

## СПОНТАННАЯ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В ГЕТЕРОПЕРЕХОДАХ II ТИПА НА ОСНОВЕ GaInAsSb/GaSb ( $\lambda=2.5$ мкм, $T=300$ К)

Андаспаева А. А., Баранов А. Н., Гребенщикова Е. А.,  
Гусейнов А. А., Именков А. Н., Рогачев А. А.,  
Филаретова Г. М., Яковлев Ю. П.

Сообщается об исследовании спонтанной электролюминесценции в гетеропереходах II типа на основе GaInAsSb/GaSb ( $\lambda=2.5$  мкм,  $T=300$  К).

Исследовались спектры излучения, внешний квантовый выход и постоянная времени спада излучения изопериодных структур  $n$ -GaSb— $n$ -Ga<sub>0.75</sub>In<sub>0.25</sub>As<sub>0.22</sub>Sb<sub>0.78</sub>— $p$ -GaAlSbAs с различной толщиной узкозонной области в интервале значений 0.4—5 мкм при температурах 77 и 300 К.

Обнаружено, что при изменении толщины узкозонной области от 5 до 0.4 мкм энергия максимума полосы излучения сдвигается в длинноволновую область на 20—30 мэВ (при 77 и 300 К), постоянная времени спада уменьшается почти на порядок от  $10^{-8}$  до  $10^{-9}$  с, а внешний квантовый выход излучения увеличивается почти в 5 раз.

В результате анализа данных по электролюминесцентным и фотоэлектрическим свойствам делается вывод о том, что излучательная рекомбинация в диодах с толстой узкозонной областью является преимущественно квазимежзонной, а в диодах с тонкой узкозонной областью доминирующую роль играет интерфейсная люминесценция через состояния на  $n$ - $n$ -границе.

Обсуждается модель излучательных переходов через границу раздела гетероперехода II типа.

1. Исследование спонтанной электролюминесценции узкозонных гетероструктур на основе GaInAsSb/GaSb имеет научное и прикладное значение. В этой системе реализуется гетеропереход II типа, и люминесценция таких структур только начинает изучаться. На их основе возможно создание высокоэффективных светодиодов для диапазона длин 1.8—2.5 мкм, перспективного для волоконно-оптических линий связи третьего поколения, а также для целей влагометрии и газового анализа.

В работе [1] нами было доложено о создании высокоэффективных светодиодов на основе GaInAsSb/GaSb, излучающих на длине волны  $\lambda=2.2$  мкм при  $T=300$  К с внешним квантовым выходом  $\eta_e=4$  %. В данной же работе впервые рассматривается спонтанная электролюминесценция из таких гетеропереходов в более длинноволновой области спектра ( $\lambda \approx 2.5$  мкм) вблизи границы несмешиваемости твердого раствора. Интерес к спонтанным источникам в этом спектральном диапазоне обусловлен созданием флюоридных светодиодов, в которых уже достигнут сверхнизкий уровень потерь ( $\sim 0.025$  дБ/км) на длине волны 2.5 мкм [2].

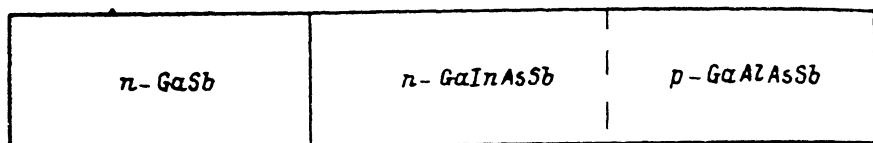
2. Светоизлучающая структура (рис. 1, а) создавалась методом жидкостной эпитаксии на подложке  $n$ -GaSb (111)В. Активная область структуры была выполнена из слоя твердого раствора  $n$ -Ga<sub>0.75</sub>In<sub>0.25</sub>As<sub>0.22</sub>Sb<sub>0.78</sub> вблизи границы несмешиваемости, к которому с одной стороны прилегает слой антимонида галлия  $n$ -типа ( $n \approx 5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>), а с другой стороны — широкозонный слой  $p$ -GaAlSbAs ( $E_g=1.2$  эВ,  $p=2 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>). Активная область структуры была легирована теллуrom до концентрации  $(1 \div 8) \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, толщина варьировалась в интервале 0.4—5 мкм. Из такой структуры были изготовлены меза-светодиоды (диаметром  $\sim 300$  мкм) с сеточным омическим контактом к  $n$ -GaSb (Au+5 % Te)

и точечным (диаметром  $\sim 40$  мкм) омическим контактом к  $p$ -GaAlSbAs (Au+5% Ge).

Исследовались диоды с различной толщиной активной области (в интервале 0.4—5 мкм). Измерялись спектры и квантовый выход излучения, постоянная времени спада излучения при выключении тока, спектр фотоответа, а также вольтамперные и вольтемкостные характеристики.

Приемником излучения служил фотодиод, изготовленный нами на основе GaInAsSb [3]. Спектры излучения корректировались с учетом чувствительности фотоприемника и прозрачности измерительной установки.

а



б

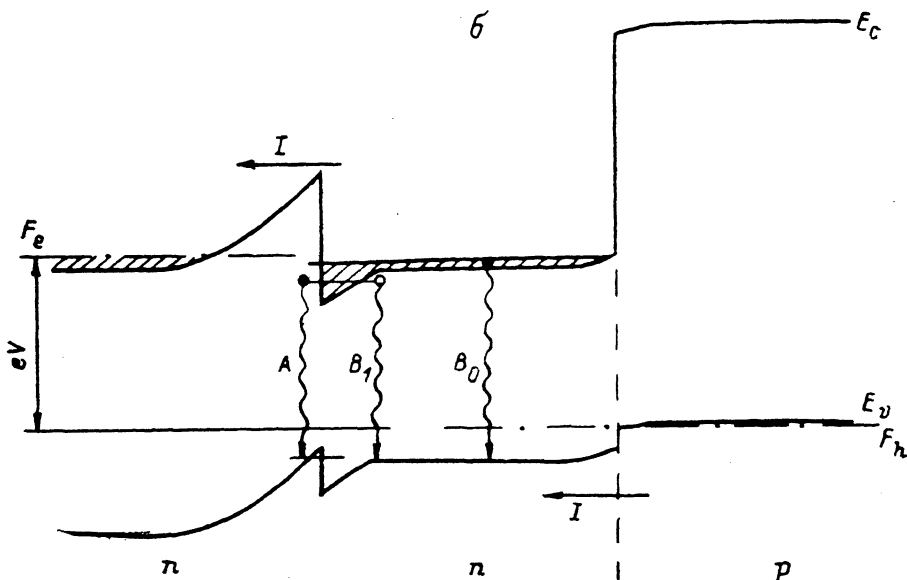


Рис. 1. Схема гетероструктуры (а) и зонная энергетическая диаграмма (б).

3. Результаты спектральных исследований диодов с различной толщиной активной области приведены в таблице.

Спектры электролюминесценции ( $I=50$  мА) диодов с различной толщиной активной области и одинаковым составом для 77 и 295 К показаны на рис. 2, а. Рассмотрим спектры электролюминесценции с толстой активной ( $d=5$  мкм) и тонкой активной ( $d=0.4$  мкм) областями.

Спектры излучения диодов с толстой активной областью имеют одну полосу с энергиями максимума  $h\nu_m=0.535$  (295 К) и 0.584 эВ (77 К). Полоса неполяризована в любом направлении распространения света. Характерно, что спектры электролюминесценции диодов с тонкой активной областью смещены в более длинноволновую область за счет генерации излучения другой физической природы  $h\nu_m=0.501$ —0.512 эВ (295 К) и 0.561—570 (77 К). Это новое излучение при наблюдении в плоскости  $p$ — $n$ -перехода имеет  $TE$ -поляризацию в длинноволновой части полосы (вектор  $E$  электромагнитного поля излучения параллелен плоскости  $p$ — $n$ -перехода). Коэффициент поляризации достигает значения 0.1—

Электрoлoмшeщeнтныe хaрaктeристикa стрyктур

Тип диoдa	d, мкм	Концентрация носителей $\times 10^{18}$ , см <sup>-3</sup>	$\eta_e$ , % при T, K		$\tau$ , нс при T, K		$h\nu_m$ , мэВ при T, K		$\Delta h\nu_m$ , мэВ при T, K	
			77	295	77	295	77	295	77	295
170 (a)	0.4	.9	6	1	2.5	3	561	501	30	60
169 (a)	1	5	8	0.8	2.5	2.8	570	512	38	64
203	1.8	0.3	3	0.5	4	6	580	530	31	68
167 (a)	3.0	8	2	0.4	6	9	583	534	25	55
208	5.0	9	0.6	0.2	8	12	584	535	30	60

0.2. В направлении, перпендикулярном плоскости p-n-перехода, излучение не поляризовано.

Постоянная времени спада регистрируемых импульсов при выключении тока (которая характеризует среднее время жизни неравновесных носителей заряда) уменьшается с уменьшением толщины активной области от 12 (d=5 мкм) до 2 нс (d=0.4 мкм) при T=295 K и от 8 до 2 нс при 77 K. Отметим, что экстраполяция экспериментальных кривых к d=0 дает время жизни неравновесных носителей заряда на n-n-гетерогранице, равное 1 нс (рис. 3).

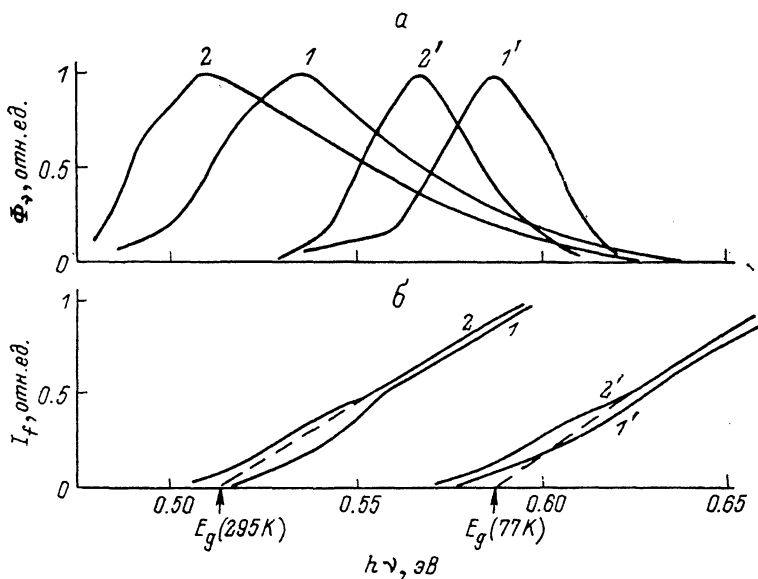


Рис. 2. Спектры излучения (a) и фoтoтoкa (б) стрyктур с толстой (1, 1') и тонкой (2, 2') активными областями.

T, K: 1, 2 - 295; 1', 2' - 77.

Характерно, что внешний квантовый выход излучения при комнатной температуре возрастает (почти в 5 раз) с уменьшением толщины активной области от 5 до 0.4 мкм. Однако максимальное значение  $\eta_e=1\%$  остается ниже в 2-3 раза, чем в структурах с  $\lambda=2.0-2.2$  мкм [1]. При 77 K внешний квантовый выход излучения в 20-30 раз больше, чем при комнатной температуре.

Для анализа спектров излучения был изучен длинноволновый край фотоответа при освещении структур со стороны p-GaAlSbAs (рис. 2, б).

В образцах с толстой активной областью формы спектра близки к параболическим, т. е.  $I_\phi \sim (h\nu - h\nu_c)^{0.5}$ , где  $h\nu_c = 0.51$  (295 K) и 0.58 эВ (77 K). Такой характер спектра фотоответа соответствует краю поглощения в прямозонном слаболегированном полупроводнике, и  $h\nu_c$  может быть отождествлена с шириной запрещенной зоны  $E_g$  активной области.

В то же время спектр фототока структур с тонкой активной областью смещен в длинноволновую сторону за счет появления фоточувствительности при  $h\nu \leq E_g$ .

Появление такой дополнительной фоточувствительности при  $h\nu \leq E_g$  вызвано, вероятно, электронными переходами вблизи границы раздела  $n$ -GaSb— $n$ -GaInAsSb.

4. Проанализируем полученные экспериментальные результаты. Узкозонный слой GaInAsSb образует с GaSb гетеропереход II типа [4], 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  $n$ -область возможны три типа излучательных переходов (рис. 1, б): квазижеззонная рекомбинация  $B_0$  и два типа интерфейсной рекомбинации  $A$  и  $B_1$ . Такие излучательные переходы недавно удалось наблюдать на границе  $p$ -GaSb— $p$ -GaInAsSb [5].

Анализ всех данных по электролюминесцентным и фотоэлектрическим свойствам  $n$ -GaSb— $n$ -GaInAsSb— $p$ -GaAlSbAs структур позволил прийти к выводу о том, что излучательная рекомбинация в диодах с толстой активной областью ( $d \geq 3$  мкм) является преимущественно квазижеззонной, а в диоде с тонкой активной областью ( $d=0.4$  мкм) доминирующую роль играют излучательные переходы через состояния на  $n$ - $n$ -гетерогранице (интерфейсная рекомбинация). Этот вывод был сделан на основе следующих фактов.

В структурах с толстой активной областью ( $d \geq 3$  мкм) доминирует полоса, энер-

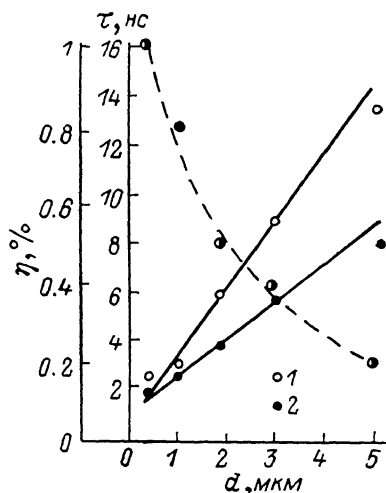


Рис. 3. Зависимость внешнего квантового выхода излучения (штриховая кривая) и постоянной времени спада интенсивности излучения (сплошные) от толщины узкозонного слоя.

Т, К: 1 — 295, 2 — 77.

гия максимума которой близка к ширине запрещенной зоны  $E_g$  активной области ( $h\nu_m$  оказывается больше  $E_g$ , определенной из экспериментальной зависимости спектра фототока, на величину  $\sim kT/2$ ). Среднее время жизни неравновесных носителей заряда в структурах с тонкой активной областью, определенное из времени спада излучения при выключении тока, составляет  $\sim 12$  нс ( $T=295$  К). Это время жизни неравновесных дырок близко к значению  $10^{-8}$  с, полученному для GaSb [6]. Форма полосы излучения соответствует межзонным переходам при параболической форме краев зон при наличии «хвостов», и такую полосу можно отождествить с квазижеззонной полосой рекомбинации типа  $B_0$  (рис. 1, б).

С уменьшением толщины активной области в спектре излучения начинает увеличиваться доля длинноволнового излучения, и при  $d \leq 1$  мкм энергия максимума излучения становится меньше  $E_g$  активной области. При этом спектр фототока смещается в длинноволновую область (рис. 2, а). Наиболее существенные изменения происходят со временем жизни неосновных носителей заряда: оно изменяется почти на порядок при изменении толщины активной области и приближении  $p$ - $n$ -перехода к  $n$ - $n$ -гетерогранице. При этом излучение становится слабо поляризованным. Все это указывает на существенное изменение механизма излучательной рекомбинации и доминирующую роль интерфейсной люминесценции в структурах с тонкой активной областью. Длинноволновую полосу излучения можно отождествить с полосой типа  $B_1$ ; переходы между состояниями для электронов в самосогласованной квантовой яме и состояниями для тяжелых дырок в подложке, вероятно, дают значительно меньший вклад

в излучение, поскольку степень  $TE$ -поляризации интерфейсной люминесценции невелика и составляет 0.1—0.2.

Увеличение внешнего квантового выхода излучения с уменьшением толщины активной области показывает, что внутренний квантовый выход излучения через квантовые состояния на гетерогранице больше, чем при межзонной рекомбинации в толще полупроводника.

#### Список литературы

- [1] Андаспаева А. А., Баранов А. Н., Гусейнов А. А., Именков А. Н., Литвак А. М., Филаретова Г. М., Яковлев Ю. П. // Письма ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 9. С. 845—849.
- [2] Ewing K. J. et al. // Proc. V Halide Glass symp. Shizuoka, 1988. P. 139—145.
- [3] Андреев И. А., Афраимов М. А., Баранов А. Н., Данильченко В. Г., Мирсагатов М. А., Михайлова М. П., Яковлев Ю. П. // Письма ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 21. С. 1311—1315.
- [4] Nakaо M., Yoshida S., Gonda S. // Sol. St. Commun. 1984. V. 49. N 7. P. 663—666.
- [5] Баранов А. Н., Гусейнов А. Н., Рогачев А. А., Титков А. Н., Чебан В. Н., Яковлев Ю. П. // Письма ЖЭТФ. 1988. Т. 48. В. 6. С. 342—344.
- [6] Агаев В. В., Титков А. Н., Чайкина Е. И. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 4. С. 750—752.

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

Получена 9.03.1989  
Принята к печати 20.03.1989