

## Люминесцентные свойства квантовых точек InAs/GaAs, полученных методом субмонослойной миграционно-стимулированной эпитаксии

© Г.Э. Цырлин, В.Н. Петров, М.В. Максимов\*, Н.Н. Леденцов\*

Институт аналитического приборостроения Российской академии наук,  
198103 Санкт-Петербург, Россия

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

(Получена 12 ноября 1996 г. Принята к печати 14 ноября 1996 г.)

Приводятся результаты по исследованию люминесцентных свойств ансамбля квантовых точек InAs, полученных методом субмонослойной миграционно-стимулированной эпитаксии на сингулярных и вициальных поверхностях GaAs(100). Наибольшая величина ширины линии фотолюминесценции на полувывоте наблюдается в образцах, разориентированных на  $3^\circ$ , что свидетельствует о наибольшем разбросе квантовых точек по размерам в этом случае. Квазиравновесные квантовые точки формируются либо при повышенном времени выдержки образцов в потоке мышьяка, либо при большей величине осажденного индия.

### Введение

Эффекты самоорганизации на поверхности полупроводников, приводящие к спонтанному образованию ансамбля упорядоченных наноразмерных островков, активно исследуются в настоящее время как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения. Как было показано ранее теоретически, свойства полупроводниковых приборов значительно улучшаются в случае применения квантово-размерных структур, в которых движение носителей заряда ограничено по двум (квантовые проволоки) и трем (квантовые точки) направлениям [1]. В случае использования полупроводниковой системы InAs/GaAs возможно получение массива квантовых точек при достижении критической толщины напыленного арсенида индия на подложку арсенида галлия непосредственно при молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) [2–7]. Данный эффект объясняется релаксацией упругих напряжений, возникающих при росте в гетероэпитаксиальной системе с рассогласованными постоянными решеток по механизму Странски–Крастанова. Недавно был реализован полупроводниковый лазер, активная область которого включает в себя массив квантовых точек InGaAs/GaAs, полученных методом субмонослойной МПЭ (СМПЭ) [8].

Известно, что на структурные свойства ансамбля квантовых точек оказывает влияние как кинетика роста, так и вициальность поверхности [9–12]. Было показано, что использование метода субмонослойной миграционно-стимулированной эпитаксии (СМСЭ) позволяет получать квантовые точки с отклонением по латеральным размерам от средней величины на 10% [13]. В данной работе приводятся результаты по исследованию люминесцентных свойств ансамбля квантовых точек, полученных методом СМСЭ на сингулярных и вициальных поверхностях GaAs(100).

### Эксперимент

Ростовые эксперименты проводились на установке МПЭ ЭП 1203 на сингулярных и разориентированных на  $3^\circ$  и  $7^\circ$  в сторону [011] подложках полуизолирующего

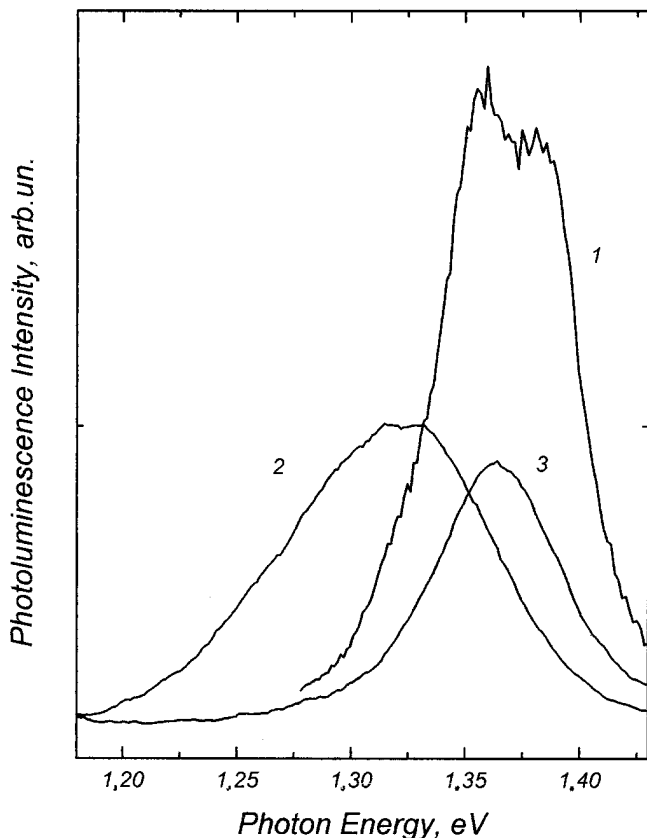
GaAs(100). Прошедшие химическую обработку по описанной в [14] методике три образца (сингулярный и два вициальных) наклеивались с помощью индия на один молибденовый держатель таким образом, чтобы неравномерность температурного поля нагревателя образца и градиенты потоков на поверхности были минимальными. После удаления окисного слоя в ростовой камере в потоке As выращивался буферный слой GaAs толщиной 300 нм при  $T_s = 630^\circ\text{C}$ . Эта температура в нашем случае соответствует моменту перехода реконструкции поверхности ( $2 \times 4$ ) в ( $3 \times 1$ ) и выбиралась из соображений улучшения электрофизических и оптических параметров слоев [15]. После буферного слоя выращивалась сверхрешетка, состоящая из пяти пар слоев GaAs/Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>As ( $20 \text{ \AA}/20 \text{ \AA}$ ), с целью исключения возможности диффузии и дрейфа неравновесных носителей в полуизолирующую подложку с высокой концентрацией глубоких примесей (Cr). Далее выращивался слой GaAs толщиной  $70 \text{ \AA}$  и температура образца в потоке мышьяка понижалась до  $T_s = 470^\circ\text{C}$  (момент перехода поверхностной рекомбинации ( $2 \times 4$ ) в ( $2 \times 2$ )). Активный слой выращивался в режиме субмонослойной миграционно-стимулированной эпитаксии, заключающейся в осаждении индия (при отсутствии потока мышьяка) в количестве, необходимом для 0.5 монослоя InAs, и выдержке в течение 2–30 с (время  $\tau$ ) в потоке мышьяка. Общая номинальная толщина InAs составляла 2 или 3 монослоя (четыре или шесть циклов осаждения). После завершения процедуры роста активного слоя при той же температуре выращивался слой GaAs толщиной  $70 \text{ \AA}$ . Далее  $T_s$  устанавливалась равной  $630^\circ\text{C}$  и выращивался слой GaAs толщиной  $70 \text{ \AA}$ . После этого выращивалась сверхрешетка, состоящая из 5 пар слоев GaAs/Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>As ( $20 \text{ \AA}/20 \text{ \AA}$ ), с целью исключения влияния поверхностной рекомбинации. При росте сверхрешеток после каждого слоя GaAs производилась выдержка поверхности образца в потоке As в течение 20 с. Давление мышьяка в ростовой камере во всех экспериментах поддерживалось постоянным на уровне  $4 \cdot 10^{-6}$  Па. Значения ранее откалиброванных потоков Ga, Al и In устанавливались таким образом,

чтобы скорости роста GaAs, AlGaAs и InAs соответствовали 0.53, 0.68 и 0.1 монослоя/с. Измерения скоростей роста производились с помощью системы наблюдения осцилляций зеркального рефлекса дифракции быстрых электронов на отражение [16] при энергии первичного пучка 12.5 кэВ, что соответствовало антибрэгговскому условию дифракции.

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) возбуждались аргоновым лазером. Плотность возбуждения составляла 1 Вт/см<sup>2</sup>. Температура наблюдения была 77 К.

## Результаты

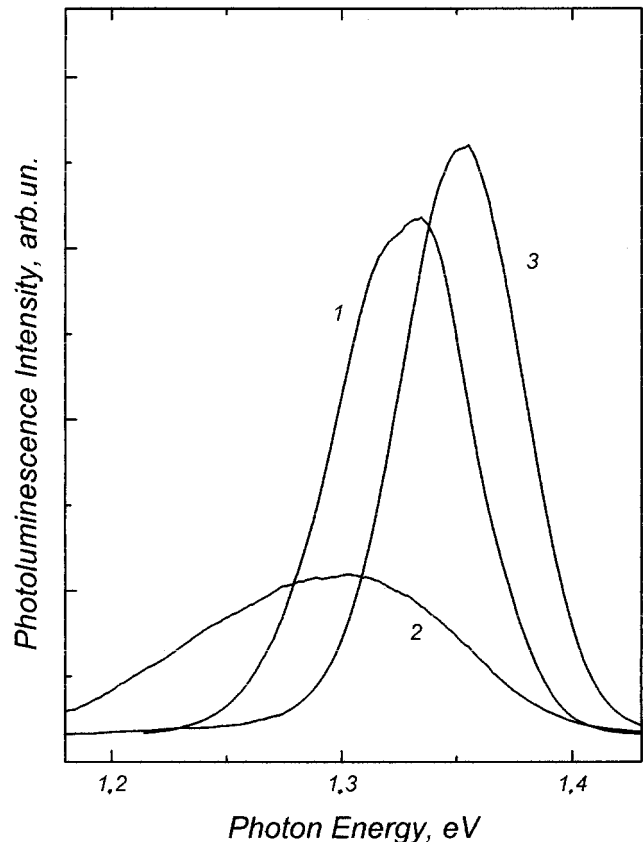
На рис. 1 приведены спектры ФЛ от структур с номинальной толщиной InAs 2 монослоя и временем выдержки в потоке мышьяка 2 с. В случае сингулярного образца спектр включает в себя два максимума, что мы связываем с неравновесными размерами квантовых образований на начальной стадии образования упругонапряженных островков. Подобного эффекта на наблюдается в случае разориентированных образцов, где на процесс образования квантовых точек дополнительное влияние оказывают моноатомные ступени на поверхности подложки. При увеличении угла разориентации происходит



**Рис. 1.** Спектры фотолюминесценции для квантовых точек InAs, полученных методом СМСЭ. Номинальная толщина 2 монослоя, выдержка между циклами 2 с. 1 — сингулярный образец; 2 — образец, разориентированный на 3°; 3 — образец, разориентированный на 7°.

смещение линии ФЛ в коротковолновую область (1.32 и 1.36 эВ соответственно) с практически неизменной интенсивностью излучения. Уменьшается и полная ширина на полувысоте линии ФЛ от 100 до 60 мэВ для 3° и 7° соответственно. Два последних факта свидетельствуют как об уменьшении размеров, так и меньшем разбросе по размерам для сильно разориентированного образца.

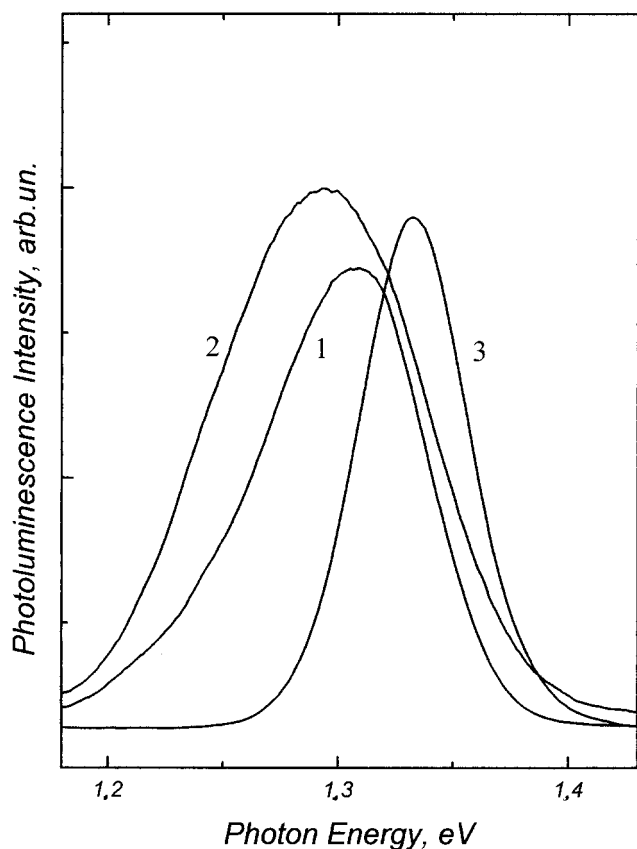
Спектры ФЛ для образцов с увеличенным временем выдержки поверхности под потолком мышьяка при сохранении такого же количества осажденного индия приведены на рис. 2. По сравнению с данными, приведенными на рис. 1, для всех образцов значительно (в 3–10 раз) возрастает интенсивность фотолюминесценции, что свидетельствует о резком возрастании плотности квантовых точек в этом случае. При этом для всех положений максимумов линий ФЛ наблюдается смещение в область меньших энергий (в диапазоне от 1.30 до 1.35 эВ), что соответствует случаю увеличения характерных размеров квантовых точек. Характер изменения полной ширины на полувысоте в зависимости от вицинальности подложки остается таким же, как и в предыдущем случае: наименьшая величина (60 мэВ) соответствует разориентации 7°, в то время как наибольшее значение (128 мэВ) наблюдается при разориентации 3°.



**Рис. 2.** Спектры фотолюминесценции для квантовых точек InAs, полученных методом СМСЭ. Номинальная толщина 2 монослоя, выдержка между циклами 30 с. 1 — сингулярный образец; 2 — образец, разориентированный на 3°; 3 — образец, разориентированный на 7°.

№ образца	Толщина слоя InAs, МС	$\tau$ , с	Разориентация, град.	Позиция пика ФЛ от квантовых точек, эВ	Ширина линии ФЛ на полувысоте, мэВ	Интенсивность ФЛ, отн. ед.
1	2	2	0	—	76	0.29
2	2	2	3	1.323	101	0.10
3	2	2	7	1.362	63	0.09
4	2	30	0	1.329	69	0.94
5	2	30	3	1.298	128	0.29
6	2	30	7	1.349	62	1
7	3	2	0	1.305	83	0.48
8	3	2	3	1.291	108	0.56
9	3	2	7	1.344	54	0.51

Влияние разориентации подложки на интенсивность, форму и положение максимума линии ФЛ в случае квантовых точек, сформированных при осаждении 3 монослоев InAs, демонстрируется на рис. 3. Характерной особенностью данных спектров является практически равная и достаточно высокая интенсивность ФЛ как для сингулярных, так и для вициальных образцов. Наибольшая ширина на полувысоте линии ФЛ наблюдается, как и ранее, в случае образцов с поверхностью, разориентированной на  $3^\circ$ . Позиции максимумов линий



**Рис. 3.** Спектры фотолюминесценции для квантовых точек InAs, полученных методом СМСЭ. Номинальная толщина 3 монослоя, выдержка между циклами 2 с. 1 — сингулярный образец; 2 — образец, разориентированный на  $3^\circ$ ; 3 — образец, разориентированный на  $7^\circ$ .

ФЛ практически совпадают со значениями для образцов со средней толщиной 2 монослоя InAs и  $\tau = 30$  с. Это, по-видимому, свидетельствует о квазиравновесных размерах квантовых точек, получаемых при СМСЭ росте в данном случае. Это также подтверждается нашими исследованиями подобных незарощенных структур [12,17] методом сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), где в случаях осаждения 2 ( $\tau = 30$  с) и 3 ( $\tau = 2$  с) монослоев InAs/GaAs при СМСЭ росте латеральные размеры квантовых точек практически совпадали (10–20 нм в зависимости от разориентации).

Оптические характеристики исследования квантовых точек при СМСЭ росте приведены в таблице. Основные выводы, которые могут быть сделаны из анализа полученных результатов, следующие. Во-первых, наибольшая величина ширины линии ФЛ на полувысоте наблюдается в образцах, разориентированных на  $3^\circ$ , что свидетельствует о наибольшем разбросе квантовых точек по размерам в этом случае. Во-вторых, квазиравновесные квантовые точки формируются либо при повышенном времени выдержки образцов в потоке мышьяка, либо при большей величине осажденного индия. В-третьих, наблюдается коротковолновый сдвиг линии фотолюминесценции при сравнении с образцами, полученными методами МПЭ и СМПЭ, что указывает на меньшие размеры квантовых точек для метода СМСЭ [10]. При этом величина ширины линии ФЛ на полувысоте для СМСЭ обычно меньше, чем при СМПЭ, или, иными словами, меньше отклонение от средних размеров квантовых точек для исследуемой технологии. Это также подтверждается сравнением профильного анализа СТМ изображений для данных методов [11–13]. Таким образом, использование технологии субмонослойной миграционно-стимулированной эпитаксии является перспективным для создания оптоэлектронных приборов, активная область которых состоит из ансамбля квантовых точек.

В заключение авторы благодарят Д. Бимберга, Г.М. Гурьянова и В.Г. Дубровского за полезные обсуждения результатов работы, Н.К. Полякова, Д.Н. Демидова и Н.П. Корнееву — за помощь в проведении ростовых экспериментов.

Данная работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 95-02-05084-а), фонда INTAS (грант № 94-1028) и научной программы "Физика твердотельных наноструктур".

## Список литературы

- [1] Y. Arakawa, H. Sakaki. Appl. Phys. Lett., **40**, 635 (1982).
- [2] L. Goldstein, F. Glas, J.Y. Marzin, M.N. Charasse, G.Le Roux. Appl. Phys. Lett., **47**, 1099 (1985).
- [3] M. Grundmann, J. Christen, N.N. Ledentsov, J. Böhrer, D. Bimberg, S.S. Ruvimov, P. Werner, U. Richter, U. Gösele, J. Heydenreich, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov. Phys. Rev. Lett., **74**, 4043 (1995).
- [4] R. Leon, S. Fafard, D. Leonard, J.I. Merz, P.M. Petroff. Phys. Rev. B, **50**, 11 687 (1994).
- [5] D.S.I. Mui, D. Leonard, L.A. Colden, P.M. Petroff. Appl. Phys. Lett., **66**, 1620 (1995).
- [6] N.N. Ledentsov, M. Grundmann, N. Kirstaedter, J. Christen, R. Heitz, J. Böhrer, F. Heinrichsdoff, D. Bimberg, S.S. Ruvimov, P. Werner, U. Richter, U. Gösele, J. Heydenreich, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, M.V. Maximov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov. Proc. 22th Int. Conf. on Physics of Semicond.. (Vancouver, Canada, 1994), ed. by D.J. Lookwood, (World Scientific, Singapore, 1995) v. 3, p. 1855.
- [7] N.N. Ledentsov, M. Grundmann, N. Kirstaedter, O. Schmidt, R. Heitz, J. Böhrer, D. Bimberg, V.M. Ustinov, V.A. Shchukin, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, S. Zaitsev, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, S.S. Ruvimov, A.O. Kosogov, P. Werner, U. Gösele, J. Heydenreich. Sol. St. Electron., **40**, 785 (1996).
- [8] N. Kirstaedter, N.N. Ledentsov, M. Grundmann, D. Bimberg, V.M. Ustinov, S.S. Ruvimov, M.V. Maximov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, U. Richter, P. Werner, U. Gösele, J. Heydenreich. Electron. Lett., **30**, 1416 (1994).
- [9] G.E. Cirlin, G.M. Guryanov, A.O. Golubok, S.Ya. Tipsishev, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, M. Grundmann, D. Bimberg. Appl. Phys. Lett., **67**, 97 (1995).
- [10] Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов, Г.Э. Цырлин, В.Н. Петров, Г.М. Гурьянов. ФТП, **29**, 1295 (1995).
- [11] G.M. Guryanov, G.E. Cirlin, V.N. Petrov, N.K. Polyakov, A.O. Golubok, S.Ya. Tipsishev, E.P. Musikhina, V.B. Gubanov, Yu.B. Sampsonenko, N.N. Ledentsov. Surf. Sci., **331–333**, 414 (1995).
- [12] G.M. Gubanov, G.E. Cirlin, V.N. Petrov, N.K. Polyakov, A.O. Golubok, S.Ya. Tipsishev, V.B. Gubanov, Yu.B. Sampsonenko, N.N. Ledentsov, V.A. Shchukin, M. Grundmann, D. Bimberg, Zh.I. Alferov. Surf. Sci., **352–354**, 651 (1996).
- [13] Г.Э. Цырлин, А.О. Голубок, С.Я. Типисев, Н.Н. Леденцов, Г.М. Гурьянов. ФТП, **29**, 1697 (1995).
- [14] Г.М. Гурьянов, Н.Н. Леденцов, В.Н. Петров, Ю.Б. Самсоненко, Г.Э. Цырлин, А.Г. Филаретов. Письма в ЖТФ, **19**, вып. 18, 64 (1993).
- [15] В.Б. Губанов, Г.М. Гурьянов, Н.Н. Леденцов, В.Н. Петров, Ю.Б. Самсоненко, Г.Э. Цырлин. Письма в ЖТФ, **19**, вып. 21, 73 (1993).
- [16] Г.М. Гурьянов, В.Н. Демидов, Н.П. Корнеева, Г.Э. Цырлин. ПТЭ, N3, 167 (1996).
- [17] G.E. Cirlin, V.N. Petrov, A.O. Golubok, S.Ya. Tipsishev, V.G. Dubrovskii, G.M. Guryanov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. Surf. Sci. (1997) (in press).

Редактор В.В. Чалдышев

## Luminescence properties of InAs/GaAs quantum dots obtained by submonolayer migration-enhanced epitaxy

G.E. Cirlin, V.N. Petrov, M.V. Maximov\*, N.N. Ledentsov\*

Institute for Analytical Instrumentation,  
Russian Academy of Sciences,  
198103 St. Petersburg, Russia

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

**Abstract** Results of the luminescence properties study of InAs quantum dot arrays formed by submonolayer migration enhanced epitaxy on GaAs(100) singular and vicinal surfaces are presented. The highest value of the full width on half maxima for 3° misoriented surface is observed indicating a highest deviation from the mean size of quantum dots in this case. Quasi-equilibrium quantum dots are formed at increased exposure time of the surface under arsenic flux at a highest amount of indium deposited.