

06

Молекулярно-пучковая эпитаксия (Ga,Mn)As нитевидных кристаллов на поверхности GaAs(100)

© А.Д. Буравлев, Г.О. Абдрашитов, Г.Э. Цырлин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Санкт-Петербургский Академический университет —
Научно-образовательный центр нанотехнологий РАН
Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург
E-mail: bour@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 25 апреля 2012 г.

Методом молекулярно-пучковой эпитаксии были впервые получены массивы нитевидных кристаллов (Ga,Mn)As на подложке GaAs(100) при температуре роста 485°C. Из данных картин дифракции быстрых электронов на отражение установлено, что ННК в этой системе формируются в кубической кристаллографической фазе.

В последнее время наблюдается неослабевающий интерес к одномерным наноструктурам — нитевидным кристаллам (ННК), выращенным с использованием различных технологических методов, в том числе и молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). Этот интерес обусловлен уникальными свойствами подобных структур, связанных с малым количеством структурных дефектов, а также с возможностью роста ННК на подложках с большим рассогласованием по параметрам решетки. Как правило, рост ННК проходит по так называемому механизму пар–жидкость–кристалл с участием катализатора на основе различных металлов. Наиболее широко используется для активации роста ННК Au [1–3]. Возможен и самокаталитический рост ННК, т.е. рост с использованием материалов, входящих в состав ННК. Так, например, в случае роста ННК GaAs катализатором может служить Ga [4,5]. Также недавно было сообщено об успешном синтезе ННК (Ga, Mn)As на подложках типа GaAs(111)В при использовании Mn в качестве катализатора [6].

Следует отметить, что полупроводниковые соединения на основе (Ga,Mn)As потенциально являются одними из наиболее перспективных

материалов для спинтронных приложений, так как они могут проявлять свойства, присущие не только полупроводникам, но и магнитным материалам. Подобные полупроводники получили название разбавленных магнитных полупроводников. Одна из основных проблем использования подобных материалов заключается в том, что их максимальная температура Кюри пока еще далека от комнатной [7]. Переход к синтезу наноструктур пониженной размерности как двумерных слоев, так и квазидвумерных структур, например ННК, может являться одним из способов решения этой проблемы. В отличие от пленок синтез ННК предоставляет более широкие возможности в плане создания бездефектных структур на расогласованной подложке.

В данной работе нами впервые была продемонстрирована принципиальная возможность синтеза ННК (Ga,Mn)As на подложке GaAs(100). В качестве катализатора использовался Mn — один из компонентов ННК. Ростовые эксперименты проводились на установке МПЭ ЭП1203, оснащенной эффузионными источниками Ga, Mn и тетрамеров As. В работе были использованы подложки GaAs с кристаллографической ориентацией типа (100), готовые к эпитаксии (epi-ready). Подложка крепилась к держателю с помощью индия. Для достоверности полученных результатов выращивалось несколько образцов в идентичных условиях, при этом структурные свойства ННК не менялись.

До стадии формирования ННК проводилась очистка подложки от окисла термическим методом. Контроль за состоянием поверхности осуществлялся методом дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО). Температуры ячеек, используемых в экспериментах, были постоянными и составляли для ячейки галлия 1000°C, мышьяка — 373°C и марганца — 720°C. После завершения процедуры термической очистки подложек при температуре 620°C производилось снижение температуры на 40–50°C и осуществлялся рост буферного слоя GaAs с целью выравнивания поверхности в течение 15 min. Далее температура подложки снижалась еще на 10°C и открывался источник Mn для создания на поверхности подложки нанокластеров, использующихся в качестве зародышей для самокаталитического роста ННК. Время напыления Mn составило 2 min. Непосредственное формирование ННК (Ga, Mn)As происходило после снижения температуры до 485°C и одновременного открытия заслонок источников Ga, As и Mn. Рост осуществлялся в течение 25 min при скорости 1 ML/s. Необходимо отметить, что рост ННК проходил в условиях стабилизации по элементам металлической группы, соотношение потоков As/(Ga, Mn) составляло 0.4. Уже через

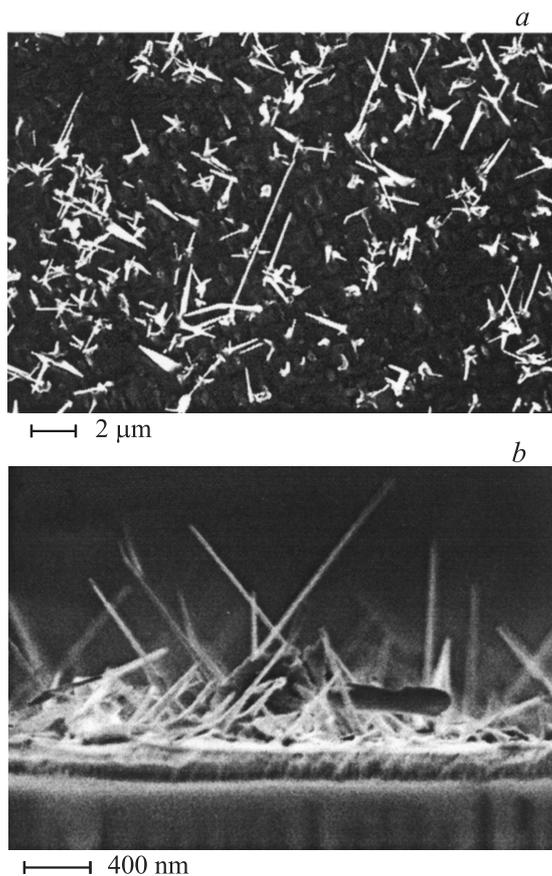


Рис. 2. СЭМ-изображения НК GaMnAs: *a* — поверхность образца, *b* — изображение со скола образца.

Структурные свойства выращенных образцов исследовались методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Из анализа полученных СЭМ-изображений поверхности, представленных на рис. 2, следует, что под углом 54.5° к нормали поверхности наблюдается два основных направления расположения НК. Помимо этого, были обнаружены НК, синтезированные вдоль кристаллографических направле-

ний типа [310] под соответствующими углами 19 и 71° к нормали поверхности с гораздо меньшей поверхностной плотностью. Соотношение ННК в направлении [100] к ННК в направлении [310] составило 15:1. Из анализа изображений можно определить и характерные размеры ННК: длина полученных ННК составила 0.7–1 μm, в их диаметр — 60–70 nm. Отдельные ННК достигали длины 2–3 μm. Поверхностная плотность полученных наноструктур составила ~ 10⁹ см⁻².

Также отметим уменьшение диаметра ННК в направлении роста до величины порядка 20–35 nm у вершины. Данная особенность, по видимому, связана с формированием двумерных островков на боковых гранях ННК вследствие ограничения диффузионной длины атомов Ga адатомами Mn. Подобное поведение наблюдалось при росте ННК GaAs при пониженной температуре эпитаксии [10], что также ограничивало диффузионную длину атомов Ga на боковых гранях ННК.

Отметим, что эквивалентная толщина двумерного слоя GaAs составила 0.45 μm, в то время как высота ННК в 2 и более раза превышает эту величину. Данный факт может свидетельствовать о диффузионном характере роста ННК [11,12].

Таким образом, нами была продемонстрирована возможность формирования ННК GaMnAs на подложке GaAs(100). Установлено, что подобные ННК формируются в кубической кристаллографической фазе. Основными направлениями роста являются [111]. Выявлено, что формирование ННК в данной системе носит диффузионный характер.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (контракты № 02.740.11.0383, 16.740.11.0019 и 14.740.11.0592), различными научными программами РАН, грантами РФФИ и программами FP7 SOBONA и FUNPROB.

Список литературы

- [1] Дубровский В.Г., Цырлин Г.Э., Устинов В.М. // ФТП. 2009. Т. 34. С. 1585.
- [2] 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.
- [3] Tchernycheva M., Cirlin G.E., Patriarche G., Travers L., Zwiller L., Perinetti U., Harmand J.-C. // Nano Lett. 2007. V. 7. P. 1500.
- [4] Cirlin G.E., Dubrovskii V.G., Samsonenko Yu.B., Bouravleuv A.D., Durose K., Proskuryakov Y.Y., Budhikar Mendes, Bowen L., Kaliteevski M.A., Abram R.A., Dagou Zeze // Phys. Rev. B. 2010. V. 82. P. 035 302.

- [5] *Dubrovskii V.G., Cirlin G.E., Sibirev N.V., Jabeen F., Harmand J.C., Werner P.* // Nano Lett. 2011. V. 11. P. 1247.
- [6] *Буравлев А.Д., Цырлин Г.Э., Романов В.В., Баграев Н.Т., Брилинская Е.С., Лебедев Н.А., Новиков С.В., Lipsanen H., Дубровский В.Г.* // ФТП. 2012. Т. 46. С. 188.
- [7] *Chen L., Yan S., Xu P.F., Lu J., Wang W.Z., Deng J.J., Qian X., Ji Y., Zhao J.H.* // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. P. 182 505.
- [8] *Сошников И.П., Цырлин Г.Э., Тонких А.А., Неведомский В.В., Самсоненко Ю.Б., Устинов В.М.* // ФТТ. 2007. Т. 49. Т. 1373.
- [9] *Cirlin G.E., Dubrovskii V.G., Soshnikov I.P., Sibirev N.V., Samsonenko Yu.B., Bouravleuv A.D., Harmand J.C., Glas F.* // Phys. Status Solidi RRL. 2009. V. 3. P. 112.
- [10] *Dubrovskii V.G., Sibirev N.V., Cirlin G.E., Tchernycheva M., Harmand J.C., Ustinov V.M.* // Phys. Rev. E. 2008. V. 77. P. 031 606.
- [11] *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.
- [12] *Dubrovskii V.G., Cirlin G.E., Soshnikov I.P., Tonkikh A.A., Sibirev N.V., Samsonenko Yu.B., Ustinov V.M.* // Phys. Rev. B. 2005. V. 71. P. 205 325.