

05;06;11;12

## **Самоорганизация квантовых точек в многослойных структурах InAs/GaAs и InGaAs/GaAs при субмонослойной миграционно-стимулированной эпитаксии**

© Г.Э. Цырлин, В.Н. Петров, С.А. Масалов,  
А.О. Голубок, Н.Н. Леденцов

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

Поступило в Редакцию 17 июля 1997 г.

Приводятся экспериментальные результаты по исследованию методом сканирующей туннельной микроскопии многослойных структур квантовых точек InGaAs/GaAs, полученных методом субмонослойной миграционно-стимулированной эпитаксии. Приведенные результаты однозначно указывают на то, что в многослойных структурах наблюдается упорядочение нанобъектов в ряды как в случае InAs, так и в случае InGaAs гетероэпитаксиальных слоев.

Одним из основных направлений в современной фундаментальной и прикладной физике поверхности является изучение процессов формирования наноструктур путем самоорганизации поверхности при гетероэпитаксиальном росте в рассогласованных по параметру постоянной решетки системах [1,2]. Квантовые точки и квантовые проволоки открывают пути к созданию оптоэлектронных приборов нового поколения [3,4]. Достигнутый прогресс в теории образования наноструктур [5] и обнаружение эффектов упорядоченности квантово-размерных образований на поверхности в системе (InAs, InGaAs)/GaAs [6,7] позволяют надеяться на получение квантово-размерных структур с заранее заданными геометрическими свойствами. В работе [8] предложена модель процесса самоорганизации квантовых точек, состоящая в создании многослойных структур, и приведены подтверждающие экспериментальные данные по "эффективной" самоорганизации  $\text{Si}_{0.25}\text{Ge}_{0.75}$  на поверхности Si. Результаты [9] также подтверждают эффективность этой методики при формировании квантовых точек методом МПЭ в системе InAs/GaAs.

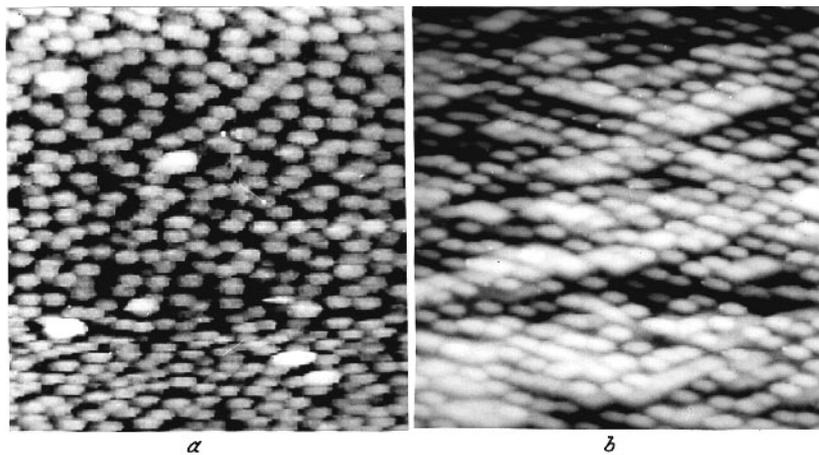
Целью нашей работы было исследование процессов самоорганизации квантовых точек в многослойных InAs/GaAs и InGaAs/GaAs структурах при использовании метода субмонослойной миграционно-стимулированной эпитаксии (СМСЭ) [10].

Ростовые эксперименты проводились на установке ЭП1203 на подложках GaAs(100). После удаления окисного слоя в ростовой камере при температуре подложки  $T_s = 610-630^\circ\text{C}$  в потоке  $\text{As}_4$ , методом традиционной МПЭ выращивался буферный слой GaAs толщиной  $0.25\ \mu\text{m}$  при сохранении реконструкции поверхности  $(2 \times 4)$  и  $T_s = 550^\circ\text{C}$ . Буферный слой легировался бериллием до концентрации  $\sim 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$  для уверенного захвата туннельного тока при последующем исследовании поверхности методом сканирующей туннельной микроскопии. После выращивания буферного слоя температура образца в потоке мышьяка понижалась до  $T_s = 470^\circ\text{C}$  (момент изменения поверхностной реконструкции  $(2 \times 4)$  на  $(4 \times 4)$ ). Давление мышьяка при открытой заслонке мышьяка в ростовой камере во всех экспериментах поддерживалось постоянным на уровне  $2.7 \cdot 10^{-6}\ \text{Pa}$ .

Формирование каждого из слоев InAs, InGaAs квантовых точек проводилось в режиме СМСЭ. Во всех случаях выращивались 3 монослоя (МС) по следующей методике: в случае InAs после осаждения, необходимого для 0.5 МС индия, а в случае InGaAs после очередного осаждения, необходимого для 0.5 МС InGaAs галлия (33%) и индия (67%), поверхность выдерживалась в течение 10 s в потоке мышьяка. Далее образовавшиеся квантовые точки зарастивались слоем GaAs:Be (20 МС) методом традиционной МПЭ при той же  $T_s$ , и процесс формирования квантовых точек повторялся. После завершения роста нагреватель образца немедленно отключался и удалялся из зоны держателя образца.

Состояние поверхности контролировалось *in situ* дифракцией быстрых электронов на отражение (ДБЭО) с помощью системы [11], позволяющей производить обработку картин ДБЭО в реальном масштабе времени. Калибровка скоростей роста GaAs и InAs проводилась с помощью измерения осцилляций интенсивности зеркального рефлекса на картине ДБЭО. Скорости роста GaAs и InAs в процессе экспериментов были соответственно 0.5 и 0.1 МС/s.

Морфология поверхности образцов исследовалась *ex situ* с помощью сканирующего туннельного микроскопа (СТМ), методика и режимы измерений описаны в [6,12]. Многократно воспроизводимые и устойчивые СТМ-изображения были получены на различных участках

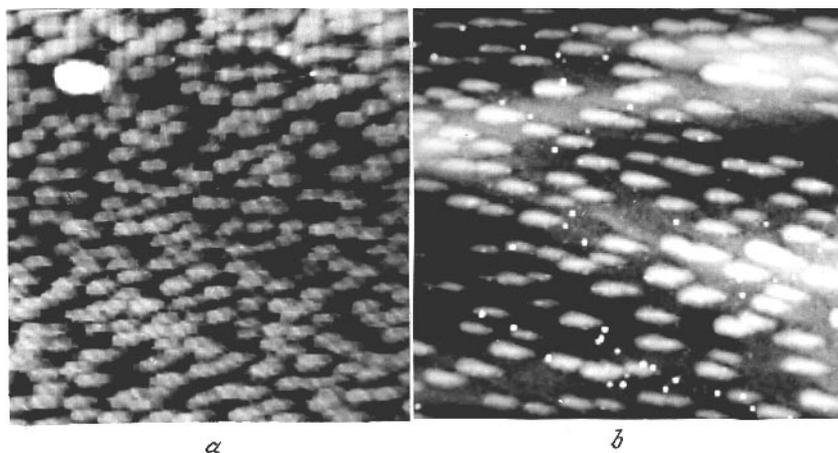


**Рис. 1.** СТМ-изображения участков поверхности после осаждения одного слоя (*a*) и десяти слоев (*b*) InAs на GaAs(100). Площадь сканирования  $600 \times 600$  nm (*a*) и  $700 \times 700$  nm (*b*). Стороны изображений параллельны направлениям [011] и [0-11].

исследуемых образцов в режиме постоянного тока ( $I_T = 5-7 \cdot 10^{-11}$  А,  $V_T = 0.7-0.9$  В) при положительном смещении на образце.

На рис. 1, *a, b* приведены СТМ-изображения поверхности при формировании одного и десяти слоев квантовых точек InAs соответственно. В обоих случаях наблюдаются практически одинаковая плотность квантовых точек ( $\sim 1 \cdot 10^{11}$  см $^{-2}$ ), а также латеральные размеры (18–20 nm). Однако если в случае одиночного слоя пространственное распределение квантовых точек изотропно (рис. 1, *a*), то в случае многослойной структуры распределение квантовых точек анизотропно с ориентацией в ряды вдоль направлений [001] и [010] (рис. 1, *b*).

На рис. 2, *a* приведены СТМ-изображения поверхности при формировании одного и десяти слоев квантовых точек InGaAs соответственно. В первом случае при достаточно высокой плотности квантовых точек ( $> 1.0 \cdot 10^{11}$  см $^{-2}$ ) и относительно небольших латеральных размерах (12 nm) пространственное распределение однородно. Для случая многослойной структуры нанобъекты обладают вытянутой формой с



**Рис. 2.** СТМ-изображения участков поверхности после осаждения одного слоя (а) десяти слоев (б)  $\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.33}\text{As}$  квантовых точек на  $\text{GaAs}(100)$ . Площадь сканирования  $600 \times 600 \text{ nm}$  для обоих случаев. Стороны изображений параллельны направлениям  $[011]$  и  $[0-11]$ .

характерным отношением длины к ширине  $\sim 4$  и преимущественной ориентацией вдоль направления  $[001]$ . Их поверхностная плотность в данном случае существенно ниже ( $\sim 3 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ).

Таким образом, нами экспериментально обнаружен эффект упорядочения нанообъектов в ряды в многослойных структурах  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ , полученных методом субмонослойной миграционно-стимулированной эпитаксии. Детальный статистический анализ приведенных СТМ-изображений, а также обсуждение механизмов, ответственных за упорядочение нанообъектов в ряды, будут приведены в отдельной статье.

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] Goldstein L., Flas F., Marzin J.Y., Charasse M.N., Le Roux G. // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 47. P. 1099.
- [2] Tersoff J., Tromp R.M., // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 70. P. 2782.
- [3] Grundmann M., Christen J., Ledentsov N.N., Bšhrer J., Bimberg D., Ruvimov S.S., Werner P., Ricciter U., Gšsele U., Heydenreich J., Ustinov V.M., Egorov A.Ya., Zhukov A.E., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I. // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 74. P. 4043.
- [4] Mui D.S.I., Leonard D., Coldren L.A., Petroff P.M. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. P. 1620.
- [5] Shchukin V.A., Ledentsov N.N., Kop'ev P.S., Bimberg D. // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 75. P. 2968.
- [6] Cirlin G.E., Guryanov G.M., Golubok A.O., Tipishev S.Ya., Ledentsov N.N., Kop'ev P.S., Grundmann M., Bimberg D. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. P. 97.
- [7] Ledentsov N.N., Grundmann M., Kirstaedter N., Schmidt O., Heitz R., Bšhrer J., Bimberg D., Ustinov V.M., Shchukin V.A., Egorov A.Ya., Zhukov A.E., Zaitsev S., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Ruvimov S.S., Kosogov A.O., Werner P., Gšsele U. // J. Heydenreich. Solid State Electronics. 1996. V. 40. P. 785.
- [8] Tersoff J., Teichert C., Lagally M.G. // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 76. N 10. P. 1675–1678.
- [9] Komarov S.A., Solomon G.S., Harris J.S. Jr. // Proceedings of the Int. Symp. "Nanostructures: physics and technology 97". St. Petersburg, Russia, 1997. P. 314.
- [10] Цырлин Г.Э., Голубок А.О., Типисев С.Я., Леденцов Н.Н., Гурьянов Г.М. // ФТП. 1995. Т. 29. С. 1697.
- [11] Губанов В.Б., Гурьянов Г.М., Демидов В.Н., Дубровский В.Г., Корнеева Н.П., Петров В.Н., Поляков Н.К., Самсоненко Ю.Б., Цырлин Г.Э. // Научное приборостроение. 1996. Т. 6 (1/2). С. 3.
- [12] Guryanov G.M., Cirlin G.E., Petrov V.N., Polyakov N.K., Golubok A.O., Tipishev S.Ya. Musikhina E.P., Gubanov V.B., Samsonenko Yu.B., Ledentsov N.N. // Surf. Sci. 1995. P. 331–333, 414.