

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТРАНСФОРМАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР СОСТАВА InAsSbP ПРИ ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИИ ИЗ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

К.М. ГАМБАРЯН*, В.М. АРУТЮНЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: kgambaryan@ysu.am

(Поступила в редакцию 27 февраля 2021 г.)

Представлены результаты измерений и численного анализа изменения формы поверхности стимулированных напряжением микро- и наноструктур InAsSbP состава. Зародышеобразование осуществляется из четырехкомпонентной жидкой фазы методом Странски–Крастанова. Рассмотрены геометрические особенности и хронология преобразования формы усеченных пирамидальных островков, линзообразных и пирамидальных квантовых точек (КТ), что открывает новые возможности в наноразмерной инженерии и наноархитектуре различных типов наноструктур. Сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения (HR-SEM) и просвечивающий электронный микроскоп (ТЕМ) используются для исследования микро- и наноструктур. Показано, что по мере уменьшения объема островков обнаруживается следующая последовательность переходов формы: усеченная пирамида, пирамида с {111} гранями, пирамида с {111} и частично {105} гранями, полностью несформированная «препирамида», которая постепенно эволюционирует в полушарие, а затем снова в пирамидальную КТ, но уже с гранями с более высокими индексами. Экспериментально измерены и теоретически рассчитаны критические размеры преобразования формы островков из «препирамиды» в полусферу (500–550 нм), а затем из линзообразной снова в пирамидальную КТ (5–7 нм). Показано, что теоретически рассчитанные значения совпадают с экспериментально измеренными данными.

1. Введение

Возрастающий интерес к полупроводниковым наноструктурам в первую очередь обусловлен наличием широкого спектра возможностей управления свойствами полупроводниковых материалов и приборов. В квантовых точках (КТ) ограничение движения свободных носителей во всех трех направлениях, приводящее к эффекту размерного квантования, открывает дополнительную возможность эффективного управления свойствами приборов на основе наноструктур путем изменения их размеров [1]. Модифицированная плотность состояний в

квантовых точках, нанопроволоках, молекулах на основе квантовых точек и других наноструктурах приводит к существенному улучшению рабочих параметров оптоэлектронных полупроводниковых приборов, таких как лазеры, фотоприемники и т. д. В частности, использование КТ в полупроводниковых лазерах приводит к повышению температурной стабильности их параметров, снижению пороговых токов, уширению спектра фоточувствительности фотоприемников и его смещению в длинноволновую область спектра, повышению эффективности солнечных элементов [2–4] и так далее. С точки зрения фундаментальной физики и техники были также исследованы такие явления, как взаимодействия в связанных КТ [5] и в кооперативных структурах КТ–нанолисты [6–8], а также влияние КТ на вольт-амперные и оптоэлектронные характеристики приборных структур [9,10].

Среди методов изготовления квантовых точек и проволок важную роль играет самоорганизованный режим роста Странски–Крастанова (S–K) [11], с помощью которого могут быть получены бездислокационные КТ, удлинённые островки и проволоки. Согласно этому методу, когда островки имеют минимальный размер, КТ имеют форму круга. Действительно, выше определенной критической толщины режим роста переключается с обычного послойного (то есть двухмерного, 2D) на 3D-режим роста из-за накопления упругой энергии в напряженном слое, который, во-первых, частично релаксирует путем спонтанного зарождения небольших островков напряженного материала, а затем путем создания дислокаций несоответствия. При нанесении гетероэпитаксиальных слоев существует относительно ограниченное количество комбинаций материалов, которые можно выращивать с параметрами кристаллической решетки, близкими к постоянной решетки подложки. Комбинируя слои с несовпадающей решеткой, можно расширить диапазон доступных комбинаций материалов за счет включения напряжения в выращенные материалы. Рассогласование решеток в этом случае обычно составляет несколько процентов от степени сжатия. Например, при эпитаксии InAs на GaAs, Ge или твердых растворов SiGe на подложке Si и т. д. Слой в 2D-режиме претерпевает фазовый переход в сторону 3D-роста поскольку аккомодация упругой деформации в псевдоморфном слое изменяет баланс между поверхностной и межфазной свободными энергиями во время роста. Это приводит к образованию когерентных (бездислокационных) островков или квантовых точек на поверхности тонкого смачивающего слоя. В зависимости от величины деформации толщина смачивающего слоя варьируется от нескольких одноатомных слоев до нескольких десятых нанометров. Как курьезность обратим внимание на то, что в оригинальной публикации Странски–Крастанова [11], эффекты деформации не рассматривались.

Полупроводниковые материалы III–V с узкой запрещенной зоной, такие как InAs, GaSb, InSb и их твердые растворы, представляют особый интерес поскольку они потенциально перспективны для доступа к среднему и дальнему

инфракрасным диапазонам длин волн и обеспечивают создание и развитие следующего поколения светодиодов, лазеров и фотодетекторов в таких применениях, как инфракрасные газовые сенсоры, молекулярная спектроскопия, тепловизионное сканирование и термофотоэлектрические элементы [12]. Для применений в среднем ИК диапазоне (2–5 мкм) КТ обычно формируются из бинарных соединений InAs и InSb или твердых растворов InAsSb, InGaAs, InAlAs, InAsP, InAsSbP и т.д., с использованием InP, GaAs, GaSb и InAs в качестве подложек.

Очевидно, что ключевыми параметрами наноструктур являются форма, распределение по размерам, деформация и состав, которые, безусловно, могут изменить электронные и оптические свойства конечного продукта, используемого в полупроводниковом устройстве. Следовательно, для создания массивов монодисперсных квантовых точек с высокой регулярностью требуется точное управление процессом роста. Однако многие аспекты формирования и оценки КТ тройных и четверных соединений, особенно III–V, и другие научные и технологические проблемы все еще плохо изучены. Существует хорошо развитое понимание зарождения островков [13,14] и последующего укрупнения [15] для простого случая, когда островки растут с фиксированной формой. Однако в нескольких случаях наблюдалось бимодальное распределение островков по размерам, несовместимое с классическим процессом укрупнения [16]. Большой объем последующих работ показал, что в равновесии маленькие островки представляют собой пирамиды или имеют куполообразную форму, тогда как более крупные островки приобретают более сложную многогранную форму после трансформации формы первого рода [17]. Для зародышеобразования и роста островков и наноструктур были применены несколько технологических методов, в частности, молекулярно-лучевая эпитаксия [18], химическое осаждение из газовой фазы [16], жидкофазная эпитаксия [6–8,10,12,19] и другие технологические методы и подходы.

В данной статье мы представляем результаты роста, исследования и численного анализа микро- и наноструктур InAsSbP состава. Будет показано, что по мере уменьшения объема островков происходит следующая последовательность переходов их формы: усеченная пирамида, пирамида, сложно ограненная пирамида, полностью не ограненная «препирамида», которая постепенно переходит в полушарие, а затем снова в пирамидальную КТ, но уже с гранями с более высокими индексами.

2. Материалы и экспериментальные детали

В наших экспериментах образцы выращивались с использованием четырехкомпонентной In-As-Sb-P жидкой фазы. Высота жидкой фазы составляла 500 мкм. Весь процесс роста проводили в атмосфере очищенного водорода.

Промышленные кристаллы InAs, используемые в качестве подложек, имели диаметр 11 мм и толщину 400 мкм, были ориентированы в кристаллографическом направлении (100), нелегированные, с фоновой концентрацией электронов $2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Для формирования жидкой фазы использовались высокочистый индий (7N), сурьма (6N) и нелегированные кристаллы InAs и InP. Сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения (HR-SEM) и просвечивающий электронный микроскоп были использованы для исследования микро- и нанометрических структур.

3. Результаты и обсуждения

3.1. Хронология изменения формы поверхности индуцированных напряжением микро- и нанометрических островков InAsSbP состава

В отличие от других методов выращивания, таких как молекулярно-лучевая эпитаксия или химическое осаждение из металлоорганических паров, жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ) осуществляется в сравнительно близких к термодинамическому равновесию условиях. При ЖФЭ традиционно жидкую фазу гомогенизируют в течение 4–6 часов (в некоторых случаях даже больше) для термодинамического уравнивания. Однако в наших первых экспериментах по выращиванию наноструктур мы специально применили нетрадиционный подход. Мы специально использовали негомогенизированную жидкую фазу (выдерживая жидкую фазу при температуре роста $T = 550^\circ\text{C}$ всего один час), но имеющую четырехкомпонентный состав In-As-Sb-P, который соответствует составу твердой фазы $\text{InAs}_{0.742}\text{Sb}_{0.08}\text{P}_{0.178}$ с постоянной решетки равной постоянной решетки подложки InAs(100). После этого жидкая фаза приводилась в контакт с подложкой в течение десяти минут и удалялась с поверхности подложки. С

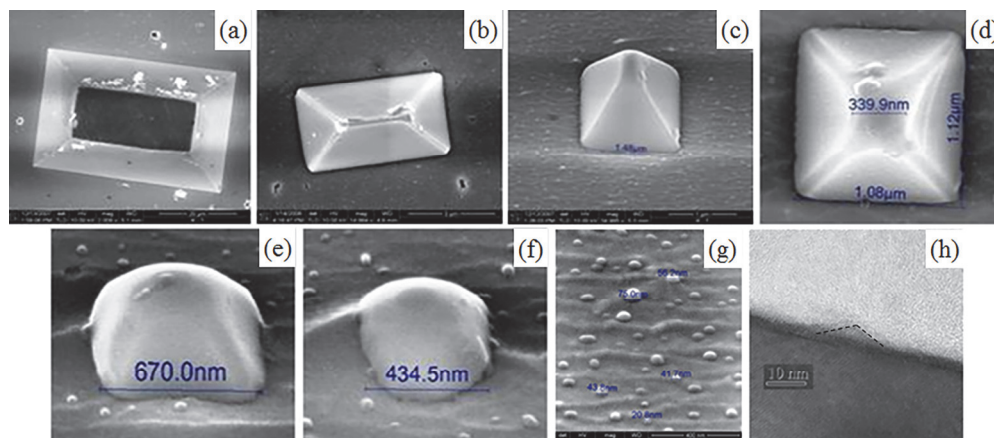


Рис.1. HR-SEM – (a)–(g) и TEM – (h) изображения и хронология изменения формы поверхности стимулированных напряжением островков InAsSbP состава.

помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения на поверхности подложки были обнаружены, с нашей точки зрения, очень интересные индуцированные деформацией микрометрические и субмикрометрические островки, представленные на рисунке 1.

Очевидно, что островки, представленные на рис.1a–1f, в силу своих размеров далеки быть названными как квантовые точки. Однако с кристаллографической точки зрения отчетливо видна интересная трансформация формы поверхности островка при уменьшении объема: от усеченной пирамиды до полусферы, которая, как показывают наши дальнейшие эксперименты, затем постепенно переходит в КТ в форме линзы (или другой конфигурации). Хронология преобразования геометрической формы схематично представлена на рисунке 2.

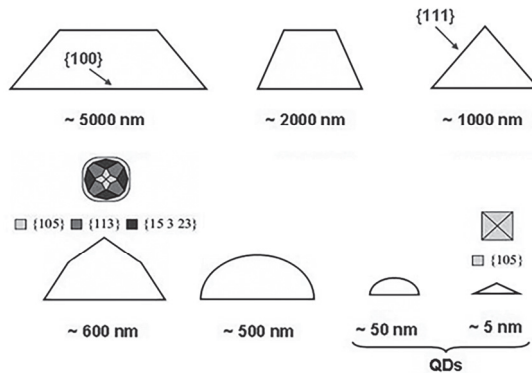


Рис.2. Схематическое представление архитектуры и изменения геометрической формы поверхности островков при уменьшении их объема.

Согласно термодинамическому принципу (минимальная энергия), во время роста на подложках, ориентированных в направлениях (100) или (001), по мере уменьшения объема индуцированных напряжением островков должна быть обнаружена следующая последовательность переходов формы: усеченная пирамида, {111} граненная пирамида, {111} и частично {105} ограненная пирамида, полностью не ограненная «препирамида», структура в виде полусферы, а затем КТ в форме линзы или другой геометрии. Следовательно, островки, выращенные методом ЖФЭ на поверхности с ориентацией (100), должны иметь аналогичную форму для широкого диапазона состава смачиваемого слоя, и должны в основном состоять из островков в виде усеченных пирамид с боковыми гранями {111} и верхней грани {100} с почти постоянным и равным двум отношением стороны основания пирамиды вдоль направления (110) к ее высоте.

И наконец, как уже упоминалось, жидкая фаза гомогенизировалась всего в течение одного часа при начальной температуре роста ЖФЭ. Более продолжительное время (~6 ч и более) или многоступенчатая гомогенизация жидкой фазы должны предотвратить образование микрометрических и субмикрометрических островков и/или позволить их подавление, тем самым способствуя образованию квантовых точек.

3.2. Численный анализ изменения формы поверхности индуцированных островков InAsSbP состава

Для объяснения и численного расчета критического размера преобразования формы островка из пирамиды в полушарие будет использован следующий теоретический подход. Здесь мы используем явное приближение для энергии, которое дает хорошее объяснение перехода формы островка. Как правило, самая маленькая форма «препирамиды» состоит из четырех $\{111\}$ и восьми $\{105\}$ граней на (100) или (001) ориентированной подложке. Согласно HR-SEM измерениям, для нашей системы общая площадь поверхности граней $\{105\}$ пренебрежимо мала по сравнению с поверхностью граней $\{111\}$. Поэтому, мы предполагаем, что наш островок представляет собой усеченную пирамиду с шириной s , длиной t и высотой h в направлениях x , y и z , соответственно. Мы также предполагаем, что пирамида симметрична, а боковая грань расположена под углом θ к подложке.

Полная энергия островка может быть записана как

$$E = E_s + E_R + E_V, \quad (1)$$

где E_s – энергия поверхности и границы раздела, E_R – изменение энергии из-за упругой релаксации, E_V – объемная энергия. В частности,

$$E_s = st(\gamma_i + \gamma_t - \gamma_s) + 2(s+t) \left[h\gamma_e \csc \theta - h \cot \theta (\gamma_t + \gamma_s - \gamma_i)/2 \right], \quad (2)$$

где γ_s , γ_t , и γ_e – поверхностная энергия (на единицу площади) подложки, верхней и краевой граней островка, соответственно, и γ_i – энергия границы раздела островок–подложка [20].

Для случая когерентного роста по методу Странски–Крастанова, когда напряженный материал смачивает поверхность подложки до образования островков, $\gamma_t = \gamma_s$, $\gamma_i = 0$ и, таким образом, выражение для поверхностной энергии принимает вид

$$E_s = 2(s+t) h \Gamma, \quad (3)$$

где $\Gamma = \gamma_e \csc \theta - \gamma_s \cot \theta$.

В основном,

$$\gamma_s = 0.5 C_{ij} \varepsilon_i \varepsilon_j, \quad (4)$$

где C_{ij} ($i, j = 1, \dots, 6$) – модуль эластичности, а $\varepsilon = \Delta a/a$ – относительное напряжение. Для расчета энергии упругой релаксации мы предполагаем, что состав многокомпонентного островка не изменяется в направлении z и что деформация ε постоянна, т.е. $\varepsilon_{xz} = \varepsilon_{yz} = 0$. Для кристаллов с кубической симметрией имеем

$$\gamma_s = \left(\frac{1}{2} C_{11} \frac{\Delta a^2}{a^2} + \frac{1}{2} C_{44} \frac{\Delta a^2}{a^2} \right) d_{\text{wet}}, \quad (5)$$

где d_{wet} – толщина смачиваемого слоя.

Энергия упругой релаксации определяется по формуле [14]

$$E_R = -\frac{1}{2} \int dx dx' \chi_{ij} (x - x') f_i(x) f_j(x'), \quad (6)$$

где x и x' – двумерные векторы, $f_i = \partial_j \sigma_{ij}$ – плотность силы на поверхности, и χ – эластическая функция Грина поверхности, которая описывает линейный отклик на приложенную силу. Здесь $\sigma_{ij} = \sigma_b h(x) \delta_{ij}$ – двумерный тензор напряжения, $\sigma_b = C_{ij} \Delta a/a$ представляет собой xx - или yy -компонент объемного напряжения островков, равномерно деформированных относительно постоянных решетки x и y подложки и позволяющих релаксировать по z , и $h(x)$ представляет собой высоту (толщину) островка в положении x .

Аналитически рассчитанный результат интеграла (6) поверхностной функции Грина изотропного твердого тела [20] можно записать как

$$E_R^{\text{pyramid}} = -2ch^2 \left[s \ln(t/(\phi h)) + t \ln(s/(\phi h)) \right], \quad (7)$$

где $c = \sigma_b^2(1-\nu)/2\pi\mu$ и $\phi = e^{-3/2} \cot \theta$. Коэффициент Пуассона определяется как $\nu = \lambda/(2(\lambda + \mu))$, где μ и λ – коэффициенты Ламэ, $h = 0.5(b_1 - b_2) \tan \theta$, $t = s = (b_1 + b_2)/2$, где b_1 и b_2 – длины нижней и верхней плоскостей усеченной пирамиды, соответственно.

Таким образом, общая энергия пирамидального островка может быть записана как

$$E_{\text{pyramid}} = E_S + E_R = -\frac{c}{2} (b_1 - b_2)^2 (b_1 + b_2) \tan^2 \theta_p \left(\ln \frac{b_1 + b_2}{b_1 - b_2} + \frac{3}{2} \right) + (b_1^2 - b_2^2) \left(\frac{1}{\cos \theta_p} \gamma_e - \gamma_s \right), \quad (8)$$

где θ_p – угол между боковой грани пирамиды и поверхностью подложки.

Для расчета полной энергии островка в форме полусферы воспользуемся следующим подходом. Используя выражение (7) при $b_2 = 0$, $b_1 = s = t = D$ и $h = D/2$, где D – диаметр полусферы, энергию упругой релаксации и поверхностную энергию полусфероподобного островка можно записать как

$$E_R^{\text{globe}} = -cD^3 \left(\frac{3}{2} - \ln \frac{\cot \theta_G}{2} \right), \quad (9)$$

$$E_S^{\text{globe}} = \frac{\sigma S_{\text{globe}}}{2} = \frac{\sigma \pi D^2}{2}, \quad (10)$$

где σ – плотность поверхностной энергии полусферы и θ_G – угол между касательной к полусфере и поверхностью подложки.

Энергия объема островка определяется как сумма химических потенциалов каждого компонента, и поскольку в критическом объеме, когда островок меняет форму от пирамидальной к полусфере, и т.к. количество и тип компонентов

одинаковы, то имеем

$$E_V^{\text{pyramid}} = E_V^{\text{globe}}. \quad (11)$$

Наконец, условие энергетического равновесия можно записать как

$$E_S^{\text{pyramid}} + E_R^{\text{pyramid}} = E_S^{\text{globe}} + E_R^{\text{globe}}, \quad (12)$$

или в раскрытом виде как

$$\begin{aligned} & -\frac{c}{2}(b_1 - b_2)^2(b_1 + b_2) \tan^2 \theta_p \left(\ln \frac{b_1 + b_2}{b_1 - b_2} + \frac{3}{2} \right) + (b_1^2 - b_2^2) \left(\frac{1}{\cos \theta_p} \gamma_e - \gamma_s \right) \\ & = -cD_{\text{cr}}^3 \left(\frac{3}{2} - \ln \frac{\cot \theta_G}{2} \right) + \frac{\sigma \pi D_{\text{cr}}^2}{2}, \end{aligned} \quad (13)$$

где D_{cr} – критический диаметр при изменении формы островка от препирамиды в полусферу.

Для расчета численных значений некоторых параметров, в частности модуля упругости, плотности поверхностной энергии и других параметров для четырехкомпонентного твердого раствора InAsSbP , мы использовали следующее линейное приближение:

$$P(\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y) = P^{\text{InAs}}(1 - X - Y) + X P^{\text{InSb}} + Y P^{\text{InP}}. \quad (14)$$

Соответствующие расчетные значения параметров для островков $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y$, выращенных на подложке $\text{InAs}(100)$, а также некоторые данные, взятые из литературы для InAs , InSb и InP , представлены в таблице.

	InAs	InSb	InP	$\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y$ $x = 0.04; y = 0.02$
$C_{11} \times 10^{-12}$, dyn/cm ²	8.329	6.669	10.11	8.267
$C_{12} \times 10^{-12}$, dyn/cm ²	4.526	3.645	6.61	4.538
$C_{44} \times 10^{-12}$, dyn/cm ²	3.959	3.626	4.56	3.9564
d_{wet} , nm	–	1.266	4.866	14.29
$\sigma \times 10^7$, J/cm ²	752	–	–	~752

Для определения толщины смачивающего слоя (d_{wet}) четырехкомпонентного твердого раствора InAsSbP , используемого в данной работе, была применена методика математической аппроксимации экспериментальных данных. Соответствующие расчетные значения d_{wet} также представлены в таблице.

Таким образом, решая уравнение (13) при $b_1 = 670$ нм, $b_2 = 150$ нм, $\gamma_e = 5 \times 10^{-5}$ Дж/см² [21], $\lambda = (2C_{11} + 3C_{12} + 4C_{44})/5 = 9.195 \times 10^{12}$ дин/см²,

$$\mu = (8C_{44} + C_{11} - C_{12})/10 = 3.537 \times 10^{12} \text{ дин/см}^2, \quad \gamma_s = \left(\frac{1}{2} C_{11} \frac{\Delta a^2}{a^2} + \frac{1}{2} C_{44} \frac{\Delta a^2}{a^2} \right) d_{\text{wet}} =$$

3.42×10^{-6} Дж/см², $v = 0.361$, $\sigma_b = 1.65 \times 10^{10}$ дин/см², $c = 0.784$ Дж/см³, $\theta_G = 25^\circ$, $\theta_p = 40^\circ$, $\Delta a/a = 2 \times 10^{-3}$, определен равный ~ 550 нм критический размер (диаметр) преобразования формы островков InAsSbP из усеченной «препирамиды» в полусферу. Это значение хорошо совпадает с экспериментальным результатом, представленным на рисунках 1e и 1f.

Как видно из рис. 1g, 1h, при дальнейшем уменьшении объема островков при критических значениях около 5–7 нм происходит преобразование формы КТ из линзообразной опять в пирамидальную, но с более высокими {105} индексами граней.

4. Заключение

Таким образом, мы представили результаты измерений и численного анализа изменения формы поверхности стимулированных напряжением микро- и наноструктур InAsSbP состава. Результаты измерений, проведенных с помощью HR-SEM и TEM показали, что по мере уменьшения объема островков обнаруживается следующая последовательность переходов формы: усеченная пирамида, пирамида с {111} гранями, пирамида с {111} и частично {105} гранями, полностью несформированная «препирамида», которая постепенно эволюционируют в полушарие, а затем снова в пирамидальную КТ, но уже с гранями с более высокими индексами. Экспериментально измерены и теоретически рассчитаны критические размеры преобразования формы островков из «препирамиды» в полусферу (500–550 нм), а затем из линзообразной снова в пирамидальную КТ (5–7 нм). Показано, что теоретически рассчитанные значения совпадают с экспериментально измеренными данными.

Авторы выражают благодарность доктору Т. Боекку из института по росту кристаллов (Берлин, Германия) и доктору А. Трамперту из Поль Друде института твердотельной электроники (Берлин, Германия) за HR-SEM и TEM измерения, соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. **D. Bimberg, M. Grundmann, N.N. Ledentsov.** Quantum Dot Heterostructures, New York: Wiley, 1998.
2. **P. Bhattacharya, X.H. Su, S. Chakrabarti, et al.** Appl. Phys. Lett., **86**, 191106 (2005).
3. **A. Rogalski.** Acta Phys. Pol. A, **116**, 389 (2009).
4. **V.M. Aroutiounian, S.G. Petrosian, A. Khachatryan, K. Touryan.** J. Appl. Phys., **89**, 2268 (2001).
5. **A.M. Rudin, L.J. Guo, et al.** Appl. Phys. Lett., **73**, 3429 (1998).
6. **O. Marquardt, T. Hickel, J. Neugebauer, K.M. Gambaryan, V.M. Aroutiounian.** J. Appl. Phys., **110**, 043708 (2011).
7. **K.M. Gambaryan.** Nanoscale Res. Lett., **5**, 587 (2010).

8. **V.M. Aroutiounian, K.M. Gambaryan, P.G. Soukiassian.** Surface Science, **604**, 1127 (2010).
9. **H. Ishikuro, T. Hiramoto.** Appl. Phys. Lett., **71**, 3691 (1997).
10. **K.M. Gambaryan, V.M. Aroutiounian, V.G. Harutyunyan.** Infrared Phys. & Tech., **54**, 114 (2011).
11. **I. Stranski, L. Krastanow.** Math.-Naturwiss., **146**, 797 (1938).
12. **K.M. Gambaryan, V.M. Aroutiounian, T. Boeck, M. Schulze.** Phys. Status Solidi C, **6**, 1456 (2009).
13. **I. Daruka, J. Tersoff, A.-L. Barabasi.** Phys. Rev. Lett., **82**, 2753 (1999).
14. **J. Tersoff, F.K. LeGoues.** Phys. Rev. Lett., **72**, 3570 (1994).
15. **M. Zinke-Allmang, L.C. Feldman, M.H. Grabow.** Surf. Sci. Rep., **16**, 377 (1992).
16. **F.M. Ross, J. Tersoff, R.M. Tromp.** Phys. Rev. Lett., **80**, 984 (1998).
17. **J. Tersoff, B.J. Spencer, A. Rastelli, H. von Kanel.** Phys. Rev. Lett., **89**, 196104 (2002).
18. **N. Liu, J. Tersoff, O. Baklenov, A.L. Holmes, Jr., C.K. Shih.** Phys. Rev. Lett., **84**, 334 (2000).
19. **K.M. Gambaryan, V.M. Aroutiounian, T. Boeck, et al.** J. Phys. D: Appl. Phys., **41**, 162004 (2008).
20. **J. Tersoff, R.M. Tromp.** Phys. Rev. Lett., **70**, 2782 (1993).
21. **K.L. Safonov, V.G. Dubrovskii, N.V. Sibirev, Yu.V. Trushin.** Technical Physics Letters, **33**, 490 (2007).

GEOMETRIC FEATURES AND NUMERICAL ANALYSIS OF InAsSbP COMPOSITION MICRO- AND NANO-STRUCTURES SHAPE TRANSFORMATION AT NUCLEATION FROM LIQUID PHASE

K.M. GAMBARYAN, V.M. AROUTIOUNIAN

Results of the characterization and numerical analysis of InAsSbP composition strain-induced micro- and nanostructures shape transition are presented. Nucleation is performed from In–As–Sb–P quaternary composition liquid phase in Stranski–Krastanow growth mode. Geometric features and the shape transformation chronology of truncated pyramidal islands, lens-shape and pyramidal quantum dots (QDs) are under consideration, which opens up new possibilities at nanoscale engineering and nanoarchitecture of several types of nanostructures. High-resolution scanning electron (HR-SEM) and transmission electron (TEM) microscopes are used for micro- and nanostructures characterization. We show that as the islands volume decreases, the following succession of shape transitions are detected: truncated pyramid, {111} faceted pyramid, {111} and partially {105} faceted pyramid, completely unfaceted “pre-pyramid”, which gradually evolve to hemisphere and then again to pyramidal QD but with higher facet indexes. Critical sizes of islands shape transformation from “pre-pyramid” to hemisphere (500–550 nm) and then from lens-shape again to pyramidal QDs (5–7 nm) are experimentally detected and theoretically evaluated. It is shown that theoretically calculated values coincide with experimentally obtained data.