

06;07

## Фотолюминесцентные исследования сильнонапряженных квантовых ям GaAs, помещенных в слои $Al_{0.48}In_{0.52}As$ и $Ga_{0.47}In_{0.53}As$

© Д.А. Винокуров, С.А. Зорина, В.А. Капитонов, Д.Н. Николаев,  
А.Л. Станкевич, В.В. Шамахов, И.С. Тарасов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург  
E-mail: dmitry.vinokurov@pop.ioffe.rssi.ru

Поступило в Редакцию 5 декабря 2005 г.

Методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках InP (100) выращены сильнонапряженные квантовые ямы GaAs, помещенные в слои  $Al_{0.48}In_{0.52}As$  и  $Ga_{0.47}In_{0.53}As$ . Исследованы фотолюминесцентные свойства этих структур и установлено, что квантовые ямы GaAs со слоем  $Al_{0.48}In_{0.52}As$  образует гетеропереход I рода, а с  $Ga_{0.47}In_{0.53}As$  — II рода.

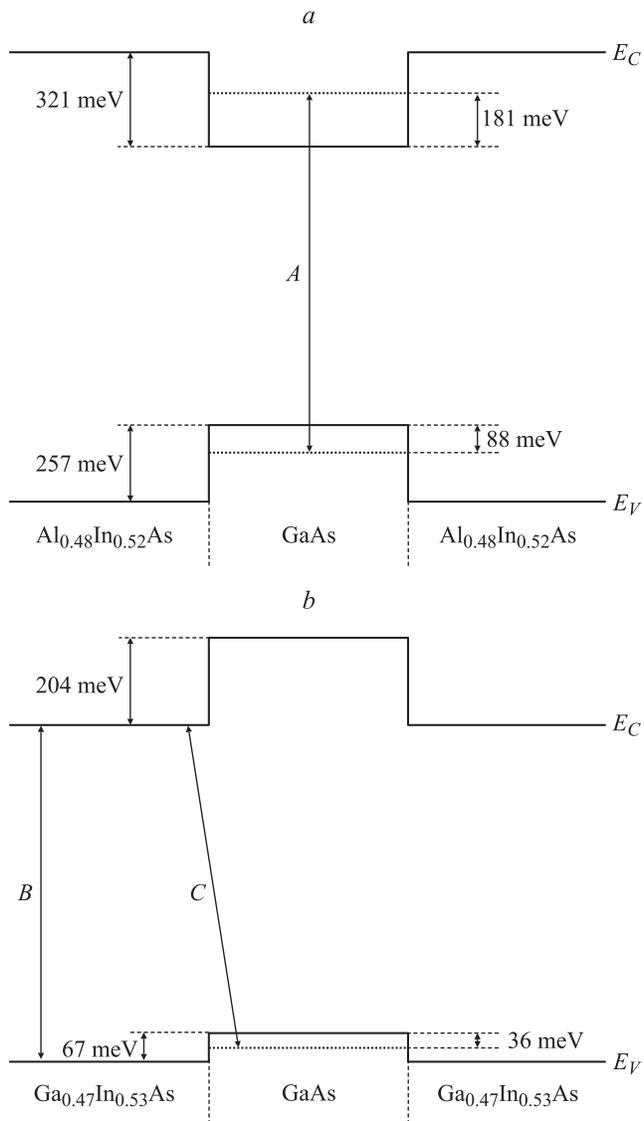
PACS: 73.21.La, 78.55.-m

Целью данной работы является исследование излучательных переходов в системе соединений  $Al_{0.48}In_{0.52}As/GaAs$  и  $Ga_{0.47}In_{0.53}As/GaAs$ . В этом случае сильно напряженная квантовая яма (КЯ) GaAs является более узкозонной по сравнению с ограничивающим слоем  $Al_{0.48}In_{0.52}As$  и более широкозонной по сравнению со слоем  $Ga_{0.47}In_{0.53}As$ . В настоящее время в литературе исследовались только две системы, в которых материал активной области более широкозонный, чем ограничивающие слои, а именно: AlAs в AlSb [1] и GaAs в GaSb [2]. В этих работах исследуемые структуры образуют гетеропереходы II рода. Предполагается, что исследование переходов II рода в других материальных системах позволит глубже изучить физические особенности полупроводниковых гетероструктур, и, возможно, получать приборы, излучающие в более длинноволновой области по сравнению с традиционным для данных ростовых систем диапазоном излучения. В данной работе были исследованы фотолюминесцентные свойства сильно напряженных КЯ GaAs, помещенных в слои  $Al_{0.48}In_{0.52}As$  и  $Ga_{0.47}In_{0.53}As$ .

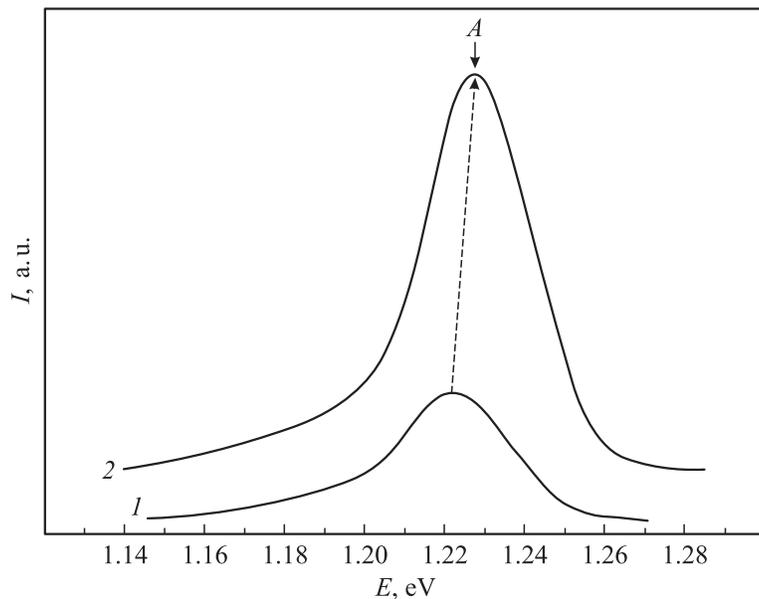
Структуры для фотолуминесцентных исследований изготавливались на установке МОС-гетероэпитаксии EMCORE GS3100 с вертикальным реактором. Процесс роста осуществлялся при пониженном давлении (77 Torr), скорости вращения подложкодержателя 1000 rev/min и температуре 725°C. На подложках *n*-InP (100) были выращены два типа нелегированных структур. Структуры типа 1 представляли собой одну сильнонапряженную КЯ GaAs ( $\Delta a/a = -3.8\%$ ) (толщина 19 Å), помещенную в слой твердого раствора Al<sub>0.48</sub>In<sub>0.52</sub>As. Структуры типа 2 состояли из одной КЯ GaAs (толщина 28 Å) или трех аналогичных ям, разделенных 300 Å барьерами Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As, заключенными в слой Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As (толщина 300 Å). Толщины сильно напряженных КЯ GaAs не превышали расчетной критической толщины, которая по данным работы [3] составляет 30 Å.

Предварительно нами была рассчитана зонная диаграмма рассматриваемых структур для температуры 77 К. При расчетах данные для ненапряженных материалов брались из работы [4]. При этом значения ширины запрещенных зон при температуре 77 К без учета напряжений были равны следующим значениям: Al<sub>0.48</sub>In<sub>0.52</sub>As — 1.519 eV, Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As — 0.804 eV, GaAs — 1.508 eV. Напряжения в КЯ GaAs учитывались по методике, приведенной в работе [5]. Так как КЯ GaAs является растянуто-напряженной относительно подложки InP, то с учетом напряжений ее ширина запрещенной зоны уменьшается по сравнению со значением ненапряженной и составляет, согласно расчетам, 0.941 eV. Поскольку слои GaAs имеют в образцах малые толщины, то необходимо учесть в них эффекты размерного квантования. Размерное квантование учитывалось по модели эффективных масс, приведенной в работе [6].

На рис. 1 изображена схематическая зонная диаграмма для КЯ GaAs, помещенной в слой Al<sub>0.48</sub>In<sub>0.52</sub>As (структура типа 1) (а) и Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As (структура типа 2) (б). Из рис. 1 видно, что структура типа 1 (а) образует гетеропереход I рода, а структура типа 2 (б) — II рода. При этом особенностью структуры типа 2 является то, что КЯ GaAs является более широкозонной, чем ограничивающие ее слои Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As. Исходя из рис. 1, а в структуре типа 1 должны наблюдаться межзонные излучательные переходы (переходы типа А) с энергией фотона 1.21 eV. В структуре типа 2 (рис. 1, б) может наблюдаться два типа оптических переходов: межзонные оптические переходы, соответствующие объемному Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As (переходы типа В) с энергией



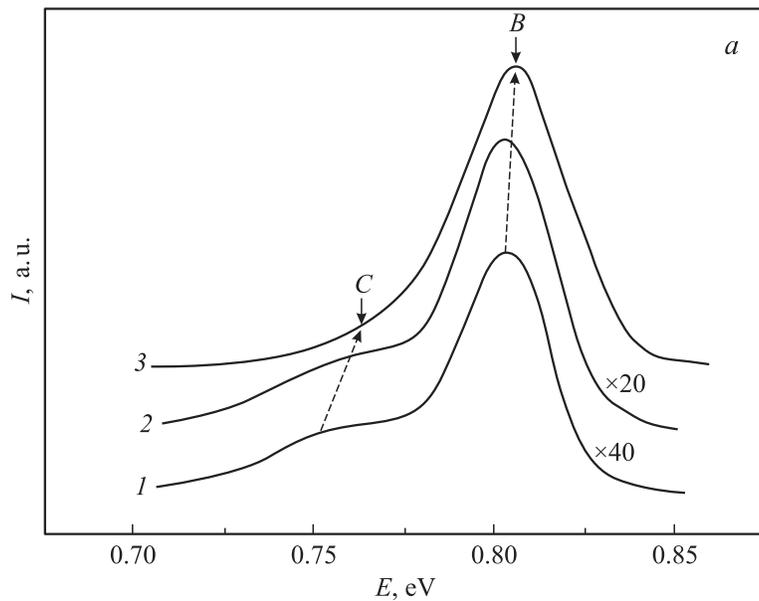
**Рис. 1.** Схематическая зонная диаграмма для КЯ GaAs, помещенной в слои  $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$  (структура типа 1) (a) и  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  (структура типа 2) (b).



**Рис. 2.** Зависимость спектров фотолюминесценции для структуры типа 1 от величины мощности оптического возбуждения при температуре 77 К: 1 —  $2.7 \text{ W/cm}^2$ , 2 —  $15 \text{ W/cm}^2$ .

фотона  $0.804 \text{ eV}$ ; не прямые (туннельные) излучательные переходы на гетерогранице II рода  $\text{GaAs}/\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  (переходы типа C), которые имеют энергию фотона  $0.773 \text{ eV}$ , значительно меньшую, чем твердые растворы, образующие данную гетерограницу. При этом электроны, находящиеся в  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  около гетерограницы  $\text{GaAs}/\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ , рекомбинируют с легкими дырками, локализованными в КЯ GaAs. Наличие легких дырок обусловлено тем, что КЯ GaAs является растянуто-напряженной относительно подложки InP.

На рис. 2 приведены спектры фотолюминесценции (ФЛ) для структуры типа 1 от величины мощности оптического возбуждения ( $2.7\text{--}15 \text{ W/cm}^2$ ) при температуре 77 К. Из данных спектров видно, что положение максимума полосы излучения практически не смещается от величины мощности оптического возбуждения, т. е. при мощности



**Рис. 3.** Зависимость спектров фотолюминесценции для структур типа 2 с одной КЯ (*a*) и тремя КЯ (*b*) от величины мощности оптического возбуждения при температуре 77 К. *a*: 1 — 2.7 W/cm<sup>2</sup>, 2 — 3.8 W/cm<sup>2</sup>, 3 — 15 W/cm<sup>2</sup>. *b*: 1 — 0.3 W/cm<sup>2</sup>, 2 — 0.35 W/cm<sup>2</sup>, 3 — 2.7 W/cm<sup>2</sup>.

оптической накачки 2.7 W/cm<sup>2</sup> максимум спектра ФЛ имеет энергию 1.223 eV, а при мощности оптической накачки 15 W/cm<sup>2</sup> — 1.228 eV. Такое незначительное смещение максимума спектра ФЛ характерно для КЯ с гетеропереходом I рода. Данные значения достаточно хорошо согласуются с расчетными значениями (1.21 eV) для межзонных оптических переходов, приведенных на рис. 1, *a* (переходы типа A).

На рис. 3 изображена зависимость спектров ФЛ для структур типа 2 с одной КЯ (*a*) и тремя КЯ (*b*) от величины мощности оптического возбуждения (0.3–15 W/cm<sup>2</sup>) при температуре 77 К. Из рис. 3, *a* видно, что спектр ФЛ имеет один четко выраженный максимум и сильно выраженное плечо со стороны меньших энергий. Максимум в спектре ФЛ имеет энергию 0.8 eV и соответствует межзонным оптическим

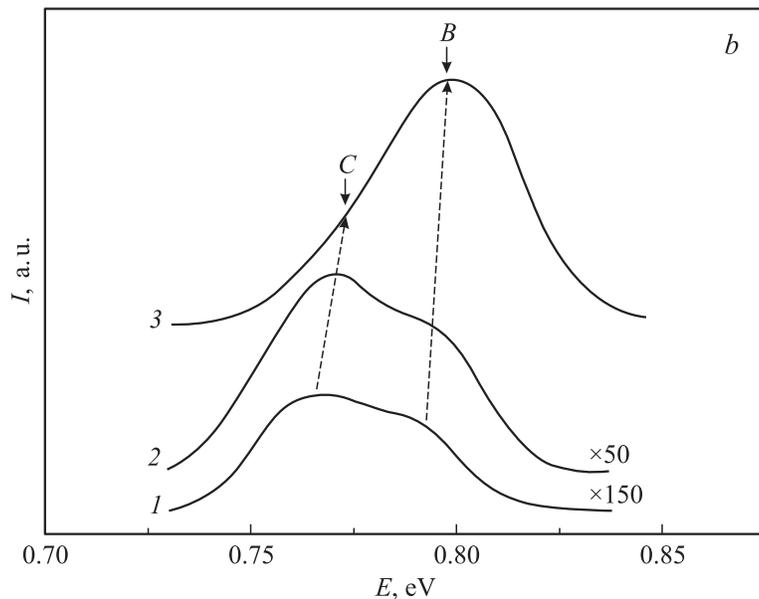


Рис. 3 (продолжение).

переходам в  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  (переходы  $B$  на рис. 1,  $b$ ). При этом максимум полосы ФЛ, обусловленный переходами  $B$ , практически не смещается от величины мощности оптического возбуждения. Низкоэнергетическое плечо в спектре ФЛ мы связываем с непрямыми оптическими переходами, происходящими на гетерогранице  $\text{GaAs}/\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  (переходы  $C$  на рис. 1,  $b$ ). При этом из поведения спектров ФЛ видно, что с увеличением мощности оптического возбуждения плечо становится менее заметным и смещается в сторону к максимуму полосы, обусловленной оптическими переходами  $B$ . Наблюдается так называемый „голубой“ сдвиг, который характерен для гетеропереходов II рода [7]. Более четко в спектрах ФЛ оптические переходы  $C$  проявляются в структуре, состоящей из трех КЯ  $\text{GaAs}$ , разделенных барьерами  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  (рис. 3,  $b$ ). Из рис. 3,  $b$  видно, что при минимальной мощности оптического возбуждения ( $0.3 \text{ W/cm}^2$ ) в спектре ФЛ видны четкий максимум с энергией  $0.77 \text{ eV}$ , который обусловлен оптическими переходами  $C$ , и

высокоэнергетическое плечо, соответствующее переходам  $B$ . С увеличением мощности возбуждения максимум, обусловленный переходами  $C$ , смещается в высокоэнергетическую область, т.е. ведет себя как структура с одной КЯ. В свою очередь, плечо, связанное с переходами  $B$ , при максимальной мощности возбуждения ( $2.7 \text{ E/cm}^2$ ) выражается в четкий максимум, который по энергии совпадает с максимумом для переходов  $B$  в структуре с одной КЯ (рис. 3,  $a$ ). Из спектров ФЛ видно, что с увеличением мощности возбуждения интенсивность переходов  $B$  возрастает быстрее, чем для переходов  $C$ . Такое поведение наблюдалось нами ранее для переходов II рода в работе [8].

Таким образом, в результате ФЛ исследований показано, что сильно напряженная КЯ GaAs, выращенная на подложках InP, образует гетеропереход I рода с  $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$  и II рода с  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ . Также следует отметить, что полученные результаты достаточно хорошо согласуются с теоретическими расчетами.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 04-02-17641.

## Список литературы

- [1] Glaser E.R., Kennedy T.A., Bennett B.R., Shanabrook B.V. // Phys. Rev. B. 1999. V. 59. P. 2240.
- [2] Соловьев В.А., Торопов А.А., Мельцер Б.Я. и др. // ФТП. 2002. Т. 36. С. 869.
- [3] Pistol M.-E., Gerling M., Hessman D., Samuelson E. // Phys. Rev. B. 1992. V. 45. P. 3628.
- [4] Vurgaftman I., Meyer J.R., Ram-Mohan L.R. // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. P. 5815.
- [5] Krijn M.P.C.M. // Semicond. Sci. Technol. 1991. V. 6. P. 27.
- [6] Adachi S. Physical Properties of III-V semiconductor compounds. 1992. 336 p.
- [7] Мусеев К.Д., Мельцер Б.Я., Соловьев В.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 12. С. 50.
- [8] Винокуров Д.А., Зорина С.А., Капитонов В.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 24. С. 31.