

УДК 538.9

**СТРУКТУРА МАССИВОВ ЛАТЕРАЛЬНО
АССОЦИИРОВАННЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК
В СИСТЕМЕ InGaAs/GaAs, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ
МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ
С СУРФАКТАНТОМ Bi**

А. В. Клековкин, А. А. Руденко, В. И. Цехош, И. П. Казаков

Методами атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии исследовано формирование квантовых точек в системе InGaAs/GaAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии при воздействии потока паров Bi на поверхность роста при различных температурах подложки GaAs. Показано, что Bi действует как сурфактант, повышая температуру возникновения латерально ассоциированных квантовых точек на 100 °C.

Ключевые слова: гетероструктуры InGaAs/GaAs, сурфактант Bi, молекулярно-лучевая эпитаксия, латерально ассоциированные квантовые точки, атомно-силовая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия.

Введение. Получение квантово-размерных объектов на основе системы InGaBiAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) возможно как при низкой температуре подложки $T_{\text{п}}$, когда происходит захват Bi растущим эпитаксиальным слоем [1], так и при достаточно высоком значении $T_{\text{п}}$, когда Bi не входит в растущий слой, но выполняет функцию сурфактанта [2]. Поведение Bi, как сурфактанта исследовано мало, несмотря на то, что это самый тяжёлый элемент в V группе и, следовательно, его встраивание в растущий слой минимально.

В нашей предыдущей статье [2], были представлены результаты исследования процесса молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в парах Bi квантовых точек (КТ) в системе InGaAs/GaAs, проведённого методом дифракции быстрых электронов. В настоящей работе полученные образцы исследованы методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Полученные данные об усло-

виях формирования “молекул” из двойных и многоэлементных латерально ассоциированных КТ (ЛАКТ) представляют интерес в связи с перспективой их использования в квантовом компьютеринге [3]. Для реализаций операций между кубитами нужны системы связанных КТ [4, 5]. Управление туннельной связью при латеральном размещении КТ организовать легче, чем при вертикальном [6].

№	Состав	Толщина, нм
4	$\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As}$	1.6
3	GaAs	100
2	$\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As}$	1.6
1	GaAs	160
Подложка <i>i</i> -GaAs (001)		

Рис. 1: Схема ГС.

Методика эксперимента. Гетероструктуры (ГС) (рис. 1) выращивались методом МЛЭ с твёрдыми молекулярными источниками. Технология подробно изложена в [2]. Формирование КТ в слоях 2 и 4 образца А (контрольный, без Bi), проводилось методом циклического осаждения последовательности InAs (1 с)/ GaAs (1 с) $\times$ 8 при температуре подложки $T_{\text{п}} = 495^\circ\text{C}$. Эффективная толщина полученного слоя состава $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As}$ была 5 монослоёв (МС).

Выращивание слоёв 2 и 4 в образцах В, С, D проводилось в потоке паров Bi при температурах $T_{\text{п}}$, равных 495, 467 и 435°C , соответственно. Верхний слой 4 осаждался для последующего контроля морфологии поверхности напряжённого из-за решёточно-го несоответствия слоя $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As}$. Исследование поверхности ГС методами АСМ и СЭМ проводилось на микроскопах SOLVER P47-SPM-MDT (в полуконтактном режиме) и JEOL 700 1F, соответственно.

Результаты и обсуждение. В зависимости от температуры подложки и наличия потока Bi на поверхности всех образцов наблюдались массивы из КТ с различной структурой элементов (рис. 2): А, D – одиночные КТ классической формы, В – двойные ЛАКТ, С – агрегаты из 2÷8 ЛАКТ.

Сравнение образцов А и В (рис. 2(а) и (b)), выращенных при одинаковой температуре $T_{\text{п}} = 495^\circ\text{C}$, показало, что воздействие потока атомов Bi на растущий слой $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As}$ в образце В привело к формированию массива двойных ЛАКТ. В экспериментах при более низкой $T_{\text{п}} = 467^\circ\text{C}$ и в потоке Bi образовались многоэлементные ЛАКТ (образец С), а при дальнейшем снижении $T_{\text{п}}$ до 435°C наблюдались одиночные КТ, но более мелкие, чем в образце А при $T_{\text{п}} = 495^\circ\text{C}$.

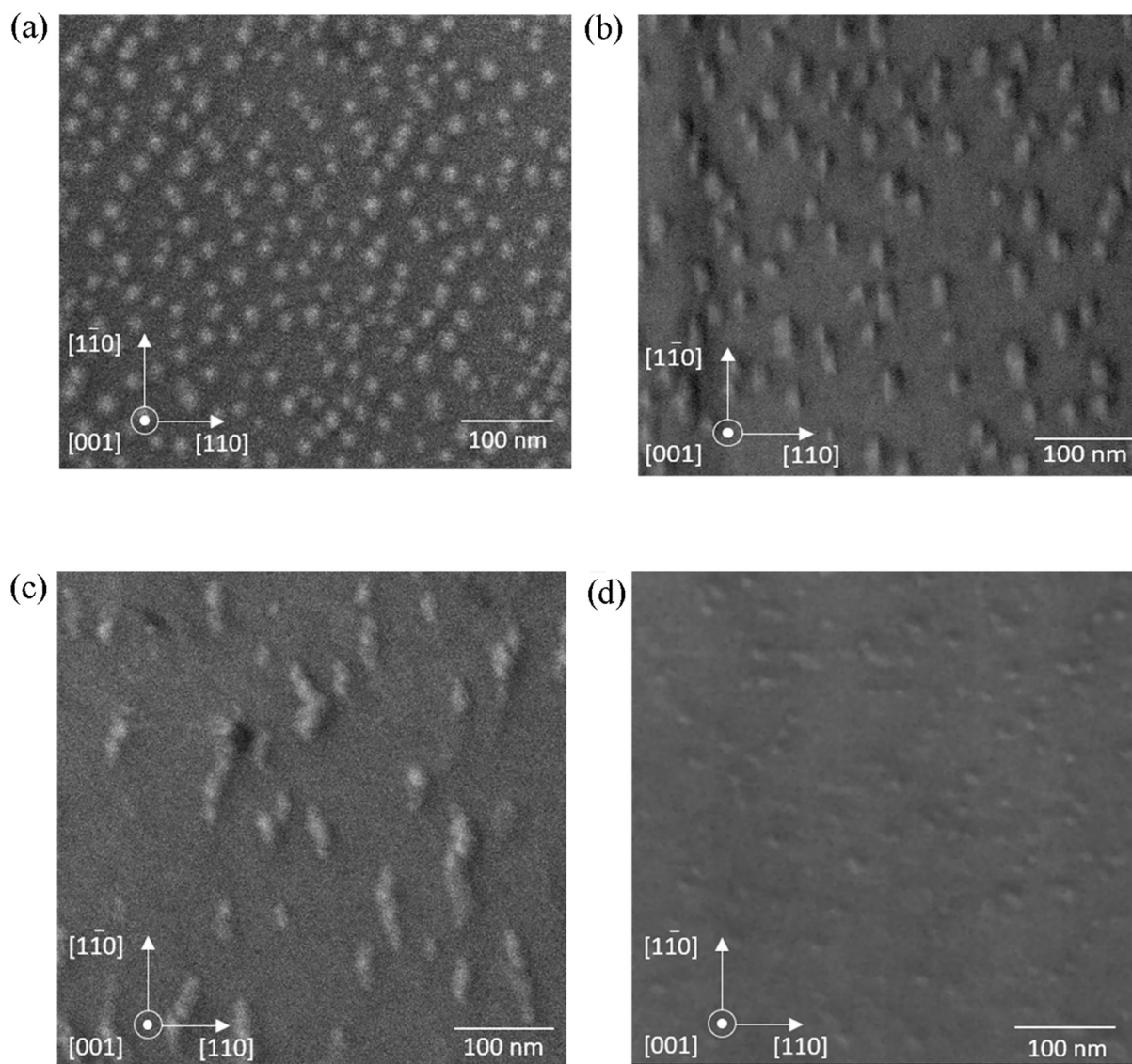


Рис. 2: СЭМ изображения поверхности образцов с КТ: А (a), В (b), С (c), D (d).

Полученные значения плотности КТ на поверхности образцов А, В и С составили $8.9 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$, $6.2 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$, $3.6 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$, соответственно. Плотность КТ для образца D определить сложно из-за их малой высоты (рис. 2(d)). Она приблизительно оценивалась значением $2 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$. При расчете плотности в образцах с ЛАКТ (образцы В и С) учитывались отдельные КТ. Например, если в агрегации ЛАКТ было 3 КТ, то считалось “3 КТ”, а не “1 КТ”.

По измерениям АСМ характеристики рельефа поверхности образцов существенно различались (рис. 3). Наиболее вероятные значения высоты рельефа для образцов А,

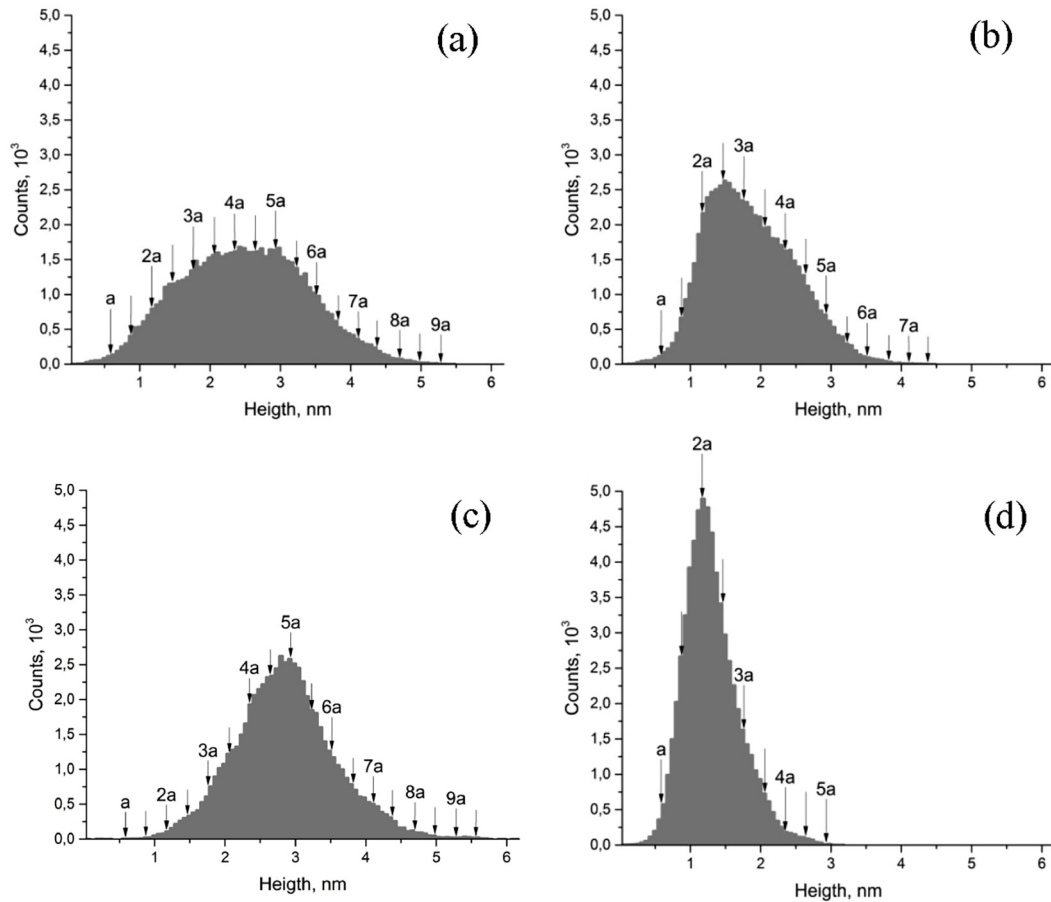


Рис. 3: Гистограммы распределения высоты КТ для образцов, выращенных без Bi (образец А) (а); и с Bi : (b) образец В, (с) образец С, (d) образец D. Стрелки указывают значения высоты КТ в единицах МС. Параметр кристаллической решётки $In_{0.52}Ga_{0.48}As$ $a = 2MC = 0.586$ нм.

В, С и D равны $5a$; $2.5a$; $5a$ и $2a$, соответственно, где $a = 2MC = 0.586$ нм – параметр решётки твёрдого раствора $In_{0.52}Ga_{0.48}As$, определённый по закону Вегарда [7].

Гистограммы распределения по высоте рельефа поверхности образцов (рис. 3) имели следующие характерные отличия: А – наиболее широкое, В – близкое к бимодальному, С – с ярко выраженными особенностями, отражающими дискретность толщины слоёв, кратной одному МС, D – самое узкое. Т. к. в пределах площади сканирования кроме КТ находились и относительно ровные участки поверхности со ступенями роста, графики на рис. 3 нельзя в полной мере отнести именно к КТ. Однако из рис. 4 видно, что высота КТ значительно превышает высоту ступеней роста и гистограммы рис. 3 адекватно характеризуют общие тенденции формирования структуры ансамблей КТ.

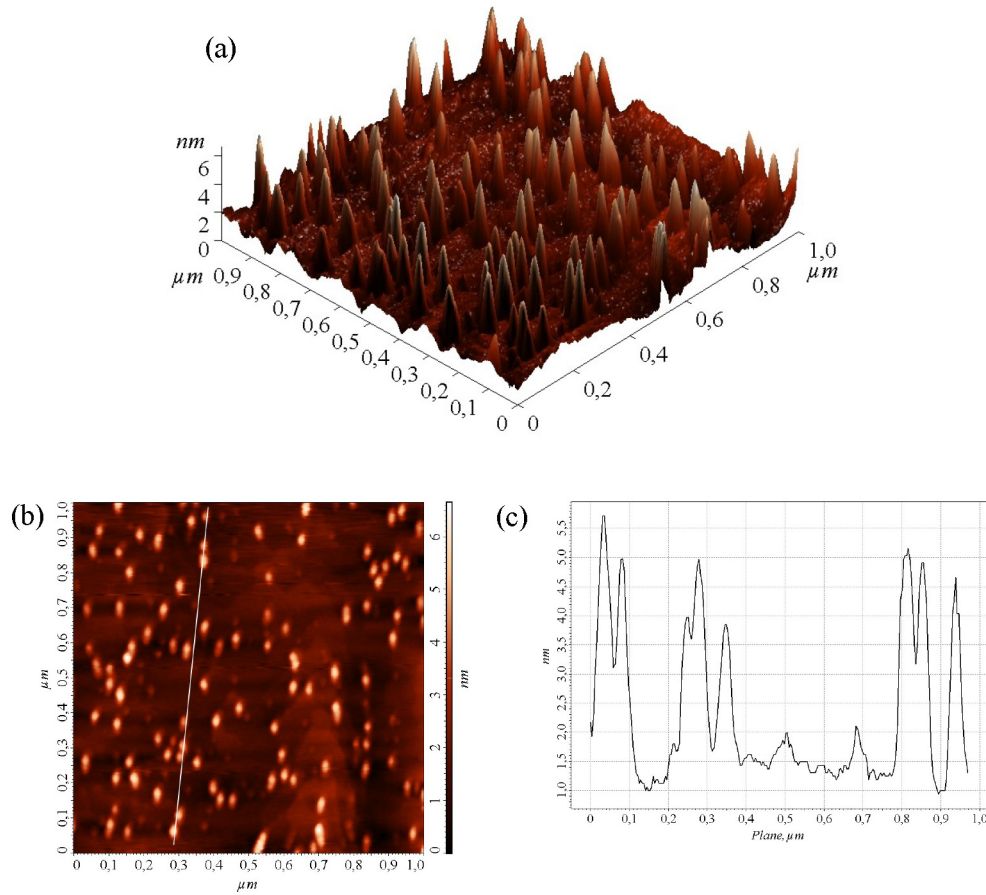


Рис. 4: Результаты АСМ поверхности образца В: (а) 3D, (b) 2D, график высоты рельефа поверхности (с) вдоль линии на изображении (b).

Полученные данные показывают, что распределение по высоте КТ существенно сужается при выращивании в присутствии потока атомов Bi . В образце В бимодальность распределения можно объяснить образованием “молекул” из двух КТ и переносом массы между ними от меньшей по размеру к большей за счёт Оствальдовского созревания [8]. Такой же процесс наблюдается в образце С, однако за счёт большего количества КТ в агрегации, высота распределения выше. В образце D узкое распределение, по-видимому, из-за подавления поверхностной диффузии и отсутствия перераспределения массы между КТ.

Представленные выше данные интересно сравнить с результатами других авторов [9–11], где методом МЛЭ выращивались ЛАКТ в системе $\text{In}(\text{Ga})\text{As-GaAs}$. Было установлено, что наиболее оптимальным диапазоном формирования ЛАКТ является $T_{\text{п}} = 320 - 340\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при $T_{\text{п}} = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ вырастают только одиночные КТ. В нашем иссле-

довании продемонстрировано образование ЛАКТ в парах Bi при $T_{\text{п}} = 467^\circ\text{C}$, т. е. более чем на 100°C выше. Увеличение температуры выращивания, как правило, снижает концентрацию точечных дефектов эпитаксиальных объектов. Кроме того, нами получены массивы двойных ЛАКТ, что позволяет надеяться на возможное контролируемое выращивание массивов с заранее заданным количеством КТ в каждом элементе.

Заключение. Формирование структуры массивов ЛАКТ в системе $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ методом МЛЭ исследовано в зависимости от температуры подложки $T_{\text{п}}$ и воздействия молекулярного потока Bi . Получены массивы из двойных и многоэлементных КТ, методами АСМ и СЭМ проанализировано их строение. Показано, что ЛАКТ в системе $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ в присутствии потока паров Bi образуются при температурах на 100°C выше, чем без Bi .

ЛИТЕРАТУРА

- [1] I. A. Likhachev, I. N. Trunkin, V. I. Tsekhoosh, et al., J. Mater. Res. **33**(16), 2342 (2018). DOI: 10.1557/jmr.2018.254.
- [2] И. П. Казаков, Краткие сообщения по физике ФИАН **51**(10), 26 (2024). <https://ksf.lebedev.ru/contents.php?post=1&year=2024&number=10&z=0>
- [3] A. Zrenner, E. Beham, S. Stufler, et al., Nature **418**(6898), 612 (2002). DOI: 10.1038/nature00912.
- [4] G. Burkard, D. Loss, D. P. DiVincenzo, Physical Review B **59**(3), 2581 (1999).
- [5] J. H. Reina, L. Quiroga, N. F. Johnson, Physical Review A **62**(1), 012305 (2000). DOI: 10.1103/PhysRevA.62.012305.
- [6] S. Kiravittaya, R. Songmuang, A. Rastelli, et al., Nanoscale Research Letters **1**, 1 (2006). DOI: 10.1007/s11671-006-9014-8.
- [7] L. Vegard, Zeitschrift für Physik **5**(1), 17 (1921). DOI: 10.1007/BF01349680.
- [8] Р. Д. Венгреневич, Ю. В. Гудыма, С. В. Ярёма, Физика и техника полупроводников **35**(12), 1440 (2001).
- [9] M. V. Maximov, A. F. Tsatsul'nikov, B. V. Volovik, et al., Applied Physics Letters **75**(16), 2347 (1999). DOI: 10.1063/1.125010.
- [10] А. Е. Жуков, Б. В. Воловик, С. С. Михрин и др., Письма в Журнал технической физики **27**(17), 51 (2001).

[11] А. А. Тонких, В. А. Егоров, Р. К. Поляков и др., Письма в ЖТФ **28**(10), 72 (2002).

Поступила в редакцию 3 июля 2024 г.

После доработки 26 ноября 2024 г.

Принята к публикации 2 декабря 2024 г.