

07:08

## Квантовые точки InAs/GaAs, выращенные капельным методом в условиях мос-гидридной эпитаксии

© М.А. Сурнина<sup>1</sup>, Р.Х. Акчурина<sup>1</sup>, А.А. Мармалюк<sup>2,3</sup>,  
Т.А. Багаев<sup>3</sup>, А.Л. Сизов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт тонких химических технологий Московского технологического университета, Москва

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, Москва

<sup>3</sup> ООО „Сигм Плюс“, Москва

<sup>4</sup> НПО „Орион“, Москва

E-mail: rakchur@mail.ru

Поступило в Редакцию 4 марта 2016 г.

Представлены результаты формирования квантовых точек (КТ) InAs на подложках GaAs (100) капельным методом с использованием в качестве прекурсоров триметилиндия (TMIn) и арсина (AsH<sub>3</sub>). Процессы роста осуществляли при температурах 230–400°C в реакторе установки МОС-гидридной эпитаксии (МОСГЭ) горизонтального типа с использованием высокочистого водорода в качестве газа-носителя. Приведены данные по влиянию температуры процесса на геометрические размеры и плотность массива КТ и результаты исследования низкотемпературной фотолюминесценции полученных образцов.

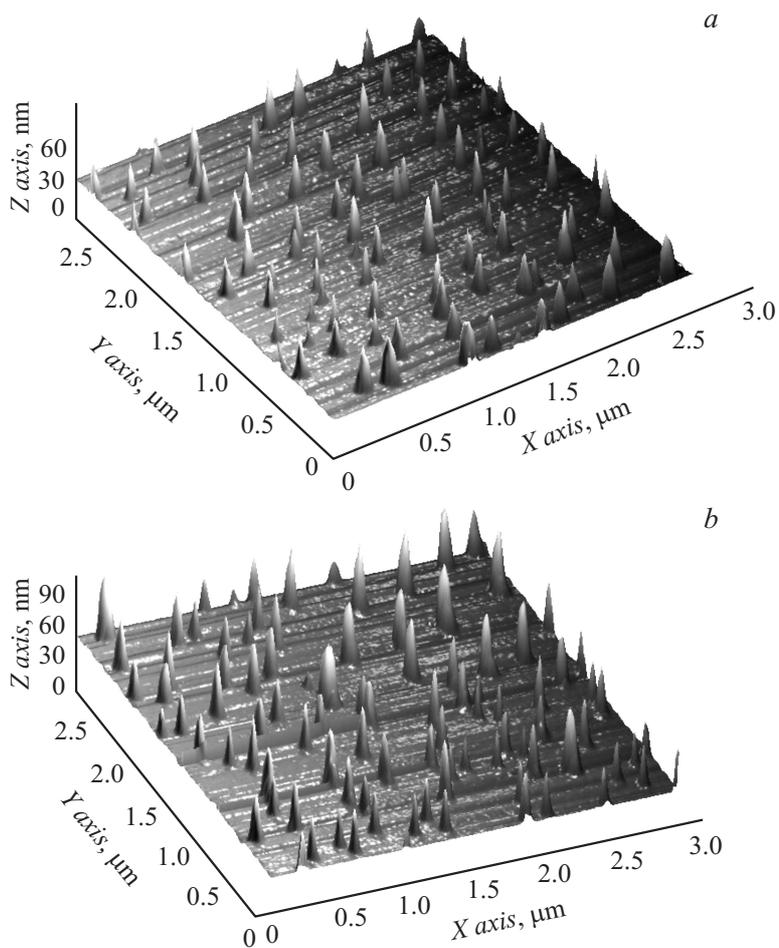
Капельный метод формирования квантовых точек (КТ) полупроводников A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>, основанный на осаждении наноразмерных капель элемента III группы с последующим насыщением капель элементом V группы, имеет потенциальные преимущества перед традиционным методом, основанным на механизме Странского–Крастанова. К их числу относятся возможность создания КТ независимо от степени рассогласования параметров кристаллических решеток сопрягаемых материалов и более гибкие возможности управления геометрическими размерами и плотностью массива КТ. Метод имеет относительно недавнюю историю. Так, в [1–4] исследованы возможности получения массивов КТ капельным методом для случая как изопериодных, так и рассогласованных по периоду кристаллической решетки гетероструктур

в условиях молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). Имея в виду перспективы масштабного производства гетероструктур с массивами КТ для оптоэлектронных применений, представляет несомненный интерес разработка указанного метода применительно к существенно более производительному технологическому процессу МОСГЭ.

В данной работе представлены результаты исследований, направленных на решение указанной задачи. Они являются продолжением ранее начатых нами работ [5–7] по формированию гетероструктур с КТ в системе InAs/GaAs. Приведено описание условий формирования массива КТ InAs на подложках GaAs(100) в реакторе горизонтального типа. С использованием метода атомно-силовой микроскопии (АСМ) исследованы геометрические характеристики КТ, сняты спектры низкотемпературной фотолюминесценции выращенных гетероструктур.

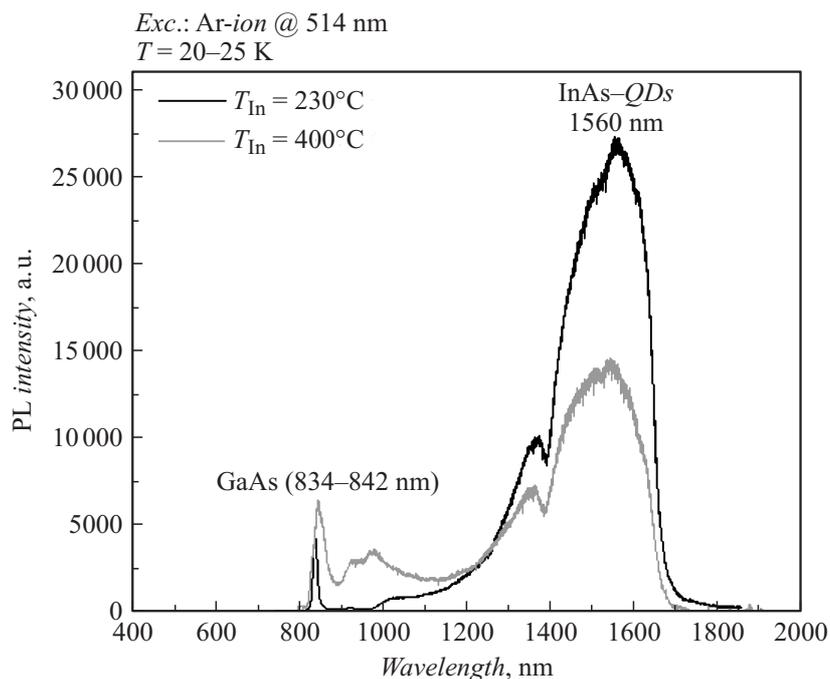
Эксперименты по росту КТ проводили на установке МОС-гидридной эпитаксии „Сигмос-130“ с реактором горизонтального типа при пониженном давлении ( $\sim 4 \cdot 10^4$  Па). В качестве источников для роста КТ использовали триметилиндия (ТМIn) и арсин, подаваемые в реактор в потоке высокочистого водорода. На начальном этапе на подвергнутой стандартной обработке подложку GaAs(100) *n*-типа проводимости при 580°C наращивали буферный слой GaAs с использованием триметилгаллия и арсина. Затем при пониженной температуре последовательно осуществляли осаждение наноразмерных капель индия и насыщение их мышьяком путем пиролиза ТМIn и арсина соответственно. Исследование рельефа поверхности полученных образцов проводили с использованием атомно-силового микроскопа NTEGRA Maximus фирмы NT-MDT при комнатной температуре. Спектры фотолюминесценции образцов были сняты при  $T = 20–25$  К на спектрометре LS-55 фирмы Perkin Elmer при возбуждении излучения Ar<sup>+</sup>-лазером ( $\lambda = 514$  nm).

При формировании КТ InAs для исключения растекания осаждаемых капель In целесообразно поддерживать низкую температуру подложки, обеспечивающую более высокое поверхностное натяжение расплава индия. В условиях МОСГЭ ограничением для использования низкотемпературных режимов эпитаксии является относительно высокая температурная устойчивость используемых источников. По данным, приведенным в [8], в гомогенных условиях термическое разложение ТМIn в атмосфере водорода при  $T \leq 250^\circ\text{C}$  снижается практически до нуля. Наличие подложки может оказывать каталитическое влияние



**Рис. 1.** АСМ-изображения поверхности гетероструктур InAs/GaAs с КТ, полученных при температуре осаждения капель индия ( $T_{\text{in}}$ ): *a* — 230°C; *b* — 400°C.

и способствовать снижению температуры пиролиза. Результаты выполненных нами ранее экспериментов подтвердили такую возможность [7]. Осложняющим фактором на этапе насыщения капель индия мышьяком



**Рис. 2.** Спектры фотолуминесценции образцов гетероструктур InAs/GaAs с массивами КТ, полученных при температуре осаждения капель индия ( $T_{In}$ ) 230 и 400°С.

является относительно большая термическая устойчивость арсина в сравнении с TMIп. Квантово-химическое моделирование процесса пиролиза арсина при контакте с поверхностями GaAs и расплавленного индия показало, что они также могут оказывать каталитическое влияние на термическое разложение AsH<sub>3</sub>; при этом разложение арсина с большей вероятностью будет протекать на поверхности капель индия, а не на поверхности GaAs [9], что благоприятствует формированию КТ InAs.

Указанные результаты были учтены в данной работе при выборе режимов формирования КТ. Температурный интервал осаждения наноразмерных капель индия изменяли в пределах 230–400°С при постоян-

ных значениях расхода  $\text{TMIп}$  и времени осаждения. Насыщение капель индия мышьяком производили путем пиролиза арсина при  $400^\circ\text{C}$  в течение  $15 \text{ min}$  с подачей  $20 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Проведение серии экспериментов по изучению влияния температуры осаждения индия на размеры и плотность массива КТ привело к следующим результатам.

Снижение этой температуры в указанном диапазоне вызывало уменьшение геометрических размеров КТ в среднем от  $35\text{--}40$  до  $20\text{--}25 \text{ nm}$  по высоте и от  $130\text{--}150$  до  $80\text{--}100 \text{ nm}$  по основанию. При этом не наблюдалось существенного влияния температуры на плотность массива КТ InAs, которая составляла  $\sim 8 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ . АСМ-изображения образцов с КТ InAs, полученных при температурах осаждения индия  $400$  и  $230^\circ\text{C}$ , представлены на рис. 1.

На рис. 2 представлены спектры фотолюминесценции двух образцов, снятые при  $T = 20\text{--}25 \text{ K}$ . Пики в коротковолновой области и при  $\lambda \approx 1560 \text{ nm}$  отвечают излучению GaAs и КТ InAs соответственно. Наличие небольшого пика в области  $\lambda \approx 1350 \text{ nm}$  может быть связано с образованием небольшого смачивающего слоя, возникающего вокруг отдельных капель индия при их растекании в результате увеличения температуры на этапе перехода ко второму этапу формирования КТ. Другой возможной причиной образования коротковолнового плеча может быть попадание небольшого количества галлия в капли индия на границе с подложкой GaAs за счет подрастворения последней в процессе формирования КТ.

На рис. 2 видно, что интенсивность пика от образца, полученного при температуре осаждения индия  $230^\circ\text{C}$ , значительно выше. Это может быть связано с тем, что меньшие по геометрическим размерам КТ, полученные при более низких температурах, характеризуются меньшей дефектностью, вызванной рассогласованием параметров кристаллической решетки InAs и GaAs.

Таким образом, в результате проведенных исследований капельным методом в условиях МОС-гидридной эпитаксии получены гетероструктуры InAs/GaAs с массивами квантовых точек плотностью  $\sim 8 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ . Установлено, что снижение температуры осаждения индия с  $400$  до  $230^\circ\text{C}$  приводит к уменьшению геометрических размеров КТ и возрастанию интенсивности их фотолюминесценции.

Авторы благодарят Жигунова Д.М. за помощь в проведении люминесцентных исследований.

## **Список литературы**

- [1] *Kim J.S., Koguchi N.* // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 85. N 24. P. 5893–5895.
- [2] *Wang Z.M., Liang B., Sablon K.A.* et al. // Small. 2007. V. 3. Iss. 2. P. 235–238.
- [3] *Alonso-González P., Alén B., Fuster D.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. P. 163 104.
- [4] *Wang Z.M., Holmes K., Mazur Y.I.* et al. // Nanoscale Res. Lett. 2006. N 1. P. 57–61.
- [5] *Акчури́н Р.Х., Богинская И.А., Вагапова Н.Т., Мармалюк А.А., Панин А.А.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 1. С. 10–15.
- [6] *Акчури́н Р.Х., Богинская И.А., Вагапова Н.Т., Мармалюк А.А., Ладугин М.А.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 15. С. 82–88.
- [7] *Акчури́н Р.Х., Берлинер Л.Б., Богинская И.А., Гордеев Е.Г., Егорова Е.В., Мармалюк А.А., Ладугин М.А., Сурнина М.А.* // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 1. С. 79–85.
- [8] *Stringfellow G.B.* Organometallic Vapor Phase Epitaxy: Theory and Practice. London: Acad. Press., 1999. P. 228.
- [9] *Гордеев Е.Г., Акчури́н Р.Х., Сурнина М.А.* // ЖФХ. 2015. Т. 89. № 1. С. 1–4.