

# Технология получения и возможности управления характеристиками структуры с квантовыми точками

© В.М. Устинов<sup>¶</sup>

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

(Получена 9 февраля 2004 г. Принята к печати 11 февраля 2004 г.)

Полупроводниковые гетероструктуры с квантовыми точками для приборных применений в настоящее время синтезируются с использованием эффекта спонтанной трансформации поверхности роста на начальной стадии гетероэпитаксии слоев, отличающихся параметрами решетки. При достижении определенной критической толщины плоская поверхность роста преобразуется в массив наноразмерных островков, как это было впервые продемонстрировано для системы InAs/GaAs. Для различных приборных применений необходимо иметь возможность управлять формой и размерами квантовых точек, что достигается путем изменения эффективной толщины слоя InAs, осаждением нескольких рядов квантовых точек, использованием разных материалов в качестве матрицы, использованием метаморфного буферного слоя, добавлением небольших количеств азота в квантовые точки и материал матрицы.

## 1. Введение

Полупроводниковые гетероструктуры с квантовыми точками (КТ), демонстрирующие свойства, удовлетворяющие требованиям приборных применений, в настоящее время синтезируются путем использования эффекта спонтанной трансформации поверхности роста на начальной стадии гетероэпитаксии материалов с различной постоянной решетки. Было обнаружено, что поверхность роста напряженного слоя на подложке с рассогласованием параметров решетки сначала является плоской и образуется так называемый „смачивающий слой“. Однако при достижении определенной критической толщины планарный фронт роста трансформируется в массив трехмерных наноостровков на поверхности смачивающего слоя, что было впервые продемонстрировано для системы InAs/GaAs [1]. Когда эти островки InAs зарастают GaAs, образуется плотный массив когерентных нано-внедрений в матрице арсенида галлия. Так как ширина запрещенной зоны InAs много меньше, чем GaAs, образуется массив квантовых точек InAs [2]. Массив квантовых точек InAs в матрице GaAs обычно демонстрирует широкую полосу фотолюминесценции в диапазоне 1.2 эВ при 77 К, т. е. со значительным сдвигом в длинноволновую область по сравнению с положением, ожидавшимся исходя из эффективной толщины осажденного слоя InAs (~ 2 монослоя). Тщательные исследования методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) показали, что поверхностная плотность массива островков InAs составляет  $(4-5) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Островок представляет собой пирамиду с квадратным основанием [3], при этом высота пирамиды составляет 30–50 Å, а размер основания 100–150 Å.

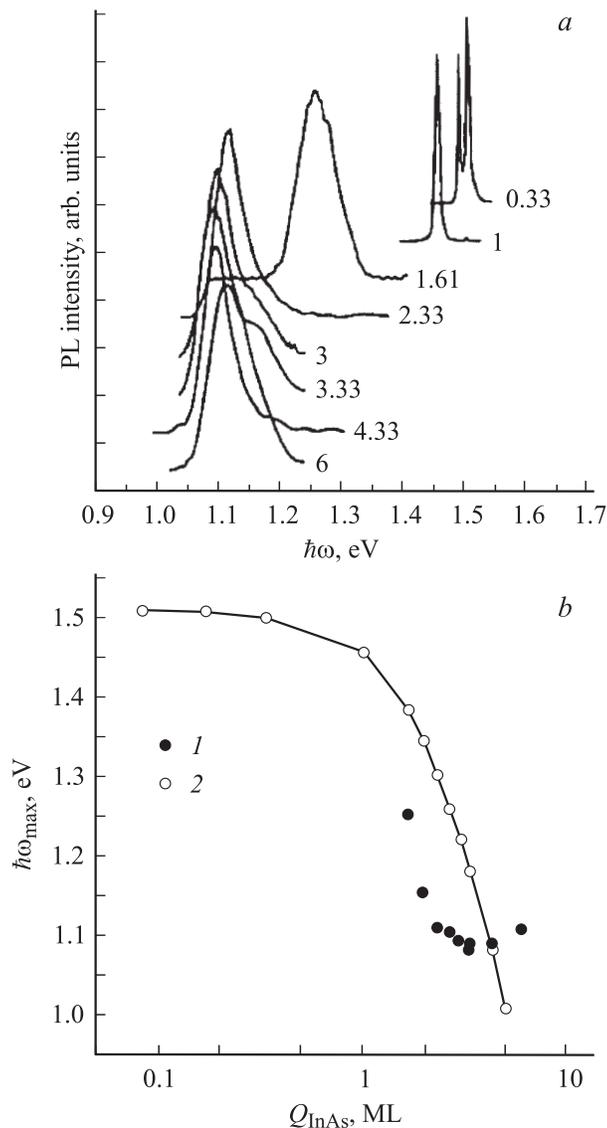
Однако для различных приборных применений важно иметь возможность управлять такими параметрами массива квантовых точек и индивидуальных островков,

как поверхностная концентрация, однородность массива, размер и форма островка. Эти параметры непосредственно влияют на электронный спектр квантовых точек. В настоящей работе показано, что эффективная толщина осажденного слоя InAs определяет спектральное положение линии люминесценции квантовых точек; последовательное осаждение нескольких рядов квантовых точек, разделенных промежуточными слоями GaAs, приводит к образованию вертикально связанных квантовых точек, отличающихся увеличенным отношением высота–основание. Существенное влияние на положение линии люминесценции квантовых точек InAs оказывает ширина запрещенной зоны матрицы. Использование „затравочного“ слоя квантовых точек InAlAs с повышенной поверхностной концентрацией островков с последующим осаждением квантовых точек InAs дает возможность существенного увеличения их концентрации. „Субмонослойные“ квантовые точки, образующиеся в результате последовательного осаждения слоев InAs и GaAs с эффективной толщиной менее одного монослоя, показывают улучшенную однородность, что проявляется в значительном сужении линии люминесценции. Увеличение объема островков и, как следствие, увеличение длины волны излучения может быть достигнуто путем зарастивания квантовых точек InAs твердыми растворами InGaAs или InGaAsN. Значительное увеличение длины волны излучения может быть достигнуто также путем выращивания квантовых точек InAs на метаморфном буферном слое InGaAs.

## 2. Влияние эффективной толщины осажденного слоя InAs на спектральное положение линии люминесценции квантовых точек InAs

В данной работе эффективная толщина осажденного слоя InAs изменялась в пределах (1/12)–6 монослоев (МС). Переход от двумерного к трехмерному характеру

<sup>¶</sup> E-mail: vmust@beam.ioffe.rssi.ru  
Fax: (812) 2473178



**Рис. 1.** *a* — спектры фотолюминесценции при 77 К гетероструктур GaAs/InAs/GaAs с различной эффективной толщиной осажденного слоя InAs. Цифры у кривых соответствуют эффективной толщине в монослоях. *b* — положение пика ФЛ при 77 К в зависимости от эффективной толщины осажденного InAs (1) и расчетные энергии оптических переходов для гетероструктур GaAs/InAs/GaAs в предположении двумерного распределения InAs (2).

роста InAs определялся по изменению картины дифракции электронов средней энергии во время процесса эпитаксии. Граница между двумерным и островковым ростом составила 1.7 МС [4], что находится в хорошем соответствии с другими опубликованными данными. На рис. 1, *a* показаны спектры фотолюминесценции (ФЛ) при 77 К структур с квантовыми точками и различной эффективной толщиной осажденного слоя InAs ( $Q_{\text{InAs}}$ ). Когда  $Q_{\text{InAs}} < 1$  МС, наблюдаются узкие линии, близкие по положению к объемному GaAs. В случае  $Q_{\text{InAs}} > 1$  МС полоса ФЛ становится широкой и

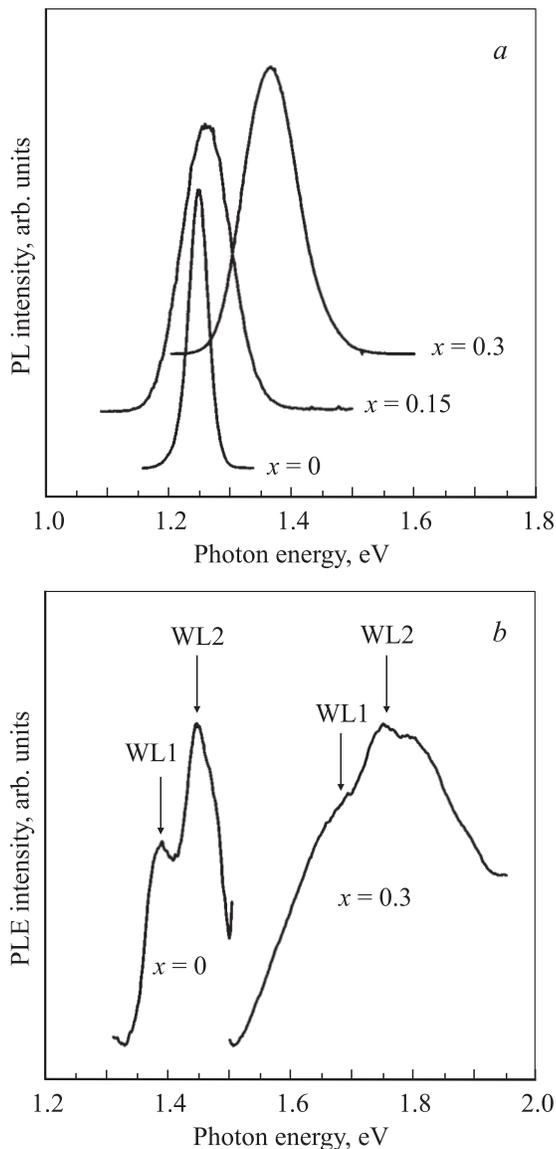
сдвигается в длинноволновую сторону. Типичная ширина пика на половине высоты (FWHM) составляет 50 мэВ. Энергетическое положение максимума линии ФЛ в зависимости от  $Q_{\text{InAs}}$  приведено на рис. 1, *b*. Экспериментальные данные сравниваются с энергиями оптических переходов, рассчитанными в предположении двумерного распределения того же самого количества InAs (квантовая яма GaAs/InAs/GaAs). Видно, что, когда образуются трехмерные островки, энергия пика ФЛ становится значительно меньше расчетной. Энергетическая разница составляет 100 мэВ на начальной стадии образования островков (1.7 МС) и возрастает до 200 мэВ при  $Q_{\text{InAs}} = 2.3$  МС. Дальнейшее увеличение толщины осажденного слоя InAs приводит к уменьшению энергии излучения до 1.1 эВ. Похожий характер зависимости наблюдался и при 300 К. При этом максимальная длина волны ФЛ составила 1.24 мкм. Насыщение зависимости длины волны излучения от  $Q_{\text{InAs}}$  объясняется наличием разброса островков по размерам и релаксацией напряжения с образованием дислокаций при превышении размера островка выше критического [4].

### 3. Влияние ширины запрещенной зоны матрицы на характеристики квантовых точек InAs

Движущей силой образования островков является различие в постоянных решетки подложки и эпитаксиального слоя. Так как постоянная решетки твердых растворов AlGaAs слабо отличается от GaAs, можно ожидать, что процесс формирования квантовых точек будет похожим на GaAs. Кроме системы InAs/GaAs (различие в постоянных решетки  $\Delta a \approx 7\%$ ), образование островков наблюдается также в системе  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}$  ( $\Delta a \approx 3.5\%$ ) [5]. Примерно такое расхождение постоянных решетки характерно и для системы InAs/ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ , поэтому можно ожидать формирования островков на начальной стадии осаждения InAs на поверхность гетероструктуры  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ . Далее описываются характеристики квантовых точек в матрицах AlGaAs и  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ .

#### 3.1. Квантовые точки InGaAs в матрице AlGaAs

Образование квантовых точек в матрице AlGaAs [6] похоже на случай, когда матрицей является GaAs. Было обнаружено, что критическая толщина островкового роста  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  составляет 1 нм и не зависит от величины  $x$  в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Спектры ФЛ структур, содержащих массивы квантовых точек InGaAs в матрице  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0, 0.15, 0.3$ ), показаны на рис. 2, *a*. Спектры возбуждения ФЛ в диапазоне энергий, превышающем область излучения КТ, приведены на рис. 2, *b*. Ранее было показано, что это излучение связано с рекомбинацией

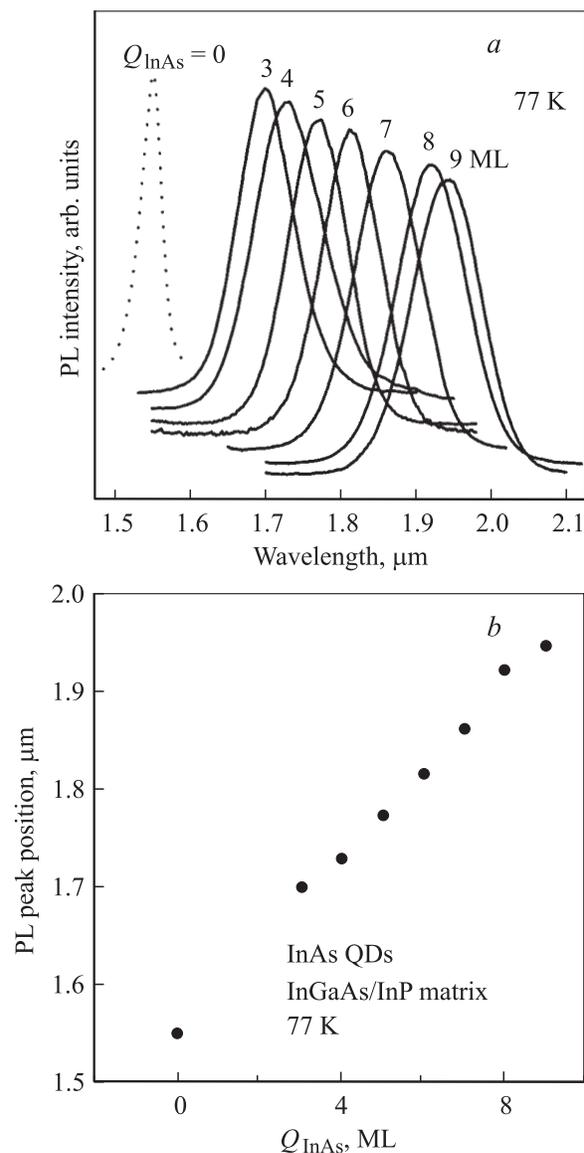


**Рис. 2.** Спектры ФЛ (а) и возбуждения ФЛ (б) для структур, содержащих массивы квантовых точек InGaAs/AlGaAs.  $x$  — мольная доля AlAs в материале матрицы.

через состояния смачивающего слоя [7]. Видно, что увеличение мольной доли AlAs в твердом растворе AlGaAs приводит к коротковолновому сдвигу линии ФЛ. Когда ширина запрещенной матрицы увеличивается на 370 мэВ ( $x = 0.3$ ), голубой сдвиг линии излучения квантовых точек составляет 120 мэВ, в то время как сдвиг линии излучения смачивающего слоя превышает 300 мэВ. Следовательно, энергетический зазор между состоянием квантовых точек и смачивающего слоя и матрицы возрастает. Данный эффект аналогичен хорошо известному поведению энергетических уровней в квантовых ямах при увеличении высоты барьера. Его следствием является меньшая относительная заселенность более высоко лежащих состояний при повышенных температурах.

### 3.2. Квантовые точки InAs в матрице $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$

Было обнаружено, что эпитаксиальный слой InAs трансформируется в массив островков по достижении критической толщины 3 МС [8], и это находится в хорошем соответствии с результатом для системы  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}$ . Однако островки в этой системе материалов отличаются гораздо большими размерами основания, меньшим отношением высота–основание и меньшей поверхностной концентрацией [9]. Спектры ФЛ структур с квантовыми точками, образованные осаждением  $Q_{\text{InAs}}$  монослоев InAs в матрице  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ , показаны на рис. 3, а, и положение пика ФЛ в зависимости от  $Q_{\text{InAs}}$  — на рис. 3, б. Видно, что, как только образуются островки, пик ФЛ сильно сдвигается



**Рис. 3.** Спектры ФЛ при 77 К (а) и положение пика ФЛ (б) в структурах с квантовыми точками InAs в матрице  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  в зависимости от эффективной толщины осажденного слоя InAs.

в длинноволновую сторону относительно пика ФЛ для матрицы  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ . Интенсивность ФЛ примерно постоянна до  $Q_{\text{InAs}} = 9 \text{ MC}$  и затем резко падает вследствие образования дислокаций.

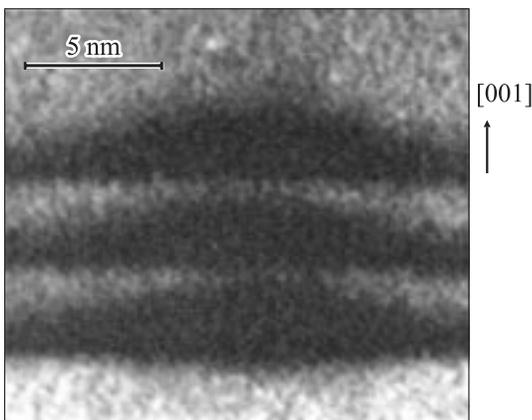
Таким образом, длина волны излучения квантовых точек InAs может управляемо изменяться в диапазоне от 0.88 мкм (матрица AlGaAs) до 1.7–1.95 мкм (матрица  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ ) путем изменения ширины запрещенной зоны матрицы.

#### 4. Вертикально связанные квантовые точки

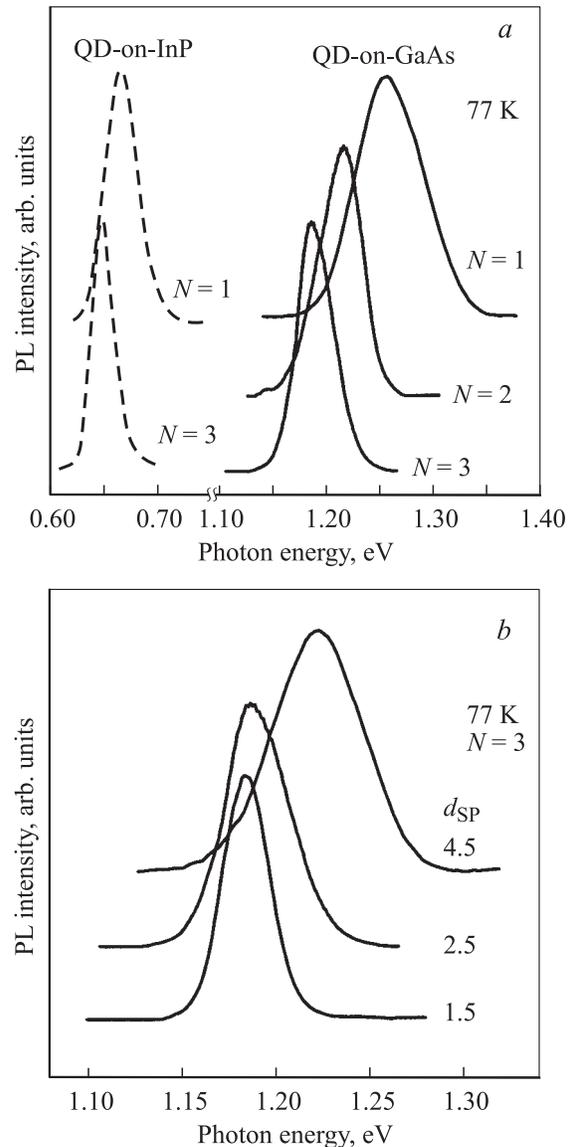
Было обнаружено, что последовательное осаждение слоев квантовых точек InAs и тонких прослоек GaAs приводит к формированию островков последующего ряда непосредственно над островками предыдущего ряда, если толщина прослойки GaAs менее  $100 \text{ \AA}$  [10]. Причина этого эффекта состоит в том, что формирование второго ряда квантовых точек InAs происходит под влиянием полей напряжений вследствие присутствия первого ряда. Это ведет к преимущественной миграции атомов In на места непосредственно над островком предыдущего ряда. Если толщина прослойки GaAs меньше, чем высота островка, (рис. 4) [11], то соседние в вертикальном направлении островки будут описываться единой системой энергетических уровней. Это означает, что изменение толщины прослойки приводит к сдвигу линии ФЛ (рис. 5). Эффект вертикального складирования лежит в основе возможности увеличения поверхностной концентрации островков при использовании составных квантовых точек InAlAs/InAs.

#### 5. Составные вертикально связанные квантовые точки InAlAs/InAs

Концентрация квантовых точек не зависит от толщины осажденного слоя InAs. Она может быть увеличена путем вертикального складирования нескольких рядов



**Рис. 4.** ПЭМ изображение поперечного сечения островков InAs, сформированных в результате попеременного осаждения 3 рядов квантовых точек InAs и слоев GaAs толщиной 1.5 нм.



**Рис. 5.** Спектры ФЛ при 77 К для структур, содержащих  $N$  рядов квантовых точек InGaAs, разделенных прослойками GaAs, в зависимости от количества рядов точек  $N$  (a) и толщины прослойки  $d_{\text{SP}}$  (b). Штриховыми линиями на рис. a показаны аналогичные спектры для структур, содержащих КТ InAs в матрице  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ . Величина  $d_{\text{SP}}$  в нм указана цифрами около кривых на рис. b.

квантовых точек. Мы показали, что эффективным путем увеличения поверхностной концентрации квантовых точек InAs в одной плоскости является использование КТ InAlAs (поверхностная концентрация которых ( $\sim 1.5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ) значительно больше, чем концентрация КТ InGaAs) в качестве центров зародышеобразования для последующего формирования квантовых точек InAs [12]. ПЭМ изображения вида сверху и поперечного сечения структур, содержащих 3 ряда складированных КТ InAs (#1), и один ряд КТ InAlAs с последующими 3 рядами КТ InAs (#2), показаны на рис. 6. Видно,

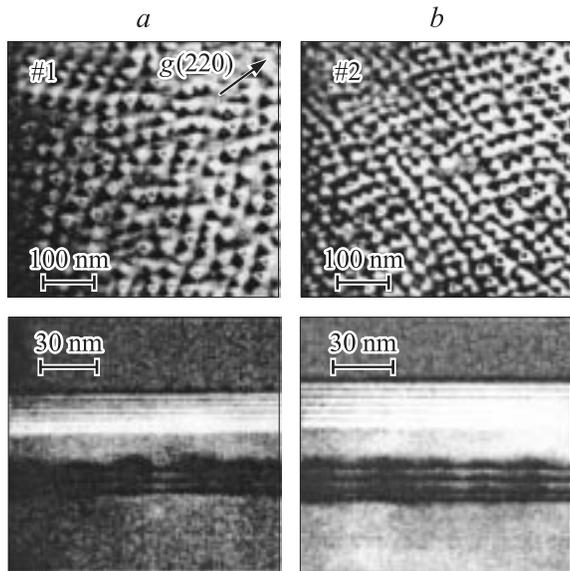


Рис. 6. ПЭМ изображения структур со складированными (а) и с составными (b) квантовыми точками.

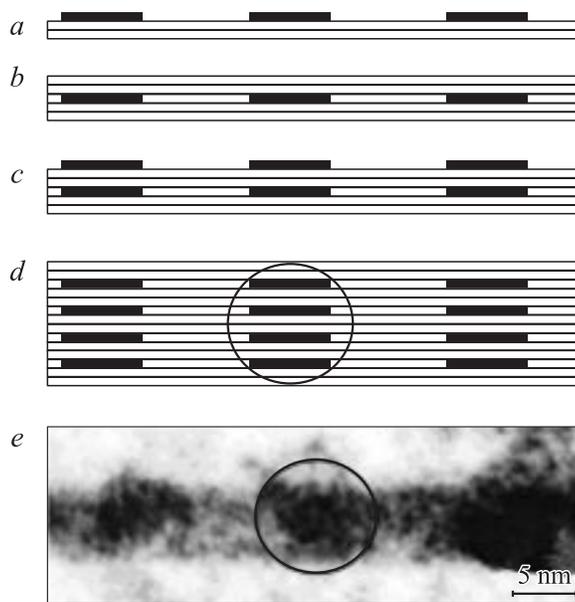


Рис. 7. Схема последовательного формирования субмонослойных квантовых точек: а — осаждение InAs (< 1 МС) на GaAs; б — осаждение нескольких монослоев GaAs; в — повторное осаждение InAs, вертикальное выравнивание островков монослойной высоты; д — СМС КТ InGaAs; е — ПЭМ изображение поперечного сечения СМС КТ.

что вертикальное выравнивание имеет место для обоих типов структур. Поверхностные концентрации островков составляют  $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  для структуры #1 и  $10^{11} \text{ см}^{-2}$  для структуры #2, при этом положение линии ФЛ для обеих структур отличается слабо и не превышает FWHM. Таким образом, массив составных вертикально

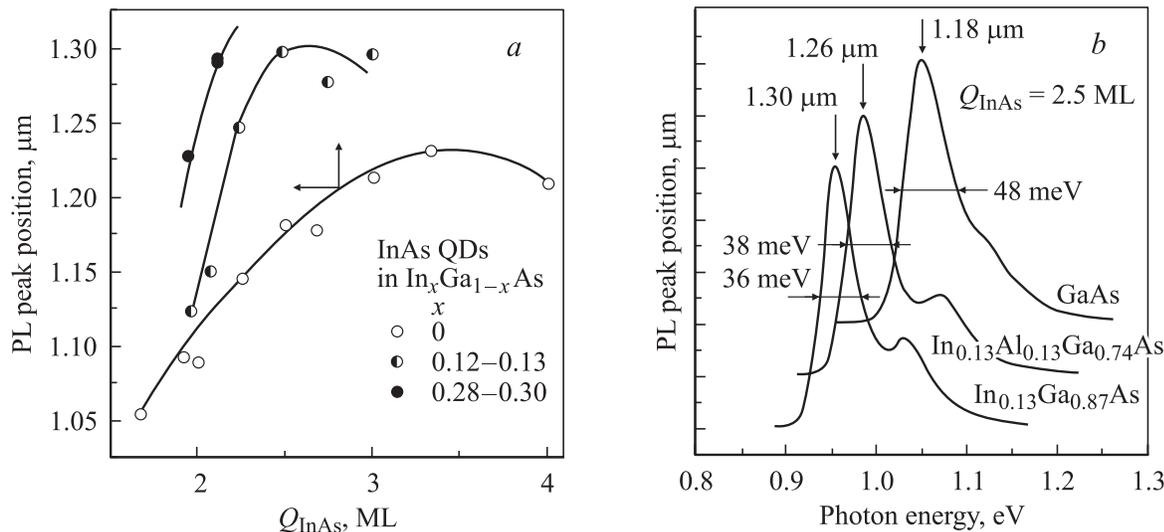
связанных квантовых точек InAlAs/InAs демонстрирует значительно большую поверхностную концентрацию, чем в случае КТ InAs. Плотность вертикально связанных КТ InAlAs/InAs задается плотностью островков InAlAs, а энергия оптического перехода определяется квантовыми точками InAs.

## 6. Субмонослойные квантовые точки InAs/GaAs

Субмонослойные квантовые точки (СМС КТ) InAs/GaAs формируются в результате поочередного осаждения InAs (0.5 МС) и GaAs (2.5 МС), повторяемого 10 раз [13]. Последовательность формирования СМС КТ схематически показана на рис. 7. Ранее было показано [2], что, когда эффективная толщина осажденного InAs менее 1 МС, при оптимальных технологических режимах молекулярно-пучковой эпитаксии тонкая пленка InAs трансформируется в массив островков высотой 1 МС, частично покрывающих поверхность роста. Островки следующего слоя InAs, отделенные от предыдущего слоем GaAs толщиной несколько МС, пространственно коррелируют с островками предыдущего ряда. В результате нескольких циклов субмонослойного осаждения образуются обогащенные In кластеры типа квантовых точек, состоящие из нескольких островков высотой 1 МС (рис. 7, е). Существенным является то, что результирующие СМС КТ состоят из островков одинаковой высоты (1 МС), и можно ожидать, что массив СМС КТ будет значительно более однородным, чем описанные ранее пирамидальные КТ вследствие присущего им разброса по размерам. Действительно, сравнение спектров ФЛ для этих двух типов квантовых точек показывает, что FWHM для СМС КТ составляет всего 19 нм, что более чем в 3 раза меньше, чем эта величина для пирамидальных квантовых точек. Таким образом, субмонослойное осаждение InAs/GaAs при оптимальных режимах выращивания позволяет значительно улучшить однородность массива квантовых точек.

## 7. Квантовые точки в квантовой яме

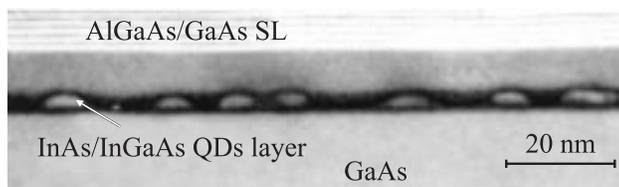
Увеличение эффективной толщины осажденного InAs приводит к увеличению длины волны ФЛ до 1.24 мкм (см. разд. 2), однако дальнейшее увеличение  $Q_{\text{InAs}}$  приводит к резкому падению интенсивности ФЛ вследствие релаксации напряжения с образованием дислокаций несоответствия. Эффективным способом расширения спектрального диапазона излучения КТ является наращивание слоя КТ InAs тонким слоем твердого раствора  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  [14]. Оказалось, что как увеличение  $Q_{\text{InAs}}$ , так и увеличение  $x$  в твердом растворе ведет к постепенному увеличению длины волны излучения, которая может достигать 1.3 мкм при определенных значениях  $Q_{\text{InAs}}$  и  $x$ . На рис. 8 приведены характерные спектры ФЛ квантовых точек InAs в матрицах разного состава. Интересно отметить, что красный сдвиг



**Рис. 8.** *a* — зависимости положения пика ФЛ при 300 К КТ InAs в зависимости от эффективной толщины осажденного InAs ( $Q_{\text{InAs}}$ ) при разных составах квантовой ямы ( $x$ ); *b* — спектры ФЛ при 300 К КТ InAs, выращенных GaAs или твердым раствором разного состава (указаны на рисунке).

полосы ФЛ наблюдается также и в случае наращивания КТ InAs четырехкомпонентным твердым раствором  $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{As}$ , ширина запрещенной зоны  $E_G$  которого примерно равна  $E_G$  GaAs. Исследование ПЭМ изображений поперечного сечения структур (рис. 9) показало, что причиной увеличения длины волны излучения наряду с уменьшением ширины запрещенной зоны матрицы является увеличение объема квантовых точек.

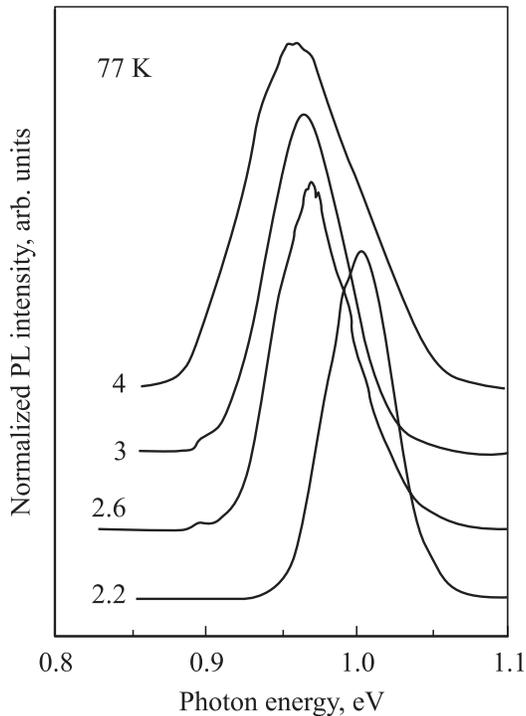
Необходимо отметить, что квантовые точки InAs/InGaAs характеризуются высоким содержанием InAs, что может в принципе приводить к локальной релаксации напряжения с образованием дислокаций. Была исследована интенсивность ФЛ в зависимости от общего содержания In в структуре при сохранении длины волны излучения 1.3 мкм. Оказалось, что структуры с минимальным содержанием индия демонстрируют максимальную интенсивность ФЛ, что указывает на минимальную концентрацию дефектов в этом случае [15]. Таким образом, наращивание квантовых точек InAs тонким слоем твердого раствора InGaAs позволяет расширить диапазон излучения КТ InAs при сохранении высокой интенсивности ФЛ.



**Рис. 9.** ПЭМ изображение поперечного сечения образца, содержащего слой квантовых точек InAs, помещенных в квантовую яму InGaAs. SL — сверхрешетка.

## 8. Квантовые точки на метаморфном буферном слое

Метаморфный буферный слой представляет собой эпитаксиальный слой InGaAs на подложке GaAs, толщина которого больше, чем критическая толщина псевдоморфного роста. Вследствие этого из-за рассогласования параметров решетки слоя и подложки происходит релаксация напряжения за счет образования дислокаций, и слой характеризуется своей постоянной решеткой. Оптимизация параметров роста позволяет при этом минимизировать число дислокаций, прорастающих в направлении роста, за счет дислокаций, локализованных вдоль гетерограницы слой-подложка [16]. При выращивании квантовых точек InAs на поверхности метаморфного буферного слоя наблюдаются различия в процессе формирования и некоторых свойствах КТ по сравнению с матрицей GaAs. Было обнаружено, что критическая толщина формирования трехмерных островков InAs на поверхности  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  изменилась по сравнению с поверхностью GaAs. На арсениде галлия критическая толщина составляет 1.7 МС, а в случае осаждения InAs на ненапряженный слой  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  критическая толщина достигла 2.1 МС, что можно объяснить уменьшением рассогласования в постоянных кристаллической решетки между материалами матрицы и осаждаемого слоя. Спектры ФЛ при 77 К структур с КТ InAs, отличающихся эффективной толщиной осажденного слоя InAs, представлены на рис. 10. Из рисунка видно, что с увеличением толщины слоя InAs, упругая деформация которого приводит к формированию массива КТ, наблюдается длинноволновый сдвиг максимума ФЛ и увеличение полуширины спектров (от 50 до 90 мэВ). Увеличение полуширины спектров

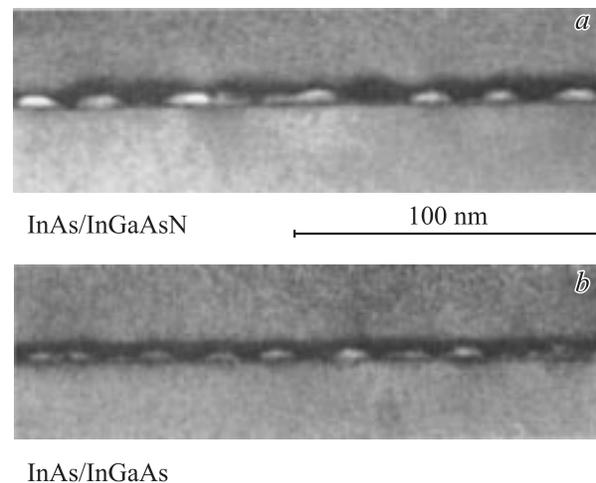


**Рис. 10.** Спектры ФЛ при 77 К структур с КТ, образующимися в результате упругой трансформации слоя InAs различной толщины (указаны в МС цифрами у кривых) на поверхности метаморфного слоя  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  и зарощёнными сверху слоем такого же состава.

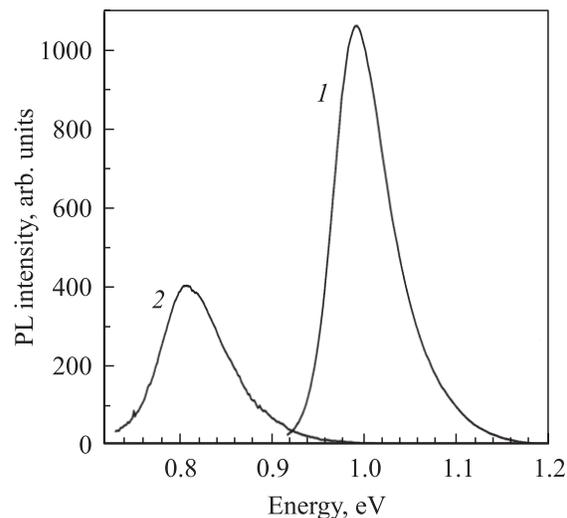
свидетельствует о том, что наиболее однородный по размерам массив КТ формируется при осаждении 2.2 МС InAs. По мере увеличения толщины слоя InAs длина волны излучения  $\lambda_{\text{max}}$  монотонно возрастает, однако при превышении значения 2.6 МС наблюдается насыщение зависимости  $\lambda_{\text{max}}(Q_{\text{InAs}})$  при дальнейшем увеличении количества осажденного InAs. Наибольшая длина волны максимума спектров ФЛ, достигнутая на структурах с КТ, составила 1372 нм при комнатной температуре (для структуры с КТ при толщине InAs 4 МС). Наибольшей интенсивностью ФЛ обладает гетероструктура с квантовыми точками, сформированными осаждением 2.6 МС InAs. Дальнейшее увеличение толщины InAs приводит к резкому падению интенсивности сигнала (до 1000 раз) при насыщении длинноволнового сдвига. Причиной этого явления является образование дислоцированных островков InAs при превышении толщины осажденного InAs более 2.6 МС. Для увеличения длины волны массив КТ из InAs 2.6 МС, демонстрирующий наиболее интенсивную фотолюминесценцию, был помещен в слой  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  толщиной 4 нм. В результате максимум линии ФЛ сдвинулся до 1.48 мкм без уменьшения интенсивности вследствие увеличения концентрации In в матрице и уменьшения ее ширины запрещенной зоны. Таким образом, использование буферного метаморфного слоя позволяет значительно увеличить длину волны излучения массива квантовых точек InAs.

## 9. Гетероструктуры с квантовыми точками с добавлением азота, излучающие в длинноволновой области

Известно, что добавление небольших концентраций азота (несколько %) к GaAs приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны твердого раствора [17]. Нами было показано, что зарощивание квантовых точек InAs четырехкомпонентным твердым раствором InGaAsN позволяет значительно увеличить длину волны излучения по сравнению с квантовыми точками InAs/InGaAs [18]. ПЭМ изображения поперечных сечений структур с квантовыми точками InAs/InGaAsN и InAs/InGaAs представлены на рис. 11. Видно, что в случае структуры InAs/InGaAsN островки значительно больше, чем в случае InAs/InGaAs. Спектры ФЛ струк-



**Рис. 11.** ПЭМ изображения поперечных сечений структур с квантовыми точками InAs/InGaAsN (a) и InAs/InGaAs (b).



**Рис. 12.** Спектры ФЛ гетероструктур с квантовой ямой GaAs/InGaAsN (1) и с квантовыми точками InAs/InGaAsN (2).

туры с квантовой ямой GaAs/InGaAsN, излучающей на длине волны 1.3 мкм, и структуры с квантовыми точками InAs/InGaAsN представлены на рис. 12. Видно, что максимум излучения структуры с квантовыми точками находится вблизи 1.55 мкм и его интенсивность немногим уступает интенсивности ФЛ структуры с квантовой ямой, на основе которой был изготовлен лазер с низкой пороговой плотностью тока. Таким образом, добавление азота в гетероструктуры с квантовыми точками на основе InAs позволяет значительно увеличить длину волны при сохранении достаточно высокой интенсивности излучения.

## 10. Заключение

Рассмотрены разные возможности управления характеристиками гетероструктур с квантовыми точками на основе InAs. Показано, что увеличение эффективной толщины осажденного слоя InAs приводит к увеличению длины волны излучения. Увеличение или уменьшение ширины запрещенной зоны матрицы дает возможность увеличения или уменьшения энергии кванта излучения из квантовых точек соответственно. Последовательное осаждение нескольких рядов квантовых точек приводит к формированию островков друг над другом, причем использование в качестве первого ряда квантовых точек с повышенной концентрацией увеличивает поверхностную плотность островков в последующих рядах. Поочередное осаждение слоев InAs и GaAs субмонослойной толщины приводит к образованию новых, „субмонослойных“, квантовых точек, отличающихся улучшенной однородностью массива. Заращивание квантовых точек InAs твердыми растворами InGaAs или InGaAsN приводит к увеличению размера островков и, как следствие, к длинноволновому сдвигу спектра излучения. Выращивание квантовых точек InAs на метаморфном буферном слое InGaAs также увеличивает длину волны излучения квантовых точек. Полученные результаты имеют большое значение при разработке новых оптоэлектронных приборов.

Работа выполнялась при поддержке РФФИ, программы „Физика твердотельных наноструктур“, программами совместных исследований между ФТИ и ITRI (Тайвань) и NSC (Германия).

## Список литературы

- [1] L. Goldstein, F. Glas, J.Y. Marzin et al. Appl. Phys. Lett., **47**, 1099 (1985).
- [2] D. Bimberg, M. Grundmann, N.N. Ledentsov. *Quantum Dot Heterostructures* (Chichester Wiley, 1999).
- [3] S.S. Ruvimov, P. Werner, K. Scheerschmidt et al. Phys. Rev. B, **51**, 14766 (1995).
- [4] А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, П.С. Копьев и др. ФТП, **30**, 1345 (1996).
- [5] D. Leonard, M. Krishnamurthy et al. Appl. Phys. Lett., **63**, 3203 (1993).
- [6] A.E. Zhukov, V.M. Ustinov et al. J. Electron Mater., **27**, 106 (1998).
- [7] А.Ф. Цацульников, Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов и др. ФТП, **30**, 1793 (1996).
- [8] В.М. Устинов, А.Е. Жуков, А.Ф. Цацульников и др. ФТП, **31**, 1256 (1997).
- [9] V.M. Ustinov, E.R. Weber, S. Ruvimov et al. Appl. Phys. Lett., **72**, 362 (1998).
- [10] Q. Xie, A. Madhukar, P. Chen et al. Phys. Rev. Lett., **75**, 2542 (1995).
- [11] V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov et al. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **417**, 141 (1996).
- [12] A.R. Kovsh, A.E. Zhukov, A.Yu. Egorov et al. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **571**, 109 (1998).
- [13] S.S. Mikhlin, A.E. Zhukov et al. Semicond. Sci. Technol., **15**, 1061 (2000).
- [14] V.M. Ustinov, N.A. Maleev et al. Appl. Phys. Lett., **74**, 2815 (1999).
- [15] V.M. Ustinov, A.E. Zhukov et al. Microelectronics J., **31**, 1 (2000).
- [16] А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, С.С. Михрин и др. ФТП, **37**, 1143 (2003).
- [17] V.M. Ustinov, A.E. Zhukov. Semicond. Sci. Technol., **15**, R41 (2000).
- [18] В.А. Одноблюдов, А.Ю. Егоров, Н.В. Крыжановская и др. Письма ЖТФ, **28**, 82 (2002).

Редактор Т.А. Полянская

## Synthesizing technology and possible controlling quantum dot structures characteristics

V.M. Ustinov

loffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Science,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Quantum dot semiconductor heterostructures for device applications are currently synthesized using the effect of spontaneous transformation of the growth surface at the initial stages of lattice mismatched strained layer epitaxy. After reaching a certain critical layer thickness the planar growth surface is transformed into an array of nanoscale islands as it was demonstrated for the first time for the InAs/GaAs system. For various device applications it is desirable to control the size and shape of individual quantum dots, their surface density and uniformity of the array. This is achieved by varying the effective thickness of the deposited InAs layer, depositing several layers of quantum dots, using various matrix materials, using a metamorphic buffer layer, and adding small amounts of nitrogen into the quantum dots and matrix.