бинарных соединений, входящих в состав четверного



**Рис. 4.** Степень поляризации  $P = (P_{TM} - P_{TE}) / (P_{TM} + P_{TE})$  излучения лазерной структуры в зависимости от отношения тока накачки к пороговому току  $I/I_{th}$ : 1 — спонтанная люминесценция и 2 — когерентное излучение.

твердого раствора GaInAsSb [4]. Большое значение разрыва в зоне проводимости лазерной структуры  $\Delta E_c \sim 600$  мэВ позволяло достичь хорошего электронного ограничения.

В такой структуре наблюдалось спонтанное и когерентное излучение, одномодовая генерация была получена на длине волны  $\lambda = 3.2$  мкм при плотности порогового тока  $j_{th} = 400$  А/см<sup>2</sup> при  $T = 77$  К. Наблюдаемая величина порогового тока была в 5 раз ниже, чем в ранее описанной лазерной структуре с разьединенным  $p-p$  гетеропереходом II типа в активной области [1]. Как видно из рис. 3, в новом лазере нам удалось продлить участок слабой температурной зависимости порогового тока в импульсном ( $\tau = 200-500$  нс) режиме вплоть до  $T = 140-150$  К по сравнению с  $T = 110$  К, полученной для лазера с  $p-p$  переходом [1]. Мы получили также высокое значение характеристической температуры  $T_0 = 47$  К на участке 77–140 и 30 К в интервале 150–200 К. Предельная рабочая температура лазера была повышена вплоть до  $T = 195$  К. Нами была исследована также поляризационная зависимость излучения

новой лазерной структуры в спонтанном и импульсном режимах. Как можно видеть из рис. 4, ТМ-поляризация всегда преобладала над ТЕ-поляризацией излучения. Этот факт может быть объяснен участием в рекомбинации легких дырок, туннелирующих через гетерограницу [5].

Для улучшения характеристик и повышения рабочей температуры лазеров на основе InAs до комнатной необходима дальнейшая оптимизация лазерной структуры, в том числе исследование фундаментальных механизмов потерь (Оже-процессов, тепловых потерь в ограничивающих слоях структуры, процессов внутризонного поглощения и связанного с ним разогрева носителей и т. д.).

В заключение в данной работе предложена и реализована новая улучшенная лазерная структура на основе разьединенного гетероперехода II типа  $p\text{-GaInAsSb}/n\text{-InGaAsSb}$  в активной области, наблюдалась одномодовая генерация на длине волны  $\lambda = 3.2$  мкм при плотности порогового тока  $j_{th} = 400$  А/см<sup>2</sup> ( $T = 77$  К). Получено высокое значение характеристической температуры  $T_0 = 47$  К и достигнута предельная рабочая температура лазера в импульсном режиме  $T = 195$  К.

Авторы благодарят С. Лурье (S. Luryi), А.Д. Горбатюка и Г.Г. Зегря за полезные обсуждения.

Данная работа частично поддержана Министерством науки России в рамках программы "Физика твердотельных наноструктур" и Европейским Отделением Аэрокосмических Исследований и Разработок США (EOARD), контракт N F61708-W0078.

## Список литературы

- [1] Моисеев К.Д., Михайлова М.П., Ершов О.Г., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. С. 83.
- [2] Михайлова М.П., Зегря Г.Г., Моисеев К.Д., Тимченко И.Н., Яковлев Ю.П. // ФТП. 1995. Т. 29. С. 687.
- [3] Zegrya G.G., Andreev A.D. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 67. P. 2683.
- [4] Sai-Halasz H., Tsu R., Esaki L. // Appl. Phys. Lett. 1977. V. 30. P. 651.
- [5] Аверкиев Н.С., Баранов А.Н., Именков А.Н., Рогачев А.А., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. С. 332.