

06;07

Фотолюминесцентные исследования сильнонапряженных квантовых ям GaAs, помещенных в слои $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ и $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$

© 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 $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ и $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$. Исследованы фотолюминесцентные свойства этих структур и установлено, что квантовые ямы GaAs со слоем $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ образует гетеропереход I рода, а с $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ — II рода.

PACS: 73.21.La, 78.55.-m

Целью данной работы является исследование излучательных переходов в системе соединений $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}/\text{GaAs}$ и $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}/\text{GaAs}$. В этом случае сильно напряженная квантовая яма (КЯ) GaAs является более узкозонной по сравнению с ограничивающим слоем $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ и более широкозонной по сравнению со слоем $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$. 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 $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ и $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$.

Структуры для фотолуминесцентных исследований изготавливались на установке МОС-гидридной эпитаксии 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 слои твердого раствора Al_{0.48}In_{0.52}As. Структуры типа 2 состояли из одной КЯ GaAs (толщина 28 Å) или трех аналогичных ям, разделенных 300 Å барьерами Ga_{0.47}In_{0.53}As, заключенными в слои Ga_{0.47}In_{0.53}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_{0.48}In_{0.52}As — 1.519 eV, Ga_{0.47}In_{0.53}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 слои Al_{0.48}In_{0.52}As (структура типа 1) (а) и Ga_{0.47}In_{0.53}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_{0.47}In_{0.53}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_{0.47}In_{0.53}As (переходы типа В) с энергией

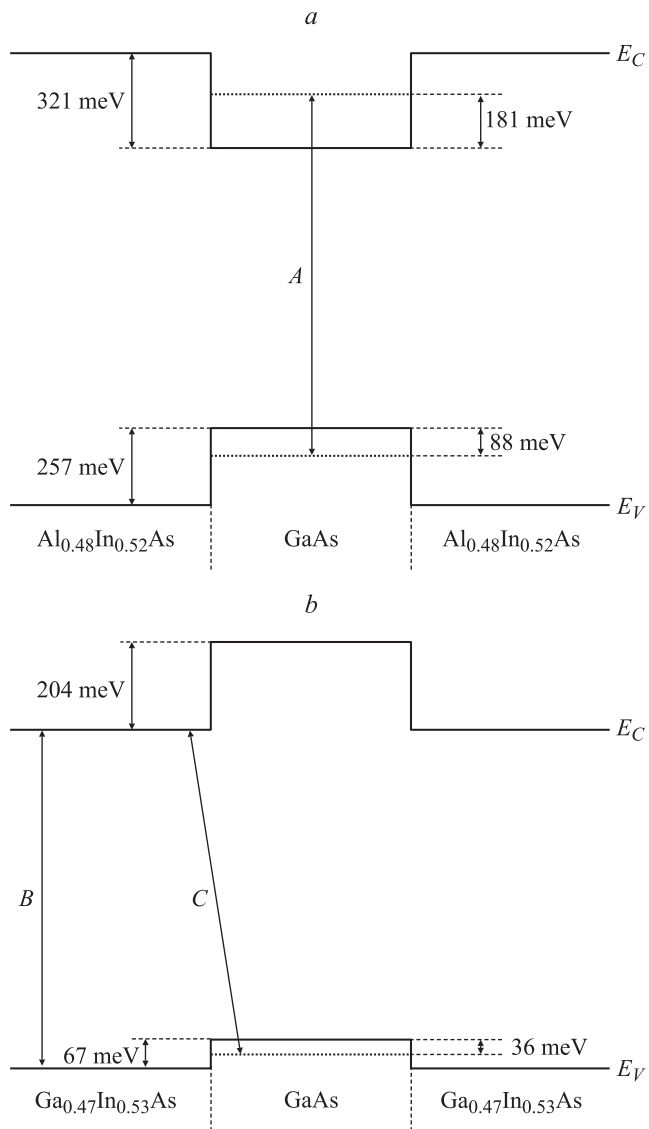


Рис. 1. Схематическая зонная диаграмма для КЯ GaAs, помещенной в слои $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ (структура типа 1) (a) и $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ (структура типа 2) (b).

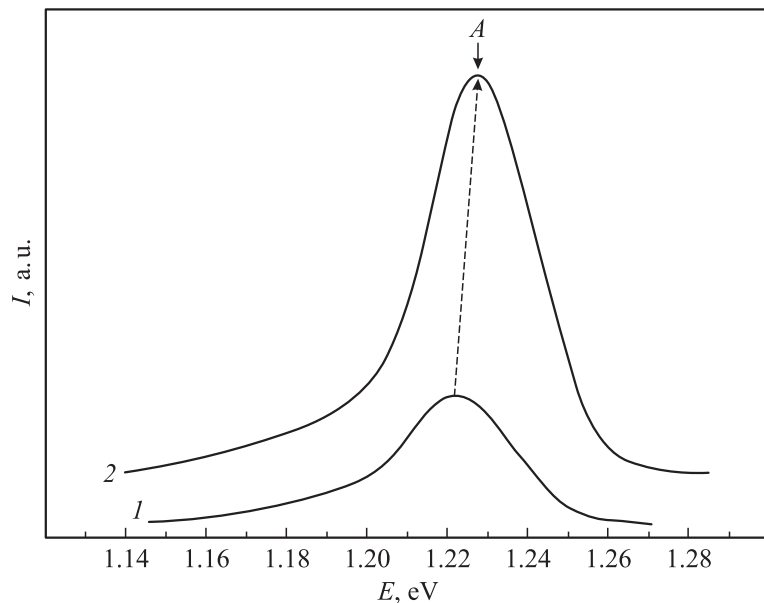


Рис. 2. Зависимость спектров фотолюминесценции для структуры типа 1 от величины мощности оптического возбуждения при температуре 77 К: 1 — 2.7 W/cm^2 , 2 — 15 W/cm^2 .

фотона 0.804 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 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

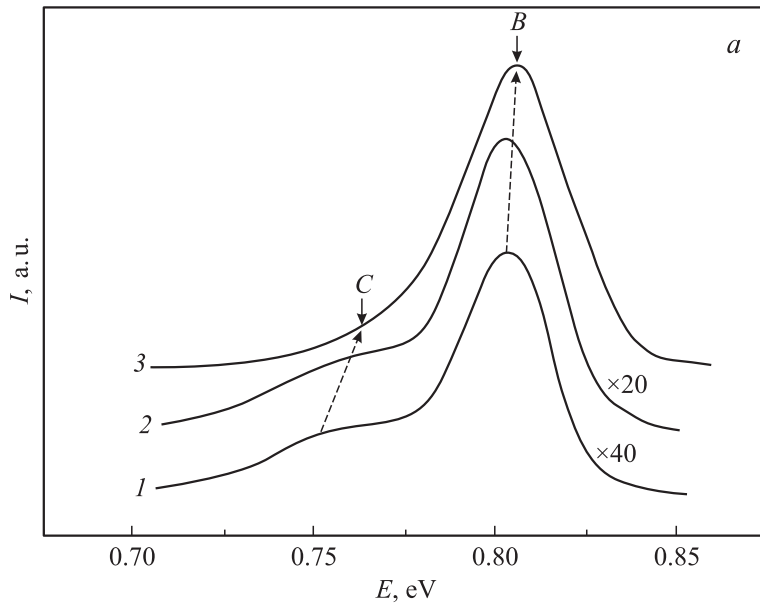


Рис. 3. Зависимость спектров фотолюминесценции для структур типа 2 с одной КЯ (*a*) и тремя КЯ (*b*) от величины мощности оптического возбуждения при температуре 77 К. *a*: 1 — 2.7 W/cm², 2 — 3.8 W/cm², 3 — 15 W/cm². *b*: 1 — 0.3 W/cm², 2 — 0.35 W/cm², 3 — 2.7 W/cm².

оптической накачки 2.7 W/cm² максимум спектра ФЛ имеет энергию 1.223 eV, а при мощности оптической накачки 15 W/cm² — 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 А).

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/cm²) 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

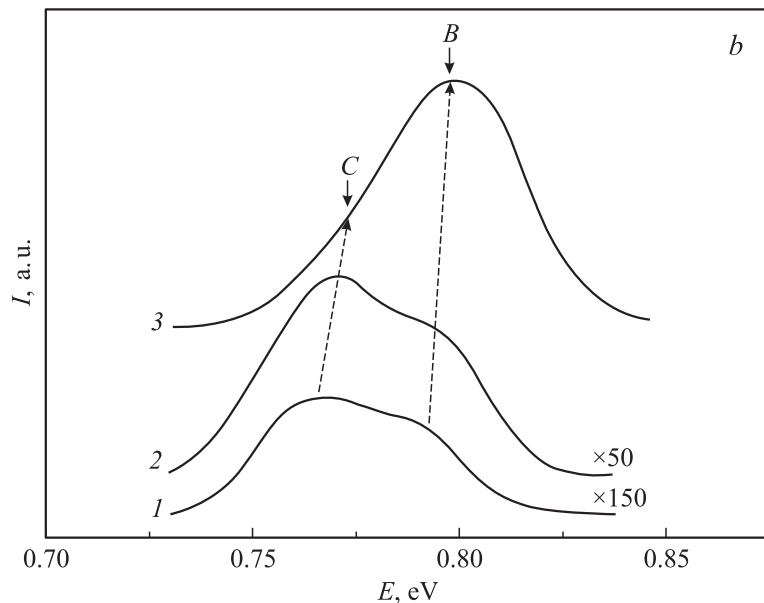


Рис. 3 (продолжение).

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 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 W/cm^2) в спектре ФЛ видны четкий максимум с энергией 0.77 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 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.