03,08,10

Квантовые точки в узкозонной системе InSb/In(Ga)AsSb

© Я.А. Пархоменко[1], П.А. Дементьев[1], И.П. Сошников[1,2], К.Д. Моисеев[1]

[1] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия
[2] Академический университет им. Ж.И. Алферова,
С-Петербург, Россия

E-mail: mkd@iropt2.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 6 июля 2026 г.
В окончательной редакции 19 августа 2026 г.
Принята к публикации 1 сентября 2026 г.

Массивы квантовых точек InSb были получены методом жидкофазной эпитаксии на слоях многокомпонентных твердых растворов в системе (In,Ga)−As−Sb, обогащенных арсенидом индия и близких по параметру кристаллической решетки к подложке InAs. Рассмотрены варианты матричного слоя, в котором замещались как атомы подрешетки группы V, так и атомы подрешетки группы III. Наблюдалось изменение характера распределения и увеличение поверхностной плотности полученных квантовых точек в зависимости от состава поверхности матричного слоя.

Ключевые слова: Квантовые точки, твердые растворы, InAs, InSb, InGaAsSb, атомно-силовая микроскопия, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, наногетероструктуры.

DOI: 10.61011/FTT.2026.10.64084.10328

Введение

Ранее на примере наногетероструктур InSb/InAs с квантовыми точками (КТ) антимонида индия было показано, что изменение состава матричного слоя $InAs_{1-y}Sb_y$ путем введения химического элемента, общего как для кристаллической решетки матрицы, так и для КТ InSb, позволяет увеличить поверхностную плотность наращиваемых нанообъектов [1]. Однако постоянная кристаллической решетки тройного твердого раствора $InAs_{1-y}Sb_y$ может существенно отличаться от аналогичного параметра бинарной подложки InAs, на которой происходит осаждение, что приводит к увеличению рассогласования между ними и, соответственно, к ухудшению качества наращиваемого матричного слоя и уменьшению внутреннего напряжения внутри наногетероструктуры $InSb/InAs_{1-y}Sb_y$. Для восстановления изопериодности эпитаксиальной матричной структуры необходимо введение в кристаллическую решетку тройного твердого раствора $InAs_{1-y}Sb_y$ дополнительного (четвертого) химического элемента, который способен уменьшить рассогласование между образующимся четверным твердым раствором и бинарной подложкой InAs. Таким элементом может быть атом фосфора в подрешетке группы V [2] или атом галлия в подрешетке группы III [3]. В результате, в качестве матричного слоя выступает эпитаксиальный слой, изопериодный с бинарным соединением арсенида индия, а матричная гетероструктура InAs/In(Ga)AsSb или InAs/InAsSb(P), на которую в последующем происходит осаждение квантовых нанообъектов, сохраняет общий параметр решетки, близкий к подложке InAs. В настоящей работе изучена эволюция осаждения КТ InSb на матричный слой с переменным содержанием галлия в многокомпонентном твердом растворе $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}Sb_y$.

Образцы и методики изучения

Массивы КТ InSb были получены методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на поверхности эпитаксиальных слоев узкозонных четверных твердых растворов In(Ga)AsSb, предварительно осажденных на монокристаллические подложки InAs, ориентированные в рабочей плоскости (001). Матричные слои на основе многокомпонентного твердого раствора $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}Sb_y$ были получены в интервале составов $0 < x < 0.1$ при фиксированном содержании сурьмы $(y = 0.1 \pm 0.01)$. В процессе эпитаксиального наращивания в подрешетке группы III увеличивалось содержание атомов галлия, при этом подрешетка группы V содержала постоянное количество атомов мышьяка и сурьмы. Рельеф поверхности образцов с КТ изучался с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver P47H и зондовой лаборатории „Интегра Аура“, производства российской компании НТ-МДТ. Детали технологического процесса выращивания образцов методом ЖФЭ и методика измерения их поверхности с помощью АСМ представлены в работе [1]. Экспресс-анализ элементного состава матричных слоев наращенных твердых растворов проводился методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС) на сканирующем электронном микроскопе Fei Quanta 200 при комнатной температуре и ускоряющем напряжении $U_{acc} = 20\,\text{kV}$.

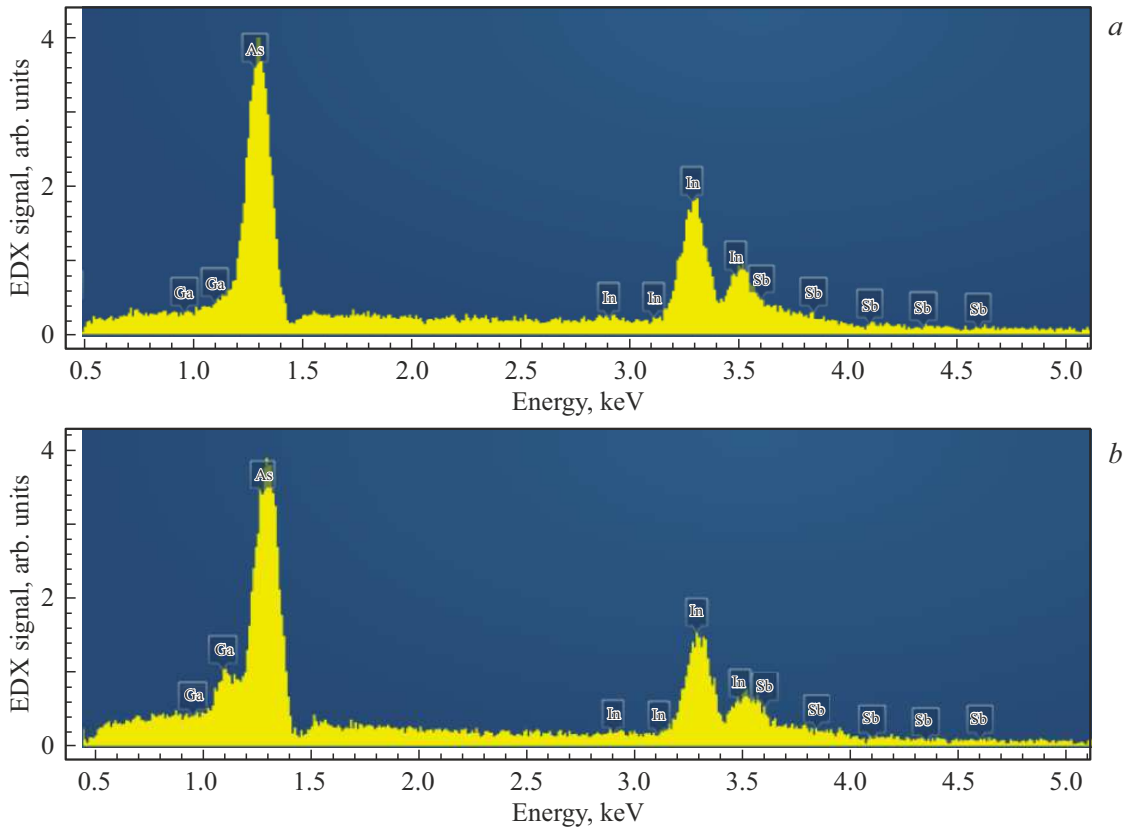


Рис. 1. Спектры ЭДРС для тройного твердого раствора $InAs_{0.89}Sb_{0.11}$ (*a*) и четверного твердого раствора $In_{0.895}Ga_{0.105}As_{0.91}Sb_{0.09}$ (*b*).

Эксперимент и обсуждение

На рис. 1 представлены примеры ЭДРС спектров для эпитаксиальных слоев $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}Sb_y$. Регистрируемые спектры содержали полосы в областях 1.098, 1.282, 3.287–4.101 keV, которые идентифицируются как линии излучения Ga $L\alpha 1$ и $L\alpha 2$ (1.098 keV); As $L\alpha 1$ и $L\alpha 2$ (1.282 keV), In $L\alpha 1$, $L\beta 1$ и $L\beta 2$ (3.287, 3.487 и 3.714 keV); Sb $L\alpha 1$, $L\beta 1$ и $L\beta 2$ (3.605, 3.844 и 4.101 keV). Оценки элементного состава твердого раствора из полученных при обработке спектров ЭДРС данных дают значения, приведенные в таблице. Тройной твердый раствор $InAs_{0.89}Sb_{0.11}$ (рис. 1, *a*) демонстрировал наличие полос только от атомов In, As и Sb. Присутствие атомов Ga в четверном твердом растворе $In_{1-x}Ga_xAs_{0.9}Sb_{0.1}$ выражалось в появлении полосы вблизи энергии 1.2 keV, при этом наблюдалось перераспределение между интенсивностями полос от атомов In и Sb в окрестности энергии 3.5 keV (рис. 1, *b*).

Атом галлия как элемент замещения атома индия в подрешетке группы III был введен для компенсации возникшего рассогласования между тройным твердым раствором $InAs_{0.89}Sb_{0.11}$ и подложкой InAs. Рассогласование по параметру кристаллической решетки между эпитаксиальным слоем и подложкой можно оценить с помощью закона Вегарда [4]. Данный закон в первом приближении предполагает линейную комбинацию вкладов бинарных соединений, составляющих многокомпонентный твердый раствор [5]. В случае тройного твердого раствора $InAs_{1-y}Sb_y$ это $(InAs)_{1-y}(InSb)_y$. В случае эпитаксиального слоя $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}Sb_y$ четверной твердый раствор может быть представлен как квазитройной, например $(InAs)_{1-x}(GaSb)_y(GaAs)_{x-y}$ или $(InAs)_{1-y}(GaSb)_x(InSb)_{y-x}$ в зависимости от соотношения x и y [6]. При условии $x > y$ расчет постоянной кристаллической решетки производился согласно формуле

$$a_{In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}Sb_y} = a_{InAs}(1-x) + a_{GaSb}y + a_{GaAs}(x-y), \quad (1)$$

тогда как при условии $x < y$ применялась формула

$$a_{In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}Sb_y} = a_{InAs}(1-y) + a_{GaSb}x + a_{InSb}(y-x), \quad (2)$$

где a_{AB} — параметр постоянной кристаллической решетки бинарного соединения, образующего четверной твердый раствор $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}Sb_y$. С учетом данных, взятых из измерений спектров ЭРДС, с помощью формул (1) и (2) были получены расчетные значения рассогласования эпитаксиальных слоев по отношению к бинарному соединению InAs (см. таблицу). Как видно из таблицы, матричный слой $In_{0.895}Ga_{0.105}As_{0.91}Sb_{0.09}$ можно считать изопериодным с подложкой InAs.

Элементный состав эпитаксиальных слов твердого раствора $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}Sb_y$ на основании измерений методом ЭДРС

Образец	Матричный слой (по данным ЭДРС)	Рассогласование с подложкой InAs (расчет)	Поверхностная плотность КТ, 10^{10} cm^{-2}
A	$InAs_{0.89}Sb_{0.11}$	$7.6 \cdot 10^{-3}$	1.8
B	$In_{0.935}Ga_{0.065}As_{0.90}Sb_{0.10}$	$2.8 \cdot 10^{-3}$	3.0
C	$In_{0.895}Ga_{0.105}As_{0.91}Sb_{0.09}$	$-4.5 \cdot 10^{-4}$	6.2

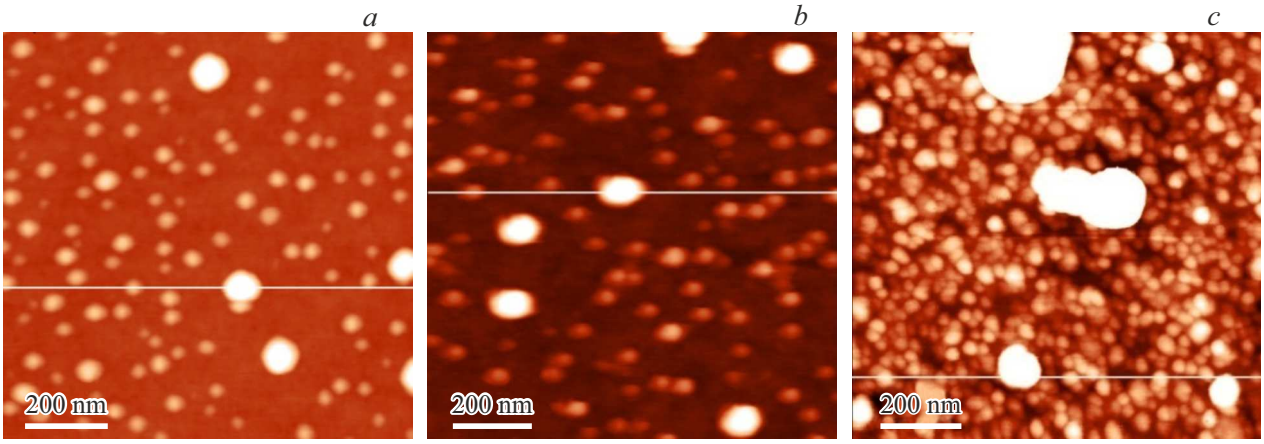


Рис. 2. АСМ-изображения участка площадью $1 \times 1\,\mu m^2$ для образцов с КТ InSb на поверхности многокомпонентного матричного слоя $InAs_{0.89}Sb_{0.11}$ (*a*), $In_{0.935}Ga_{0.065}As_{0.90}Sb_{0.10}$ (*b*) и $In_{0.895}Ga_{0.105}As_{0.91}Sb_{0.09}$ (*c*).

При осаждении на поверхность эпитаксиального слоя тройного твердого раствора $InAs_{1-y}Sb_y$ был обнаружен бимодальный характер распределения полученных КТ InSb (рис. 2, *a*). Статистические гистограммы, полученные путем обработки АСМ-изображений, показывают, что основную часть массивов данных КТ составляют нанообъекты со средней высотой 4 nm и средним латеральным параметром 30 nm (рис. 3, *a*). Присутствие общего элемента (Sb) в матричном слое и КТ способствовало увеличению поверхностной плотности малых КТ за счет общих химических связей между нанообъектом и матрицей. Вместе с тем, присутствие дополнительного элемента в подрешетке группы V (Sb) как атома замещения для As в бинарном соединении InAs приводило к увеличению постоянной кристаллической решетки эпитаксиального слоя тройного твердого раствора $InAs_{1-y}Sb_y$, что выражалось в росте рассогласования между подложкой и матричным слоем (таблица, образец *A*). Увеличение рассогласования вызывало нарушение качества осажденного слоя тройного твердого раствора и появление на его поверхности структурных дефектов (сетки продольных дислокаций и др.), что приводило к переходу эпитаксиального роста КТ в фазу осаждения релаксированного соединения InSb, как это видно на примере появления поверхностных граней в больших КТ [1].

При введении галлия в подрешетку группы III тройного твердого раствора $InAs_{1-y}Sb_y$ как атома замещения для индия в образце со слоем четверного твердого раствора $In_{0.935}Ga_{0.065}As_{0.90}Sb_{0.10}$ наблюдалось уменьшение рассогласования между матричным слоем и подложкой InAs (таблица, образец *B*). При этом бимодальный характер распределения КТ по размерам в целом сохранялся (рис. 2, *b*), однако наблюдалась трансформация распределения по высоте, в основном менялся характер распределения для малых КТ (рис. 3, *b*). Как видно из статистической гистограммы данного образца, можно выделить два локальных максимума в распределениях КТ по высоте: 0.7 nm и 3.5 nm. Отметим появление массивов „плоских“ (маловысотных) нанообъектов с большей плотностью при введении галлия в подрешетку группы III матричного слоя. При этом массивы КТ со средней высотой 3.5 nm присутствовали как в образце *A* так и в образце *B*.

Дальнейшее увеличение содержания галлия в кристаллической решетке четверного твердого раствора $In_{0.895}Ga_{0.105}As_{0.91}Sb_{0.09}$ обеспечивает достижение изоморфности матричного слоя и подложки (таблица, образец *C*). В результате, мы получаем матрицу с единой величиной постоянной решетки, но обладающую поверхностью со сложным набором поверхностных связей. Обе подрешетки матричного соединения $A^{III}B^{V}$ имеют атомы замещения: III — Ga/In, V — Sb/As. Поскольку в образце *C* рассогласование между наращенным слоем и подложкой почти отсутствовало, что, в свою очередь, позволило улучшить морфологию поверхности матричного слоя и минимизировать концентрацию структурных дефектов, то форма больших КТ снова преобразовы-

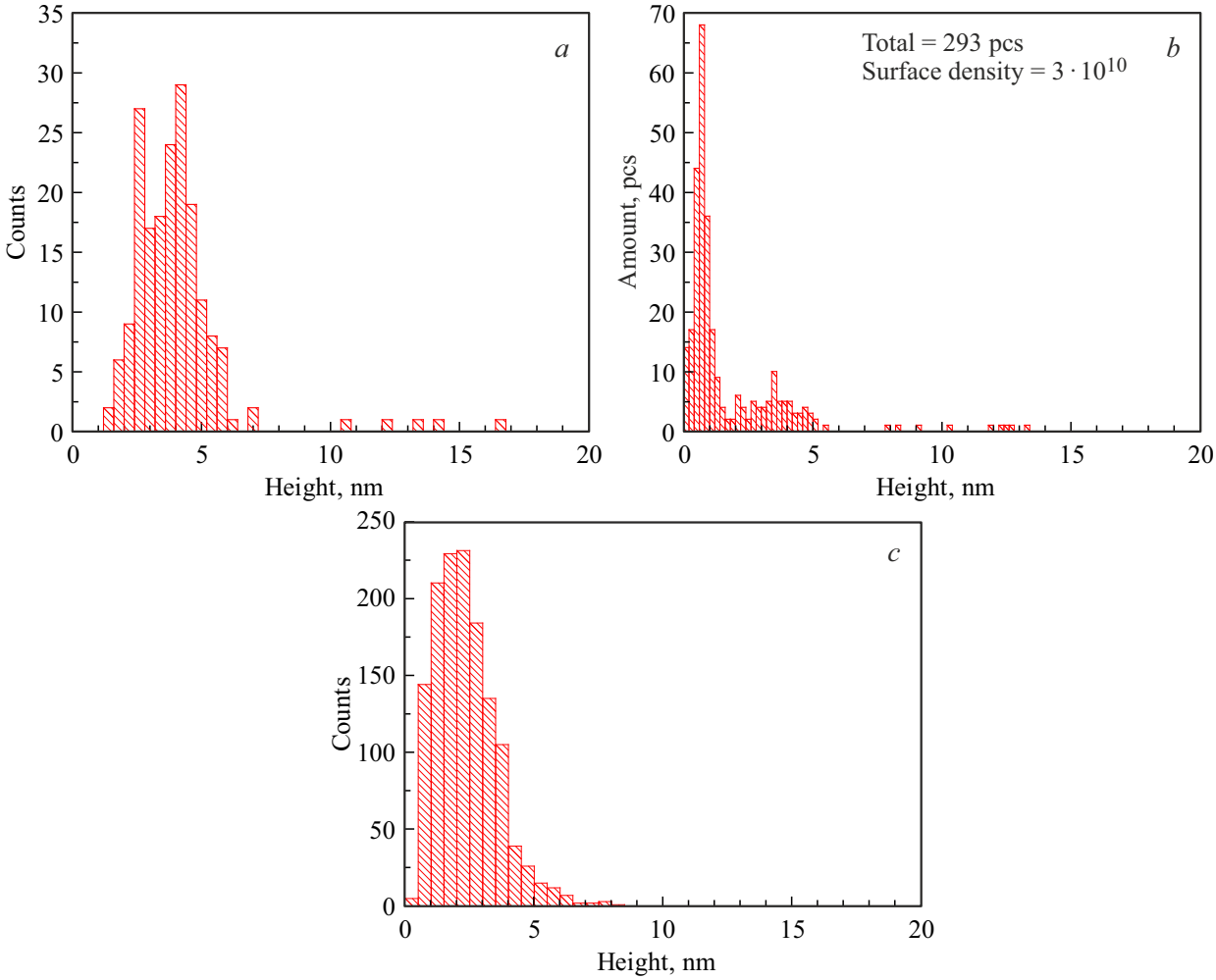


Рис. 3. Статистические гистограммы, полученные путем обработки АСМ-изображений, приведенных на рис. 2, *a, b* и *c* соответственно.

валась из усеченной пирамиды с четко выявленными гранями (для систем с большим рассогласованием матричного слоя) в округлую форму выпуклой линзы без каких-либо центров сингулярности. Кроме того, массивы КТ InSb снова демонстрировали бимодальный характер распределения с четко выраженными значениями для малых и для больших КТ, соответственно (рис. 2, *a* и *c*), который наблюдался для матриц на основе бинарного соединения InAs. В случае образца *C* средняя высота нанооствровков была порядка 2.5 nm, а средний латеральный параметр был равен 12 nm (рис. 3, *c*).

Известно, что для формирования нанооствровков по механизму Странского–Крастанова критическим является то, что поверхностная энергия нанообъекта обычно меньше поверхностной энергии матрицы (подложки или эпитаксиального слоя) [7]. На начальном этапе поверхностная энергия матрицы γ_S должна быть больше суммы поверхностной энергии смачивающего слоя γ_L и удельной энергии межфазной границы γ_I:

$$\gamma_S > \gamma_L + \gamma_I. \qquad (3)$$

Поскольку эпитаксиальный слой четверного твердого раствора $In_{0.895}Ga_{0.105}As_{0.91}Sb_{0.09}$ может быть представлен как комбинация бинарных соединений, например $(InAs)_{0.895}(GaSb)_{0.09}(GaAs)_{0.015}$ для случая изопериодности с подложкой InAs, то поверхностная энергия матричного слоя будет определяться суперпозицией вкладов упомянутых бинарных соединений. Согласно литературным данным, поверхностная энергия GaSb(001) и InAs(001) составляет примерно $0.7-0.8\,J/m^2$ [8], тогда как для GaAs(001) она достигает значений $1.1-1.6\,J/m^2$ [9]. Применяя формулу (1) для расчета поверхностной энергии матричного слоя, можно оценить ее значение в первом приближении, которое составит примерно $0.84\,J/m^2$ при использовании максимальных значений для упомянутых интервалов. Следовательно, присутствие бинарного соединения GaAs увеличивает поверхностную энергию матричного слоя на основе четверного твердого раствора InGaAsSb почти на 5% по сравнению с энергией в случае бинарной подложки InAs. Таким образом, происходит усиление неравенства (3) за счет роста правой части при неизменных значениях в

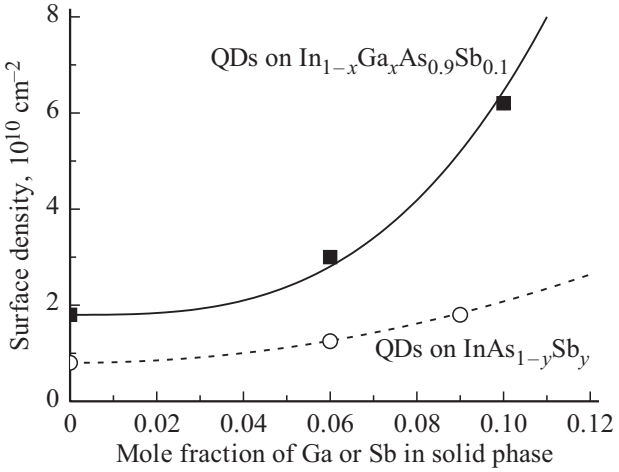


Рис. 4. Зависимость поверхностной плотности КТ InSb от состава матричного слоя на основе многокомпонентного твердого раствора $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}Sb_y$.

левой части, что улучшает условия для формирования нановостровков по механизму Странского–Крастанова. В результате мы видим определенную связь между наличием атомов галлия в кристаллической структуре матричного слоя на основе многокомпонентного твердого раствора и плотностью массивов, распределением по высоте и латеральному параметру, а также формой осаждаемых на нем КТ InSb. Более того, на поверхности четырехкомпонентного матричного слоя, изоморфного с подложкой InAs, наблюдался резкий рост поверхностной плотности КТ (рис. 2, *c*).

На рис. 4 приведены две зависимости концентрации КТ от содержания дополнительных атомов замещения в матричном слое. В случае тройного твердого раствора $InAs_{1-y}Sb_y$ содержание сурьмы менялось в интервале $0 < y < 0.1$, тогда как в образцах с четверным твердым раствором $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}Sb_y$ содержание галлия менялось в интервале $0 < x < 0.1$ при фиксированном содержании сурьмы $y = 0.1 \pm 0.01$. Наблюдаемый рост поверхностной плотности КТ достаточно хорошо описывается нелинейной зависимостью, которую можно представить в виде степенной функции

$$N_{A,B}(s) = N_0 + (k \cdot s)^p, \qquad (4)$$

где N_0 — значение поверхностной плотности КТ при осаждении на бинарную поверхность ($s = 0$, где s — значение x или y, $N_0 = n_{x,0}$ или $N_0 = n_{0,y}$), k — коэффициент, связанный с элементным составом твердого раствора, p — степенной показатель, связанный со структурой поверхности матричного слоя. Как видно из графика, для матричного слоя на основе тройного твердого раствора данная зависимость принимает вид квадратичной функции $N_{\mathrm{Sb}}(y) = n_{0,0} + (11.2y)^2$, тогда как для матричного слоя на основе четверного твердого раствора мы видим более резкую тенденцию, близкую к кубической функции $N_{\mathrm{Ga,Sb}}(x) = n_{0,0.1} + (16.7x)^3$. Как видно из сравнения полученных зависимостей с учетом изменения поверхностной энергии матричного слоя, можно предположить, что элементный состав матричного слоя влияет на концентрацию осажденных КТ. При этом основной вклад вносит подрешетка группы III за счет элемента, который не является общим ни для КТ InSb, ни для матрицы InAs(Sb). Мы полагаем, что структурное изменение поверхности матричного слоя с бинарной на многокомпонентную является определяющим фактором для получения массивов КТ InSb высокой плотности.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований гетероструктур с КТ в системе InSb/In(Ga)As(Sb), полученных с помощью метода ЖФЭ, было показано, что в случае постоянства параметра кристаллической решетки матричного материала при последовательном наращивании на бинарную подложку эпитаксиальных слоев многокомпонентных твердых растворов существенную роль при получении массивов КТ с высокой плотностью нанообъектов играет элементный состав поверхности матричного слоя. Контроль поверхностной энергии слоев на основе многокомпонентных твердых растворов открывает широкий диапазон возможностей управления структурными свойствами наногетероструктур на основе КТ InSb в системе соединений $A^{III}B^{V}$, обогащенных арсенидом индия. Введение в кристаллическую структуру эпитаксиального слоя элемента, общего с КТ и матрицей, позволяет увеличить поверхностную плотность массивов КТ примерно в два раза, тогда как введение дополнительного атома, не являющегося общим ни с КТ, ни с матрицей, но влияющего на поверхностную энергию матрицы, увеличивает концентрацию КТ почти на порядок.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Я.А. Пархоменко, П.А. Дементьев, К.Д. Моисеев. ФТТ **67**, *8*, 1426 (2025). DOI: 10.61011/FTT.2025.08.61312.176-25
[2] N. Kobayashi, Y. Horikoshi. Japan. J. Appl. Phys. **20**, 2301 (1981).
[3] R. Sankaran, G.A. Antypas. J. Cryst. Growth **36**, 198 (1976).
[4] L. Vegard, Zeitschrift für Physik **5**, 17 (1921).
[5] В.В. Романов, К.Д. Моисеев. ФТТ **65**, *10*, 1707 (2023). DOI: 10.61011/FTT.2026.10.64084.10328
[6] А.Н. Баранов, А.М. Литвак, К.Д. Моисеев, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. ЖПХ **67**, *12*, 1951 (1994)
[7] J.E. Prieto, I. Markov. Surf. Sci. **664**, 172 (2017).
[8] A. Ponchet, L. Pedesseau, A. Le Corre, C. Cornet, N. Bertru. Appl. Phys. Lett. **114**, 172102 (2019).
[9] J.E. Northrup, S. Froyen. Phys. Rev. B **50**, 2015 (1994).

Редактор Е.Ю. Флегонтова