

06;07

## Фотолюминесцентные исследования гетеропереходов II типа GaAsP/GaInAsP

© Д.А. Винокуров, С.А. Зорина, В.А. Капитонов,  
А.В. Мурашова, Д.Н. Николаев, А.Л. Станкевич,  
М.К. Трукан, 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 15 июля 2004 г.

Исследованы фотолюминесцентные свойства гетероструктур на основе твердых растворов GaInP/GaAsP/GaInAsP, выращенных методом МOC-гидридной эпитаксии. Показано, что твердые растворы GaAs<sub>0.77</sub>P<sub>0.23</sub> и Ga<sub>0.74</sub>In<sub>0.26</sub>As<sub>0.53</sub>P<sub>0.47</sub> образуют между собой гетеропереход II типа. Установлено, что величина разрыва в зоне проводимости на гетерогранице твердых растворов GaAs<sub>0.77</sub>P<sub>0.23</sub> и Ga<sub>0.74</sub>In<sub>0.26</sub>As<sub>0.53</sub>P<sub>0.47</sub> составляет 90 meV, поэтому использование четвертого твердого раствора в качестве активной области лазерной гетероструктуры ( $\lambda = 780$  nm) предпочтительнее.

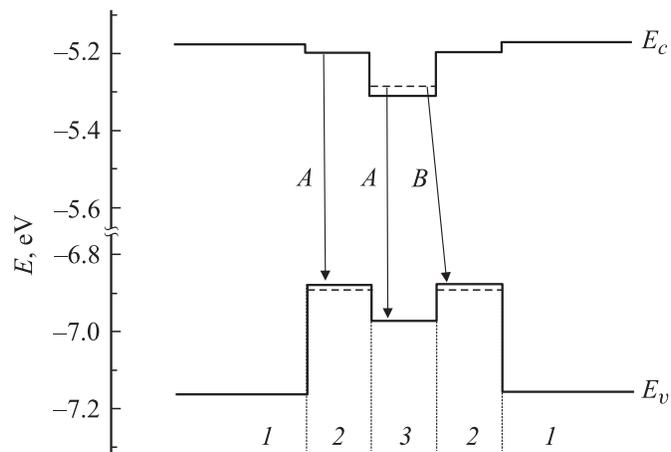
Для производства мощных лазерных диодов, излучающих в диапазоне длин волн 730–810 nm, чаще всего используют гетероструктуры, содержащие в качестве активной области твердые растворы GaAsP [1,2] или GaInAsP [3,4]. При этом ограничение мощностных характеристик таких диодов связано, в первую очередь, с термическим выбросом носителей заряда из квантовой ямы (КЯ) в волноводную область. Эффективность процесса термического выброса носителей заряда определяется глубиной залегания энергетических уровней в КЯ для электронов и дырок по отношению к волноводу. Особенно процесс термического выброса носителей заряда из КЯ важен для электронов, так как они обладают существенно меньшей эффективной массой по сравнению с дырками. Поэтому при возможности использования в качестве активной области различных твердых растворов, позволяющих получить одну и ту же длину волны излучения, необходимо учитывать глубину залегания энергетических уровней для носителей заряда в квантовых ямах относительно выбранного волновода.

В данной работе исследовались фотолуминесцентные свойства гетеропереходов II типа, образованных твердыми растворами  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$  и  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$  (данные твердые растворы могут использоваться в качестве активной области в лазерных гетероструктурах, излучающих на длине волны 780 nm), с целью оценки разрыва зон на границе между ними.

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 rot/min и температуре 700°C. На подложках  $n\text{-GaAs}$  (100) были выращены гетероструктуры с напряженными одиночными КЯ  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$  ( $\Delta a/a = -0.8\%$ ) и  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$  ( $\Delta a/a = 0.2\%$ ), а также с КЯ  $W$ -типа  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}/\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}/\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$ , помещенными между широкозонными слоями твердого раствора  $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ . Толщина одиночных КЯ  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$  и  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$  составляла  $\sim 100 \text{ \AA}$ , а КЯ  $W$ -типа —  $300 \text{ \AA}$  (по  $100 \text{ \AA}$  каждый из трех слоев).

Ранее, согласно расчетам по модели [5], нами было показано [6], что КЯ, образованная четверным твердым раствором  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$  в волноводе  $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ , обладает большей глубиной залегания электронных энергетических уровней по сравнению с аналогичной КЯ на базе тройного твердого раствора  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$ . Данные расчета были косвенно подтверждены фотолуминесцентными исследованиями [6], из которых было видно, что интенсивность спектра КЯ, состоящей из четверного твердого раствора  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$ , в 3 раза превышала интенсивность спектра КЯ, состоящей из тройного твердого раствора  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$ . Также эти расчеты показали, что данные твердые растворы должны образовывать между собой гетеропереход II типа. Для подтверждения сделанного предположения при исследованиях были использованы экспериментальные гетероструктуры с квантовыми ямами  $W$ -типа.

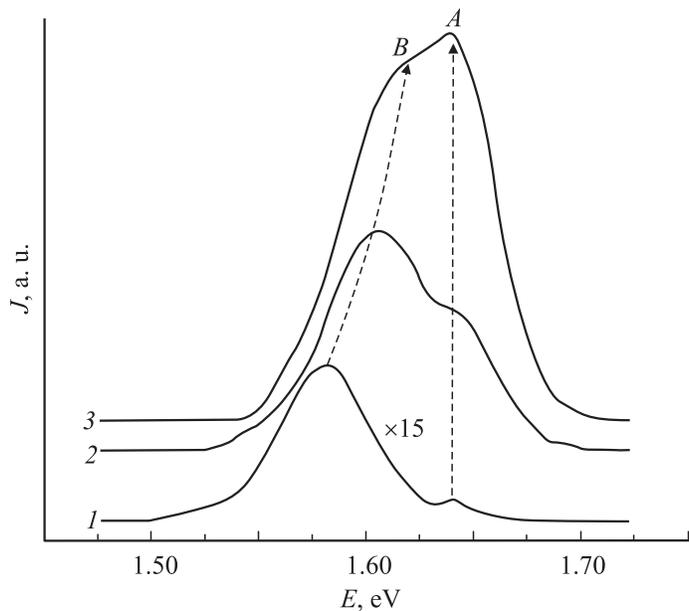
На рис. 1 приведено схематическое изображение энергетической зонной диаграммы экспериментальной гетероструктуры с КЯ  $W$ -типа, а также энергетические уровни размерного квантования и возможные оптические переходы, которые могут в ней наблюдаться, рассчитанные с учетом напряжений согласно [5]. При этом значения ширины запрещенных зон при 77 К вычислялись по интерполяционным зависимостям, приведенным в [7]. Исходя из расчетов, в такой КЯ могут



**Рис. 1.** Схематическое изображение энергетической зонной диаграммы двойной гетероструктуры, состоящей из широкозонного твердого раствора  $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$  и квантовой ямы  $W$ -типа: 1 —  $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ , 2 —  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$ , 3 —  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$ . Штриховые линии — уровни размерного квантования.  $A$  — межзонные излучательные переходы, соответствующие одиночной квантовой яме;  $B$  — непрямые (туннельные) излучательные переходы на гетерогранице II типа  $\text{GaAsP}/\text{GaInAsP}$ .

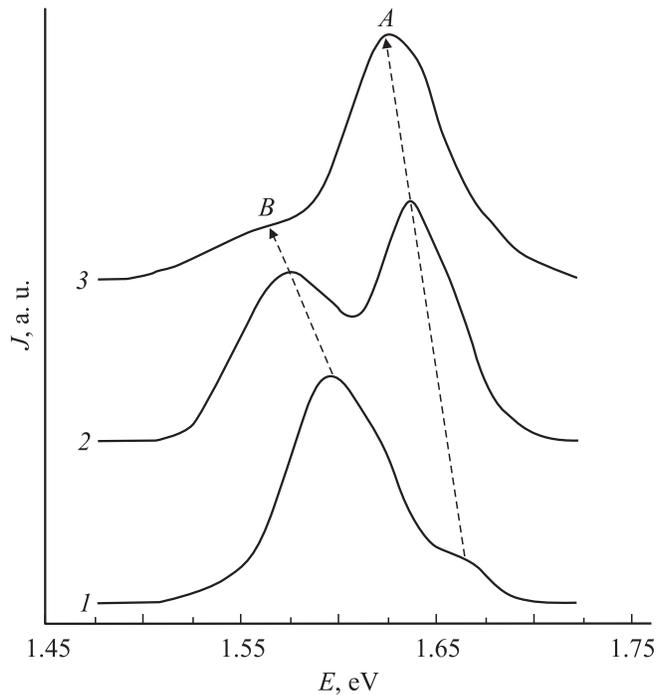
наблюдаться межзонные излучательные переходы, соответствующие одиночной КЯ (переходы типа  $A$ ), с энергией фотона  $1.67 \text{ eV}$  ( $77 \text{ K}$ ) и непрямые (туннельные) излучательные переходы на гетерогранице II типа  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}/\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$  (переходы типа  $B$ ), которые имеют энергию фотона  $1.6 \text{ eV}$  ( $77 \text{ K}$ ), значительно меньшую, чем твердые растворы, образующие данную гетерограницу. При этом электроны, локализованные в квантовой яме  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$ , рекомбинируют с легкими дырками локализованными в яме  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$ . Наличие легких дырок обусловлено тем, что твердый раствор  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$  является сжато-напряженным относительно подложки  $\text{GaAs}$ .

На рис. 2 изображено поведение спектра фотолюминесценции (ФЛ) для КЯ  $W$ -типа от величины мощности оптического возбуждения ( $1.5\text{--}15 \text{ W/cm}^2$ ) при температуре  $77 \text{ K}$ . В спектре ФЛ при малом уровне возбуждения ( $1.5 \text{ W/cm}^2$ ) наблюдаются два четких максимума. Один



**Рис. 2.** Спектры фотолюминесценции для структуры с квантовой ямой  $W$ -типа при различных плотностях мощности возбуждения и температуре 77 К: 1 —  $1.5 \text{ W/cm}^2$ , 2 —  $7 \text{ W/cm}^2$ , 3 —  $10 \text{ W/cm}^2$ .

из них, с энергией фотона  $1.655 \text{ eV}$ , обусловлен межзонными излучательными переходами типа  $A$  (рис. 1). Максимум полосы излучения, обусловленной переходами  $A$ , смещен в область меньших энергий по сравнению с максимумами спектров ФЛ от одиночных квантовых ям  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$  и  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$  (экспериментальные значения  $1.68 \text{ eV}$  при  $77 \text{ K}$ ), так как в КЯ  $W$ -типа отсутствуют уровни размерного квантования в валентной зоне слоя  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$  и зоне проводимости слоя  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$  в отличие от одиночных квантовых ям  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$  и  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$ . Второй максимум соответствует переходам с энергией фотонов  $1.59 \text{ eV}$ , который, по нашему мнению, соответствует непрямым излучательным переходам на гетерогранице II типа  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}/\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$  (переходы  $B$  на рис. 1). Высокая интенсивность этих переходов объясняется локализацией носителей



**Рис. 3.** Спектры фотолуминесценции для структуры с квантовой ямой *W*-типа при различных температурах и плотности мощности возбуждения  $3 \text{ W/cm}^2$ : 1 — 77 К, 2 — 120 К, 3 — 210 К.

заряда вблизи гетерограниц II типа за счет кулоновского взаимодействия электронов и дырок [8]. Максимум полосы излучения *B* смещен относительно максимума *A* на  $65 \text{ meV}$  в область меньших энергий. Данная величина соответствует энергетическому зазору между дном зоны проводимости  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$  и уровнем квантования для электронов в  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$ . Такая же величина ( $65 \text{ meV}$ ) соответствует и зазору между потолком валентной зоны  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$  и уровнем квантования для дырок в  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$ . Для определения разрыва зон в зоне проводимости на границе между  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$  и  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$  к разнице между переходами *A* и *B* ( $65 \text{ meV}$ ) необходимо прибавить значение энергии квантования для электронов

в  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$ , которое по нашим расчетам составляет около  $25\text{ meV}$ . Таким образом, величина разрыва зон для зоны проводимости составляет около  $90\text{ meV}$  с точностью до определения энергии квантования электронов. При увеличении уровня накачки максимум, обусловленный переходами *A*, почти не сдвигается, в то время как максимум, связанный с переходами *B*, смещается в сторону больших энергий при росте уровня возбуждения и приближается к максимуму *A*. Наблюдается „голубой“ сдвиг, который характерен для гетеропереходов II типа [9]. Также следует отметить, что с увеличением уровня возбуждения интенсивность полосы *B* возрастает медленней, чем интенсивность полосы *A*, и при некотором значении (около  $15\text{ W/cm}^2$ ) в спектре ФЛ преобладают переходы типа *A*.

Также нами было исследовано поведение спектров ФЛ для одиночных квантовых ям  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$  и  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$  и для КЯ *W*-типа от температуры. На рис. 3 приведено изменение спектра ФЛ для КЯ *W*-типа от температуры, которая менялась в диапазоне от  $77$  до  $300\text{ K}$ , при мощности возбуждения  $3\text{ W/cm}^2$ . С увеличением температуры происходит перераспределение интенсивности максимумов в спектре фотолюминесценции. Интенсивность максимума *B*, обусловленного переходами на гетерогранице II типа, уменьшается с увеличением температуры, а интенсивность максимума *A*, соответствующего излучательным переходам в одиночной КЯ, возрастает. Максимум *B* исчезает при температуре  $260\text{ K}$ , при этом изменение положения максимума *A* совпадает по характеру с изменением спектров ФЛ от одиночных квантовых ям  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$  и  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$ . Исчезновение полосы *B*, как мы предполагаем, обусловлено уменьшением вероятности соответствующих излучательных переходов вследствие уменьшения локализации носителей заряда у гетерограниц II типа  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}/\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$  за счет ослабления кулоновского взаимодействия между электронами и дырками при увеличении температуры.

Таким образом, с помощью фотолюминесцентных исследований экспериментально доказано, что твердые растворы  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$  и  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$  образуют между собой гетеропереход II типа. Величина разрыва зон в зоне проводимости между ними составляет около  $90\text{ meV}$ . На основании этого можно заключить, что четверной твердый раствор  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$  будет иметь более глубокую КЯ для электронов по сравнению с тройным твердым раствором  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$

относительно любого выбранного волновода. Поэтому при создании лазерных структур с длиной волны излучения 780 nm использование в качестве активной области твердого раствора  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$  является более предпочтительным с точки зрения подавления процесса термического выброса электронов из квантовой ямы в волноводную область.

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

## Список литературы

- [1] *Elbert G., Bugge F., Knauer A. et al.* // IEEE J. Select. Topics Quantum Electron. 1999. V. 5. P. 780.
- [2] *Agahi F., Lau K.M., Choi H.K. et al.* // IEEE Photon. Technol. Lett. 1995. V. 7. P. 140.
- [3] *Mawst L.J., Rusli S., Al-Muhanna A., Wade J.K.* // IEEE J. Select. Topics Quantum Electron. 1999. V. 5. P. 785.
- [4] *Diaz J., Yi H.J., Razeghi M., Burnham G.T.* // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. P. 3042.
- [5] *Krijn M.P.C.M.* // Semicond. Sci. Technol. 1991. V. 6. P. 27.
- [6] *Винокуров Д.А., Зорина С.А., Капитонов В.А. и др.* // ФТП. 2003. Т. 37 (12). С. 1473.
- [7] *Стрельченко С.С., Лебедев В.В.* Соединения  $\text{A}^3\text{B}^5$ : Справочник. М.: Металлургия, 1984.
- [8] *Joullie A., Skouri E.M., Garcia M. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. P. 2499.
- [9] *Мусеев К.Д., Мельцер Б.Я., Соловьев В.А. и др.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24 (12). С. 50.