УДК 539.219

Светлой памяти Виталия Валентиновича Слезова посвящается

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО РАЗМЕРАМ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК InAsSbP/InAs(100) В РАМКАХ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ТЕОРИИ ЛСВ

Р.Д. ВЕНГРЕНОВИЧ^{*}, Б.В. ИВАНСКИЙ, И.И. ПАНЬКО, Ю.М. КУШНИР, В.И. КРИВЕЦКИЙ

Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича, 58012, Украина, г. Черновцы, ул. Коцюбинского 2 ^{*}e-mail:vengrenovich@i.ua

(Поступила в редакцию 14 января 2014 г.)

В рамках модифицированной для поверхности теории ЛСВ проведен анализ роста квантовых точек (КТ) в структуре InAsSbP/InAs(100) на стадии оствальдовского созревания (ОС). Установлено, что после 30-тиминутного роста КТ InAsSbP их распределение по размерам хорошо аппроксимируется обобщенным распределением Чакраверти–Вагнера. При этом рост КТ в процессе ОС контролируется одновременно двумя механизмами – поверхностной диффузией и химической реакцией. При меньших временах роста КТ стадия ОС наступает частично (20 мин) или не наступает вообще (10 мин).

1. Введение

В настоящие время продукты нанотехнологий в виде нанокристаллов или нанокластеров (НК) находят применение в различных областях электроники, информационных технологий, молекулярной медицины, биологии, фармакологии и т.п. [1]. В частности, синтез НК полупроводников открывает не только новые области их применения, но и новые возможности управления свойствами полупроводников. НК полупроводников в виде квантовых точек (КТ) широко используются в оптоэлектронике, в качестве строительных блоков, при конструировании различных приборов и устройств.

У КТ с пространственным ограничением носителей заряда во всех трех направлениях реализуется предельный случай размерного квантования, наиболее характерный для полупроводников [2,3]. Если полупроводниковый кристалл уменьшать до размеров меньших 100 нм, то все его основные характеристики, вследствие эффекта размерного квантования, кардинально изменяются. Электронный спектр такого воображаемого НК, ассоциируемого с КТ, представляет собой набор дискретных уровней, разделенных областями запрещен-

ных состояний, и соответствует электронному спектру изолированного атома.

Качественный прорыв в технологии получения низкоразмерных структур и, в частности, КТ связан с использованием эффекта самоорганизации полупроводниковых наноструктур, получаемых методом молекулярно-лучевой эпитаксии в режиме Странски–Крастанова [4].

В последнее время, благодаря успехам современных нанотехнологий, создаются новые искусственные материалы, в значительной мере расширяющие функциональные возможности электронных приборов в физике, химии, биологии и других областях науки и техники. В частности, использование шаблонной самоорганизации позволяет достигать точного позиционирования НК путем создания плоских и объёмных матриц КТ [5-8].

В качестве подложек для изготовления двухмерных матриц дырок путем реактивного ионного травления, в большинстве исследований используется арсенид галлия (GaAs) [9-11], хотя иногда применяют и кремниевые (Si) подложки [12-14]. На этих подложках методом молекулярно-лучевой эпитаксии выращивают искусственные, трехмерно упорядоченные, квантовые точечные кристаллы.

Особого внимания заслуживает использование в качестве шаблонов углеродных нанотрубок, на поверхность которых осаждаются наночастицы (НЧ) (Pt, Au) [15-17]. Укрупнение НЧ Pt в процессе спекания является основным недостатком их использования в катализе.

Получение самоорганизованных КТ методом молекулярно лучевой эпитаксии в режиме Странски–Крастанова относится к высокотехнологичным дорогостоящим методам. Поэтому параллельно развиваются и другие методы синтеза КТ, такие, например, как капельная, жидкофазная и электрожидкофазная эпитаксии [18-22].

Анализ литературных данных указывает на значительный прогресс, который наблюдается в синтезе КТ полупроводников, с использованием химических методов и, в частности, методов коллоидной химии [23-27]. Например, синтез НК ZnO, одного из наиболее универсальных полупроводников, обладающего многофункциональными свойствами, осуществляется в основном химическими методами из перенасыщенных растворов [28-38]. При этом размеры НК, определяемые из оптических спектров поглощения, колеблятся в пределах от нескольких нанометров (1-5 нм) до нескольких десятков нанометров [37,38]. Из оптических спектров поглощения по сдвигу края поглощения можно определить не только ширину запрещенной зоны и соответствующий ей средний размер НК, но и восстанавить само распределение НК по размерам.

Общим требованием, предъявляемым к КТ, является требование однородности НК по размерам, форме, составу, кристаллической структуре и другим технологическим параметрам. Кроме того, само распределение по размерам должно быть по возможности более узким с небольшим значением дисперсии. Соблюдение этих требований предполагает детальное изучение механизма и кинетики формирования КТ в процессе их синтеза. При этом заключительная стадия формирования КТ является общей для всех НК, независимо от методов их получения. Эта стадия, называемая стадией оствальдовского созревания (OC), заключается в том, что взаимодействие нанокластеров между собой происходит посредством эффекта Гиббса-Томсона, вследствие чего мелкие кластеры растворяются и исчезают, а крупные растут за их счет [39]. В процессе ОС происходит увеличение среднего размера НК и уширение распределения по размерам, что может приводить к ухудшению полезных для практики свойств, первоначально приобретенных массивом КТ во время синтеза. Понятно, что в этом смысле явление ОС является нежелательным. Поэтому изучение механизма и кинетики роста (растворения) НК на стадии ОС открывает возможность управления этим процессом, с целью уменьшения его влияния на нежелательные изменения физических свойств НК в связи с их укрупнением.

Ранее было показано, что в ряде случаев рост кластеров в нанодисперсных системах происходит по двум механизмам одновременно – диффузионному и вагнеровскому, или кинетическому, определяемому скоростью образования химических связей (химической реакцией) на поверхности НК [40-44].

В данной работе, используя результаты экспериментальных исследований авторов [22], мы попытаемся показать, что и в случае квазитрехмерных КТ InAsSbP/InAs(100), их рост (растворение) в процессе ОС также происходит одновременно по двум механизмам – диффузионному, посредством поверхностной диффузии, и вагнеровскому или кинетическому, посредством химической реакции.

2. Основы модифицированной теории ЛСВ применительно к КТ InAsSbP/InAs(100), выращенных методом жидкофазной эпитаксии

Образование новой фазы в процессе фазового превращения, включающего эпитаксию из газообразного и жидкого состояний, кристаллизацию и распад перенасыщенных растворов, как в твердотельных, так и жидких средах, происходит в три стадии: возникновение кластеров (КЛ) новой фазы; их независимый рост и взаимодействие КЛ между собой через эффект Гиббса-Томсона – стадия ОС. В жидких средах возможна еще одна стадия – стадия коагуляции (коалесценции), когда в результате броуновских столкновений две или большее число частиц меньших размеров объединяются в одну большую частицу [45]. Стадия ОС достаточно адекватно описывается теорией Лифшица-Слезова-Вагнера (ЛСВ) [46-48].

Изначально теория ЛСВ была разработана для описания стадии ОС в объемных дисперсных системах, при распаде пересыщенных твердых растворов, когда рост (растворение) КЛ происходит в условиях двух крайних механизмов – диффузионного, контролируемого коэффициентом объемной диффузии D_v , и вагнеровского, или кинетического, контролируемого кинетическим коэффициентом β . Позже Чакраверти [49] распространил теорию ЛСВ на поверхностные дисперсные системы и, в частности, на островковые пленки, в которых рост (растворение) островков происходит посредством поверхностной

диффузии, характеризуемой коэффициентом поверхностной диффузии D_s.

С развитием нанотехнологий установлено, что в гетеросистемах, содержащих КТ, при соответствующих условиях также наблюдается процесс ОС [50,51]. При этом, поскольку свойства нанодисперсных систем, содержащих НК, кардинально отличаются от свойств дисперсных систем с КЛ в микрометровом диапазоне и выше, то следует ожидать, что и сам процесс ОС в наносистемах должен обладать своими характерными особенностями. В первую очередь это следует из того, что в НК число поверхностных атомов сопоставимо с их числом в объеме, поэтому они обладают повышенной реакционной способностью. В этом случае уже нельзя пренебрегать вагнеровским (кинетическим) механизмом роста, контролируемым химической реакцией. Поэтому при росте НК на поверхности (стадия ОС) необходимо учитывать оба механизма – поверхностную диффузию и химическую реакцию. В рамках модифицированной для поверхности теории ЛСВ [42] суммарный поток растворенного материала jк (от) КТ состоит из двух частей

$$j = j_S + j_i, \tag{1}$$

где j_{s} и j_{i} – соответственно, диффузионная и кинетическая части потока j.

Определение функции распределения КТ по размерам предполагает знание их формы. В случае структуры InAsSbP/InAs(100) форма КТ при проведении расчетов выбиралась такой, чтобы, во-первых, она максимально соответствовала форме и профилям экспериментальных КТ, синтезированных авторами работы [22] (рис.1) методом жидкофазной эпитаксии и, во-вторых, чтобы обмен растворенного материала между КТ беспрепятственно осуществлялся путем поверхностной диффузии. В результате, форма КТ InAsSbP моделировалась куполообразными островками [49], в виде сферических сегментов радиуса *r* и высоты *h*, являющихся частью сферы радиуса R_c (рис.1), и характеризующихся краевым углом θ , через который определяются поверхность $S = 4\pi R_c^2 \alpha_2(\theta)$ и объем островков $V = \frac{4}{3}\pi R_c^3 \alpha_1(\theta)$, где



Рис.1. Модель КТ в виде сферического сегмента, являющегося частью сферы радиуса R_c

В рамках рассматриваемой модели распределение КТ InAsSbP по относительным размерам при условии, что их рост (растворение) происходит одновременно по двум механизмам – поверхностная диффузия + химическая реакция, может быть представлено в виде обобщенного распределения Чакраверти-Вагнера [42]

$$g(u, x) = Q(x) g'(u, x), \qquad (2)$$

где $Q(x) = \frac{\Phi}{\frac{4}{3}\pi\alpha_1(\theta)\frac{1}{\sin^3\theta}\int_0^1 u^3g'(u,x)du}$, Φ – объемная доля дисперсной

фазы,

$$g'(u, x) = \frac{u^3 \left(u^2 + 2ux^2 + 2x^2 + x\right)^{\frac{D}{2}}}{\left(1 - u\right)^8} \exp\left(\frac{F - Dx^2}{\sqrt{2x^2 + x - x^4}} \arctan \frac{u + x^2}{\sqrt{2x^2 + x - x^4}}\right) \exp\left(\frac{C}{1 - u}\right), \quad (3)$$

$$B = \frac{32x^4 + 16x^3 + 48x^2 + 13x + 5}{A}, \quad C = -\frac{12x^2 + 3x + 3}{A},$$

$$D = -\frac{80x^4 + 40x^3 + 15x^2 + x + 2}{A}, \quad F = -\frac{32x^6 + 16x^5 + 54x^4 + 34x^3 + 8x^2}{A},$$

$$A = 16x^4 + 8x^3 + 9x^2 + 2x + 1, \quad x = \frac{j_s}{j}, \quad (1 - x) = \frac{j_i}{j}, \quad 0 \le x \le 1,$$

 $u = \frac{r}{r_g}$ – относительный радиус, r_g – максимальный радиус островков.

В рамках модифицированной теории ЛСВ [42] r_g и r_k связаны соотношением

$$\frac{r_g}{r_k} = \frac{2x+2}{2x+1}.$$
(5)

В отличие от традиционной переменной $\rho = \frac{r}{r_k}$, где r_k – критический

(средний) размер островков [46], переменная $u = \frac{r}{r_g}$ [52] позволяет унифициро-

вать интервал изменения относительных размеров НК. Независимо от механизма роста НК он изменяется между нулем и единицей: $0 \le u < 1$. При u = 1 функция распределения НК по относительным размерам не определена [52]. Кроме того, в переменной u g(u, x), как будет показано ниже, удобна для сравнения с экспериментальными гистограммами.

Для крайних механизмов роста обобщенное распределение Чакраверти-Вагнера (2) должно принимать вид распределений Вагнера и Чакраверти по отдельности. Действительно, при x = 0 B = 5; C = -3; D = -2; F = 0 и выражение (3) с точностью до постоянной соответствует распределению Вагнера [48]

$$g'(u) = u(1-u)^{-5} \exp\left(-\frac{3}{1-u}\right).$$
 (6)

В этом случае рост НК полностью контролируется химической реакцией, протекающей на их поверхности.

При
$$x = 1$$
 $B = \frac{19}{6}$; $C = -\frac{1}{2}$; $D = -\frac{23}{6}$; $F = -4$ и выражение (3) с

точностью до постоянной превращается в распределение Чакраверти [49]

$$g'(u) = \frac{u^{3} \exp\left(-\frac{1}{2(1-u)}\right) \exp\left(-\frac{1}{6\sqrt{2}} \operatorname{arctg} \frac{u+1}{\sqrt{2}}\right)}{\left(1-u\right)^{\frac{19}{6}} \left(u^{2}+2u+3\right)^{\frac{23}{12}}},$$
(7)

и рост НК полностью лимитируется поверхностной диффузией.

3. Обсуждение

На рис.2а в графическом виде показано обобщенное распределение Чакраверти-Вагнера (2) для различных значений параметра x. Крайние кривые x = 0 и x = 1 соответствуют распределениям Вагнера и Чакраверти. Все другие кривые, в интервале 0 < x < 1, описывают распределение КТ по размерам при одновременном действии двух механизмов роста (растворения) – поверхностная диффузия + химическая реакция.



Рис.2. Обобщенное распределение Чакраверти-Вагнера в виде кривых, рассчитанных в соответствии с выражением (2) для различных значений x (a); эти же кривые, нормированные на свои максимумы (b).

Эти же кривые, нормированные на свои максимумы, показаны на рис.2b. В таком виде, когда величины, откладываемые по координатным осям, нормированы на единицу, кривые на рис.2b удобны для сравнения с экспериментальными данными (гистограммами, распределениями).

Для сравнения экспериментальную гистограмму (экспериментальную кривую) следует представить в таком же нормированном виде, как и теоретическая кривая. С этой целью, на горизонтальной оси гистограммы, вдоль которой откладываются радиусы (r) или диаметры (d) НК, скажем в нм, переходят к относительной переменной (к относительному диаметру) $u = \frac{r}{r_g} = \frac{d}{d_g}$, где мак-

симальный диаметр d_g берется из гистограммы. В этом случае u – относительный диаметр НК на гистограмме будет изменяться в пределах между 0 и 1.

На вертикальной оси гистограммы все значения, которым соответствует число частиц в единице объема данного диаметра в определенном интервале Δd , нормируются на максимум гистограммы. Таким образом, гистограмма также будет нормирована по координатным осям на единицу. Сравнивая экспериментальную гистограмму с теоретической кривой, после предварительного их построения в одинаковом масштабе, можно увидеть насколько они соответствуют или не соответствуют друг другу. Для количественного сопоставления необходимо сравнивать соответствующие моменты – начальные и центральные, вычисленные для экспериментального и теоретического распределений.

На рис.3 приведены результаты сравнения экспериментальных распределений по размерам КТ InAsSbP, полученных в работе [22] (рис.4), предварительно нормированных указанным выше способом, в зависимости от времени роста при $t = 550^{\circ}$ C: a) 10; b) 20; c) 30 мин, с нормированными теоретическими кривыми.



Рис.3. Сравнение экспериментальных распределений по размерам KT InAsSbP [22] с теоретическими кривыми в зависимости от времени роста: a) 10; b) 20; c) 30 мин.

С целью лучшего визуального восприятия эти же экспериментальные данные в виде гистограмм, заимствованные из работы [53] и соответствующим образом нормированные, приведены на рис.4.

Из рис.За и 4а видно, что представленные на них экспериментальные данные не описываются ни распределением Вагнера (x = 0), ни распределением Чакраверти (x = 1). По нашему мнению, это означает, что после 10-тиминутного роста КТ InAsSbP стадия ОС еще не наступила. По-видимому, здесь имеет место какой-то другой механизм укрупнения НК. Возможно, после десятиминутной видержки, когда новые зародышы больше не образовываются, пересыщение растворённого материала на подложке может все еще оставаться достаточно высоким. Скорость роста в этом случае определяется скоростью осаждения растворённого материала на поверхности КТ, непосредственно из пересыщенного раствора.

После 20-тиминутного роста при температуре 550°С стадия ОС постепенно охватывает большую часть массива КТ: экспериментальные данные на рис.3b и 4b удовлетворительно описываются теоретической кривой. Однако здесь, параллельно с взаимодействием КТ между собой через эффект Гиббса-Томсона, значительная часть НК, по-видимому, все еще продолжает расти независимо друг от друга. И только после 30-тиминутного роста стадией ОС охвачен весь массив КТ InAsSbP/InAs(100). Это подтверждается результатами сравнения, показанных на рис.3с и 4с, где теоретические и экспериментальные распределения КТ достаточно хорошо согласуются между собой.



Рис.4. Экспериментальные распределения на рис.3, изображенные в виде гистограмм. Сравнение такое же.

Таким образом, можно считать доказанным, что рост (растворение) КТ в структуре InAsSbP/InAs(100) на стадии ОС происходит одновременно по двум механизмам, контролируемым поверхностной диффузией и химической реакцией, протекающей на поверхности КТ.

4. Заключение

В результате проведенного анализа особенностей роста КТ в структуре InAsSbP/InAs(100) от времен роста, показано, что после 30-тиминутной выдержки при температуре 550°С, когда наступает стадия ОС, характер распределения КТ InAsSbP по размерам вполне адекватно описывается в рамках модифицированной для поверхности теории ЛСВ. Это следует из того, что на стадии ОС экспериментальные распределения по размерам достаточно хорошо описываются обобщенным распределением Чакраверти-Вагнера, в основу расчета которого положен механизм одновременного роста КТ путем поверхностной диффузии и химической реакции. При временах роста порядка 20 мин, когда стадия ОС наступила не полностью, модифицированная теория ЛСВ может быть привлечена для анализа особенностей роста КТ лишь частично: экспериментальное распределение по размерам удовлетворительно описывается обобщенным распределение Чакраверти-Вагнера. Однако при временах роста, меньших 10 минут, использовать модифицированную теорию ЛСВ для анализа роста КТ не представляется возможным.

На наш взгляд, ситуация при которой рост КТ происходит одновременно по двум механизмам является, по-видимому, более общей по сравнению с той, при которой рост КТ контролируется только одним механизмом – поверхностной диффузией или химической реакцией, рассмотренными ранее Чакраверти и Вагнером.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. U. Hartmann. Faszination Nanotechnologie. München; Heidelberg: Elsevier, Spektrum, Akad. Verl., VIII, 2006.
- X. Fang, T. Zhai, U.K. Gautan, L. Li, L. Wu, Y. Bando, D. Golbeg. Progress in Materials Science, 56, 175 (2011).
- D.V. Talapin, J.-S. Lee, M.V. Kovalenko, E.V. Shevchenko. Chem. Rev., 110, 389 (2010).
- I.N. Stranski, L. Krastanov. Sitz. Ber. Oesterr. Akad. Wiss., Meth.-Nat. wiss. Kl.II, 146, 797 (1938).
- D. Grutzmacher, T. Fromherz, Ch. Dais, Ju. Stangl, E. Muller, Y.Ekinci, H. H. Solak, H. Sigg, R. T. Lechner, E. Wimtersberger, S.Birner, V. Holy, G. Bauer. Nano Letters, 7, 3150 (2007).
- 6. S. Kiravittaya, A. Rastelli, O. G. Schmidt. Appl. Phys. Lett., 87, 243112 (2005).
- Z. Zhong, A. Halilovic, T. Fromherz, F. Schaftler, G. Bauer. Appl. Phys. Lett., 82, 4779 (2003).
- 8. J.L. Gray, S. Atha, R. Hull, J.A. Floro. Nano Lett., 4, 2447 (2004).
- 9. H. Lee, J. A. Johnson, J.S. Speck, P.M. Petroff. J. Vac. Sci. Technol., 18, 2193 (2000).
- 10. M.H. Baier, S. Watanabe, E. Pelucchi, E. Kapon. Appl. Phys. Lett., 84, 1943 (2004).
- 11. S. Kiravittaya, A. Rastelli, O. G. Schmidt. Appl. Phys. Lett., 88, 043112 (2006).

- 12. O.G. Schmidt, K. Eberl. IEEE Trans. Electron Devices, 48, 1175 (2001).
- 13. O.G. Schmidt, N.Y. Jin-Phillipp, C. Lange, U. Denker, K. Eberl, R. Schreiner, H. Grabeldinger, H. Schweizer. Appl. Phys. Lett., 77, 4139 (2000).
- A. Karmous, A. Cuenat, A. Ronda, I. Berbezier, S. Atha, R. Hull. Appl. Phys. Lett., 85, 6401 (2004).
- 15. F. Yang, M.S. Chen, D.W. Goodman. Journal of Phys. Chem. C, 113, 254 (2009).
- S.B. Simonsen, I. Chorkendorff, S. Dahl, M. Skoglundh, J. Sehested, S. Helveg, J. Am. Chem. Soc., 132, 7968 (2010).
- 17. C. Mateo-Mateo, C. Vázquez-Vázquez, M. Pérez-Lorenzo, V. Salgueirño, M.A. Correa-Duarte. Journal of Nanomaterials. 2012, 6 pages, ID 404159 (2012).
- 18. J.H. Lee, Zh.M. Wang, E.S. Kim, et al. Nanoscale Res. Lett., 5, 308 (2010).
- 19. Z.M. Wang, K. Holmes, Y. Mazur, et al. Nanoscale Res. Lett., 1, 57 (2010).
- 20. V.A. Gevorkyan, V.M. Aroutiounian, K.M. Gambaryan, M.S. Kazaryan, K.J. Touryan, M.W. Wanlass. Thin Solid Films, 124, 451 (2004).
- V.A. Gevorkyan, V.M. Aroutiounian, K.M. Gambaryan, A.H. Arakelyan, I.A. Andreev, L.V. Golubev, Yu.P. Yakovlev. Techn. Phys., 52, 339 (2007).
- 22. В.М. Арутюнян, К.М. Гамбарян, В.Г. Арутюнян, П.Г. Сукиассиан, Т. Боек, Я. Шмидтбауэр, Р. Бансен. Изв. НАН Армении, Физика, 48, 55 (2013).
- 23. M.L. Steigerwald, L.E. Brus, Acc. Chem. Res., 23, 183 (1990). C.B. Murray, C.R. Kagan, M.G. Bawendi, Annu. Rev. Mater. Sci., 30, 545 (2000).
- 24. X. Peng, J. Wickham, A.P. Alivisatos. J. Am. Chem. Soc., 120, 5343 (1998).
- 25. W.W. Yu, X. Peng. Angew. Chem., Int. Ed., 41, 2368 (2002).
- J. Nanda, S. Sapra, D.D. Sarma, N. Chandrasekharan, G. Hodes. Chem. Mater., 12, 1018 (2000).
- 27. R. Viswanatha, S. Sapra, S. Sen Gupta, B. Satpati, P.V. Satyam, B.N. Dev, D.D. Sarma. J. Phys. Chem. B, 108, 6303 (2004).
- 28. Z. Hu, G. Oskam, P.C. Searson. J. Colloid Interface Sci., 263, 454 (2003).
- 29. J. Zhang, Z. Lin, Y. Lan, G. Ren, D. Chen, F. Huang, M. Hong, J. Am. Chem. Soc., 128, 12981 (2006).
- Z.R. Tian, J.A. Voigt, J. Liu, B. McKenzie, M.J. McDermott, M.A. Rodriguez, H. Konishi, H. Xu. Nat. Mater., 2, 821 (2003).
- 31. C. Pacholski, A. Kornowski, H. Weller. Angew. Chem., Int. Ed., 41, 1188 (2002).
- 32. C. Ribeiro, E.J.H. Lee, E. Longo, E.R. Leite. Chem. Phys. Chem., 6, 690 (2005).
- 33. R. Bandyopadhyaya, R. Kumar, K.S. Gandhi, D. Ramkrishna. Langmuir, 13, 3610 (1997).
- 34. M. Ethayaraja, K. Dutta, R. Bandyopadhyaya. J. Phys. Chem. B, 110, 16471 (2006).
- 35. M. Ethayaraja, R. Bandyopadhyaya. J. Am. Chem. Soc., 128, 17102 (2006).
- 36. R. Bandyopadhyaya, R. Kumar, K.S. Gandhi. Langmuir, 17, 1015 (2001).
- A. Layek, G. Mishra, A. Sharma, M. Spasova, S. Dhar, A. Chowdhury, R. Bandyopadhyaya. J. Phys. Chem. C, 116, 24757 (2012).
- 38. A. de Kergommeaux, J. Faure-Vincent, A. Pron, R. de Bettignies, B. Malaman, and P. Reiss. J. Am. Chem. Soc., 134, 11659 (2012).
- 39. W. Ostwald. Zs. Phys. Chem., 34, 495 (1900).
- 40. Р.Д. Венгренович, Б.В. Иванский, А.В. Москалюк. ЖЭТФ, 131, 1040 (2007).
- 41. Р.Д. Венгренович, А.В. Москалюк, С.В. Ярема. ФТТ, 49, 13 (2007).
- 42. R.D. Vengrenovich, B.V. Ivans'kyi, A.V. Moskalyuk. Ukranian Journal of Physics, 11, 1101 (2008).
- 43. R. Vengrenovich, B. Ivanskii, I. Panko, M. Stasyk. J. Phys. Chem. C., 117, 13681 (2013).
- B. Ivanskii, A. Moskalyuk, S. Yarema, I. Panko, M. Stasyk. ISRN Nanomaterials 2013, 8 pages (2013).

- A. Layek, G. Mishra, A. Sharma, M. Spasova, S. Dhar, A. Chowdhury, R. Bandyopadhyaya. J. Phys. Chem. C, 116, 24757 (2012).
- 46. I.M. Lifshits, V.V. Slezov. JETP, 35, 479 (1958).
- 47. I.M. Lifshits, V.V. Slezov. J. Phys. Chem. Solids., 19, 35 (1961).
- 48. C. Wagner. Zs. Electrochem., 65, 581 (1961).
- 49. B.K. Chakraverty. J. Phys. Chem. Solids, 28, 2401 (1967).
- 50. О.П. Пчеляков, Ю.Б. Никифоров, А.И. Якимов, Б. Фойхтлендер. ФТП, 34, 1281 (2000).
- 51. R.D. Vengrenovich, Yu.V. Gudyma, S.V. Yarema. Semiconductors, 35, 1378 (2001).
- 52. R.D. Vengrenovitch. Acta metall., 30, 1079 (1982).
- A.K. Simonyan. Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences), 48, 220 (2013).

SIZE DISTRIBUTION OF InAsSbP/InAs (100) QUANTUM DOTS IN THE FRAMES OF MODIFIED FOR SURFACE LSW THEORY

R.D. VENGRENOVICH, B.V. IVANSKII, I.I. PANKO, YU.M. KUSHNIR, V.I. KRYVETSKYI

Analysis of quantum dots (QD) growth in InAsSbP/InAs (100) structure at the stage of Ostwald ripening (OR) is carried out in the frames of modified for surface LSW theory. It is found that after a 30 min QD InAsSbP growth, their size distribution is well approximated by the generalized Chakraverty-Wagner distribution. The growth of QDs in the OR process is governed simultaneously by two mechanisms: surface diffusion and chemical reaction. At short time for QD growth OR stage occurs partially (20 min) or does not occur at all (10 min).