

06.3

© 1990

## ДЛИННОВОЛНОВЫЕ СВЕТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ $GaInAsSb$ ВБЛИЗИ ОБЛАСТИ НЕСМЕШИВАЕМОСТИ

( $\lambda = 2.4-2.6$  мкм,  $T = 300$  К)

А.Н. И мен ков, О.П. Ка пр а н ч и к,  
А.М. Л и т в а к, А.А. П о п о в,  
Н.А. Ч а р ы к о в, Ю.П. Я к о в л е в

1. Спектральный диапазон длин волн 1.8–2.6 мкм перспективен для волоконно-оптических линий связи третьего поколения, а также для задач влагометрии и газового анализа. Среди соединений  $A^3B^5$  наибольший интерес для создания источников света в этом спектральном диапазоне представляют твердые растворы  $GaInAsSb$ , изопериодные к подложке  $GaSb$ .

В работах [1–3] нами сообщалось о создании и исследовании высокоэффективных светодиодов на основе гетероструктур  $GaInAsSb/ GaAlSbAs$  для спектрального диапазона 1.8–2.4 мкм с внешним квантовым выходом 1–4%. Особый интерес представляет создание светодиодов в области минимума дисперсионных потерь флюоритных волокон в диапазоне 2.5–2.6 мкм [4]. Однако создание таких излучателей в этом спектральном диапазоне вызывает большие трудности из-за наличия обширной области несмешиваемости в системе твердых растворов  $GaInAsSb$  для составов в области  $0.24 \leq X \leq 0.76$  [5].

В результате теоретического и экспериментального анализа области несмешиваемости нами впервые была показана возможность получения твердых растворов  $GaInAsSb$  с содержанием индия вплоть до  $X = 0.29$  [6] исходя из ограничений по условиям спиноидального распада и условиям молекулярности, и синтезированы такие слои.

Данная работа является продолжением начатых нами исследований [1–3, 6] и посвящена созданию и изучению светодиодов на основе  $GaInAsSb$  вблизи области несмешиваемости с максимумом излучения около 2.5 мкм.

2. Светодиоды представляли собой структуру (рис. 1, а), состоящую из активного слоя  $n-Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$  ( $X = 0.27$ ), выращенного на подложке  $n-GaSb:Te$  ( $6-9 \cdot 10^{17}$  см $^{-3}$ ) и широкозонного эмиттера  $p-Ga_{1-x}Al_xAs_ySb_{1-y}$  ( $X = 34\%$ ).

Для получения активного слоя  $GaInAsSb$  вблизи границы несмешиваемости с максимальным содержанием индия были реализованы условия эпитаксиальной кристаллизации, изложенные в работе [6]. Это позволило получить слои  $GaInAsSb$  с  $X = 0.27$  (рис. 1, в), что существенно превысило содержание индия в слоях ( $X = 0.22-0.24$ ), полученное нами ранее в работах [2, 3].

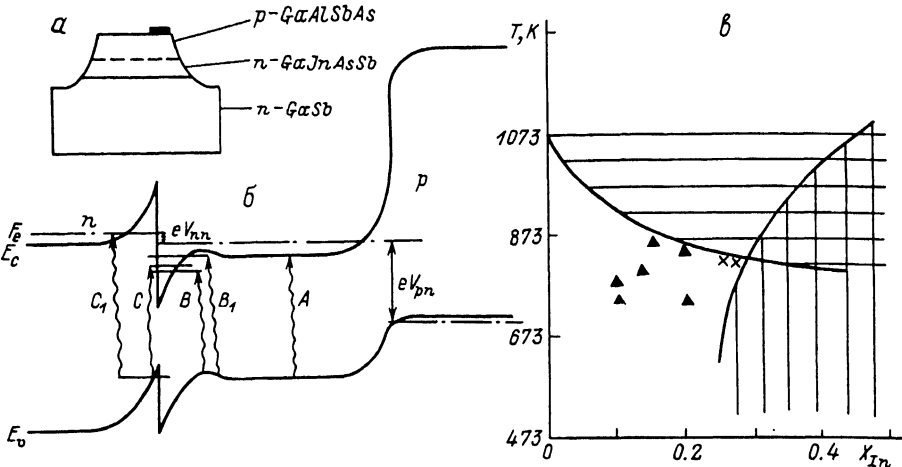


Рис. 1. Структура светодиода и его основные параметры: а - структура мезасветодиода, б - энергетическая диаграмма  $n\text{-GaSb}-n\text{-GaInAsSb}-p\text{-GaAlAsSb}$  структуры при приложении прямого смещения, в - зависимость содержания  $\text{In}$  ( $x$ ) в твердом растворе от температуры эпитаксии.

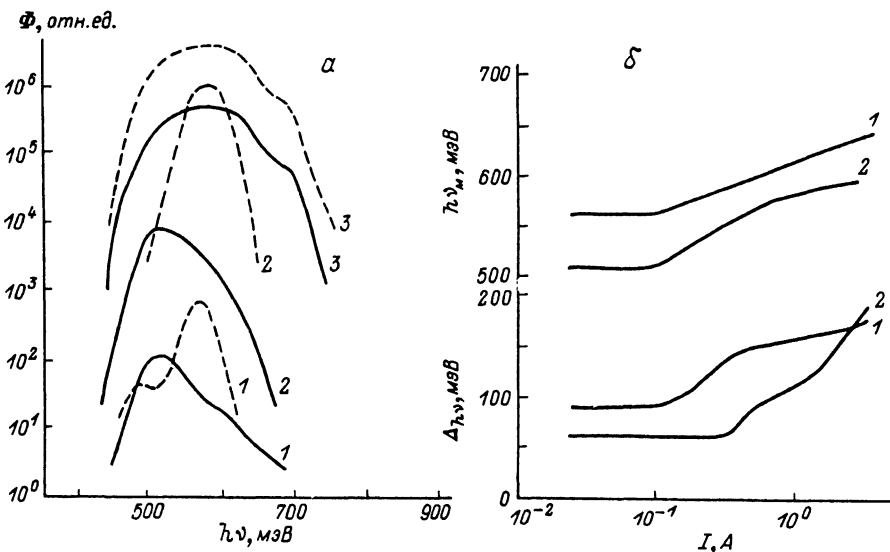


Рис. 2. Электролюминесцентные свойства светодиодов с „толстой“ активной областью: а - спектры излучения при различных токах (1 - 0.02 А, 2 - 0.15 А, 3 - 4 А) при 300 К (сплошные линии) и 77 К (пунктир), б - зависимости энергии максимума  $h\nu_m$  и полуширины полосы излучения  $\Delta h\nu_m$  при 77 К (1) и 300 К (2) от тока.

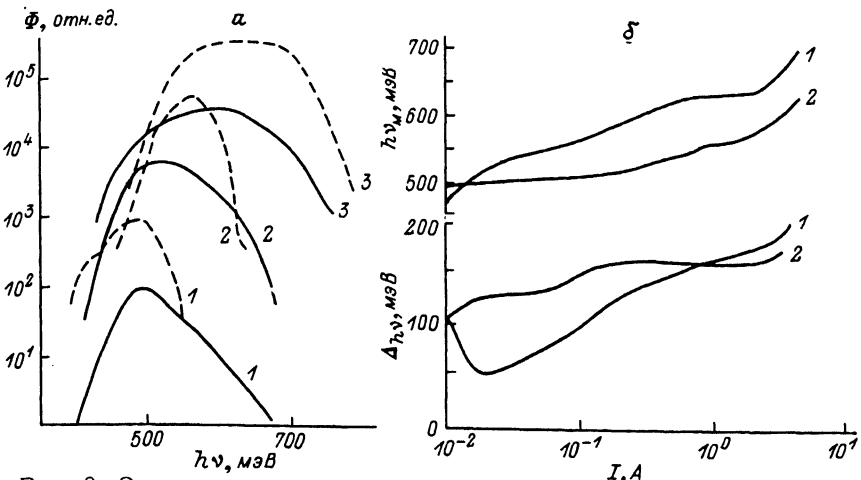


Рис. 3. Электролюминесцентные свойства светодиодов с "тонкой" активной областью. а - спектры излучения при различных токах (1 - 0.02 А, 2 - 0.15 А, 3 - 4 А) при 300 К (сплошные линии) и 77 К (пунктир), б - зависимости энергии максимума  $\hbar\nu_m$  и полуширины полосы излучения  $\Delta\hbar\nu_m$  при 77 К (1) и 300 К (2) от тока.

Активный слой структуры был легирован теллуром до концентрации носителей  $\sim 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , а широкозонный эмиттер - германием до концентрации дырок  $\sim 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Исследовались структуры двух типов: с "толстой" (толщина слоя  $h = 1.2-1.5$  мкм) и с "тонкой" ( $h = 0.3$  мкм) активной областью. Структуры с "толстой" активной областью получались путем последовательного наращивания четырех тонких слоев  $\text{GaInAsSb}$  друг на друга.

Из полученной гетероструктуры были изготовлены мезасветодиоды (рис. 1, а) диаметром 300 мкм со сплошным омическим контактом к  $n\text{-GaSb}$  ( $\text{Au} + 5\% \text{Te}$ ) и точечным контактом диаметром 40 мкм ( $\text{Au} + 5\% \text{Ce}$ ) к  $p\text{-GaAlAsSb:Ge}$ .

Исследовались электролюминесцентные и вольтамперные характеристики светодиодов. Измерения проводились с помощью монохроматора МДР-12, а в качестве приемника использовалось охлаждаемое до  $T = 77$  К фотосопротивление из  $\text{InSb}$ . Приведенные на рис. 2 и 3 электролюминесцентные характеристики получены как при постоянном (в интервале токов 10-150 мА), так и импульсном (в интервале токов 150-6000 мА, длительность импульса 150 нс, скважность 66) режиме питания.

3. Рассмотрим электролюминесцентные характеристики светодиодов. Вначале рассмотрим характеристики "толстых" образцов (рис. 2), в которых толщина активной области  $\text{GaInAsSb}$  составляла 1.3 мкм.

Для этих структур характерно, что энергия максимума полосы излучения составляет 500-510 мэВ (300 К) и 560-570 кэВ (77 К)

и практически не зависит от тока в интервале 0.02–0.2 А (как для  $T = 77$  К, так и для 300 К), а затем начинает монотонно возрастать при изменении тока в интервале 0.2–6 А. При этом следует отметить, что разница между  $h\nu_m$  при  $T = 77$  К и  $T = 300$  К составляет 55 мэВ, что меньше разницы  $h\nu_m$  фотолюминесценции для  $T = 77$  К и  $T = 300$  К, полученных на толстых слоях этого же твердого раствора. Полуширина полосы излучения составляет при малых токах 60 мэВ (77 К) и 80 мэВ (300 К) и также увеличивается с ростом тока при  $I > 150$  мА.

Рассмотрим теперь электролюминесцентные характеристики структур с „тонкой“ активной областью, толщина которой составляет 0.3 мкм.

Форма спектров таких структур видоизменяется с ростом тока, зависимость  $h\nu_m$  и полуширины полосы излучения от тока имеет сложный характер, содержит чередующиеся участки роста и стабилизации в зависимости от тока.

Уникальной особенностью спектров люминесценции „тонких“ структур является то, что при малых токах ( $I = 0.01$  мА) энергия максимума полосы излучения при  $T = 300$  К больше, чем энергия максимума при  $T = 77$  К, и с ростом тока в интервале 0.01–0.1 А ( $T = 300$  К)  $h\nu_m$  практически не зависит от тока, а при  $T = 77$  К  $h\nu_m$  резко возрастает (рис. 3, а, б). Отличительной особенностью спектров люминесценции является также и то, что полуширина полосы излучения при  $T = 77$  К уменьшается почти в два раза от 110 мэВ до 50 мэВ с ростом тока от 0.1 до 0.03 А, а затем снова возрастает. При  $T = 300$  К характерно возрастание полуширины полосы излучения на начальном участке роста тока, насыщение при токах в интервале 0.1–1 А, и дальнейшее возрастание при  $I > 1$  А. Следует отметить, что в спектрах излучения как „толстых“, так и „тонких“ образцов при низких температурах ( $T = 77$  К) и малых токах (0.01–0.03 А) обнаруживается вторая длинноволновая полоса излучения.

Квантовый выход излучения  $\eta$  увеличивается в 2–3 раза с ростом тока в интервале 20–200 мА и достигает 0.5–1% ( $T = 300$  К), а при  $T = 77$  К  $\eta$  составляет около 20%.

Вольтамперная характеристика светодиодов имеет два экспоненциальных участка для обоих типов структур. При токе 10–30 мА проявляется первый участок, где  $I \sim \exp\left(\frac{qU}{\beta kT}\right)$ ,  $\beta = 1-1.5$ , а при токе  $> 30$  мА – второй участок, где  $I \sim \exp\left(\frac{qU}{\varepsilon}\right)$ , где  $\varepsilon = 50-100$  мэВ. Последовательное сопротивление структур составляло 1–2 Ом.

4. Проанализируем полученные экспериментальные результаты. Узкозонный слой  $GaInAsSb$  образует с  $n-GaSb$  гетеропереход 11 – типа [7], в котором зонная энергетическая диаграмма узкозонного полупроводника смещена относительно энергетической диаграммы  $GaSb$ , так что разрыв в зоне проводимости и валентной зоне имеет один и тот же знак. В такой структуре при инжекции дырок в  $n-InGaSbAs$  область возможно несколько

типов излучательных переходов (рис. 1, б): квазимежзонная рекомбинация А в толще слоя и несколько типов интерфейсной рекомбинации В, В<sub>1</sub>, С и С<sub>1</sub> на п-п-гетерогранице. Излучательные переходы типа А, В были недавно идентифицированы как на р-*GaSb*-р-*GaInAsSb* [8], так и на п-*GaSb*-п-*GaInAsSb* гетерогранице [3], где содержание индия составляло 0.2-0.24.

В данной работе (содержание индия в твердом растворе составляло 0.27), по-видимому, проявляются интерфейсные переходы типа В<sub>1</sub> (рекомбинация дырок на второе локализованное состояние электронов) и С и С<sub>1</sub> (рекомбинация связанных дырок в *GaSb* с локализованными в свободными электронами в подложке).

Проанализируем вначале характер излучения из структур с „толстой“ активной областью. При Т = 300 К в таких структурах преобладает квазимежзонная рекомбинация (переход типа А), так как при малых токах  $h\nu_m$  у них больше, чем у „тонких“, а при больших токах  $h\nu_m$  увеличивается с ростом тока быстрее, чем при Т = 77 К и быстрее, чем в структурах с „тонкой“ активной областью.

Однако при Т = 77 К в „толстых“ структурах наряду с межзонной рекомбинацией существенную роль играет и интерфейсная рекомбинация (переходы типа В и С). На это указывает наличие длинноволновой полосы излучения при малых токах (рис. 2, а), энергия максимума которой увеличивается с ростом тока и сливается с основной полосой излучения.

В структурах с „тонкой“ активной областью интерфейсная рекомбинация, вероятно, является доминирующей как при 300 К, так и при 77 К. При малых токах (Т = 77 К), вероятно, проявляются две интерфейсные полосы (переходы типа В и С), что приводит к большой полуширине полосы излучения в этих условиях. Согласно [7], для твердого раствора такого состава (X=0.27) разрыв в валентной зоне на гетерогранице с *GaSb* составит  $\Delta E_v \approx 0.18$  эВ, а разрыв в зоне проводимости  $\Delta E_c \approx 0.4$  эВ (для  $E_g \approx 0.5$  эВ). При таких условиях, когда величина  $\Delta E_v$  соизмерима с величиной  $\Delta E_c/2$ , становится возможным проявление интерфейсной рекомбинации двух типов.

При возрастании тока через структуру увеличивается падение напряжения и на п-п-переходе, при этом глубина квантовой ямы для электронов уменьшается, а уровень для дырок в *GaSb* становится выше потолка валентной зоны узкозонного слоя, что приводит к преобладанию в излучении полосы С. В результате происходит сужение полуширины полосы излучения с ростом тока.

При дальнейшем возрастании тока ( $I > 1$  А) ширина п-п-перехода уменьшается настолько, что становятся возможными переходы типа В<sub>1</sub> и С<sub>1</sub> с более высокими энергиями фотона, чем переходы типа В и С. Такой вывод подтверждается возрастанием энергии максимума полосы излучения с ростом тока.

Преобладание интерфейсной рекомбинации в „тонких“ структурах по сравнению с „толстыми“ объясняется как более резкой п-п-гетерограницей в „тонких“ структурах, так и меньшим влиянием квази-

межзонной рекомбинации в толще активной области.

Итак, в результате использования твердого раствора  $GaInAsSb$  с рекордно высоким содержанием индия ( $X = 0,27$ ) удалось получить светодиоды с длиной волны излучения 2,4-2,6 мкм с внешним квантовым выходом  $\sim 1\%$ .

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Андаспаева А., Баранов А.Н., Гусейнов А., Именков А.Н., Литвак А.М., Филаретова Г.М., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 9. С. 845-849.
- [2] Андаспаева А., Баранов А.Н., Гусейнов А.А., Именков А.Н., Колчанова Н.М., Сидоренкова Е.А., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 18. С. 71-75.
- [3] Андаспаева А.А., Баранов А.Н., Гребенщикова Е.А., Гусейнов А.А., Именков А.Н., Рогачев А.А., Филаретова Г.М., Яковлев Ю.П. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 8. С. 1373-1377.
- [4] Дианов Е.М. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1983. Т. 26. № 5. С. 27-35.
- [5] De Winter J.C., Pollack M.A., Srivastava A.R., Ziskind J.C. // J. of Elect. Mater. 1985. V. 4. N 6. P. 729-747.
- [6] Баранов А.Н., Гусейнов А.А., Литвак А.М., Попов А.А., Чарыков Н.А., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 5. С. 33-38.
- [7] Накао М., Yoshido S. and S. Gonda // Sol. St. Comm. 1984. V. 49. N 7. P. 663-666.
- [8] Баранов А.Н., Гусейнов А.А., Рогачев А.А., Титков А.Н., Чебан В.Н., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 6. С. 342-344.

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

Поступило в Редакцию  
5 октября 1990 г.