

06

Формирование массивов GaAs нитевидных нанокристаллов на подложке Si(111) методом магнетронного осаждения

© И.П. Сошников, В.Г. Дубровский, Н.В. Сибирев, В.Т. Барченко,
А.В. Веретеха, Г.Э. Цырлин, В.М. Устинов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
Научно-образовательный комплекс „Санкт-Петербургский
физико-технический научно-образовательный центр РАН“
Институт аналитического приборостроения РАН, С.-Петербург
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет „ЛЭТИ“
E-mail: ipsosh@beam.ioffe.rssi.ru

Поступило в Редакцию 7 февраля 2006 г.

Продемонстрирована возможность формирования GaAs нитевидных нанокристаллов (ННК) на подложках Si(111) методом магнетронного осаждения. Показано, что характерная длина ННК изменяется пропорционально эффективной толщине осаждаемого материала и обратно пропорционально размерам поперечного размера вершины. Полученные результаты объясняются в рамках диффузионной модели роста ННК.

PACS: 81.07.Bc

Массивы нитевидных нанокристаллов (ННК) полупроводниковых материалов являются перспективным объектом для различных приложений, в частности, в опто- и микроэлектронике, а также для создания эмиссионных катодов, сорбционной хроматографии органических веществ и соединений и т.д. [1,2]. Как правило, такие структуры получают либо методом молекулярно-пучковой эпитаксии [2–6], либо методом химического газотранспортного осаждения [1,7–9], которые отличает относительно высокая стоимость ростового процесса и/или проблемы экологической безопасности. Ранее неоднократно наблюдалось образование ННК при ионно-плазменной и ионно-лучевой бомбардировке поверхности [10–14]. Возможность совмещения опто- и микроэлектронных

приборов на кремниевой подложке делает актуальной задачу поиска альтернативных экологически чистых и экономичных методов получения массивов ННК. Поэтому целью настоящей работы является исследование возможности получения арсенид-галлиевых массивов ННК на поверхности кремния методом магнетронного осаждения. Настоящая работа является продолжением исследований, начатых в [15].

Эксперименты по осаждению полупроводниковых материалов GaAs проводились на установке ВУП-5М, оснащенной магнетроном постоянного тока и испарителем резистивного типа для напыления сверхтонких слоев Au. Для проведения экспериментов был сконструирован перемещаемый столик образцов, позволяющий нагревать образцы до температуры $T \sim 800^\circ\text{C}$. В качестве мишеней в магнетроне использовались пластины арсенида галлия АГЧК-3. Остаточное давление в рабочей камере составляло не более $3 \cdot 10^{-6}$ Торг и возрастало до $(2-5) \cdot 10^{-2}$ Торг в условиях натекания аргона при работе магнетрона. Чистота рабочего газа аргона была не хуже чем 99.99%. В ряде экспериментов напыление Au проводилось на другой установке ВУП-5, оснащенной электронными испарителями. В качестве подложек использовались пластины кремния КДБ-7.5 с ориентацией поверхности (111). С целью исключения влияния поверхностных загрязнений образцы подвергались предростовой химической обработке по методу Шираки [16].

Процесс формирования ННК проводился по следующей основной схеме. После откачки камеры образцы нагревались до температуры 580°C и на их поверхность методом магнетронного распыления осаждался буферный слой GaAs с толщиной 50–150 nm. Затем образцы охлаждались до температуры примерно 250°C и напылялся активационный слой Au толщиной порядка 1 nm. После этого проводился напуск аргона до рабочего давления магнетрона. После напуска газа поджигался разряд магнетронной плазмы. Одновременно с этим образцы нагревались до температуры 625°C и выдерживались около 1 min в положении столика без магнетронного напыления. Далее температура снижалась до рабочей, и столик с образцами перемещался в положение над магнетроном, при котором обеспечивается напыление материала мишени. Осаждение слоя полупроводника осуществлялось до достижения эффективной толщины, варьируемой в зависимости от задачи в пределах от 0.1 до 1 μm . После выполнения программы эксперимента магнетронной разряд и нагрев образцов выключались, а образцы выдерживались в потоке аргона для охлаждения до температуры не

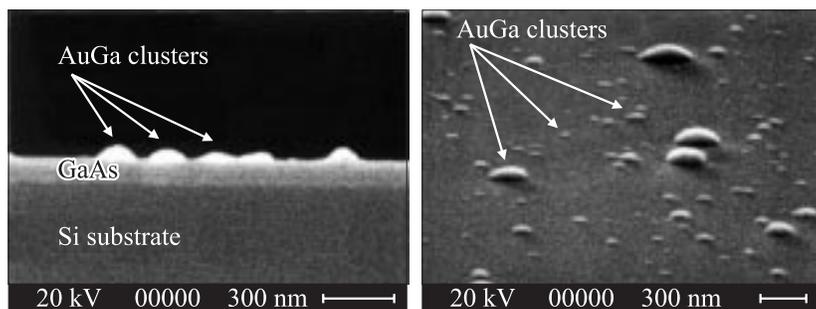


Рис. 1. Поверхностная морфология образца, выращенного без буферного слоя GaAs в поперечном сечении (слева) и изометрии (справа).

выше 50°C . Помимо указанной основной схемы роста ННК, несколько образцов были выполнены по схеме с исключением стадии осаждения буферного слоя.

Исследование поверхностной морфологии проводилось методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе CamScan S4-90FE с полевым катодом. РЭМ исследования на образцах без буферного слоя GaAs и с осаждением основного слоя GaAs толщиной до 500 nm показывают, что на них наблюдается образование лишь кластеров AuGa с латеральными размерами от 10 до 1000 nm и не наблюдается формирование ННК. Пример морфологии массива ННК приведен на рис. 1.

На рис. 2 приведен пример поверхностной морфологии, которая формируется при использовании основной схемы эксперимента роста, включающей осаждение буферного слоя GaAs. Видно, что на поверхности формируется плотный массив ННК с характерной формой в виде усеченных конусов с малым углом раствора (менее 10°) и преимущественным направлением осей, отличающимся от направления кристаллографической оси подложки (111) приблизительно на $15, 25$ и 36° в трех плоскостях (110). Плотность ННК составляет величину порядка $10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-2}$, в зависимости от условий эксперимента. Характерные размеры ННК составляют от 300 до 10 000 nm в длину и около 200 nm в поперечнике у основания соответственно. Поперечные размеры вершины ННК составляют 10–200 nm. Отметим, что при детальном

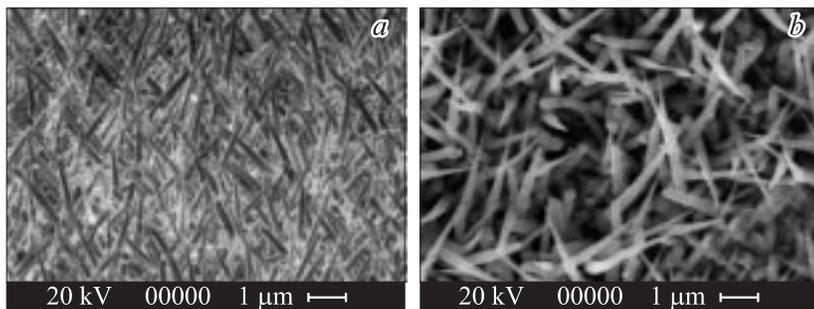


Рис. 2. РЭМ изображение в изометрии (*a*) и „вид сверху“ (*b*) образца со сформированным массивом GaAs ННК в результате осаждения 1 nm Au и 160 nm GaAs при температуре 575°C на поверхности Si (111).

исследованиях формы ННК наблюдается огранка, по-видимому, по плоскостям (110). Последнее свидетельствует о кристаллической структуре ННК и подтверждается данными дифракции быстрых электронов на отражение [15,17].

Сопоставление полученных результатов показывает, что характерная длина ННК может превосходить эффективную толщину напыленного слоя полупроводника более чем в 10 раз.

На рис. 3 приведены результаты определения элементов морфологии на одном из образцов с GaAs ННК, выращенными на поверхности Si(111). Отметим, что ННК, выращенные на подложках Si, имеют большую длину, чем в случае роста на подложках GaAs при тех же размерах капель и условиях роста [15]. Сопоставление характерных размеров ННК на различных образцах показывает, что длина ННК зависит от эффективной толщины осажденного слоя GaAs линейным образом в исследованном диапазоне. Экспериментальная зависимость длины ННК L от диаметра их вершины D и толщины осаждения GaAs H хорошо укладывается на кривую, являющуюся простейшим вариантом теоретической зависимости при диффузионном росте ННК [6,17]

$$L = \frac{D_*}{D} H. \quad (1)$$

Толщина осажденного GaAs H в рассматриваемом ростовом эксперименте равна 210 nm. Величина D_* в (1) по физическому смыслу есть

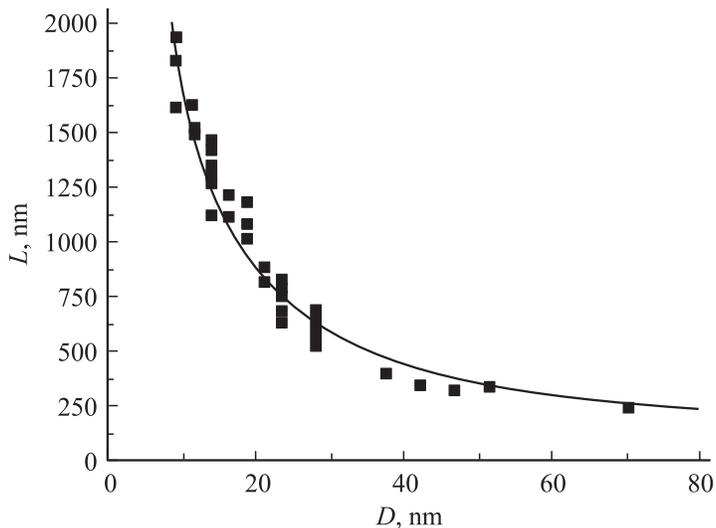


Рис. 3. Зависимость длины ННК от диаметра их вершин. GaAs ННК выращены на подложке GaAs(111)В в результате осаждения 1 nm Au и 210 nm GaAs при температуре 575°C. Квадраты — обработка РЭМ изображения образца, сплошная линия — формула (1) при $R_* = 100$ nm.

линейный размер эффективной полосы „сбора“ адатомов с поверхности. Наилучшее соответствие выражения (1) и экспериментальной кривой достигается при $D_* = 83$ nm. При этом для самых тонких ННК диаметра $D \sim 10$ nm диффузионный вклад в скорость роста ННК много больше адсорбционного [7,18], поэтому длина самых тонких ННК на рис. 3 (~ 2000 nm) почти в 10 раз превосходит H .

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность получения массивов GaAs ННК на подложках Si(111) с плотностью до 10^9 см $^{-2}$ и характерными размерами в длину от 300 до 10 000 nm при диаметре вершины от 10 до 200 nm. Характерная длина ННК изменяется пропорционально эффективной толщине осаждаемого материала и обратно пропорционально поперечному размеру вершины. На основе анализа полученных зависимостей размеров делается вывод о диффузионном механизме формирования ННК в рассматриваемом случае.

Авторы признательны В. Бусову и С. Трошкову за выполненные РЭМ исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и научных программ РАН.

Список литературы

- [1] Hiruma K., Yazawa M., Haraguchi K., Ogawa K., Katsuyama T., Koguchi M., Kakibayashi H. // *J. Appl. Phys.* 1993. V. 74. P. 3162.
- [2] Ohlsson B.J., Bjork M.T., Magnusson M.H., Deppert K., Samuelson L., Wallenberg L.R. // *Appl. Phys. Lett.* 2001. V. 79. P. 3335.
- [3] Тонких А.А., Цырлин Г.Э., Самсоненко Ю.Б., Сошников И.П., Устинов В.М. // *ФТП.* 2004. Т. 38. С. 1256.
- [4] Сошников И.П., Тонких А.А., Цырлин Г.Э., Самсоненко Ю.Б., Устинов В.М. // *Письма в ЖТФ.* 2004. Т. 30. В. 18. С. 28.
- [5] Сошников И.П., Цырлин Г.Э., Тонких А.А., Самсоненко Ю.Б., Дубровский В.Г., Устинов В.М., Горбенко О.М., Litvinov D., Gerthsen D. // *ФТТ.* 2005. Т. 47. С. 2121.
- [6] Dubrovskii V.G., Girlin G.E., Soshnikov I.P., Sibirev N.V., Tonkikh A.A., Samsonenko Yu.B., Ustinov V.M. // *Phys. Rev. B.* 2005. V. 71. P. 205325.
- [7] Гиваргизов Е.И. // *Кристаллография.* 1975. Т. 20. С. 812.
- [8] Поляков С.М., Лаверко Е.Н., Марахонов В.М. // *Кристаллография.* 1970. Т. 15. С. 598.
- [9] Wagner R.S., Ellis W.C. // *Appl. Phys. Lett.* 1964. V. 4. P. 89.
- [10] Malherbe Crit J.B. // *Rev. in Solid State and Mat. Sci.* 1994. V. 19 (3). P. 1.
- [11] Сошников И.П., Луцев А.В., Гаевский М.Э., Роткина Л.Г., Нестеров С.И., Кулагина М., Барченко В.Т., Калмыкова И.П., Ефимов А.А., Горбенко О.М. // *ЖТФ.* 2001. Т. 71. В. 7. С. 106.
- [12] Wada O. // *J. Phys. D.* 1984. V. 17. P. 2429.
- [13] Беграмбеков Л.Б. // *Итоги науки и техники. Сер. Пучки заряженных частиц и твердое тело.* М.: ВИНТИ РАН, 1993. В. 7. С. 4.
- [14] *Фундаментальные и прикладные аспекты распыления твердых тел /* Ред. Е.С. Машкова. М.: Мир, 1989. 389 с.
- [15] Сошников И.П. // *Письма в ЖТФ.* 2005. Т. 31. В. 15. С. 29.
- [16] Ishizaka A., Shiraki Y. // *J. Electrochem. Soc.* 1986. V. 133 (4). P. 666.
- [17] Цырлин Г.Э., Дубровский В.Г., Сибирев Н.В., Сошников И.П., Самсоненко Ю.Б., Тонких А.А., Устинов В.М. // *ФТП.* 2005. Т. 39. С. 587.
- [18] Dubrovskii V.G., Sibirev N.V. // *Phys. Rev. E.* 2004. V. 70. P. 031604.