

РОЗДІЛ III. ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ

УДК 004.94:621.315.592

Анатолий Казаков, Геннадий Шаповалов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ СОСУЩЕСТВОВАНИЯ ФАЗ В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Анатолий Казаков, Геннадий Шаповалов

МОДЕЛЮВАННЯ ОБЛАСТЕЙ СПІВІСНУВАННЯ ФАЗ У ТВЕРДИХ РОЗЧИНАХ $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ З ВИКОРИСТАННЯМ РІЗНИХ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Anatolii Kazakov, Hennadii Shapovalov

SIMULATION OF THE SPACES OF PHASE COEXISTENCE IN SOLID SOLUTIONS $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ WITH USING OF DIFFERENT THERMODYNAMIC MODELS

При определенных температурах и составах в многокомпонентных твердых растворах полупроводников возможно формирование модулированных периодических пространственных структур, что приводит к деградации свойств материалов и приборов, создаваемых на их основе. Проблемы прогнозирования свойств структурированных функциональных материалов нано- и микроэлектроники, имеющих оптимальные свойства для реализации практических задач, являются актуальными в настоящее время. Для твердых растворов $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ были рассчитаны области, в которых выполняются условия формирования пространств сосуществования фаз порядка два в рамках моделей строго регулярного раствора с учетом параметров взаимодействий первых двух координационных сфер, модели пострегулярного раствора и модели регулярного раствора с учетом взаимодействий атомов в первых трех координационных сферах, а также проведен сравнительный анализ полученных результатов моделирования.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, термодинамические модели, пространства сосуществования фаз, модулированные структуры, свободная энергия, устойчивость к дифференцированию.

Рис.: 3. Библ.: 15.

При певних температурах і складах у багатокомпонентних твердих розчинах напівпровідників можливе формування модульованих періодичних просторових структур, що призводить до деградації властивостей матеріалів і приладів, створених на їх основі. Проблеми прогнозування властивостей структуризованих функціональних матеріалів нано- і мікроелектроніки, що мають оптимальні властивості для реалізації практичних завдань, є нині актуальними. Для твердих розчинів $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ були розраховані області, в яких виконуються умови формування просторів співіснування фаз порядку два в рамках моделей строго регулярного розчину з урахуванням параметрів взаємодій перших двох координаційних сфер, моделі пострегулярного розчину і моделі регулярного розчину з урахуванням взаємодій атомів у перших трьох координаційних сферах, а також проведено порівняльний аналіз отриманих результатів моделювання.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, термодинамічні моделі, простори співіснування фаз, модульовані структури, вільна енергія, стійкість до диференціювання.

Рис.: 3. Бібл.: 15.

The formation of the modulated periodic spatial structures in multicomponent solid solutions of semiconductors, under certain temperature and composition is possible. This leads to a degradation of properties of materials and devices created on their basis. Problems of forecasting of properties of structured functional materials in nanoelectronics and microelectronics with optimal properties for practical tasks are relevant today. The areas fulfillment of the conditions of formation of the spaces of phase coexistence of the second order for solid solutions $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ were calculated. The calculations in the framework of the regular solution model is strictly within the parameters of interaction of the first two coordination spheres, the model of postregular solution and the regular solution the model, taking into account the interactions of atoms in the first three coordination areas have been executed. The comparative analysis of the simulation results was obtained.

Key words: computer simulation, thermodynamic models, of phase coexistence spaces, modulated structures, free energy, the differentiability.

Fig.: 3. Bibl.: 15.

Постановка проблеми. Актуальною проблемою сучасної мікро- і наноелектроніки являються прогнозування властивостей матеріалів, використовуваних в сучасних оптоелектронних приладах. Для створення оптоелектронних пристроїв, що працюють в ши-

роком спектральному діапазону, перспективними являються багатокомпонентні напівпровідникові матеріали на основі сполучень типу A_3B_5 . Однак при певних умовах в багатокомпонентних твердих розчинах, отриманих на основі цих сполучень напівпровідників, можливо формування періодичних просторових структур, що може призвести до деградації властивостей оптичних пристроїв. При цьому для більш точного опису поведінки досліджуваних матеріалів виникає необхідність дослідження різних термодинамічних моделей, які дозволяють оптимально враховувати фізичні властивості досліджуваних напівпровідникових сполучень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результати досліджень експериментальних складових епітаксціальних шарів, отриманих в роботах [1–5], показують можливість утворення модульованих періодичних структур в багатокомпонентних напівпровідникових матеріалах на основі твердого розчину $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$. Результати розрахунків [6] положень областей існування фаз порядку два, в яких можливо виникнення модульованих структур, в межах моделі строго регулярного розчину з урахуванням взаємодій атомів в перших двох координаційних сферах [7] знаходяться в задовільному відповідності з експериментальними даними [1–5]. Однак ряд експериментальних точок не потрапляє в розраховані області. Причиною може бути відсутність в моделі врахування концентраційних залежностей параметра взаємодії [8]. Крім того, дослідження [9–13] свідчать про утворення в процесі формування епітаксціальних шарів великих кластерообразних утворень ще в рідкій фазі, що вимагає при моделюванні врахування взаємодій між атомами не тільки в перших двох координаційних сферах, але і більш віддалених порядків.

Виділення нерешених раніше частин загальної проблеми. Проведено розрахунок положень областей існування фаз порядку два для твердого розчину $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ в межах термодинамічної моделі нерегулярного розчину і моделей, які враховують взаємодію між атомами різних порядків, а також проведено порівняльний аналіз моделювання в межах різних термодинамічних моделей, що не проводилося раніше.

Ціль статті. З метою аналізу перспектив використання різних термодинамічних моделей для прогнозування критичних явищ в багатокомпонентних твердих розчинах наведено результати розрахунків просторів існування фаз другого порядку. Розрахунки проводилися в межах моделей строго регулярного розчину, в якому передбачалося випадкове розподілення різноманітних атомів по вузлах відповідних підрешіток з урахуванням взаємодій атомів в двох найближчих координаційних сферах, нерегулярного розчину і запропонованої в роботі моделі регулярного розчину, який враховує взаємодію між атомами перших трьох координаційних сфер.

Изложение основного материала. Сучасні методи комп'ютерного моделювання дозволяють проводити аналіз моделей, побудованих на основі термодинамічного підходу і прогнозувати поведінку відповідних систем. Термодинамічні моделі, описувані потенціальними функціями, стійкими до диференціювання, дозволяють проаналізувати процеси виникнення самоорганізованих упорядкованих структур. Умови виникнення просторів існування фаз другого, третього і четвертого порядку, виражені через вищі похідні потенціалу Гіббса, відповідно, мають вигляд [14]:

$$\frac{dG}{dx} = \frac{d^2G}{dx^2} = \frac{d^3G}{dx^3} = 0 ; \quad \frac{d^4G}{dx^4} > 0, \quad (1)$$

$$\frac{dG}{dx} = \frac{d^2G}{dx^2} = \dots = \frac{d^5G}{dx^5} = 0 ; \quad \frac{d^6G}{dx^6} > 0, \quad (2)$$

$$\frac{dG}{dx} = \frac{d^2G}{dx^2} = \dots = \frac{d^7G}{dx^7} = 0 ; \frac{d^8G}{dx^8} > 0, \quad (3)$$

где $G(X_{AC}, X_{BC}, X_{AD}, X_{BD})$ – свободная энергия Гиббса, X_{ij} – концентрации бинарных компонентов.

В качестве исследуемого материала в работе рассматривался перспективный для оптоэлектроники твердый раствор $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$. Для построения областей сосуществования фаз был использован алгоритм, основанный на дифференциальном топологическом подходе, основные идеи которого описаны в работе [7]. Результаты расчетов пространств сосуществования фаз порядка два, полученные в рамках модели строго регулярного раствора для температуры 773 К, показаны на сечении существования твердых растворов диаграммы состояния системы $In - Ga - As - P$ на рис. 1.

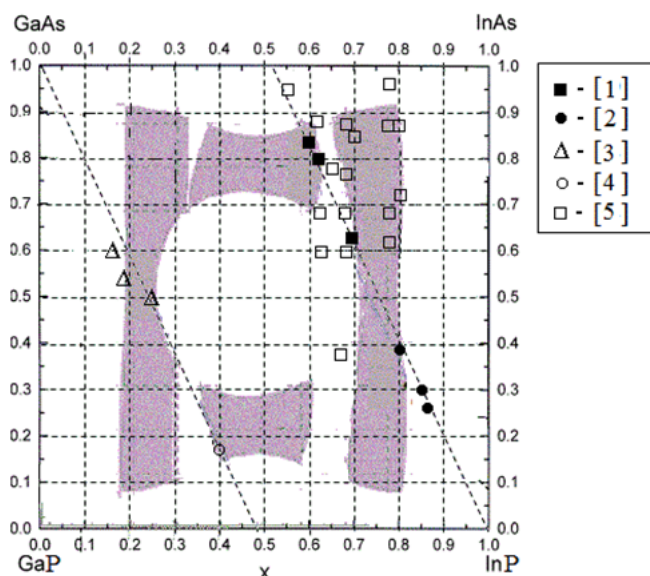


Рис. 1. Области выполнения условий формирования пространств сосуществования фаз порядка два на сечении существования твердых растворов диаграммы состояния системы $In - Ga - As - P$ (773 К), рассчитанные в рамках модели строго регулярного раствора

учитывающие в выражении свободной энергии концентрационные зависимости, более точно [8] описывают свойства многокомпонентных полупроводниковых растворов.

В работе была рассмотрена термодинамическая модель пострегулярного раствора, в которой учитывались концентрационные зависимости параметра взаимодействия в четырёхкомпонентных твёрдых растворах со смешением атомов в двух подрешётках $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$. В выражении для потенциала Гиббса учитывались взаимодействия между атомами первой и второй координационных сфер [6]. Концентрационные зависимости параметров взаимодействия аппроксимировались полиномом второй степени:

$$W(x) = W_1x + W_2(1-x) + W_3x(1-x), \quad (4)$$

где W_1 , W_2 и W_3 — аппроксимационные коэффициенты, полученные в данной работе. Для определения использовались экспериментальные и расчетные данные, приведенные в работах [1–5, 15]. Для твердого раствора $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ выражение (4) приводилось к виду:

Пунктиром показаны изопериодические линии для подложек из $GaAs$ и InP . Темным цветом показаны области выполнения условий формирования пространств сосуществования фаз порядка два, рассчитанные в рамках модели строго регулярного раствора.

Из рис. 1 видно, что большинство экспериментальных составов эпитаксиальных слоев, полученных в работах [1–5], в которых наблюдалось образование модулированных периодических структур, попадает в расчетные области сосуществования фаз порядка два, однако ряд точек находятся за границами рассчитанных областей. Причиной может служить то обстоятельство, что в модели строго регулярного раствора не учитываются концентрационные зависимости параметров взаимодействия. Термодинамические модели,

$$\begin{aligned}
 W_{\text{InP-InAs}}(X_{\text{InP}}, X_{\text{InAs}}) &= W_{\text{InP-InAs}}^1(X_{\text{InP}} + X_{\text{InAs}}) + W_{\text{InP-InAs}}^2(1 - X_{\text{InP}} - X_{\text{InAs}}) + \\
 &+ W_{\text{InP-InAs}}^3(X_{\text{InP}} + X_{\text{InAs}})(1 - X_{\text{InP}} - X_{\text{InAs}}), \\
 W_{\text{GaAs-InAs}}(X_{\text{GaAs}}, X_{\text{InAs}}) &= W_{\text{GaAs-InAs}}^1(X_{\text{GaAs}} + X_{\text{InAs}}) + W_{\text{GaAs-InAs}}^2(1 - X_{\text{GaAs}} - X_{\text{InAs}}) + \\
 &+ W_{\text{GaAs-InAs}}^3(X_{\text{GaAs}} + X_{\text{InAs}})(1 - X_{\text{GaAs}} - X_{\text{InAs}}), \\
 W_{\text{GaP-InP}}(X_{\text{GaP}}, X_{\text{InP}}) &= W_{\text{GaP-InP}}^1(X_{\text{GaP}} + X_{\text{InP}}) + W_{\text{GaP-InP}}^2(1 - X_{\text{GaP}} - X_{\text{InP}}) + \\
 &+ W_{\text{GaP-InP}}^3(X_{\text{GaP}} + X_{\text{InP}})(1 - X_{\text{GaP}} - X_{\text{InP}}), \\
 W_{\text{GaP-GaAs}}(X_{\text{GaP}}, X_{\text{GaAs}}) &= W_{\text{GaP-GaAs}}^1(X_{\text{GaP}} + X_{\text{GaAs}}) + W_{\text{GaP-GaAs}}^2(1 - X_{\text{GaP}} - X_{\text{GaAs}}) + \\
 &+ W_{\text{GaP-GaAs}}^3(X_{\text{GaP}} + X_{\text{GaAs}})(1 - X_{\text{GaP}} - X_{\text{GaAs}}).
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Для расчета положений пространств сосуществования фаз согласно (1) – (3) были получены с учетом (5) аналитические выражения для полных производных свободной энергии Гиббса до восьмой производной включительно, численно определены и построены на сечениях существования твердых растворов диаграммы состояния системы In-Ga-As-P нулевые контура высших производных свободной энергии рассматриваемой системы с первой по восьмую включительно и пространства сосуществования фаз.

На рис. 2 показана рассчитанная область сосуществования фаз порядка два, полученная в рамках термодинамической модели с учетом концентрационных зависимостей параметров взаимодействия. Несмотря на то, что область более компактна, заметного улучшения в совпадении с экспериментальными данными по сравнению с результатами расчетов в рамках строго регулярного раствора, представленными на рис. 1, не наблюдается.

Такой результат может быть связан с тем, что в моделях, использованных выше, выражение для свободной энергии системы строилось с учетом взаимодействия атомов только в первой и второй координационных сферах. Однако исследования [9–13] свидетельствуют о том, что еще в жидкой фазе при выращивании кристалла наблюдаются возникновения более крупных кластероподобных структур, для учета влияния которых необходимо рассматривать взаимодействия между атомами более удаленных координационных сфер.

В работе было получено выражения свободной энергии четырехкомпонентной системы In – Ga – As – P, в которой учтено взаимодействие атомов как первых и вторых, так и третьих координационных сфер. Общее количество соседних атомов рассматриваемой системы с учетом первой, второй и третьей координационной сферы $z_3 = 36$. В выражении свободной энергии

$$G = -kT \ln \sum_{i=1}^3 \exp\left(-\frac{E^i}{kT}\right)
 \tag{6}$$

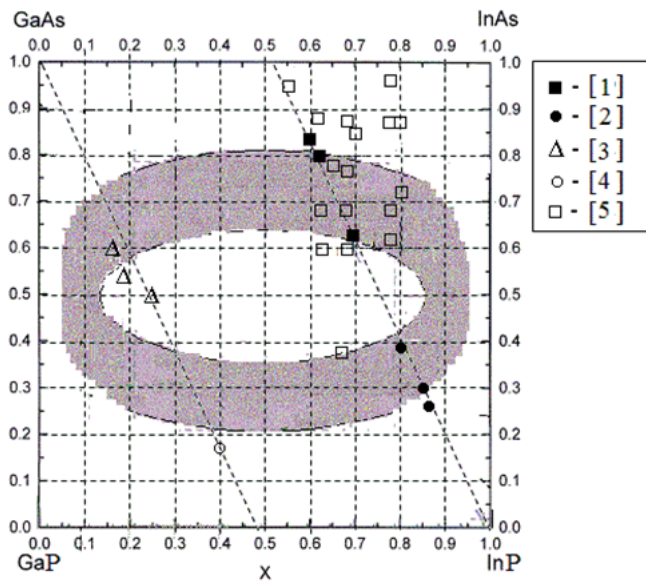


Рис. 2. Области выполнения условий формирования пространств сосуществования фаз порядка два на сечении существования твердых растворов диаграммы состояния системы In – Ga – As – P (773 K), рассчитанные в рамках модели пострегулярного раствора

полная потенциальная энергия E представлялась как сумма потенциальных энергий, обусловленных взаимодействием каждой из рассмотренных конфигураций:

$$E = E^1 + E^2 + E^3, \quad (7)$$

где E^1, E^2, E^3 – вклады, обусловленные взаимодействиями между атомами первой, второй и третьей координационными сферами соответственно.

Общие подходы к расчетам E^1 и E^2 были изложены в работе [6]. Для расчета E^3 было учтено, что при условии нахождения в центре атома А-типа, в третьей координационной сфере могут быть атомы С или D. Тогда, вклад E^3 можно представить в виде:

$$E^3 = w_{AC}^{CA} N_{ACAC} + w_{AC}^{DB} N_{ADBC} + w_{AD}^{CA} N_{ACAD} + w_{AD}^{DB} N_{ADBD} + w_{BC}^{CA} N_{BCAC} + w_{BC}^{DA} N_{BDAC} + w_{BD}^{CA} N_{BCAD} + w_{BD}^{DA} N_{BDAD}, \quad (8)$$

где w_{AC}^{CA} – энергия связи между центральным атомом А и атомом С, находящемся в третьей координационной сфере, при условии, что в первой сфере находится атом С, а во второй – атом А. Аналогично, w_{AC}^{DB}, w_{AD}^{CA} и т. д. – энергии связи между всеми остальными конфигурациями атомов. N_{ACAC} – количество ближайших пар атомов АС – АС при условии, что в центре находится атом А, в первой координационной сфере атом С, во второй – атом А и в третьей – С. N_{ADBC}, N_{ACAD} и т. д. – количество всех остальных соответствующих ближайших соседних пар атомов с учетом трех ближайших координационных сфер. Количество рассматриваемых пар можно найти через вероятность обнаружения соответствующих атомов первой, второй и третьей координационных сфер при фиксированном центральном атоме. Так, количество N_{ACAC} можно выразить через количество атомов N_A и вероятность P_{ACAC} обнаружения атомов С-А-С при фиксированном атоме А через соотношение $N_{ACAC} = z_3 N_A P_{ACAC}$. Вероятность такого события можно найти через вероятности обнаружения соответствующих пар атомов, как произведение вероятностей: $P_{ACAC} = P_{AC} P_{CA} P_{AC}$, которые связаны с количеством вторых ближайших соседних пар атомов соотношениями:

$$P_{AC} = \frac{N_{AC}}{N_{AC} + N_{AD}}. \quad (9)$$

Аналогично представлялись выражения для $N_{ADBC}, N_{ACAD}, N_{ADBD}$ и т. д.

Для моделирования пространств сосуществования фаз полное выражение (6) для свободной энергии рассматриваемой системы $In - Ga - As - P$ с учетом (7) и (8) было приведено к мольным долям $X_{AC}, X_{AD}, X_{BC}, X_{BD}$, связанными с концентрационными параметрами x, y соотношениями:

$$X_{AC} = (1-x)(1-y), \quad X_{AD} = (1-x)y, \quad X_{BC} = x(1-y), \quad X_{BD} = xy. \quad (10)$$

Полученное в результате выражение для свободной энергии с учетом (10) было исследовано на устойчивость к дифференцированию и получению матриц высших производных по концентрациям компонентов. Были получены аналитические выражения для полных высших производных свободной энергии и показано, что исследуемое выражение устойчиво к многократному дифференцированию и имеет невырожденные производные вплоть до восьмой включительно, что дает возможность использовать его для построения областей сосуществования фаз в рассматриваемых твердых растворах с использованием критериев (1) – (3). Аналитические выражения для производных свободной энергии четырехкомпонентного твердого раствора $In_x Ga_{1-x} As_y P_{1-y}$ по концентраци-

ям соответствующих компонентов были использованы для расчета положений нулевых контуров высших производных. Результаты расчетов нулевых контуров были использованы для определения пространств сосуществования фаз порядка два с применением алгоритма построения областей сосуществования фаз [7].

Результаты моделирования пространств сосуществования фаз порядка два, полученные в рамках модели строго регулярного раствора с учетом взаимодействий в третьей координационной сфере для температуры 773 К, показаны на сечении существования твердых растворов диаграммы состояния системы $In-Ga-As-P$ на рис. 3:

Выводы и рекомендации. В результате моделирования для случая учета взаимодействия между атомами первой, второй и третьей координационных сфер четырехкомпонентного твердого раствора $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ получено более точное по сравнению с расчетами в рамках строго регулярного раствора с учетом взаимодействий в первых двух координационных сферах и модели пострегулярного раствора совпадение рассчитанных областей с экспериментальными точками, в которых наблюдались упорядоченные структуры. Результаты позволяют предположить перспективность подхода, учитывающего в процессе моделирования взаимодействия между атомами первых трех координационных сфер для расчетов пространств сосуществования фаз более высоких порядков в полупроводниковых соединениях на основе A_3B_5 .

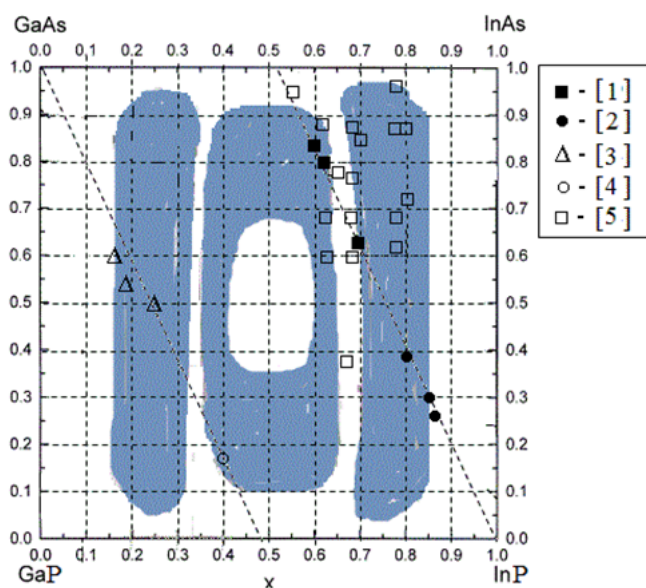


Рис. 3. Области выполнения условий формирования пространств сосуществования фаз порядка два на сечении существования твердых растворов диаграммы состояния системы $In-Ga-As-P$ (773 К), рассчитанные в рамках модели строго регулярного раствора с учетом взаимодействий атомов первой, второй и третьей координационных сфер

Список использованных источников

1. Henoc P. Composition modulation in liquid phase epitaxial $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ layers lattice matched to InP substrates / P. Henoc, A. Izrael, M. Quillec, H. Launois // Appl. Phys. Lett. – 1982. – Vol. 40. – Pp. 951–963.
2. Mahajan S. Spinodal decomposition in InGaAsP epitaxial layers / S. Mahajan, B. V. Dutt, H. Temkin and others // J. Crystal Growth. – 1984. – Vol. 68, № 2. – Pp. 589–595.
3. Kuwano N. Electron microscope study of modulated structures and heterointerfaces in LPE-grown GaInAsP layers lattice matched on GaAs / N. Kuwano, K. Funuka, Oki K. and others // J. Crystal Growth. – 1989. – Vol. 98. – Pp. 82–89.
4. Спонтанно формирующиеся периодические InGaAsP – структуры с модулированным составом / Л. С. Вавилова, В. А. Капитонов, А. В. Мурашева и др. // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, № 9. – С. 1108–1110.
5. Chu S. Surface layer spinodal decomposition in $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y$ and $In_{1-x}Ga_xAs$ grown by hybrid transport vapor phase epitaxy. / S. Chu, S. Nakahara, K. Strege, W. Johnston // J. Appl. Phys. – 1985. – Vol. 57. – Pp. 4610–4616.
6. Казаков А. И. Компьютерное моделирование критических пространств сосуществования на фазовых диаграммах многокомпонентных твердых растворов / А. И. Казаков, Л. Т. Ква-ташидзе, Г. В. Шаповалов // Информатика и математические методы в моделировании – 2014. – Т. 4, №4. – С. 349–356.

7. Onabe K. Thermodynamics of the type $A_{1-x}B_xC_{1-y}D_y$, III-V quaternary solid solutions / K. Onabe // *J. Phys. Chem. Solids*. – 1982 – Vol. 43, № 11. – Pp. 1071–1086.
8. Подольская Н. И. Энергия смешения соединений $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$ / Н. И. Подольская, С. Ю. Карпов, А. И. Жмакин // *Письма в журнал технической физики*. – 2008. – № 34 (9). – С. 17–23.
9. Notzel N. Semiconductor quantum-wire structures directly grown on high-index surfaces / R. Notzel, N.N. Ledentsov, L. Dawareitz and others // *Phys. Rev.* – B, 45, 1992. – Pp. 3507–3513.
10. Вращивание квантовых кластеров GaAs-AlAs на ориентированных не по (100) фасетированных поверхностях GaAs методом молекулярно-пучковой эпитаксии / Ж. И. Алфёров, А. Ю. Егоров, А. Е. Жуков, С. В. Иванов и др. // *ФТП*. – 1992. – № 26. – С. 1715–1719.
11. Gagis G. Novel materials GaInAsPSb/GaSb and GaInAsPSb/InAs for room-temperature optoelectronic devices for a 3-5 μ m wavelength range (GaInAsPSb/GaSb and GaInAsPSb/InAs for 3–5 μ m) / G.S. Gagis, V.I. Vasilev, A.G. Deryagin, V.V. Dudelev, A.S. Maslov, R.V. Levin, B.V. Pushnyi and others // *Semicond. Sci. Technol.*, 23, 2008. – Pp. 125026–125031.
12. Формирование тройных твердых растворов AIII BV на пластинах GaAs и GaSb за счет твердофазных реакций замещения / В. И. Васильев, Г. С. Гагис, В. И. Кучинский, В. Г. Данильченко // *Физика и техника полупроводников*. – 2015. – Т. 49, № 7. – С. 984–988.
13. Формирование массивов квантовых точек $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ в процессе ионно-лучевого осаждения / И. А. Сыроев, М. Л. Лунина, Д. Л. Алфимова, А. В. Благин, Д. А. Гусев, Б. М. Середин // *Неорганические материалы*. – 2013. – Т. 50, № 2. – С. 1–7.
14. Okada K. Classical calculations on the phase transition I. Phase diagram in four-dimensional space for the system with one order parameter / K. Okada, I. Suzuki // *J. Phys. Soc. Jap.* – 1982. – Vol. 51, № 10. – Pp. 3250–3257.
15. Расчет фазовых равновесий в многокомпонентных системах / А. И. Казаков, В. А. Мокрицкий, В. Н. Романенко и др. – М. : *Металлургия*, 1987. – 136 с.

References

1. Henoc, P., Izrael, A., Quillec, M., Launois, H. (1982). Composition modulation in liquid phase epitaxial $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ layers lattice matched to InP substrates. *Appl. Phys. Lett.*, vol. 40, pp. 951–963.
2. Mahajan, S., Dutt, B.V., Temkin, H. et al. (1984). Spinodal decomposition in InGaAsP epitaxial layers. *J. Crystal Growth*, vol. 68, no. 2, pp. 589–595.
3. Kuwano, N., Funuka, K., Oki, K. et al. (1989). Electron microscope study of modulated structures and heterointerfaces in LPE-grown GaInAsP layers lattice matched on GaAs. *J. Crystal Growth*, vol. 98, pp. 82–89.
4. Vavilova, L.S. Kapitonov, V.A., Murasheva, A.V. et al. (1999). Spontaneously formed periodic InGaAsP structures with modulated structure [Spontaneously formed periodic InGaAsP – structure with modulated structure]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov – Physics and Technology of Semiconductor*, vol. 33, no. 9, pp. 1108–1110 (in Russian).
5. Chu, S., Nakahara, S., Stregge, K., Johnston, W. (1985). Surface layer spinodal decomposition in $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y$ and $In_{1-x}Ga_xAs$ grown by hybrid transport vapor phase epitaxy. *J. Appl. Phys.*, vol. 57, pp. 4610–4616.
6. Kazakov, A.I., Kvatashidze, L.T., Shapovalov, G.V. (2014). Компьютерное моделирование критических пространств сосуществования на фазовых диаграммах многокомпонентных твердых растворов [Computer simulation for the phase coexistence spaces formation in quaternary semiconductor alloys]. *Informatika i matematicheskie metody v modelirovanii – Computer and mathematical methods for modeling*, vol. 4, no. 4, pp. 349–356 (in Russian).
7. Onabe K. (1982). Thermodynamics of the type $A_{1-x}B_xC_{1-y}D_y$, III-V quaternary solid solutions. *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 43, no. 11, pp. 1071–1086.
8. Podolskaia, N.I., Karpov, S.Yu., Zhmakin, A.I. (2008). Энергия смешения соединений $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$ [The energy of mixing compounds $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$]. *Pisma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Technical Physics Letters journal*, no. 34 (9), pp. 17–23 (in Russian).
9. Notzel, R., Ledentsov, N.N., Dawareitz, L. et al. (1992). Semiconductor quantum-wire structures directly grown on high-index surfaces. *Phys. Rev.*, B, 45, pp. 3507–3513.
10. Alferov, Zh.I., Egorov, A.Yu., Zhukov, A.E., Ivanov, S.V. et al. (1992). Вращивание квантовых кластеров GaAs-AlAs на ориентированных не по (100) фасетированных поверхностях GaAs методом молекулярно-пучковой эпитаксии [Growing GaAs quantum clusters on the AlAs-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

oriented not on the (100) surfaces of faceted GaAs by molecular beam epitaxy]. *FTP – SSP*, no. 26, pp. 1715–1719 (in Russian).

11. Gagis G.S., Vasilev V.I., Deryagin A.G., Dudelev V.V., Maslov A.S., Levin R.V., Pushnyi B.V. et al. (2008). Novel materials GaInAsPSb/GaSb and GaInAsPSb/InAs for room-temperature optoelectronic devices for a 3–5 μm wavelength range (GaInAsPSb/GaSb and GaInAsPSb/InAs for 3–5 μm). *Semicond. Sci. Technol.*, 23, pp. 125026–125031.

12. Vasilev, V.I., Gagis, G.S., Kuchinskii, V.I., Danilchenko, V.G. (2015). Formirovanie troinykh tverdykh rastvorov A₁B₃V na plastinakh GaAs i GaSb za schet tverdogfaznykh reakcii zameshcheniia [Formation of binary solid solutions A₁B₃V on GaAs and GaSb wafers by solid-phase substitution reactions]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov – Physics and Technology of Semiconductor*, vol. 49, no. 7, pp. 984–988 (in Russian).

13. Sysoev, I.A., Lunina, M.L., Alfimova, D.L., Blagin, A.V., Gusev, D.A., Seredin, B.M. (2013). Formirovanie massivov kvantovykh tochek Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y} v protsesse ionno-luchevogo osazhdeniia [Formation of arrays of quantum dots Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y} in the ion-beam deposition]. *Neorganicheskie materialy – Inorganic Materials*, vol. 50, no. 2, pp. 1–7 (in Russian).

14. Okada, K., Suzuki, I. (1982). Classical calculations on the phase transition I. Phase diagram in four-dimensional space for the system with one order parameter. *J. Phys. Soc. Jap.*, vol. 51, no. 10, pp. 3250–3257.

15. Kazakov, A.I., Mokritskii, V.A., Romanenko, V.N. et al. (1987). *Raschet fazovykh ravnovesii v mnogokomponentnykh sistemakh [Calculation of phase equilibria in multicomponent systems]*. Moscow: Metallurgiiia (in Russian).

Казаків Анатолій Іванович – доктор технічних наук, завідувач кафедри інформаційних технологій проектування в електроніці та телекомунікаціях, Одеський національний політехнічний університет (просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна).

Казаків Анатолій Іванович – доктор технічних наук, завідувач кафедри інформаційних технологій проектування в електроніці та телекомунікаціях, Одеський національний політехнічний університет (просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна).

Kazakov Anatolii – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Information Design Technologies in Electronics and Telecommunications, Odessa National Polytechnic University (1 Shevchenko Av., Odessa, 65044, Ukraine).

E-mail: anatkaz@mail.ru

Шаповалов Геннадій Віталєвич – старший преподаватель кафедры информационных технологий проектирования в электронике и телекоммуникациях, Одеський національний політехнічний університет, (просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна).

Шаповалов Геннадій Віталєвич – старший викладач кафедри інформаційних технологій проектування в електроніці та телекомунікаціях, Одеський національний політехнічний університет (просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна).

Shapovalov Hennadii – Senior Lecturer of the Department of Information Design Technologies in Electronics and Telecommunications, Odessa National Polytechnic University (1 Shevchenko Av., Odessa, 65044, Ukraine).

E-mail: sciencestudies@rambler.ru