

©1995 г.

КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ InAs/GaAs, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ СУБМОНОСЛОЙНОЙ МИГРАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННОЙ ЭПИТАКСИИ

Г.Э.Цырлин, А.О.Голубок, С.Я.Тупицев, 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 10 января 1995 г. Принята к печати 16 января 1995 г.)

Впервые предложен и реализован метод субмонослойной миграционно-стимулированной эпитаксии на установке молекулярно-пучковой эпитаксии ЭП 1203. Метод был использован для получения квантовых точек InAs на сингулярной и вицинальной поверхности GaAs (100). Наши результаты свидетельствуют о перспективности метода субмонослойной миграционно-стимулированной эпитаксии для создания массивов квантовых точек с высокой однородностью и низкой дисперсией по размерам.

Изучению явлений самоорганизации на поверхности полупроводников в последнее время уделяется повышенное внимание [1-4]. В частности, недавно было продемонстрировано, что осаждение на поверхность GaAs некоторого количества InAs приводит к образованию квантово-размерных структур, являющихся результатом распада напряженных слоев при росте кристалла по механизму Странски-Крастанова [5-9]. Для получения квантовых точек и квантовых проволок InGaAs/GaAs были использованы методы традиционной молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) [5-7] и субмонослойной молекулярно-пучковой эпитаксии (СМПЭ) [8,9]. Использование последнего метода является актуальным в связи с ожидаемым улучшением оптических свойств в подобных структурах [10]. Улучшение оптических и электрофизических свойств полупроводниковых структур, а также получение более гладких границ раздела по сравнению с МПЭ возможно и при использовании метода миграционно-стимулированной эпитаксии (МСЭ) [11-13]. В отличие от традиционного МПЭ метод МСЭ основан на последовательном, а не на одновременном, напылении молекулярных пучков III и V групп на поверхность образца.

В данной работе впервые реализован новый эпитаксиальный метод, названный нами субмонослойной миграционно-стимулированной эпитаксией (СМСЭ). Данный метод, являющийся соединением технологий СМПЭ и МСЭ, был использован для получения квантовых точек InAs на поверхности GaAs (100).

Ростовые эксперименты проводились на установке МПЭ ЭП 1203 на сингулярных и разориентированных на 2.5° в сторону [011] подложках полуизолирующего GaAs (100). Прошедшие химическую обработку по описанной в [14] методике образцы наклеивались с помощью индия на молибденовый держатель. В случае исследования влияния разориентации подложки сингулярный и вицинальный образцы помещались на один держатель. После удаления окисного слоя в ростовой камере при температуре подложки $T_s = 580^\circ\text{C}$ в потоке As_4 выращивался буферный слой GaAs, легированный бериллием до концентрации 10^{16} см^{-3} толщиной 1 мкм при сохранении реконструкции поверхности (2×4) и $T_s = 550^\circ\text{C}$. Далее температура образца понижалась в потоке мышьяка до $T_s = 470^\circ\text{C}$ и заслонка мышьяка перекрывалась для откачки из ростового объема остаточного As_4 . Значение пика $^{75}\text{As}^{++}$, регистрируемое с помощью масс-спектрометра, за время откачки (~ 30 мин) уменьшалось более чем на порядок. Процедура осаждения InAs в СМСЭ моде заключалась в следующем. В начале открывалась заслонка индия на время, соответствующее осаждению половины монослоя InAs, если бы рост проводился в режиме МПЭ при As-стабилизированных условиях. После этого одновременно закрывалась заслонка In и открывалась заслонка мышьяка на заранее заданное время для последующей выдержки поверхности в атмосфере As_4 . Данный цикл повторялся 4 раза. Таким образом, суммарная номинальная толщина осажденного InAs в каждом случае составляла 2 монослоя. С помощью предлагаемой методики были выращены образцы с временем выдержки поверхности под мышьяком 2 с (сингулярный и вицинальный образцы) и 30 с (сингулярный образец). Наблюдение за картиной дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО) в направлении [011] свидетельствовало об образовании трехмерных образований в конце четвертого цикла для обоих времен прерывания роста. Значения ранее откалиброванных потоков Ga и In с помощью наблюдения осцилляций зеркального рефлекса ДБЭО устанавливались таким образом, чтобы скорости роста GaAs и InAs соответствовали 0.6 и 0.1 монослоя/с. Соотношение потоков при открытых заслонках индия и мышьяка составляло $J_{\text{As}_4}/J_{\text{In}} = 5$.

После окончания СМСЭ роста образцы немедленно закалялись при закрытой заслонке мышьяка. Далее исследование морфологии поверхности производилось *ex situ* в сканирующем туннельном микроскопе (СТМ) при атмосферном давлении. Методика СТМ измерений подробно приведена в [9,15].

На рис. 1,а приведено СТМ изображение участка поверхности InAs/GaAs (2 монослоя, сингулярная поверхность, выдержка под мышьяком между циклами осаждения атомов индия $\Delta t = 2$ с). Для данной поверхности характерно наличие изолированных квантовых точек с плотностью $\rho = 3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ и средним диаметром $d \sim 400 \text{ \AA}$. Особенностью приведенного изображения является малый разброс по латеральным размерам ($\pm 5\%$). На рис. 1,б приведено СТМ изображение для участка поверхности InAs/GaAs, полученной на вицинальной под-

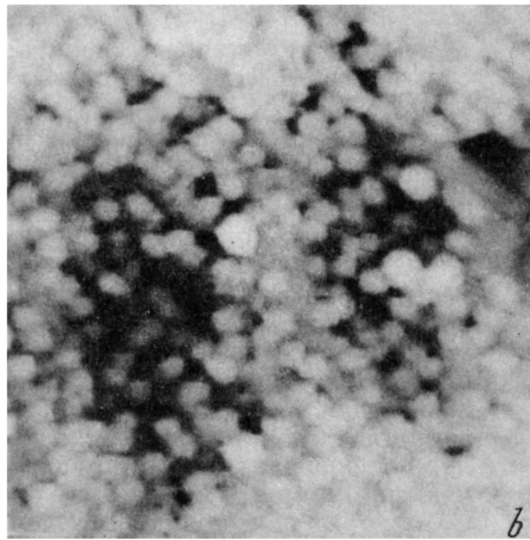
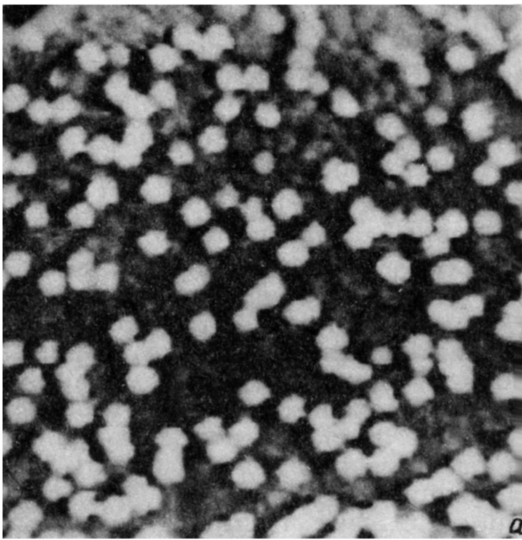


Рис. 1. СТМ изображение квантовых точек после напыления 2 монослоев InAs методом СМСЭ с выдержкой в течение 2 с между циклами напыления индия: *a* — на сингулярную поверхность, площадь сканирования 1×1 мкм; *b* — на вицинальную поверхность, площадь сканирования 0.6×0.6 мкм.

ложке при тех же условиях роста, что и для сингулярного образца. По сравнению с рис. 1, *a* заметно возросла плотность квантовых точек ($\rho = 1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$) при уменьшении латеральных размеров ($d = 180 \text{ \AA}$) и сохранении низкой дисперсии. В обоих случаях распределение точек по поверхности изотропно.

В качестве примера влияния времени выдержки поверхности в потоке мышьяка на рис. 2 приведено СТМ изображения для сингулярного образца, где Δt составляет 30 с. В данном случае распределение квантовых точек приобретает анизотропный характер с преимущественной ориентацией вдоль направлений $[001]$ и $[010]$. Плотность квантово-размерных образований и их характерные размеры в этом случае такие же, как и для сингулярного образца с $\Delta t = 2$ с (рис. 1, *a*).

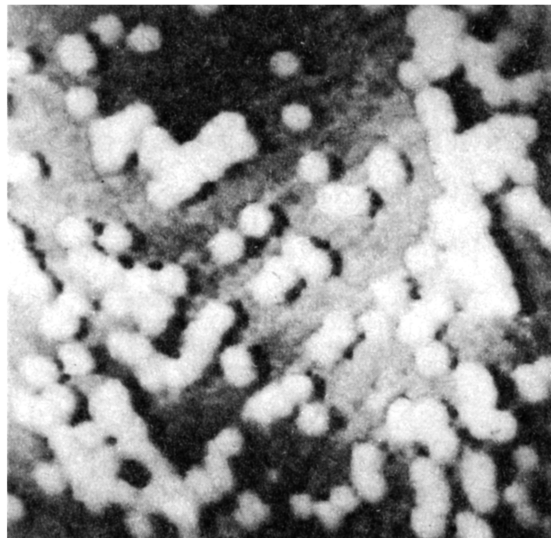


Рис. 2. СТМ изображение квантовых точек после напыления 2 монослоев InAs на сингулярную поверхность методом СМСЭ с выдержкой в течение 30 с между циклами напыления индия, площадь сканирования 1×1 мкм.

Таким образом, можно сделать вывод о независимости геометрических параметров при различных временах прерывания роста в методе СМСЭ.

Сопоставление полученных результатов с результатами по СМПЭ росту InAs/GaAs квантово-размерных образований [8,9] свидетельствует о наличии различий в механизмах роста при СМПЭ и СМСЭ. В [9] отмечено, что при росте на вицинальной поверхности в методе СМПЭ происходит эффективное уменьшение как размеров квантовых точек, так и их плотности по сравнению с ростом на сингулярной поверхности. В нашем случае плотность образований возрастает при одновременном уменьшении характерных латеральных размеров. Не наблюдается в случае малых Δt и упорядочивание точек в ряды, характерное для СМПЭ роста. Подобное упорядочение, с другой стороны, наблюдается при достаточно больших Δt в случае роста на сингулярной поверхности. Направления анизотропии в распределении точек, по-видимому, может быть объяснено реконструкцией поверхности GaAs перед напылением InAs, которая при увеличении Δt оказывает большее влияние на результирующую структуру.

Таким образом, впервые предложен метод субмонослойной миграционно-стимулированной эпитаксии. Показано, что метод СМСЭ позволяет формировать квантово-размерные структуры с пониженной размерностью (квантовые точки) с высокой однородностью распределения и низкой дисперсией по размерам. Подобные структуры являются, на наш взгляд, перспективными для использования в качестве активной области лазеров, работающих в инфракрасной области спектра [16]. Упорядочение точек в ряды перспективно также для создания лазеров с распределенной обратной связью.

В заключение авторы выражают благодарность В.Н. Петрову, Ю.Б. Самсоненко, В.Б. Губанову и Н.К. Полякову за помощь в проведении ростовых экспериментов и Е.П. Мусихиной за СТМ измерения.

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. Nötzel, N.N. Ledentsov, L. Däweritz, M. Hohenstein, K. Ploog. Phys. Rev. Lett., **67**, 3812 (1991).
- [5] D. Leonard, M. Krishnamurthy, C.M. Reaves, S.P. Denbaars, P.M. Petroff. Appl. Phys. Lett., **63**, 3203 (1993).
- [6] J.M. Moison, F. Houzay, F. Barthe, L. Leprince, E. Andre, O. Vatel. Appl. Phys. Lett., **64**, 196 (1994).
- [7] 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, Zn.I. Alferov. Proc 22 th Int. Conf. on Physics of Semicond. (Vancouver, Canada, 1994) (в печати).
- [8] G.M. Guryanov, G.E. Cirilin, V.N. Petrov, N.K. Polyakov, A.O. Golubok, S. Yu. Tzipishev, E.P. Musikhina, V.B. Gubanov, Yu.B. Samsonenko, N.N. Ledentsov. Surf. Sci. (в печати).
- [9] Г.М. Гурьянов, Г.Э. Пырлин, В.Н. Петров, Ю.Б. Самсоненко, В.Б. Губанов, Н.К. Поляков, А.О. Голубок, С.Я. Типисев, Е.П. Мусихина, Н.Н. Леденцов. ФТП (принято к печати).

- [10] P.D. Wang, N.N. Ledentsov, C.M. Sotomayor Torres, P.S. KopéV, V.M. Ustinov. Appl. Phys. Lett., **64**, 1526 (1994).
- [11] H. Yamaguchi, M. Kawashima, Y. Horikoshi. Appl. Surf. Sci., **33/34**, 406 (1988).
- [12] J.M. Gerard, J.Y. Marzin, B. Jusserand. J. Cryst. Growth, **111**, 205 (1991).
- [13] А.Г. Филаретов, Г.Э. Пырлин. ФТТ, **33**, 1329 (1991).
- [14] Г.М. Гурьянов, Н.Н. Леденцов, В.Н. Петров, Ю.Б. Самсоненко, Г.Э. Пырлин, А.Г. Филаретов. Письма ЖТФ, **19**, 64 (1993).
- [15] A.O. Golubok, S.Ya. Tipsishev, G.E. Cirlin, G.M. Guryanov, V.N. Petrov. *Ext. Abstracts 7 th Int. Conf. on Vacuum Microelectron.* (Grenoble, France, 1994) p. 362.
- [16] 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).

Редактор В.В. Чалдышев

InAs/GaAs quantum dots grown by the submonolayer migration-enhanced epitaxy method

G.E. Cirlin, A.O. Golubok, S.Ya. Tipsishev, N.N. Ledentsov[†], G.M. Guryanov

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
