

06;07;12

## Исследование напряженных квантовых ям $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ , полученных методом МОС-гидридной эпитаксии

© А.Д. Бондарев, Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов,  
О.В. Коваленков, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 25 февраля 1998 г.

Проведены исследования возможности получения методом МОС-гидридной эпитаксии пониженного давления сильно напряженных (напряжение сжатия) квантовых ям  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  на подложках фосфида индия (100). Исследованы фотолуминесцентные свойства полученных гетероструктур. Показано, что такие гетероструктуры перспективны для применения в лазерных диодах, излучающих в диапазоне длин волн  $1.5 \div 2 \mu\text{m}$ , важном для мониторинга окружающей среды.

В последнее время проводятся интенсивные исследования в области создания полупроводниковых гетероструктур с напряженными слоями для применения их в лазерных диодах. Интерес к таким структурам обусловлен существенным улучшением излучающих характеристик по сравнению со структурами на основе согласованных по параметру решетки материалов [1].

Использование сжато-напряженных в плоскости гетероперехода квантовых ям в активной области лазерной структуры приводит к существенной перестройке ее энергетической зонной структуры. Подзона тяжелых дырок поднимается выше подзоны легких и, кроме того, эффективная масса тяжелых дырок значительно уменьшается [2]. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению плотности состояний в валентной зоне, что позволяет достичь условий инверсии заселенности носителей при меньших уровнях возбуждения и, следовательно, достичь пороговой плотности тока лазера при меньших плотностях тока.

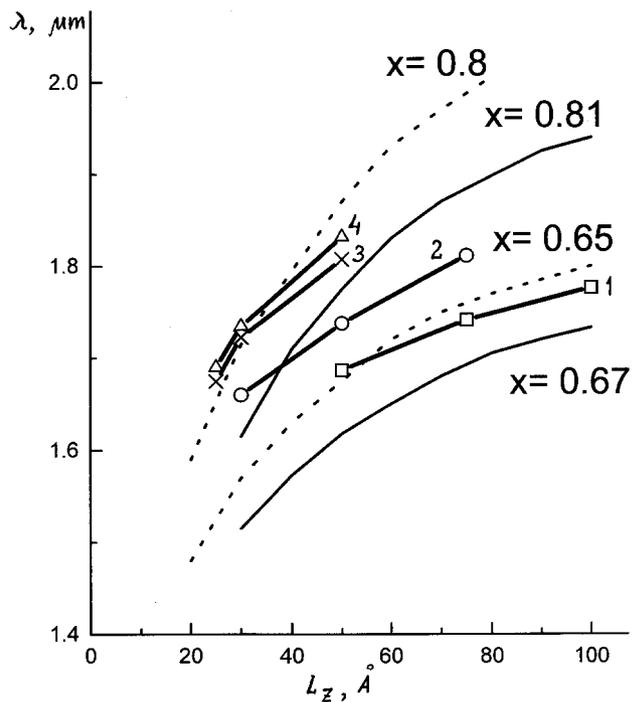
Напряженные материалы на основе квантовых ям в системе  $\text{In-Ga-As-P}$  широко используются в лазерах для волоконно-оптической связи на длины волн 1.3 и 1.55  $\mu\text{m}$ . Известно, что использование в активной

области лазерной структуры напряженных квантовых ям  $\text{InGaAs}$  может расширить диапазон излучаемых длин волн до величины порядка  $2\ \mu\text{m}$ . Этот диапазон интересен для молекулярной спектроскопии и мониторинга атмосферных загрязнений, поскольку в нем находятся спектры поглощения таких газов, как  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{HBr}$ ,  $\text{HCl}$ . Однако напряженные гетероструктуры в системе  $\text{In-Ga-As-P}$ , излучающие на нетрадиционных длинах волн  $1.6\text{--}2\ \mu\text{m}$ , в литературе до сих пор детально не исследовались.

Для расширения диапазона излучения  $\text{InGaAs}/\text{InGaAsP}/\text{InP}$  лазеров в сторону  $2\ \mu\text{m}$  в активной области необходимо использовать сильно напряженные (напряжение сжатия) слои тройного твердого раствора  $\text{InGaAs}$  с высоким содержанием индия.

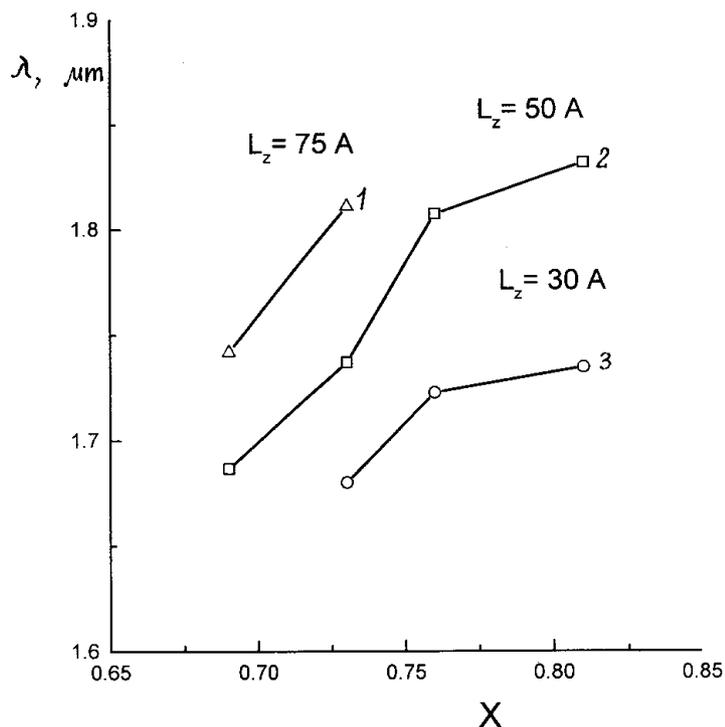
Настоящая работа посвящена получению и исследованию квантовых ям  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с содержанием индия в диапазоне  $0.6\text{--}0.85$ . Хотя для получения эффективных лазерных структур в активной области, как правило, необходимо иметь набор квантовых ям, структуры с одиночной ямой более удобны для исследования условий выращивания и качества гетероструктуры.

В нашей работе эпитаксиальные процессы проводились методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений и гидридов (МОС-гидридной эпитаксии) при пониженном давлении ( $100\ \text{mBar}$ ) в горизонтальном реакторе с высокочастотным нагревом графитового подложкодержателя. Температура роста по показаниям платиноплатинородиевой термодомы составляла  $600^\circ\text{C}$ . Как известно, низкая температура роста предпочтительна для выращивания напряженных индийсодержащих квантовых ям, чтобы свести к минимуму сегрегацию индия от гетерограницы [5]. Подложками служили пластины фосфида индия с ориентацией  $(100) \pm 30'$ . Перед загрузкой в реактор подложки обезжиривались кипячением в толуоле и ацетоне и обрабатывались в травителе бихромат калия-бромистый водород для удаления нарушенного слоя. В качестве газа-носителя использовался водород, очищенный диффузией через многоступенчатый палладиевый фильтр. Исходными реагентами служили триметилгаллия (ТМГ), триметилиндия (ТМИ), арсин ( $\text{AsH}_3$ ) и фосфин ( $\text{PH}_3$ ), разбавленные в водороде. Мольная концентрация ТМИ в потоке газа-носителя поддерживалась на уровне  $6.2 \cdot 10^{-5}$ , а ТМГ изменялась в диапазоне  $0.8 \div 3 \cdot 10^{-5}$  в зависимости от состава твердого раствора  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ .



**Рис. 1.** Зависимость длины волны ( $\lambda$ ) максимума спектра ФЛ (300 К) квантовых ям  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  от толщины ( $L_z$ ). 1 —  $x = 0.69$ ; 2 —  $x = 0.73$ ; 3 —  $x = 0.76$  и 4 —  $x = 0.81$ . Сплошные кривые — расчетные данные из [1] и пунктирные — экспериментальные данные из [5].

Выращенные образцы представляли собой нелегированные преднамеренно гетероструктуры и состояли последовательно из: буферного слоя  $\text{InP}$  толщиной  $0.2 \mu\text{m}$ ; нижнего барьерного слоя  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  толщиной  $0.2 \mu\text{m}$ , согласованного по параметру решетки с подложкой; квантовой ямы  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с содержанием индия в диапазоне  $0.6 \div 0.85$  и толщиной от 20 до  $100 \text{\AA}$  и верхнего слоя  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  толщиной  $0.2 \mu\text{m}$ . Напряжения в квантовой яме, обусловленные несоответствием параметров решетки, составляли величины от 0.5 до 2% в зависимости от содержания индия в яме. Соотношение элементов V и III группы в



**Рис. 2.** Зависимость длины волны ( $\lambda$ ) максимума спектра ФЛ (300 К) квантовых ям  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  от состава  $x$  твердого раствора. Треугольник —  $L_z = 75 \text{ \AA}$ ; квадрат —  $L_z = 50 \text{ \AA}$ ; кружок —  $L_z = 30 \text{ \AA}$ .

объеме реактора составляло 300 для выращивания слоя  $\text{InP}$  и  $60 \div 85$  для выращивания слоя твердого раствора.

В качестве барьерных слоев, несмотря на недостаточную для обеспечения эффективной фотолюминесценции высоту энергетических барьеров, использовался согласованный с подложкой тройной твердый раствор для того, чтобы избежать неопределенности состава на границах раздела барьер–квантовая яма, связанной с интенсивным замещением атомов мышьяка и фосфора в подрешетке V группы на каждой гетерогранице [3,4].

Полученные образцы исследовались методом фотолюминесценции (ФЛ) при комнатной температуре (300 К) и температуре жидкого азота (77 К). В качестве источника возбуждающего излучения служил аргоновый лазер с  $\lambda = 0.488 \mu\text{m}$ . На рис. 1 представлены зависимости максимума длины волны ФЛ квантовых ям  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  от их толщины. Пунктирные кривые с содержанием индия в яме  $x = 0.8$  и  $x = 0.65$  представляют собой теоретические расчеты для переходов  $n = 1$  электрон — тяжелая дырка из работы [1]. В своих расчетах авторы [1] в качестве барьерных слоев использовали четверной твердый раствор  $\text{InGaAsP}$  с  $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$ . Сплошные кривые — экспериментальные данные из работы [5]. Точки на графике представляют наши экспериментальные данные для содержания индия в квантовой яме  $x = 0.81, 0.76, 0.73$  и  $0.69$  соответственно. Меньший наклон наших кривых легко объясним, если учесть, что в случае применения в качестве барьерных слоев согласованного с подложкой твердого раствора  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  ( $\lambda = 1.6 \mu\text{m}$ ) мы имеем существенно более мелкую квантовую яму и для тонких ям первый уровень размерного квантования находится достаточно близко к энергетическому положению барьера. Значительное расхождение в данных работ [1] и [5] может объясняться неидеальностью гетерограниц, обусловленной сегрегацией индия. На рис. 2 представлены полученные нами экспериментальные зависимости длины волны ФЛ квантовых ям различной толщины, снятые при температуре 77 К, от состава твердого раствора в яме. Из анализа рис. 2 видно, что для достижения длины волны излучения порядка  $2 \mu\text{m}$  в активной области необходимо иметь сильно напряженные квантовые ямы с рассогласованием порядка 2% ( $x = 0.82$ ) и толщинами на уровне  $100 \text{ \AA}$ .

В настоящей работе исследовались сильно напряженные (напряжение сжатия) квантовые ямы  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ , выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии пониженного давления. Полученные результаты показали, что данная гетероструктура является перспективной для лазерных диодов, излучающих в диапазоне длин волн  $1.5 \div 2 \mu\text{m}$ .

Настоящая работа выполнена при частичной поддержке проекта 96–2005 по МНТП ”Физика твердотельных наноструктур” и гранта РФФИ № 98–02–18266.

## Список литературы

- [1] *Thijs P.J.A., Tiemeijer L.F., Binsma J.J.M.* et al. // IEEE J. of Quantum Electron. 1994. V. 30. N 2. P. 477–499.
- [2] *Chuang S.L.* // Phys. Rev. B. 1991. V. 43. N 12. P. 9649–9661.
- [3] *Mesrine M., Massies J., Vanelle E.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. N 24. P. 3552–3554.
- [4] *Taskinen M., Sopanen M., Lipsanen H.* et al. // Surf. Science. 1997. V. 376. N 1. P. 60–68.
- [5] *Dong J., Ubukata A., Matsumoto K.* // Jpn. J. Appl. Phys. 1997. V. 36. N 9A. P. 5468–5471.