

06

## Квантовые точки InSb/InAs, полученные методом жидкофазной эпитаксии

© К.Д. Моисеев, Я.А. Пархоменко, А.В. Анкудинов, Е.В. Гущина,  
М.П. Михайлова, А.Н. Титков, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

E-mail: mkd@iropt2.ioffe.rssi.ru

Поступило в Редакцию 3 ноября 2006 г.

Мы сообщаем о первых результатах по выращиванию InSb/InAs квантовых точек методом жидкофазной эпитаксии и структурных исследований их характеристик методами сканирующей зондовой микроскопии и атомно-силовой микроскопии. Показано, что плотность, форма и размеры нанобъектов зависят от температуры выращивания, скорости охлаждения и времени контакта раствор–расплав–подложка. Получены однородные массивы квантовых точек InSb на подложках InAs(100) в интервале температур  $T = 420\text{--}445^\circ\text{C}$ , со средними размерами: высотой  $H = 3.4 \pm 1\text{ nm}$ , радиусом  $R = 27.2 \pm 7.5\text{ nm}$  и плотностью до  $1.9 \cdot 10^{10}\text{ cm}^{-2}$ .

PACS 73.21.La, 81.15.Lm

**1. Введение.** Создание нульмерных нанобъектов — полупроводниковых квантовых точек (КТ) представляет интерес как для фундаментальной физики, так и для потенциальных применений в электронных и оптоэлектронных приборах [1]. Самоорганизующиеся квантовые точки могут быть получены на основе многих полупроводниковых материалов. Большинство исследований посвящено выращиванию и исследованию структурных и оптических свойств квантовых точек в системах InAs/GaAs, InGaAs/GaAs, GaSb/GaAs, InP/GaAs, InAs/InP, Ge/Si [2–5].

Конечной целью этих исследований являлось создание лазеров [6] и фотодиодов [7] для спектрального диапазона  $1.1\text{--}1.3\ \mu\text{m}$ , перспективного для задач волоконно-оптической связи. В последние годы возник также интерес к использованию КТ для биологии и медицины [8,9]. Структуры с квантовыми точками выращивались главным образом методами молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) или газофазной

эпитаксией из металлоорганических соединений (МОГФЭ). При этом рост осуществлялся по методу Странского–Крастанова при использовании подложек с постоянной решетки, существенно отличающейся от постоянной решетки КТ [1,3]. Отметим, что для выращивания массивов КТ в системах InAsSb/InAs и InAs/GaAs использовался также метод жидкофазной эпитаксии [10,11].

Однако для продвижения в инфракрасную область спектра ( $\lambda = 2-5 \mu\text{m}$ ) особый интерес представляют квантовые точки на основе узкозонных материалов InAs и InSb и их соединений (например,  $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}$ ). Актуальной задачей является создание низкопороговых лазеров среднего ИК-диапазона, работающих при комнатной температуре. Такие лазеры имеют обширные применения в системах лазерной диодной спектроскопии высокого разрешения [12] и газового анализа, важных для экологического мониторинга. Квантовые точки InSb/GaSb и InSb/InAs являются перспективными материалами для создания оптоэлектронных приборов среднего ИК-диапазона. Однако до настоящего времени лишь небольшое число работ посвящено выращиванию таких нанообъектов методами МПЭ [13,14] и МОГФЭ [15], в которых получена люминесценция в области  $\lambda > 2 \mu\text{m}$ .

В настоящей работе мы сообщаем о первых результатах по выращиванию КТ InSb/InAs методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ).

**2. Эксперимент.** Для выращивания структур с квантовыми точками использовалась стандартная установка для ЖФЭ на базе диффузионной печи СДО-125/4. Эпитаксиальное выращивание проводилось в атмосфере водорода в графитовой кассете „пенального“ типа в горизонтальном кварцевом реакторе. В качестве подложек нами использовались монокристаллические пластины InAs, ориентированные в кристаллографической плоскости (100). Разница в постоянных кристаллической решетки InSb и InAs составляла 7.2%.

Выращивание квантовых точек InSb на подложках InAs проводилось из индиевых растворов-расплавов. В качестве шихты использовались бинарное соединение InSb и In чистотой 99.999 mass.% в элементарном виде. Состав шихты для выращивания для всех образцов был одинаковый. Эксперименты по эпитаксиальному выращиванию проводились в температурном диапазоне  $420 \div 445^\circ\text{C}$  при скорости охлаждения системы  $0.3 \text{ grad/min}$ . Рост КТ осуществлялся в процессе протаскивания подложки под раствором-расплавом при достижении заданной

**Таблица 1.** Результаты экспериментов в зависимости от температуры контакта при скорости охлаждения 0.3 K/min

Номер образца	Температура контакта, °C	Концентрация квантовых точек $n$ ( $\times 10^{10}$ , $\text{cm}^{-2}$ )	Средняя высота квантовых точек $H$ , nm
MP4/1	420	1.9	2.7
MP3/1	430	1.0	3.4
MP6/1	435	0.9	3.6
MP5/1	440	0.7	3.6
MP7/1	445	0.1	9.8

**Таблица 2.** Результаты экспериментов в зависимости от времени контакта раствора-расплава с подложкой InAs при постоянной температуре контакта и скорости охлаждения 0.6 grad/min

Номер образца	Температура контакта, °C	Концентрация квантовых точек $\times 10^{10}$ , $\text{cm}^{-2}$	Средняя высота квантовых точек $H$ , nm	Технология контакта
MP1/1	425	1.2	1.9	Протаскивание
MP2/1	425	1.3	2.6	Время контакта 2 s

температуры. Результаты экспериментов в зависимости от условий выращивания приведены в табл. 1 и 2.

Структурные исследования выращенных нанобъектов были проведены методами сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ), развитыми в работах [16,17]. Методами СЗМ были изучены особенности рельефа, а также локальная проводимость поверхностей образцов монокристаллических шайб InAs с выращенными в разных технологических условиях массивами КТ InSb. Исследования велись на приборах Ntegra-Aura и Solver P47H российской компании НТ-МДТ. Распределения объектов по размерам анализировались с помощью разработанной в ФТИ им. Иоффе программы статистической обработки SPM-Image Magic.

Из первичного осмотра поверхности выращенных структур можно сказать, что наиболее чистые образцы (под „чистыми“ будем понимать полное отсутствие каких-либо капель раствора-расплава на поверхности образца) были получены в температурном диапазоне 430–440°C. При более низких температурах роста наблюдалось частичное удаление раствора-расплава, часть поверхности занимали мелкие или крупные макроскопические капли на основе атомарного индия.

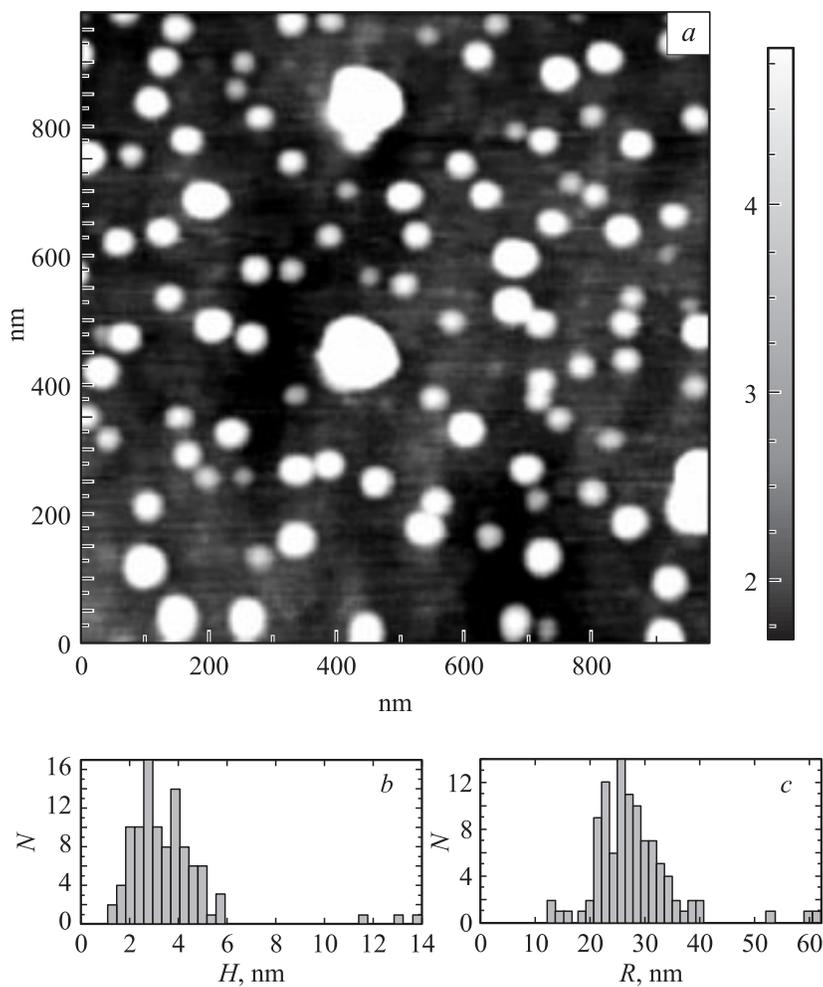
На рис. 1 приведены результаты исследований морфологии рельефа поверхности образца МР3/1. Обнаруженные на поверхности нанобъекты характеризуются средним значением высоты  $H = 3.4 \pm 1.9$  nm, средним радиусом  $R = 27.2 \pm 7.5$  nm, число объектов в кадре  $N = 102$ , что соответствует средней плотности  $n = 10^{10}$  cm<sup>-2</sup>. Здесь следует отметить, что по данным АСМ точно определяются высота и поверхностная плотность объектов, а размер объектов в плоскости, как правило, завышен из-за инструментального эффекта.

Результаты морфологических исследований особенностей рельефа поверхности для образцов, полученных при различной температуре роста (см. табл. 1), показали, что плотность нанобъектов убывает с повышением температуры роста, в то время как их средняя высота увеличивается. Можно также отметить бимодальность в распределении нанобъектов (существуют два вида объектов — большие и маленькие), однако редкое число больших нанобъектов слабо влияло на среднестатистические параметры выращенных частиц. Наиболее оптимальные данные были получены для образца МР3/1.

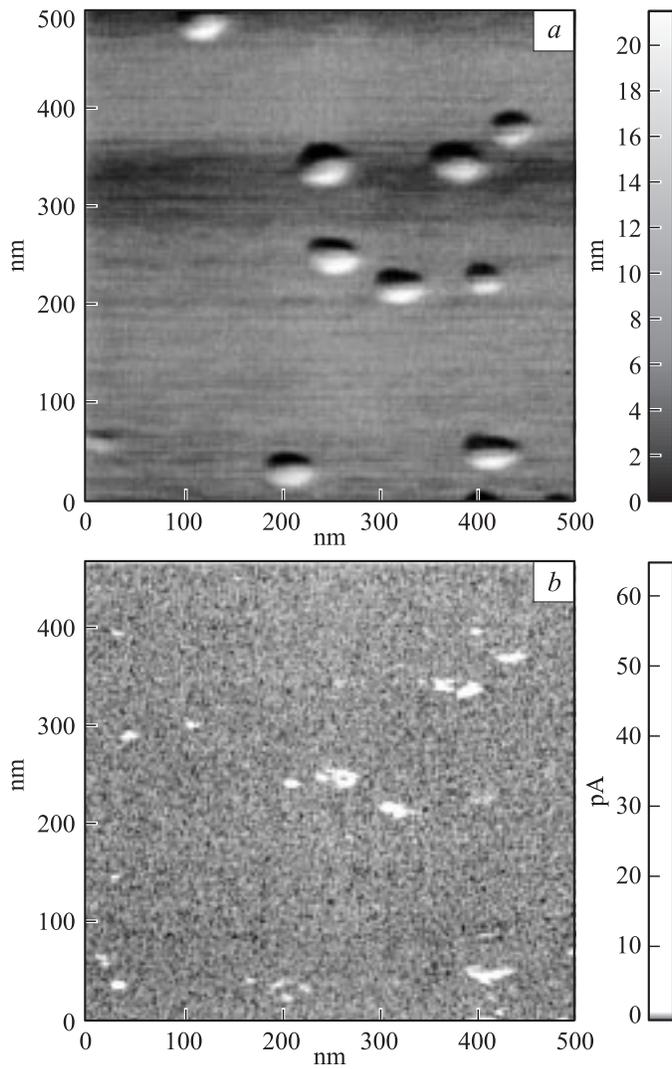
В серии экспериментов при скорости охлаждения 0.6 grad/min получены сравнительные результаты для образцов, выращенных при различных временах контактирования раствора-расплава с подложкой InAs. Для образца МР2/1 время нахождения подложки в стационарном состоянии под раствором-расплавом было увеличено до 2 s.

Как видно из табл. 2, изменение времени контакта практически не повлияло на концентрацию КТ, осажденных на поверхности подложки, однако высота этих частиц по данным СЗМ увеличилась примерно в полтора раза. При этом возросло и число более крупных частиц.

На рис. 2 приведены результаты исследования проводимости нанобъектов. Параллельно данным топографии велись измерения локальных значений сопротивления растекания. Светлым местам на рис. 2, *b* соответствуют большие токи растекания, а значит более низкое сопротивление растекания. Согласно полученным данным, все нанобъекты



**Рис. 1.** Топография участка поверхности для образца МРЗ/1 (*a*) площадью  $1 \mu\text{m}^2$ , полученная методом бесконтактной атомно-силовой микроскопии. Распределение нанобъектов InSb/InAs по высоте  $H$  (*b*) и радиусу  $R$  (*c*).  $N$  — число частиц.



**Рис. 2.** Проводимость нанообъектов InSb, выращенных на подложке InAs. Топография участка поверхности для образца МР3/1 (*a*) площадью  $0.5 \times 0.5 \mu\text{m}^2$  и карта локальной проводимости этого же участка (*b*), полученные методом контактной атомно-силовой микроскопии.

обладают повышенной проводимостью по сравнению с подложкой, что находит простое объяснение. Действительно, транспорт носителей через нанобъекты будет облегчен, если нанобъекты — это квантовые точки из InSb, материала более узкозонного, чем InAs.

Результаты СЗМ исследований показывают, что в процессе роста удалось создать достаточно плотный и однородный по свойствам ансамбль квантово-размерных объектов, обладающих по сравнению с матрицей более высокой проводимостью. Откуда можно заключить, что методом ЖФЭ удастся создать квантовые точки InSb на поверхности InAs.

**3. Заключение.** Таким образом, в результате эксперимента методом ЖФЭ был создан однородный массив квантовых точек InSb на поверхности InAs с размерами  $R = 20\text{--}40\text{ nm}$ , высотой  $H = 2.7\text{--}9.8\text{ nm}$  и плотностью до  $1.9 \cdot 10^{10}\text{ cm}^{-2}$ . Показано, что плотность, форма и размер квантовых нанобъектов зависят от температуры выращивания, скорости охлаждения и времени контакта раствор–расплав–подложка. Характеризация КТ проведена методами СЗМ и АСМ.

Отметим, что по своим параметрам они не уступают аналогичным КТ, выращенным методами МПЭ и МОСГФЭ. Преимуществом ЖФЭ-технологии является ее простота, возможность получения материала с низким уровнем дефектов и дешевизна технологического процесса, что важно для массового производства полупроводниковых приборов на основе гетероструктур с квантовыми точками.

## Список литературы

- [1] Леденцов Н.Н., Устинов В.М., Шукин В.А., Копьев П.С., Алфёров Ж.А., Бимберг Д. // ФТП. 1998. Т. 32. № 4. С. 385–410.
- [2] Moison J.M., Houzay F., Barthe F., Leprince L., Andre E., Vatel O. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. P. 196.
- [3] Hatami F., Ledentsov N.N., Grundmann M. et al. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. P. 656.
- [4] Saint-Giroris G., Patriarche G., Michon A., Beaudoin G., Sagnes I., Smaali K., Troyon M. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 031923.
- [5] Eaglesham D.E., Cerrulo M. // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 65. P. 1020.
- [6] Alphandery E., Nicolas R.J., Mason N.J., Zhang B., Mork P., Booker C.R. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. P. 2041.

- [7] *Bhattacharya P., Stiff A.D., Roberts J., Chakrabarti S.* // Mid-infrared optoelectronics. Springer Series in Optical Sciences / Ed. A. Ritter. 2006. P. 487–513.
- [8] *Warren C.W.* et al. // Science. 1998. V. 281. P. 2016–2018.
- [9] *Зегря Г.Г.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 4. С. 75–81.
- [10] *Krier A., Huang X.L., Hammiche A.* // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. P. 3791.
- [11] *Марончук И.Е., Марончук А.И., Кулоткина Т.Ф., Найденова М.В., Чорный И.В.* // Поверхность. Рентгеновские синхротронные и нейтронные исследования. 2005. № 12. С. 97–101.
- [12] *Именков А.Н., Колчанова Н.М., Кубат П., Мусеев К.Д., Цивили С., Яковлев Ю.П.* // ФТП. 2001. Т. 35. С. 375–379.
- [13] *Deguffrog N., Ramonda M., Baranov A.N., Tournie E.* // Proc. of the 12<sup>th</sup> Int. Conf. Narrow-gap Semicond / Ed. J. Kono and J. Leontin. Toulouse, France, 3–7 July 2005. Conf. ser N 187. P. 93–98.
- [14] *Ivanov S.V., Semenov A.N., Lyublinskaya O.G., Meltzer B.Ya., Solov'ev V.A., Terent'ev Ya.V., Kop'ev P.S.* // Proc. of the 12<sup>th</sup> Int. Conf. Narrow-gap Semicond / Ed. J. Kono and J. Leontin. Toulouse, France, 3–7 July 2005. Conf. ser N 187. P. 89–92.
- [15] *Nicholas R.J., Shields P.A., Child R.A., Li L.J., Alphantery E., Mason N.J., Bumby C.* // Physica E. 2004. V. 20. P. 204–210.
- [16] *Ankudinov A., Maruschak V., Titkov A., Evtichiev V., Kotelnikov E., Egorov A., Riechert H., Huhtinen H., Laiho R.* // Phys. Low-Dim. Struct. 2001. V. 3/4. P. 9–12.
- [17] *Dunaevsky M.S., Ankudinov A.V., Krasilnik Z.F., Lobanov D.N., Novikov A.V., Laiho R., Baranov A.N., Yarekha D.A., Girard P., Titkov A.N.* // Proc. 11<sup>th</sup> Int. Symp. Nanostructures: Physics and Technology. St. Petersburg, Russia. June 23–28, 2003. P. 103–104.