

# Электролюминесценция в разьединенной гетероструктуре $p$ -GaInAsSb/ $p$ -InAs при гелиевых температурах

© Н.Л. Баженов, Г.Г. Зегря, В.И. Иванов-Омский, М.П. Михайлова,  
М.Ю. Михайлов, К.Д. Моисеев В.А. Смирнов, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 26 марта 1997 г. Принята к печати 1 апреля 1997 г.)

Исследована электролюминесценция в разьединенной одиночной гетероструктуре II типа  $p$ -GaInAsSb/ $p$ -InAs при  $T = 4.2 \div 77$  К. Показано, что при понижении температуры ниже  $T = 77$  К две полосы люминесценции с энергиями максимумов 311 мэВ (полоса А) и 384 мэВ (полоса В) сдвигаются в сторону больших энергий, причем при  $T = 4.2$  К коротковолновая полоса расщепляется на две полосы  $B_1$  и  $B_2$ . Результаты объясняются в рамках модели, учитывающей рекомбинацию электронов из зоны проводимости на акцепторный уровень в InAs, а также рекомбинацией электронов и дырок, локализованных в самосогласованных квантовых ямах по разные стороны от гетерограницы.

## Введение

Недавно была обнаружена и исследована электролюминесценция (ЭЛ) в одиночном разьединенном гетеропереходе II типа  $p$ -GaInAsSb/ $p$ -InAs при  $T = 77$  К [1]. В этой же работе был выполнен качественный анализ механизма ЭЛ в такой структуре. Было показано, что механизм ЭЛ в рассматриваемой  $p$ - $p$ -гетероструктуре обусловлен рекомбинацией электронов и дырок, локализованных в самосогласованных квантовых ямах по разные стороны от гетерограницы. Однако вопрос о том, определяется ли форма потенциальных барьеров и самосогласованных квантовых ям на гетерогранице непосредственно технологией изготовления гетероструктуры или она зависит также от величины приложенного внешнего смещения, не до конца понятен. В этой связи особенно полезными представляются исследования электролюминесценции в импульсном режиме, так как в этом случае имеется возможность не только в более широком диапазоне изменять ток, протекающий через гетеропереход, но и оценить характерные времена излучательных процессов. В работе [2] была исследована излучательная рекомбинация в разьединенной  $p$ - $p$ -гетероструктуре II типа при импульсном возбуждении при температуре жидкого азота. Было показано, что в спектрах люминесценции наблюдаются две полосы излучения с максимумами, соответствующими энергиям 384 и 311 мэВ, полушириной  $18 \div 19$  мэВ, и оценены времена излучательной и безызлучательной рекомбинации на гетерогранице II типа, которые составили  $\tau_R \simeq 2 \cdot 10^{-7}$  с и  $\tau_{A2} = (0.5 \div 1.4) \cdot 10^{-7}$  с соответственно.

Цель настоящей работы состояла в исследовании электролюминесценции в разьединенной гетероструктуре  $p$ -GaInAsSb/ $p$ -InAs в импульсном режиме при температуре жидкого гелия. Экспериментальные исследования были выполнены при различных токах и различных положениях измерительного строга относительно импульса тока.

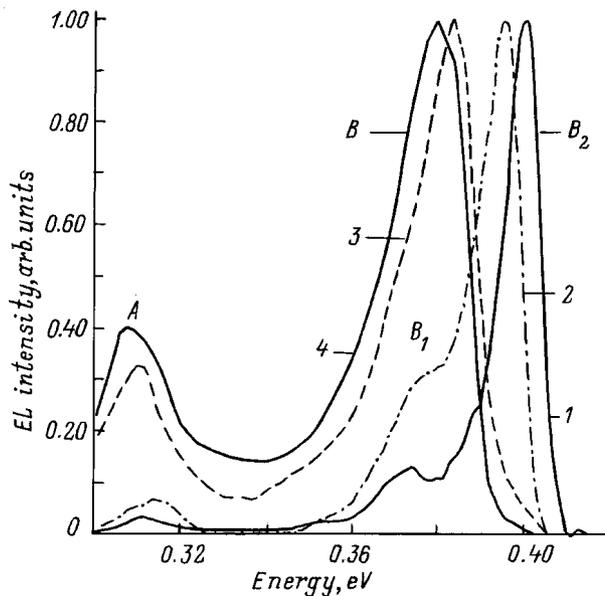
## Методика эксперимента и образцы

Одиночные гетероструктуры  $p$ -GaInAsSb/ $p$ -InAs были получены методом жидкофазной эпитаксии. Технология их изготовления и методика измерений подробно описаны ранее [2,3]. Подложка для такой структуры легировалась Zn до концентраций порядка  $5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Эпитаксиальный широкозонный слой твердого раствора Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As<sub>y</sub>Sb<sub>1-y</sub> ( $x = 0.17$ ,  $y = 0.22$ ) также легировался Zn до концентрации  $p = 10^{18}$  см<sup>-3</sup>.

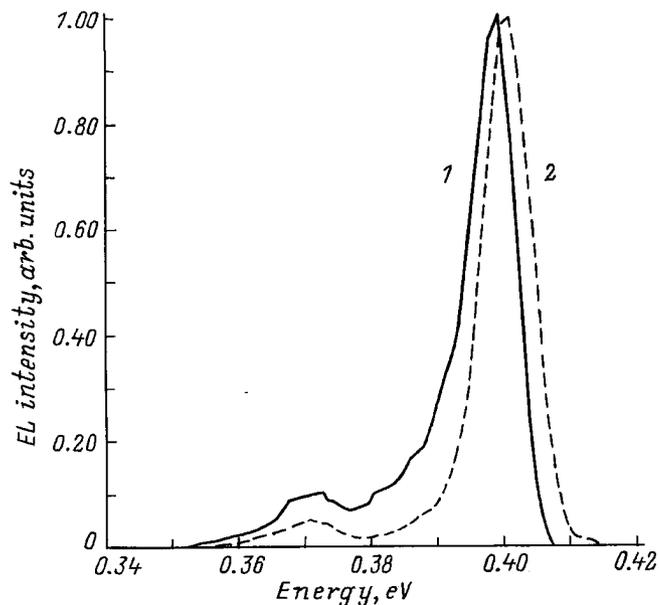
## Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены спектры люминесценции исследованной структуры, когда отрицательный потенциал приложен к узкозонному полупроводнику  $p$ -InAs (обратное смещение), при четырех температурах от 4.2 до 100 К. При  $T = 77$  К в спектрах наблюдались две линии с максимумами при энергиях фотонов 311 мэВ (линия А) и 384 мэВ (линия В) соответственно. При понижении температуры до  $T = 4.2$  К полоса А сужалась, причем ее максимум практически не смещался (энергия максимума 314 мэВ). Одновременно изменялась структура полосы В — она явно расщеплялась на две линии с энергиями максимумов 371 мэВ ( $B_1$  и 400 мэВ ( $B_2$ ), при этом положение полосы  $B_1$  практически совпадало с положением полосы В при  $T = 77$  К. Из сравнения со спектром, снятым при промежуточной температуре  $T = 15$  К, видно, что при повышении температуры от гелиевой относительная интенсивность полосы  $B_1$  возрастает, но ее положение практически не изменяется и совпадает с положением полосы В при  $T = 77$  К, а полоса  $B_2$  смещается в сторону меньших энергий фотонов и, расширяясь, поглощает полосу  $B_1$ .

Таким образом, положение двух длинноволновых полос практически не зависит от температуры, а коротковолновая полоса при понижении температуры сдвигается



**Рис. 1.** Спектры электролюминесценции (EL) при  $T = 4.2$  (1), 15 (2), 77 (3) и 100 (4) К.



**Рис. 2.** Спектры электролюминесценции (EL) при  $T = 4.2$  К при обратном (1) и прямом (2) смещениях.

гается в сторону бóльших энергий. Температурный коэффициент сдвига равен  $-2.2 \cdot 10^{-4}$  эВ/К, что близко к величине соответствующего температурного коэффициента изменения ширины запрещенной зоны в InAs  $-2.8 \cdot 10^{-4}$  эВ/К [4].

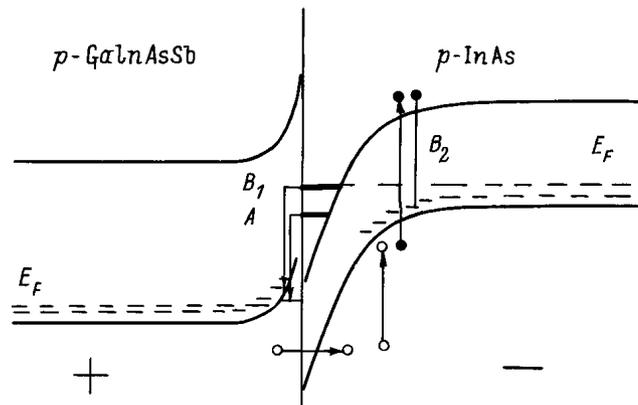
Исследование показало, что вольт-амперная характеристика исследуемой структуры при понижении температуры от  $T = 77$  до 4.2 К изменяется слабо. Это свидетельствует о туннельном характере протекания тока. Отметим, что при прямом смещении, когда положительный потенциал приложен к более узкозонному полупроводнику  $p\text{-InAs}$ , полоса А не наблюдается.

На рис. 2 представлены спектры полос  $B_1$  и  $B_2$  исследованной структуры как для случая обратного смещения, так и для случая прямого смещения. Видно, что форма спектра при обеих полярностях приложенного смещения подобна. Положение полос  $B_1$  и  $B_2$  практически совпадает. При увеличении интенсивности возбуждения интенсивность линий излучения линейно возрастает, но их энергетическое положение остается неизменным.

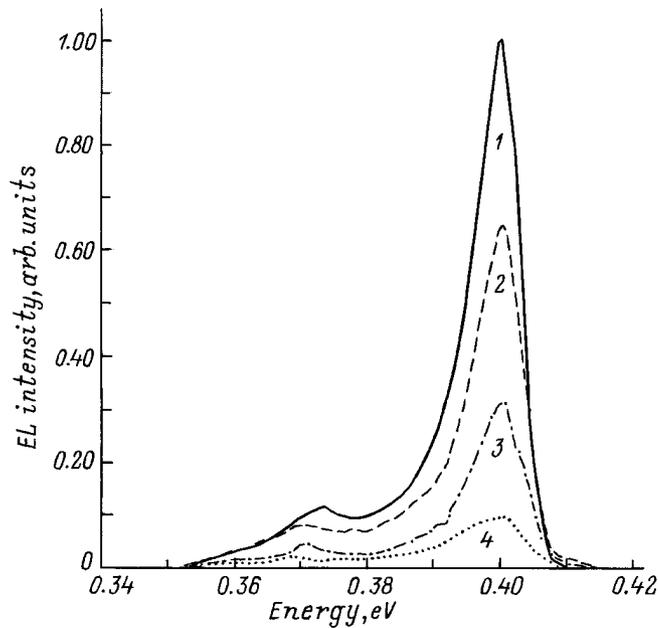
При прямом смещении полоса  $B_2$  симметрична и имеет гауссову форму. В случае обратного смещения полоса  $B_2$  несимметрична. Ее коротковолновый край по-прежнему описывается гауссовым распределением, причем с теми же параметрами, что и при прямом смещении, однако длинноволновый край имеет лоренцеву форму. Тем не менее можно сделать вывод, что вид спектра исследованной гетероструктуры слабо зависит не только от степени возбуждения, но и от полярности тока. Это свидетельствует в пользу того, что зонная структура определяется в первую очередь технологией изготовления гетероперехода, а не приложенным смеще-

нием. Кроме того рекомбинация носителей при обеих полярностях смещения происходит в одной и той же области гетероструктуры.

Природа полос  $B_2$  может быть лучше понята из схематичной зонной диаграммы, представленной на рис. 3 ( $E_F$  — уровень Ферми). На рисунке гетеропереход изображен при обратном смещении. В этом случае становится эффективным туннелирование дырок из валентной зоны твердого раствора в валентную зону InAs. Протуннелировавшая дырка теряет энергию за счет оже-процесса, который сопровождается возбуждением неравновесного электрона из валентной зоны InAs в зону проводимости и переходом дырки к потолку валентной зоны. Электрон в зоне проводимости излучательно рекомбинирует на акцепторный уровень, что приводит к появлению в спектре ЭЛ полосы  $B_2$ . Поскольку легирующей примесью как



**Рис. 3.** Зонная диаграмма исследованной гетероструктуры при обратном смещении.



**Рис. 4.** Спектры электролюминесценции (EL) при обратном смещении при  $T = 4.2$  К, снятые спустя промежуток времени  $\Delta t$  после выключения тока через гетеропереход.  $\Delta t$ , мкс: 1 — 0, 2 — 4, 3 — 8, 4 — 12.

подложки, так и слоя является Zn, формирующий в InAs акцепторный уровень с энергией 25 мэВ [5], а ширина запрещенной зоны InAs, определенная по измерению фотолюминесценции при  $T = 4.2$  К, равна 423 мэВ, естественно предположить, что рекомбинация электронов происходит на акцепторный уровень, соответствующий цинку. При прямом смещении имеет место аналогичный процесс, однако туннелирование дырок происходит из валентной зоны InAs в валентную зону GaInAsSb. Кроме того, при прямом смещении, превышающем контактную разность потенциалов, (что достигалось в эксперименте) может происходить туннелирование электронов из валентной зоны GaInAsSb в зону проводимости InAs и их рекомбинация с дырками. Отметим, что поскольку при обратном смещении энергетические зоны искривлены сильнее, чем при прямом смещении, а рекомбинация электрона происходит именно в области, где зоны имеют сильный наклон, следует ожидать, что длинноволновый край полосы ЭЛ в этом случае будет более пологим, чем коротковолновый, из-за вклада рекомбинации, сопровождающейся туннелированием. Именно это и наблюдается в эксперименте.

В рамках нашей модели зонной диаграммы отсутствие зависимости положения полос ЭЛ от смещения можно объяснить следующим образом. На  $p$ - $p$ -гетерогранице имеется квантовая яма, форма которой практически не зависит от величины и полярности приложенного смещения. При приложении смещения происходит заполнение локальных уровней в яме электронами, а следовательно,

и их туннельная рекомбинация с дырками, что и приводит к появлению полос  $A$  и  $B_1$ .

На рис. 4 представлены спектры ЭЛ, характеризующие кинетику гашения люминесценции после окончания импульса тока длительностью 10 мкс через гетеропереход при обратном смещении. Видно, что после выключения тока возбуждения интенсивность полос  $B_1$  и  $B_2$  уменьшается. Уменьшение в "е" раз происходит приблизительно за 8 мкс, что близко к времени релаксации интегральной люминесценции в таких структурах [3]. В целом это подтверждает предположение о том, что энергетическая структура гетерограницы в основном практически не зависит от приложенного напряжения. При этом скорость уменьшения интенсивности полос при сдвиге измерительного строба подтверждает, что оба соответствующих канала излучательной рекомбинации имеют общий источник неравновесных электронов.

## Заключение

Таким образом, в настоящей работе исследованы спектры ЭЛ одиночной гетероструктуры  $p$ -GaInAsSb/ $p$ -InAs в импульсных электрических полях при  $T = 4.2 \div 100$  К. Полученные экспериментальные данные позволили уточнить модель излучательной рекомбинации электронов, предложенную в работах [1,2]. Дополнительно к рекомбинации электронов, локализованных в самосогласованной квантовой яме на гетерогранице со стороны  $p$ -InAs, эта модель учитывает излучательные переходы электронов на акцепторный уровень в  $p$ -InAs.

Данная работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 96-02-17841-а, а также Международной ассоциацией INTAS, грант № 94-0789.

## Список литературы

- [1] М.П. Mikhailova, G.G. Zegrya, K.D. Moiseev, Yu.P. Yakovlev. *Sol. St. Electron.*, **40**, 673 (1996).
- [2] Н.Л. Баженов, Г.Г. Зегря, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, В.А. Смирнов, О.Ю. Соловьева, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **31**, 658 (1977).
- [3] N.L. Bazhenov, G.G. Zegrya, V.I. Ivanov-Omskii, K.D. Moiseev, M.P. Mikhailova, V.A. Smirnov, Yu.P. Yakovlev. *23-rd Int. Symp. Compound Semiconductors* (St. Petersburg, Russia, September 23–27) rep. 11.P2.37.
- [4] П.К. Баранский, В.П. Клочков, И.В. Потыкевич. *Полупроводниковая электроника*. Справочник (Киев, Наук. думка, 1975).
- [5] X. Gong, H. Kan, T. Yamagichi, I. Sazuki, M. Aoyama, M. Kumagawa, N.L. Rowell, A. Wang, R. Rinfret. *JJAP*, v. 33, 1740 (1994).

Редактор Л.В. Шаронова

## Electroluminescence from type II broken-gap $p$ -GaInAsSb/ $p$ -InAs heterojunction at helium temperatures

N.L. Bazhenov, G.G. Zegrya, V.I. Ivanov-Omskii,  
M.P. Mikhailova, M.Yu. Mikhailov, K.D. Moiseev,  
V.A. Smirnov, Yu.P. Yakovlev

A.F. Ioffe Phisicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Electroluminescence from the type II broken-gap  $p$ -GaInAsSb/ $p$ -InAs single heterojunction was studied at  $T = 4.2 \div 77$  K. Two bands with maximum energies of 311 meV ( $A$  band) and 384 meV ( $B$  band) observed at  $T = 77$  K were shown to shift toward higher energies with decreasing temperature to 4.2 K, the short-wave band splitting into two subbands ( $B_1$  and  $B_2$ ). The results are discussed in the framework of the model taking into account band-to-acceptor recombination in InAs as well as radiative recombination of electrons and holes localized in the adjacent wells at both sides of the heterojunction.