

# Гетероструктуры в системе InGaAs/InP с напряженными квантовыми ямами и квантовыми точками ( $\lambda = 1.5\text{--}1.9\ \mu\text{м}$ )

© З.Н. Соколова<sup>¶</sup>, Д.А. Винокуров, И.С. Тарасов, Н.А. Гунько, Г.Г. Зегря

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

(Получена 1 марта 1999 г. Принята к печати 2 марта 1999 г.)

Экспериментально и теоретически исследуются сильно напряженные гетероструктуры  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  с содержанием индия в активной области  $x = 0.69\text{--}1.0$ . Методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений и гидридов получено два типа структур: 1) с одиночными сжато-напряженными квантовыми ямами, 2) с самоорганизующимися наноразмерными кластерами (квантовыми точками) InAs.

Температурная зависимость квантовой эффективности излучения образцов с квантовыми ямами в интервале  $77\text{--}265\ \text{К}$  характеризуется  $T_0 = 43\ \text{К}$ . Одной из причин малого  $T_0$  является делокализация электронов в активной области. Максимальная длина волны излучения, полученная в структурах с квантовыми точками, составляет  $1.9\ \mu\text{м}$  при  $77\ \text{К}$ .

## 1. Введение

Последнее время большое внимание уделяется созданию совершенных источников излучения для среднего инфракрасного (ИК) диапазона ( $1.5\text{--}5.0\ \mu\text{м}$ ), находящихся применение в волоконно-оптических линиях связи, лазерных радарах, газовых анализаторах. Диапазон  $1.5\text{--}2\ \mu\text{м}$  перекрывается твердыми растворами полупроводников типа  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ . Наиболее интенсивно исследуются соединения, содержащие сурьму [1,2]. В указанном диапазоне также излучают гетероструктуры  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  с напряженными квантовыми ямами (QW) [3,4] или квантовыми точками (QD) [5–7].

В настоящей работе экспериментально и теоретически исследуются сильно напряженные гетероструктуры  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  с составом в активной области  $x = 0.69\text{--}1.0$ .

## 2. Получение и фотолюминесцентные исследования гетероструктур

Методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений пониженного давления на подложках InP (100) выращивались гетероструктуры с одиночной сжато-напряженной QW с составом  $x = 0.69\text{--}0.81$  [4] и самоорганизующиеся наноразмерные кластеры InAs (QD) [5].

Выращенные образцы представляли собой преднамеренно не легированные гетероструктуры и состояли из буферного слоя InP толщиной  $0.2\ \mu\text{м}$ , нижнего барьерного слоя  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  толщиной  $0.2\ \mu\text{м}$  ( $0.3\ \mu\text{м}$  для QD), согласованного по параметру решетки с подложкой, затем квантовых точек из InAs или квантовой ямы  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с содержанием индия в диапазоне  $0.69\text{--}0.81$  и толщиной от  $25$  до  $100\ \text{Å}$ , а также верхнего слоя  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  толщиной  $0.2\ \mu\text{м}$  ( $0.04\ \mu\text{м}$  для QD) [4,5].

Напряжения сжатия в квантовой яме, обусловленные несоответствием параметров решетки, составляли величины от  $1\%$  до  $1.8\%$  в зависимости от содержания индия в яме. В случае структуры с QD скорость роста составляла  $8\ \text{Å}/\text{с}$  для барьеров и  $2\ \text{Å}/\text{с}$  для QD; температура роста  $500\text{--}600^\circ\text{C}$ . Количество осажденного InAs варьировалось от  $1.5$  до  $7$  монослоев (ML).

Исследования полученных образцов с помощью просвечивающей микроскопии показали, что можно идентифицировать два типа QD: со средним поперечным размером  $50\text{--}60$  и  $10\text{--}20\ \text{нм}$ .

Зонная диаграмма полученных гетероструктур представлена на рис. 1, откуда следует, что в случае QW исследуется гетеропереход второго рода; в области QW отсутствует потенциальная яма для электронов. В зависимости от состава твердого раствора ( $x = 0.69\text{--}0.81$ )  $\Delta E_c = (-3)\text{--}(-16)\ \text{мэВ}$ ;  $E_g = 664\text{--}607\ \text{мэВ}$ ; величина вызванного напряжением расщепления подзон легких и тяжелых дырок  $\delta = 64\text{--}115\ \text{мэВ}$ , а глубина QW для тяжелых дырок составляет  $105\text{--}175\ \text{мэВ}$ .

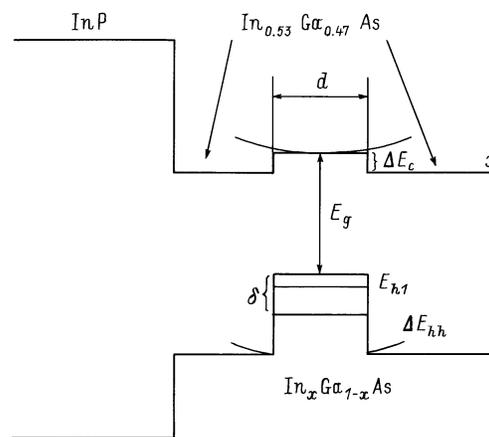


Рис. 1. Зонная диаграмма гетероструктуры  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ .

<sup>¶</sup> E-mail: zina.sokolova@pop.ioffe.rssi.ru

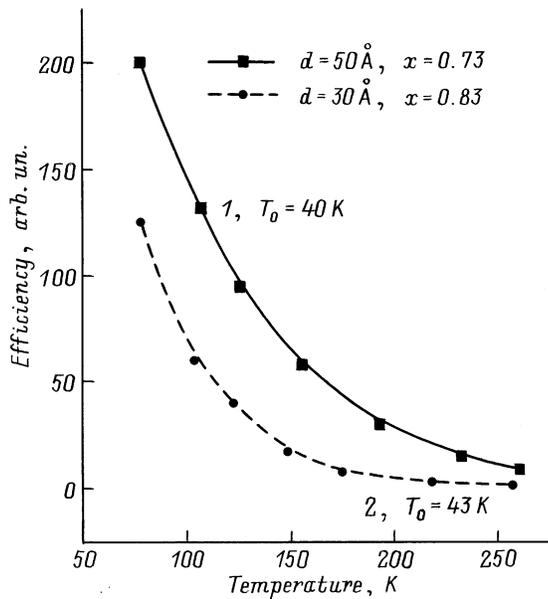


Рис. 2. Температурная зависимость внешней квантовой эффективности ( $\eta$ ) для  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -квантовых ям: 1 —  $d = 50 \text{ \AA}$ ,  $x = 0.73$ ,  $T_0 = 40 \text{ K}$ . 2 —  $d = 30 \text{ \AA}$ ,  $x = 0.81$ ,  $T_0 = 43 \text{ K}$ .

Фотолюминесценция (ФЛ) полученных образцов с QW исследовалась в интервале температур 77–265 K, а образцов с QD при 77 K. Источником возбуждающего излучения служил аргоновый лазер ( $\lambda = 0.514 \text{ мкм}$ ) с плотностью возбуждения  $1 \text{ кВт/см}^2$ . Были сняты зависимости длины волны ФЛ QW в максимуме интенсивности от толщины QW при 77 K [4]. Наибольшая длина волны излучения составляет  $1.66 \text{ мкм}$ . Вычислены значения энергий переходов электрона со дна зоны проводимости на первый уровень размерного квантования тяжелых дырок. Оказалось, что расчетные значения энергий переходов, полученные из грубой оценки, на 30–70 мэВ меньше измеренных значений.

Так же определялась температурная зависимость полуширины спектра излучения для структуры с QW толщиной  $50 \text{ \AA}$  и с  $x = 0.73$  в интервале температур 77–265 K. При 77 K полуширина составляет 20 мэВ и быстро возрастает с ростом температуры.

В интервале температур 77–265 K измерялась температурная зависимость квантовой эффективности излучения ( $\eta$ ) для двух структур с QW: 1 —  $d = 50 \text{ \AA}$ ;  $x = 0.73$ ; 2 —  $d = 30 \text{ \AA}$ ;  $x = 0.81$  (рис. 2). Из этой зависимости определялся параметр  $T_0$  по формуле

$$\eta = \eta_0 \exp(-T/T_0). \quad (1)$$

Для случая 1  $T_0 = 40 \text{ K}$  и  $T_0 = 43 \text{ K}$  для случая 2.

При формировании InAs QD, выращенных при  $T = 600^\circ\text{C}$ , в спектрах ФЛ, измеренных при 77 K, появляются два интенсивных пика с  $\lambda = 1.68$  и  $1.88 \text{ мкм}$ . Эффективность излучательной рекомбинации от QD приблизительно на порядок выше люминесценции от матрицы  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ . На рис. 3 представлена

зависимость энергии этих двух пиков ФЛ от количества осажденного InAs. Видно, что положение пиков практически не изменяется при варьировании номинальной толщины осажденного слоя InAs от 2.5 до 7 монослоев, что отличается от случае QW, в котором энергия пика ФЛ уменьшается при увеличении толщины слоя. Отсюда можно сделать вывод, что, согласно модели Странского-Крастанова, трехмерные кластеры развиваются до их критических размеров, определяемых "рав-

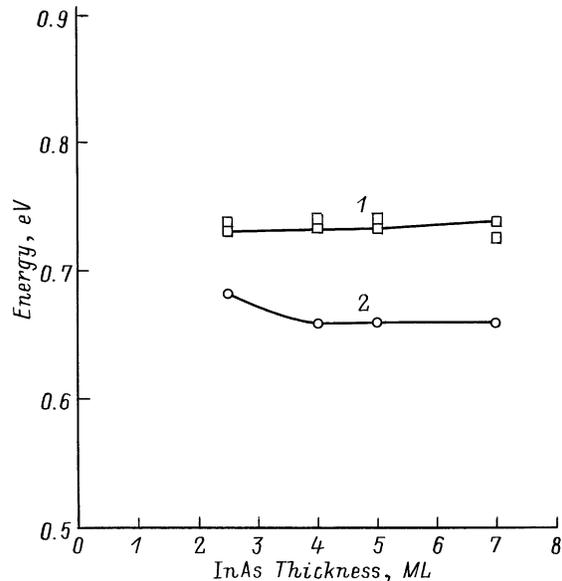


Рис. 3. Полученная при 77 K зависимость положения двух максимумов энергии в спектрах ФЛ квантовых точек от номинальной толщины осажденного при  $T = 600^\circ\text{C}$  InAs.

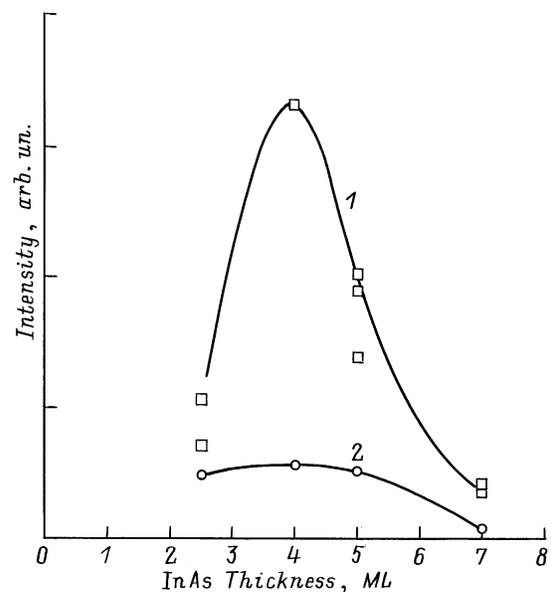


Рис. 4. Полученная при 77 K зависимость интенсивности двух пиков ФЛ квантовых точек от номинальной толщины осажденного при  $T = 600^\circ\text{C}$  InAs. 1 —  $\lambda = 1.68 \text{ мкм}$ , 2 —  $\lambda = 1.88 \text{ мкм}$ .

новесием” напряжений между материалами матрицы и QD. По нашему мнению, полученные данные указывают на существование двух размеров QD в исследуемой структуре.

На рис. 4 приведена зависимость интенсивности ФЛ при 77 К от количества осажденного InAs для QD, выращенных при 600°C. При 4–5 монослоях InAs наблюдается максимум интенсивности для пика с  $\lambda = 1.68$  мкм; у пика с  $\lambda = 1.88$  мкм интенсивность остается практически неизменной для 2.5–5 монослоев и значительно меньшей. Резкое ухудшение излучательных характеристик от QD при толщине более 5 монослоев можно объяснить ростом числа дислокаций.

Снимались спектральные зависимости интенсивности ФЛ для InAs QD, выращенных при  $T = 500, 550$  и  $600^\circ\text{C}$ . При  $T = 500^\circ\text{C}$  получена структура с QD, излучающими на длине волны  $\lambda = 1.91$  мкм при 77 К.

### 3. Кулоновская потенциальная яма для электронов

Чтобы избежать расхождения измеренных и оцененных в простейшей модели значений длин волн излучения QW [4], необходимо учесть, что электроны в активной области локализованы в QW, возникающей благодаря кулоновскому притяжению к дыркам. Форма кулоновской потенциальной ямы определяется из решения уравнения Пуассона [8].

Из решения этого уравнения были найдены значения ширины области, занимаемой электронами. Рассчитанная нами в диапазоне температур 77–250 К концентрация электронов, локализованных в активной области напряженной гетероструктуры, в 3–10 раз меньше концентрации локализованных здесь же дырок. В рассматриваемых структурах с QW также ослаблена скорость беспорогового процесса оже-рекомбинации [9] благодаря тому, что потенциальный барьер для электронов не вертикальный, а плавно изменяется с поперечной координатой [10].

### 4. Обсуждение результатов и выводы

Проведенные в работе экспериментальные и теоретические исследования показали, что излучение в диапазоне 1.5–1.9 мкм может быть получено при использовании гетероструктур в системе с напряженными квантовыми ямами и квантовыми точками  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  ( $x = 0.69–1.0$ ).

У гетероструктур с напряженными квантовыми ямами, несмотря на ослабление оже-процессов, с ростом температуры сильно увеличивается полуширина спектра излучения и падает внешняя квантовая эффективность. Это связано с делокализацией электронов в активной области, благодаря образованию широкой кулоновской потенциальной ямы. В результате интеграл перекрытия

электронов и дырок в области квантовой ямы уменьшается; также увеличивается доля непрямых переходов. Кроме того, в изучаемых гетероструктурах существует сильное поглощение света дырками с переходом их в спин-орбитально отщепленную зону [11].

Проведенные исследования показывают, что на основе рассматриваемых гетероструктур с малым энергетическим зазором ( $\Delta E_g$ ) на границах квантовой ямы и барьера не могут быть созданы эффективные источники излучения. Переход к InAs-квантовым точкам позволяет продвинуться в область больших длин волн.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 98-02-18266) и программы Министерства науки РФ ”Физика твердотельных наноструктур” (проект 2-005).

### Список литературы

- [1] J. Dias, H. Yu, A. Rybaltowski, B. Lane, G. Lukas, D. Wu, S. Kim, M. Erdtmann, E. Kaas, M. Razeghi. *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 40 (1997).
- [2] D.Z. Garbuzov, R.U. Martinelli, H. Lee, P.K. York, R.J. Menna, J.C. Connolly, S.Y. Narayan. *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 2006 (1996).
- [3] L. Zheng, C.H. Lin, K.E. Singer, M. Missous. *IEE Proc. Optoelectron.*, **144**, 360 (1997).
- [4] А.Д. Бондарев, Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, О.В. Коваленков, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов. *Письма ЖТФ*, **24**, 46 (1998).
- [5] O.V. Kovalenkov, I.S. Tarasov, D.A. Vinokurov, V.A. Kapitonov. *Abstracts 6th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", St. Petersburg, Russia, June 22–26 (1998) p. 268.*
- [6] В.М. Устинов, А.Е. Жуков, А.Ф. Цацульников, А.Ю. Егоров, А.Р. Ковш, М.В. Максимов, А.А. Суворова, Н.А. Берт, П.С. Копьев. *ФТП*, **31**, 1256 (1997).
- [7] В.М. Устинов, А.Р. Ковш, А.Е. Жуков, А.Ю. Егоров, Н.Н. Леденцов, А.В. Лунев, Ю.М. Шерняков, М.В. Максимов, А.Ф. Цацульников, Б.В. Воловик, П.С. Копьев, Ж.И. Алфёров. *Письма ЖТФ*, **24**, 49 (1998).
- [8] M. Silver, E.P. O'Reilly. *IEEE J. Quant. Electron.*, **30**, 547 (1994).
- [9] Г.Г. Зегря, А.С. Полковников. *ЖЭТФ*, **113**, 1491 (1998).
- [10] Г.Г. Зегря, В.А. Харченко. *ЖЭТФ*, **101**, 327 (1992).
- [11] N.A. Gun'ko, V.B. Khalfin, Z.N. Sokolova, G.G. Zegrya. *J. Appl. Phys.*, **84**, 547 (1998).

Редактор В.В. Чалдышев

### Heterostructures in InGaAs/InP system with strained quantum wells and quantum dots ( $\lambda = 1.5 \div 1.9 \mu\text{m}$ )

Z.N. Sokolova, D.A. Vinokurov, I.S. Tarasov,  
N.A. Gunko, G.G. Zegrya

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