

©1995 г.

## САМООРГАНИЗАЦИЯ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ СТРУКТУР $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ НА РАЗОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ $\text{GaAs}$ (100) ПРИ СУБМОНОСЛОЙНОЙ МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ ЭПИТАКСИИ

*Г.М.Гурьянов, Г.Э.Цырлин, В.Н.Петров, Ю.Б.Самсоненко,  
В.Б.Губанов, Н.К.Поляков, А.О.Голубок, С.Я.Тупицев,  
Е.П.Мусихина, Н.Н.Леденцов<sup>†</sup>*

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

<sup>†</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021, Санкт-Петербург, Россия

(Получена 5 декабря 1994 г. Принята к печати 13 декабря 1994 г.)

Методом сканирующей туннельной микроскопии исследовано влияние разориентации поверхности  $\text{GaAs}(100)$  на формирование квантово-размерных структур  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  при субмонослойной молекулярно-пучковой эпитаксии. Обнаружено, что на вивинальной поверхности наблюдается анизотропия в распределении квантово-размерных образований в направлении, отличном от направления разориентации подложки. Полученные результаты свидетельствуют о возможности создания новых типов квантово-размерных образований (квантовые проволоки и упорядоченные массивы квантовых точек) непосредственно при субмонослойном молекулярно-пучковом эпитаксиальном росте.

Изучению явлений самоорганизации на поверхности полупроводников при молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) в последнее время уделяется особое внимание как с теоретической, так и с экспериментальной точек зрения [1-7]. Большой интерес представляет квантово-размерные структуры (КРС), в которых движение носителей заряда ограничено по двум (квантовые проволоки) или трем (квантовые точки) направлениям. Этот интерес связан в существенной степени с ожидаемым улучшением свойств полупроводниковых приборов, принцип действия которых основан на квантово-размерных эффектах [8].

Одной из наиболее исследуемых в последнее время полупроводниковых систем, привлекательных с точки зрения явлений самоорганизации, является  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ . Это объясняется тем, что большое рассогласование постоянных кристаллической решетки (до 7% для

InAs/GaAs) приводит при определенной критической толщине напряженного слоя к образованию напряженных когерентных островков (механизм Странски–Крастанова или Фольмера–Вебера). Быстрый переход от послойного роста к формированию островков в таких системах стимулируется релаксацией упругих напряжений. В настоящее время имеется ряд сообщений об образовании квантовых точек  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , полученных на поверхности GaAs при МПЭ-росте [9–12]. Основное внимание в данных работах было уделено начальной стадии нуклеации InAs на GaAs (100) [9], влиянию температуры подложки и молярной доли In в твердом растворе на геометрические характеристики полученных нульмерных образований [10–12]. Были получены сверхузкие линии катодолюминесценции от одиночных квантовых точек [13]. Впервые реализован полупроводниковый лазер, активная область которого состояла из набора квантовых точек [14]. Известно, что на механизм роста полупроводниковых соединений большое влияние оказывает разориентация исходной поверхности подложки относительно основной кристаллографической плоскости (вицинальность поверхности) [15]. Однако в настоящее время вопрос о влиянии разориентации поверхности на рост квантово-размерных структур в системе  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  остался не изученным.

В данной работе приведены результаты исследования методом сканирующей туннельной микроскопии квантово-размерных образований  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ , полученных при субмонослойном МПЭ-росте на вицинальных и сингулярных поверхностях GaAs (100). Полученные нами результаты существенное влияние на анизотропию распределения получаемых квантово-размерных образований.

## 1. Эксперимент

Ростовые эксперименты проводились на установке МПЭ ЭП 1203 на полуизолирующих подложках GaAs (100) (сингулярные образцы) и подложках GaAs (100), поверхность которых разориентирована на  $3^\circ$  в сторону [011] (вицинальные образцы). Методика химической предростовой подготовки поверхности пластин описана в [16]. Сингулярные и вицинальные подложки GaAs 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 при температуре подложки  $T_s = 580^\circ\text{C}$  в потоке  $\text{As}_4$  выращивался буферный слой GaAs толщиной 0.25 мкм при сохранении реконструкции поверхности  $(2 \times 4)$  и  $T_s = 550^\circ\text{C}$ . Буферный слой легировался бериллием до концентрации  $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$  для уверенного захвата туннельного тока при последующем исследовании поверхности методом сканирующей туннельной микроскопии.

После выращивания буферного слоя температура образца в потоке мышьяка понижалась до  $T_s \cong 470^\circ\text{C}$ , величина которой определялась с помощью данных, приведенных в [17] (момент перехода поверхностной реконструкции  $(2 \times 4)$  в  $(2 \times 2)$ ). Выращивание  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  слоев проводилось в режиме субмонослойного молекулярно-пучкового эпитаксиального (СМПЭ) роста [18]. Он заключался в следующем: для по-

лучения твердого раствора  $\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.33}\text{As}$  на поверхность осаждалось 2/3 монослоя  $\text{InAs}$ , далее образец выдерживался в потоке мышьяка в течение 10 с, после этого напылялось 1/3 монослоя  $\text{GaAs}$  с последующей выдержкой в потоке  $\text{As}_4$  также в течение 10 с. Подобный цикл продолжался до появления на картине дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО) отчетливых объемных рефлексов, свидетельствующих об образовании на поверхности трехмерных объектов, после чего рост прерывался (было осаждено 4 монослоя (МС)). Процедура СМПЭ роста для  $\text{InAs}$  заключалась в напылении половин монослоя арсенида индия с последующей 10-секундной выдержкой в потоке мышьяка, что также повторялось до появления отчетливых объемных рефлексов на картине ДБЭО (осаждено 3 МС). Наблюдение за картинками дифракции производилось в направлении  $[0\bar{1}1]$  на сингулярном образце. После завершения процедуры СМПЭ роста образцы закаливались путем быстрого понижения  $T_s$  до комнатной температуры.

Давление мышьяка в ростовой камере во всех экспериментах поддерживалось постоянным на уровне  $4 \cdot 10^{-6}$  Па. Калибровка скоростей роста  $\text{GaAs}$  и  $\text{InAs}$  проводилась с помощью измерения осцилляций интенсивности зеркального рефлекса на картине ДБЭО. Скорости роста  $\text{GaAs}$  и  $\text{InAs}$  в процессе экспериментов были постоянными и равными 0.45 и 0.1 монослоя/с соответственно.

Морфология поверхности образцов исследовалась *ex situ* с помощью сканирующего туннельного микроскопа (СТМ), методика и режимы измерений описаны в [7]. Многократно воспроизводимые и устойчивые СТМ-изображения были получены на различных участках исследуемых образцов. Следует лишь отметить, что для увеличения срока возможных СТМ измерений образцы помещались в вакуумное масло [19], что позволило проводить воспроизводимые измерения в течение месяца после их изъятия из вакуумной камеры.

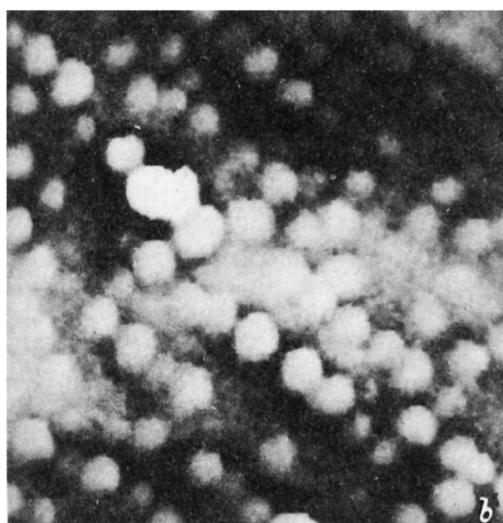
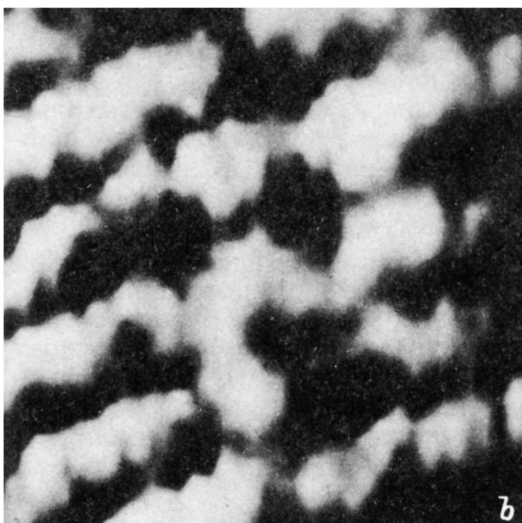
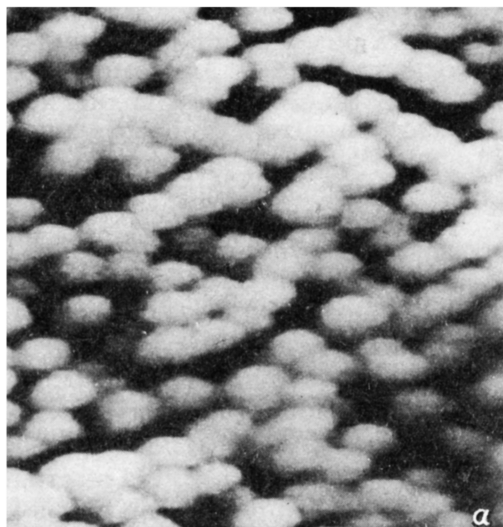
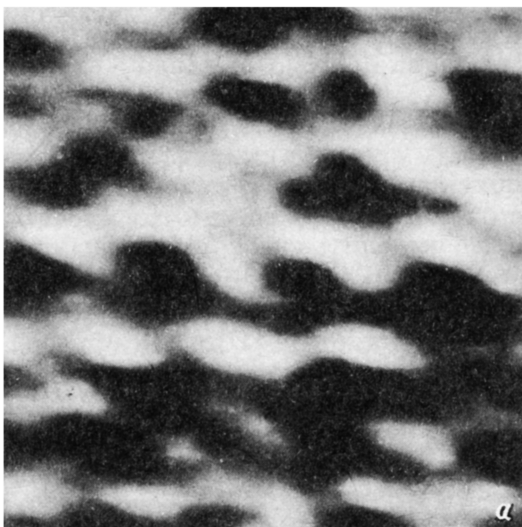
## 2. Результаты и обсуждение

В таблице приведены номера исследуемых образцов и соответствующие им технологические параметры.

На рис. 1, *a, b* приведены СТМ-изображения для образцов 1 и 2 соответственно ( $\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.33}\text{As}$ , номинальная толщина 4 МС). Из рисунка видно, что морфология поверхностей качественно совпадает для сингулярного и вицинального образцов. Однако если в случае сингулярной поверхности наблюдается преимущественная ориентация КРС вдоль направления  $[0\bar{1}1]$ , то на разориентированной поверхности — вдоль  $[0\bar{0}1]$ . Следует также отметить, что на вицинальной поверхности КРС

Перечень исследуемых образцов и их технологические параметры

№ образца	Количество МС	Содержание In, $x$	Вицинальность
1	4	0.66	Нет
2	4	0.66	Да
3	3	1	Нет
4	3	1	Да



**Рис. 1.** STM изображение квантово-размерных образований после напыления 4 МС  $\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.33}\text{As}$ : *a* — на сингулярную поверхность, площадь сканирования  $7500 \times 7500 \text{ \AA}$ ; *b* — на вицинальную поверхность, площадь сканирования  $7500 \times 7500 \text{ \AA}$ .

**Рис. 2.** STM изображение квантовых точек после напыления 3 МС  $\text{InAs}$ : *a* — на сингулярную поверхность, площадь сканирования  $3600 \times 3600 \text{ \AA}$ ; *b* — на вицинальную поверхность, площадь сканирования  $3100 \times 3100 \text{ \AA}$ .

имеют более упорядоченную структуру в виде проволок с характерным поперечным размером  $700 \text{ \AA}$ , а направление преимущественной ориентации проволок не совпадает с направлением разориентации вицинальной поверхности. При выращивании твердого раствора с другой молярной долей  $\text{In}$  ( $x = 0.33$ ) с той же толщиной и аналогичных условиях роста на сингулярной поверхности наблюдалась протяженная мезоскопическая структуры, вытянутая также в направлении  $[0\bar{1}1]$  [20]. Это направление соответствует анизотропии, связанной с реконструкцией поверхности.

На рис. 2, *a, b* приведены СТМ-изображения для образцов 3 и 4 соответственно (InAs, номинальная толщина 3 МС). В данном случае вследствие большей величины рассогласования постоянных решеток квантовые точки образуются при меньшей толщине напыленного слоя [11]. Для сингулярной поверхности (рис. 2, *a*) характерно наличие квантовых точек, расположенных на близком расстоянии друг к другу с плотностью  $\sim 1.5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Несмотря на то что имеется локальное упорядочение точек в ряды, выделить какое-либо одно кристаллографическое направление не удастся. Латеральные размеры КРС в этом случае, оцененные из СТМ профилей с учетом конечного диаметра острия, составляют 180 Å в диаметре ( $D$ ). Для образца с вицинальной поверхностью (рис. 2, *b*) очевидно наличие двух основных отличий от предыдущего СТМ изображения — уменьшение характерных размеров и плотности квантовых точек ( $D = 150 \text{ Å}$ , плотность  $\sim 1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ), а также выстраивание КРС в ряды с выраженным направлением ориентации вдоль [001].

Таким образом, при выращивании квантово-размерных образований  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  методом субмонослойной молекулярно-пучковой эпитаксии обнаружены существенные отличия при росте на сингулярных и вицинальных поверхностях. Они заключаются, во-первых, в эффективном уменьшении плотности и латеральных размеров трехмерных образований при выращивании на вицинальной поверхности (по крайней мере в случае InAs) и, во-вторых, в появлении выраженного кристаллографического направления ориентации квантовых проволок и точек, отличного от направления разориентации подложки.

Первая особенность может быть, по-видимому, объяснена природой роста на вицинальной поверхности. Эта поверхность представляет собой набор монослойных по высоте ступеней, расстояние между которыми зависит от угла разориентации. В случае роста напряженных слоев каждая ступень является эффективным центром релаксации напряжений слоя за счет появления напряжений в подложке. При меньшем эффективном напряжении самого слоя критическая толщина, определяющая начальный момент формирования островков, соответственно увеличивается.

Объяснение второго эффекта (анизотропия распределения КРС на поверхности) пока находится в стадии рассмотрения, так как требует дополнительных экспериментальных данных. Хотелось бы лишь отметить тот факт, что направление преимущественной ориентации квантово-размерных образований отличается от направления разориентации вицинальной поверхности и зависит от мольной доли индия в твердом растворе  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Для InAs ( $x = 1$ ) квантовые точки ориентированы вдоль [001], что составляет  $45^\circ$  по отношению к направлению разориентации. В случае твердого раствора  $\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.33}\text{As}$  образуются квантовые проволоки, ориентированные вдоль [031] (угол поворота  $22.5^\circ$  относительно направления разориентации). Наличие анизотропии в распределении КРС связано, по-видимому, как с анизотропией внутренних свойств кристалла арсенида галлия, так и с особенностями роста на вицинальной поверхности GaAs.

Таким образом, экспериментально показано, что разориентация поверхности GaAs (100) оказывает существенное влияние на распределе-

ние КРС, получаемых методом субмонослойной МПЭ. Обнаружена анизотропия в поверхностном распределении КРС, отличная от направления разориентации подложки и зависящая от состава твердого раствора InGaAs. Показано, что варьируя состав твердого раствора и количество осажденного материала, возможно получение новых типов структур с пониженной размерностью (квантовые проволоки и упорядоченные массивы квантовых точек) непосредственно при эпитаксиальном росте.

#### Список литературы

- [1] В.И. Марченко. ЖЭТФ, **81**, 1141 (1981).
- [2] Y.-W. Mo, B.S. Swartzentruber, R. Kariotis, M.B. Webb, M.G. Lagally. Phys. Rev. Lett., **63**, 2393 (1989).
- [3] Y.-W. Mo, D.E. Savage, B.S. Swartzentruber, M.G. Lagally. Phys. Rev. Lett., **65**, 1020 (1990).
- [4] R.Nötzl, N.N. Ledentsov, L. Däweritz, M. Hohenstein, K. Ploog. Phys. Rev. Lett., **67**, 3812 (1991).
- [5] J. Tersoff, R.M. Tromp. Phys. Rev. Lett., **70**, 2782 (1993).
- [6] M. Krishnamurthy, M. Wassermeier, D.R.M. Williams, P.M. Petroff. Appl. Phys. Lett., **62**, 1922 (1993).
- [7] А.О. Голубок, Г.М. Гурьянов, Н.Н. Леденцов, В.Н. Петров, Ю.Б. Самсоненко, С.Я. Типисев, Г.Э. Цырлин. ФТП, **28**, 515 (1994).
- [8] Y. Aikawa, H. Sakai. Appl. Phys. Lett., **40**, 635 (1982).
- [9] V. Bressler-Hill, A. Lorke, S. Varma, P.M. Petroff, K. Pond, W.H. Weinberg. Phys. Rev. B, **50**, 8479 (1994).
- [10] D. Leonard, M. Krishnamurthy, C.M. Reaves, S.P. Denbaars, P.M. Petroff. Appl. Phys. Lett., **63**, 3203 (1993).
- [11] J.M. Moison, F. Houzay, F. Barthe, L. Leprince, E. Andre, O. Vatel. Appl. Phys. Lett., **64**, 196 (1994).
- [12] N.N. Ledentsov, M. Grundmann, N. Kirstaedter, J. Christen, R. Heitz, J. Böhrer, F. Heinrichsdorff, D. Bimberg, S.S. Ruvimov, P. Werner, U. Richter, U. Gösele, J. Heydenreich, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, M.V. Maximov, P.S. Kopév, Zh.I. Alferov. Proc. 22 th Int. Conf. on Phys. Semicond. (Vancouver, Canada, 1994) (в печати).
- [13] 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. Kopév, Zh.I. Alferov. Phys. Rev. Lett. (в печати).
- [14] N. Kirstaedter, N.N. Ledentsov, M. Grundmann, D. Bimberg, V.M. Ustinov, S.S. Ruvimov, M.V. Maximov, P.S. Kopév, Zh.I. Alferov; U. Richter, P. Werner, U. Gösele, J. Heydenreich. Electron. Lett., **30**, 1416 (1994).
- [15] H. Lee, N. Nouri, C. Colvard, D. Ackley. J. Cryst. Growth, **95**, 292 (1989).
- [16] Г.М. Гурьянов, Н.Н. Леденцов, В.Н. Петров, Ю.Б. Самсоненко, Г.Э. Цырлин, А.Г. Филаретов. Письма ЖТФ, **19**, 64 (1993).
- [17] M. Yana, H. Yokose, Y. Iwai, M. Inoue. J. Cryst. Growth, **111**, 609 (1991).
- [18] P.D. Wang, N.N. Ledentsov, C.M. Sotomayor Torres, P.S. Kopév, V.M. Ustinov. Appl. Phys. Lett., **64**, 1526 (1994).
- [19] A.O. Golubok, S.Ya. Tipishev, G.E. Cirilin, G.M. Guryanov, V.N. Petrov. Ext. Abstracts 7 th Int. Conf. on Vacuum Microelectron. (Grenoble, France, 1994) p. 362.
- [20] G.M. Guryanov, G.E. Cirilin, V.N. Petrov, N.K. Polyakov, A.O. Golubok, S.Ya. Tipishev, E.P. Musikhina, V.B. Gubanov, Yu.B. Samsonenko, N.N. Ledentsov. Surf. Sci. (в печати).

Редактор В.В. Чалдышев

**Self-organizing of quantum-dimensional strained  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  structures on misorientated GaAs (100) surfaces during submonolayer molecular-beam epitaxy**

*G.M. Guryanov, G.E. Cirlin, V.N. Petrov, Yu.B. Samsonenko, V.B. Gubanov, N.K. Polyakov, A.O. Golubok, S.Ya. Tipisev, E.P. Musikhina, N.N. Ledentsov<sup>†</sup>*

Institute of Analytical Instrumentation, 198103 St. Petersburg, Russia

<sup>†</sup>A.F. Ioffe Physicotechnical Institute, 194021 St. Petersburg, Russia

---