

ПРОСВЕЧИВАЮЩАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК InGaAs/GaAs, ВЫРАЩЕННЫХ В ПОТОКЕ ПАРОВ Bi

И. Н. Трунькин¹, И. П. Казаков²

Методом просвечивающей 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. Обнаружены наноструктуры со смешанной размерностью (0D/2D). С помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии показано, что Bi действует как сурфактант и не захватывается растущими слоями.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия, гетероструктуры InGaAs/GaAs, латерально ассоциированные квантовые точки, сурфактант Bi, просвечивающая электронная микроскопия, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия.

Введение. В наших предыдущих работах, были представлены результаты исследования процесса формирования квантовых точек (КТ) в системе InGaAs/GaAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в парах Bi, проведённого методами дифракции быстрых электронов [1], атомно-силовой (АСМ) и сканирующей электронной микроскопии СЭМ [2]. В настоящей работе полученные образцы были исследованы методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭРС), что позволило не только получить данные о кристаллической структуре КТ, но и установить роль Bi, как сурфактанта, в процессе их выращивания. Формирование КТ в присутствии сурфактантов – мало изученная область сама по себе, и, практически не исследованная в системе InGaBiAs/GaAs, где Bi выступает в этой роли при температурах роста выше 400 °С, практически не входя в состав твёрдого раствора.

¹ Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, 1; e-mail: igor.trunckin@yandex.ru.

² ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

Методика эксперимента. Гетероструктуры (ГС) (табл. 1) выращивались на подложках *i*-GaAs (001) методом МЛЭ с твёрдыми молекулярными источниками [1]. Формирование КТ в слоях 2 и 4 образца А (контрольный, без *Bi*), проводилось методом циклического осаждения последовательности InAs (1 с)/GaAs (1 с) × 8 при температуре подложки $T_{\text{п}} = 495$ °С. Эффективная толщина полученного слоя состава $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As}$ была 5 монослоёв (МЛ).

Т а б л и ц а 1

Схема расположения слоёв ГС

№	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

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 °С, соответственно. Перед началом осаждения этих слоёв в образцах В, С, D поверхность слоя GaAs выдерживалась в парах *Bi* в течение 30 с. Верхний слой 4 осаждался для последующего контроля морфологии поверхности напряжённого из-за решёточного несоответствия слоя $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As}$.

ПЭМ исследование поверхности ГС проводилось на просвечивающем электронном микроскопе TITAN 80-300 (ThermoFisher Scientific, Waltham, Massachusetts) с корректором сферических аберраций в режимах светлого поля и высокоуглового темного поля при ускоряющем напряжении 300 кВ. Обработка изображений проводилась с помощью программного обеспечения TIA (FEI) и Digital Micrograph (Gatan, Pleasanton, California). Для ЭРС использовался просвечивающий электронный микроскоп Tescan Osiris (Thermo Fisher Scientific, США, 2015) с системой энергодисперсионного рентгеновского микроанализа (Bruker, США).

Результаты и обсуждение. Полученные ПЭМ данные, вместе с ранее опубликованными результатами исследований методами АСМ и СЭМ [2], указывают на то, что молекулярный поток *Bi* оказывает сильное воздействие на процесс формирования исследуемых наноструктур методом МЛЭ. При исследовании ПЭМ поперечных сечений всех образцов на поверхности верхнего слоя $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As}$ (4, табл. 1) были обнаружены КТ (рис. 1), но никаких протяжённых дефектов не наблюдалось. Это свидетельствует о том, что критическая толщина напряжённых слоёв $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As}$ не была достигнута.

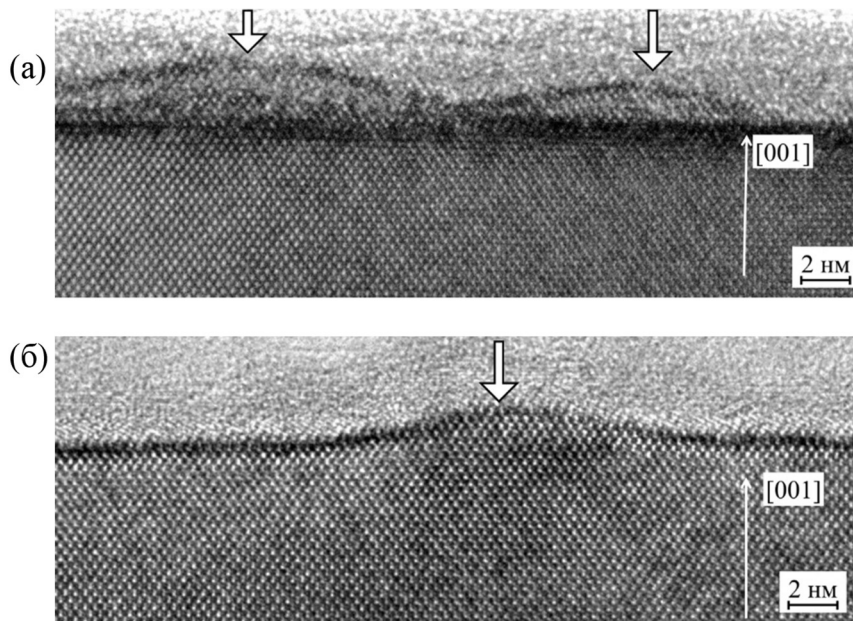


Рис. 1: Изображение ПЭМ поперечного сечения верхнего слоя $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As}$ (4, табл. 1) образцов А (а) и С (б). КТ показаны стрелками. Видно, что протяжённые дефекты отсутствуют.

Величина $T_{\text{п}}$ и присутствие Bi имело сильное влияние на морфологию верхнего слоя $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As}$ (4, табл. 1) [2]. В образце А (контрольный, выращенный без Bi) сформировались одиночные КТ, в то время как в образце В, выращенного при той же температуре, но в потоке Bi , в основном образовались парные КТ. С понижением температуры роста образцов, выращенных в потоке Bi , тенденция к коалесценции КТ сначала усиливалась: в образце С наблюдались агрегаты из латерально ассоциированных КТ (ЛАКТ). При более низкой температуре роста, тенденция к агрегации была подавлена: в образце D образовались одиночные КТ, но меньшего размера, чем в А. Отметим, что по сравнению с ранее опубликованными работами [3], в нашей работе ЛАКТ образовались при более высокой, примерно на 1000 °С, температуре, что вызвано влиянием Bi на процесс роста. Это открывает новые возможности для понижения концентрации точечных дефектов в наноструктурах с ЛАКТ.

Структуры внутренних слоёв $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As}$ (2, табл. 1) образцов существенно различались. В образце А наблюдалась модулированная по толщине квантовая яма (КЯ) (рис. 2(а)). В образцах В (рис. 2(б)) и D (рис. 2(г)) наблюдались как КЯ, так и КТ, в образце С (рис. 2(в)) обнаружены отдельные КТ и ЛАКТ.

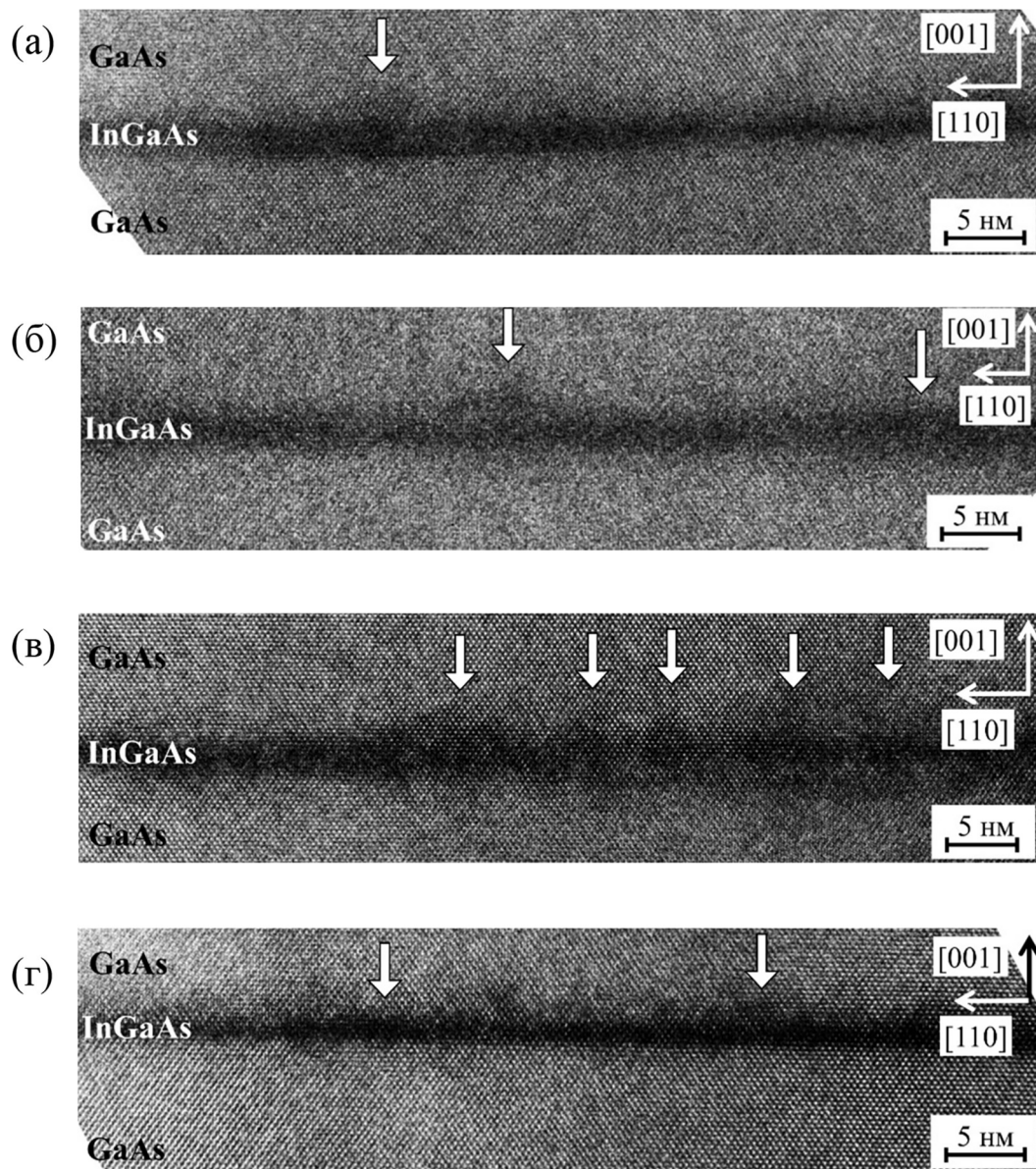


Рис. 2: Изображение ПЭМ поперечного сечения внутреннего слоя $In_{0.52}Ga_{0.48}As$ (2, табл. 1) образцов А (а), В (б), С (в) и D (г). Хорошо видна модуляция толщины слоя. Утолщения и КТ показаны стрелками.

Эти отличия в структурах верхнего и нижнего слоёв $In_{0.52}Ga_{0.48}As$ можно объяснить перемешиванием последнего с GaAs при заращивании нижнего слоя. Подобный эффект трансформации слоёв с КТ при их заращивании изучался методом сканирующей туннельной спектроскопии в работе [4].

Интересно, что кроме метода МЛЭ, ЛАКТ получали методом отжига изначально гладких слоёв InGaAs на GaAs [5], где должна быть низкая поверхностная диффузия, как и в низкотемпературном росте методом МЛЭ [3]. В нашем случае использование реактивного сурфактанта Bi также должно снижать скорость поверхностной диффузии.

Таким образом, можно заключить, что для образования ЛАКТ, необходима низкая поверхностная диффузия и использование Bi открывает новые возможности для контролирования процесса выращивания, т. к. существенно повышает температуру их формирования.

Следует отметить, что в образцах В, С, и D, выращенных в потоке Bi, образовались наноструктуры, содержащие КЯ и КТ. Этот новый тип наноструктур со смешанной

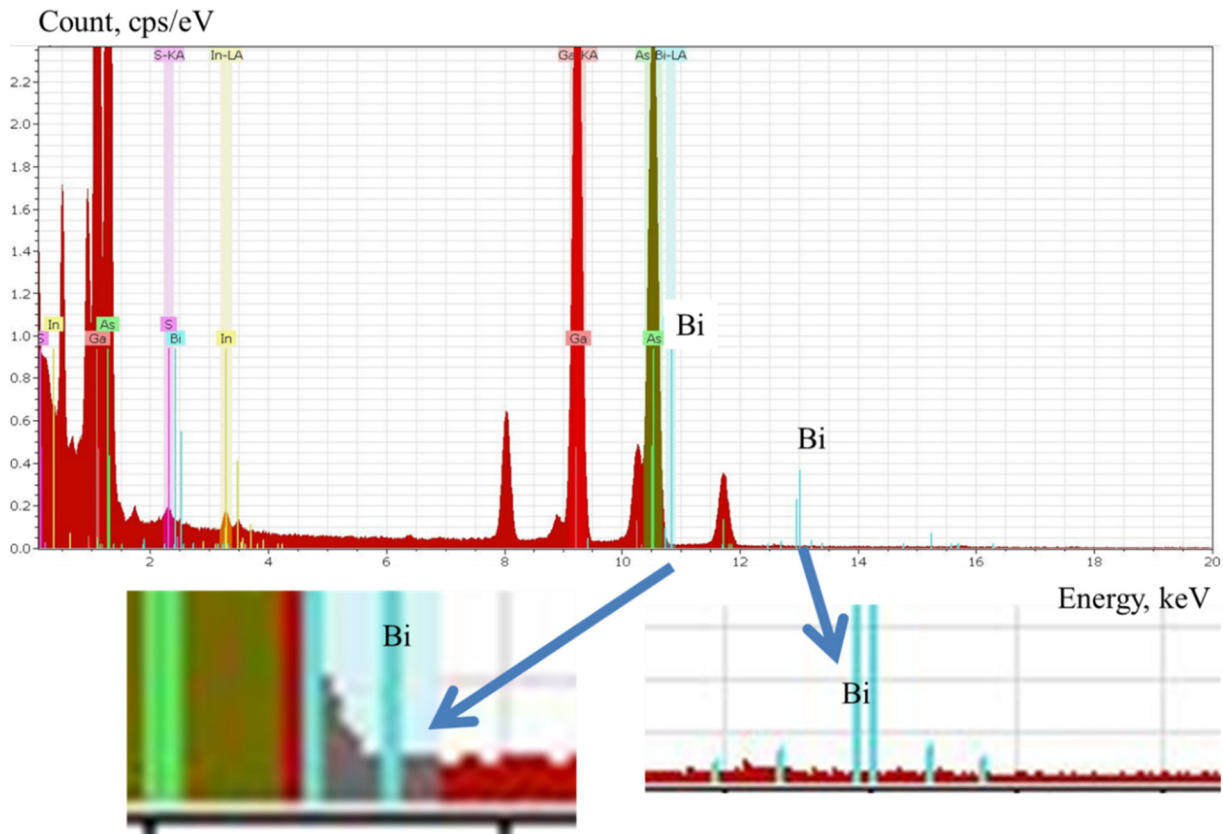


Рис. 3: Спектр ЭРС поверхности слоя $In_{0.52}Ga_{0.48}As$ (4, табл. 1) образца D. Вертикальными линиями показаны положения пиков указанных элементов, если они присутствуют в образце. Синие линии соответствуют Bi. Стрелками указаны увеличенные изображения участков спектра. Видно, что в спектре отсутствуют пики Bi.

размерностью ($0D/2D$) перспективен для создания микролазеров и фотовольтаических приложений [6].

Для исследования захвата растущими слоями сурфактанта Bi при формировании наших наноструктур использовалась ЭРС поверхности образца D . Было установлено, что концентрация Bi в слое $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As}$ не превышает 0.25 ат.%, т.к. его пиков в спектре не обнаружено (рис. 3).

Как было показано в [1], при данном соотношении молекулярных потоков и отсутствии десорбции Bi с поверхности растущих слоёв, его концентрация в слое $\text{GaBi}_x\text{As}_{1-x}$ имела значение $x = 0.105$. Таким образом, было подтверждено, что Bi в условиях выращивания наших наногетероструктур проявляет свойства сурфактанта, т.е. существенно влияет на формирование растущих наногетероструктур, но, практически, не входит в их состав. Это соответствует результатам, описанным в работах [7, 8], где утверждается, что при температурах роста, превышающих ~ 440 °C, захват Bi растущими слоями GaAs не происходит.

Заключение. Кристаллическая структура КТ в системе $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$, полученных методом МЛЭ в молекулярном потоке Bi , исследована методом ПЭМ. Методом ЭРС показано, что Bi существенно влияет на формирование растущих наногетероструктур, но практически не входит в их состав, проявляя свойства сурфактанта. Обнаружены наноструктуры со смешанной размерностью ($0D/2D$), перспективные для создания микролазеров и фотовольтаических приложений.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] И. П. Казаков, Краткие сообщения по физике ФИАН **51**(10), 26 (2024).
- [2] А. В. Клековкин, А. А. Руденко, В. И. Цехош, И. П. Казаков, Краткие сообщения по физике ФИАН [в печати].
- [3] M. V. Maximov, A. F. Tsatsul'nikov, B. V. Volovik, et al., Applied Physics Letters **75**(16), 2347 (1999). DOI: 10.1063/1.125010.
- [4] Q. Gong, P. Offermans, R. Nötzel, et al., Applied Physics Letters **85**(23), 5697 (2004). DOI: 10.1063/1.1831564.
- [5] T. D. Park, John S. Colton, Jeffrey K. Farrer, et al., AIP Advances **4**(12), (2014). DOI: 10.1063/1.4905053.
- [6] S. A. Mintairov, N. A. Kalyuzhnyy, V. M. Lantratov, et al., Nanotechnology **26**(38), 385202 (2015). DOI: 10.1088/0957-4484/26/38/385202.

- [7] M. Yoshimoto, K. Oe, *Molecular Beam Epitaxy* (Elsevier, 2018). – P. 197-209. DOI: 10.1016/B978-0-12-812136-8.00010-4.
- [8] K. Nagaraja, Yu. A. Mityagin, M. P. Telenkov, I. P. Kazakov, *Critical Review in Solid State and Material Sciences* **42**(3), 239 (2016). DOI: 10.1080/10408436.2016.1186007.

Поступила в редакцию 10 июля 2024 г.

После доработки 6 октября 2024 г.

Принята к публикации 8 октября 2024 г.