

Физические свойства многокомпонентных узкозонных твердых растворов с мезоструктурой

А.В. Благин¹, Л.В. Благина², В.В. Кодин², Н.А. Нефедова³, И.Г. Попова¹

¹*Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону*

²*Институт технологий ДГТУ, г. Волгодонск*

³*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск*

Аннотация: В статье проведено моделирование фазовых равновесий в многокомпонентных системах соединений АЗВ5 и рассчитаны составы жидкой фазы, равновесной с заданным твердым раствором. Исследованы факторы, ограничивающие растворимость легирующих компонентов. Обсуждаются структурные и электрофизические характеристики многокомпонентных полупроводниковых гетеросистем АЗВ5, твердые растворы которых кристаллизуются из жидкой фазы в градиентном тепловом поле. Качественно описан механизм внедрения примесей в решетку эпитаксиальных слоев многокомпонентных твердых растворов.

Ключевые слова: твердые растворы, мезоструктура, антимонид, легирование, жидкая фаза, фазовые превращения, бинарные соединения, ассоциаты, постоянная решетки, многокомпонентные системы.

Введение

Теоретическая интерпретация экспериментальных данных и дальнейшее развитие фундаментальных представлений об объектах искусственной природы становится все более эффективным познавательным инструментом и залогом прогресса новых технологий. В данном случае речь идет о следующем:

- 1) Фундаментальная наука – физика конденсированного состояния;
- 2) Прикладная область – технология полупроводниковых материалов, в частности, оптоэлектронной техники;
- 3) Объект исследований – многокомпонентные твердые растворы (МТР) (в настоящей работе – основанные на бинарных соединениях АЗВ5).

Нередко устоявшиеся представления превращаются в стереотипы, и опирающаяся на них исследовательская мысль приходит в тупик. Одну из таких проблем представляет вопрос о стехиометричности МТР. Они могут быть стехиометричными по составу для макрообластей (сотни и тысячи

монослоев), но в целом – не обладать стехиометрией; дефекты и искажения решетки на микро- и наноуровне могут приводить к частичному или полному разупорядочению, и это обстоятельство не сулит обзримых перспектив использования таких материалов в качестве базы электронных устройств. В других условиях упомянутые неоднородности и искажения могут самоупорядочиваться и образовывать некую сверхрешетку. Однако последнее понятие подразумевает характерное значение периода в единицы-десятки нанометров, тогда как этот период может быть значительно – на один-два порядка больше. Система “выходит” из класса квантово-размерных объектов, тем не менее, она может проявлять новые свойства, привлекательные с точки зрения элементной базы новых фоторегистрирующих или излучательных устройств. В настоящей работе использован термин “системы с мезоструктурой”, что, на наш взгляд, позволяет избежать путаницы и сохранить возможность поиска новых явлений и способов встраивания таких материалов в качестве активных областей приборов. Из анализа рентгеноструктурных данных следует, что уровень содержания таких компонентов, как висмут и мышьяк, может быть выше стандартных уровней легирования, но стехиометрического твердого раствора не образуется.

Фазовые превращения в системах: переход к большему числу компонентов

С ростом числа компонентов твердый раствор в большей степени подвержен распаду, что подтверждается значительным числом источников [1-4]. Это обстоятельство может иметь положительное значение - как фактор самоорганизации мезоструктуры в кристаллизуемой твердой фазе. Вместе с тем тенденция к нарушению гомогенности затвердевающего раствора проявляется в формировании кластеров, ассоциатов, “сиботаксисов” [5,6] в объеме расплава и должна учитываться при моделировании фазовых

превращений. Механизм ас социирования заключается в следующем. Морфологические изменения мигрирующей в кристалле жидкой зоны отстают от изменения температуры на границе растворения (так называемый “гистерезис температурной зависимости скорости зоны” [6,7]). Рост температуры способствует гомогенизации расплава; однако при достижении концентрационного пересыщения на фронте кристаллизации имеет место скачок температуры вниз на 5÷12 К [5] и однородность расплава вновь нарушается; этот процесс сопровождается рядом эффектов – выделением вторых фаз; спинодальным распадом МТР в прилегающих к границе затвердевания слоях, наконец, к формированию субструктуры [8].

Адекватное описание фазовых равновесий должно включать учет констант химических реакций, т.е. необходима модификация модели регулярных растворов; ввод новой модели – “ассоциированного раствора” [9]. Нами была адаптирована модель многокомпонентного расплава на основе предложенной авторами [10] модели EFLCP – “избыточных термодинамических потенциалов”; рассматривалась пятикомпонентная система, равновесие расплава и твердой фазы в которой описывается уравнением:

$$RT \ln \gamma_i = \sum_{j \neq i}^n \alpha_{ij} x_j^2 + \sum_{j \neq i}^n \sum_{k \neq i}^n (\alpha_{ij} + \alpha_{ik} - \alpha_{jk}) x_j x_k + \left(2x_i - \frac{1}{2} \right) \sum_{j \neq i}^n \beta_{ij} x_j^2 + \sum_{j \neq i}^n \sum_{k \neq i}^n x_j x_k [(x_j - x_k) \beta_{kj} + x_j (\beta_{ij} + \beta_{ik}) + (1 - 2x_j) \psi_{ijk}] \quad (1)$$

где R – молярная газовая постоянная, x_i – содержание i -го компонента в жидкой фазе, α_{ij} , β_{ij} , ψ_{ijk} – параметры модели EFLCP, первый из которых равен разности потенциалов Гиббса для смеси компонентов А и В и для их молекулярно связанных состояний в расплаве, рассчитанной через химпотенциалы составляющих расплава согласно [11].

$$\alpha_{ij} = 2(\mu_{ij}^{ol} - \mu_i^{ol} - \mu_j^{ol} + RT \ln 4) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mu_i^{0l} = H_i^0(T) - TS_i^0 = H_{i,298}^0 + \int_{298}^{T_{nl,i}} C_{p,i}^S dT + \Delta H_{nl,i} + \int_{T_{nl,i}}^T C_{p,i}^l dT - \\ - T \left(S_{i,298}^0 + \int_{298}^{T_{nl,i}} \frac{C_{p,i}^S}{T} dT + \frac{\Delta H_{nl,i}}{T_{nl,i}} + \int_{T_{nl,i}}^T \frac{C_{p,i}^l}{T} dT \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $H_{i,298}^0$, $S_{i,298}^0$, $C_{p,i}^S$, $C_{p,i}^l$, $T_{nl,i}$, $\Delta H_{nl,i}$ - теплота и энтропия плавления, теплоемкости кристалла и расплава при постоянном давлении, температура плавления и избыточная энтропия, приведенные в [12,13]. Вторая группа (“бета-коэффициенты”) – изменения свободной энергии при образовании двойных (типа АВ) ассоциатов, определяемых по диаграммам плавления бинарных и квазибинарных соединений,

$$\beta_{ij} = \frac{9}{2} (\mu_{ij}^0 - \mu_i^0 + \mu_j^0 + \mu_{ij}^0) \quad (4)$$

Третья группа (“пси-коэффициенты”) – аналогичные величины для тройных (типа АВС) ассоциатов -

$$\psi_{ijk} = 9 \left(\mu_{ijk}^0 - \frac{2}{3} (\mu_{ij}^0 + \mu_{ik}^0 + \mu_{jk}^0) + \frac{1}{3} (\mu_i^0 + \mu_j^0 + \mu_k^0) + RT \ln \left(\frac{16}{27} \right) \right). \quad (5)$$

Эти коэффициенты определяются экспериментально по разрезам диаграмм плавления ТТР. Пятикомпонентная система есть система 6 двойных соединений – А-D, А-E, В-D, В-E, С-D и С-E. Соответствующие возможные реакции обмена:

$$\begin{cases} AD + BE \Leftrightarrow AE + BD, \\ AD + CE \Leftrightarrow AE + CD, \\ BD + CE \Leftrightarrow BE + CD. \end{cases} \quad (6)$$

Для химпотенциалов бинарных компонент твердого раствора справедливо

$$\begin{cases} \mu_{AD}^S + \mu_{BE}^S = \mu_{AE}^S + \mu_{BD}^S, \\ \mu_{AD}^S + \mu_{CE}^S = \mu_{AE}^S + \mu_{CD}^S, \\ \mu_{BD}^S + \mu_{CE}^S = \mu_{BE}^S + \mu_{CD}^S. \end{cases} \quad (7)$$

Таким образом, 5-компонентную систему можно рассматривать как комплекс 3-х четырехкомпонентных ТР, и постоянная решетки этой системы, по закону Вегарда.

$$a = y_A y_D a_{AD} + y_A y_E a_{AE} + y_B y_D a_{BD} + y_B y_E a_{BE} + y_C y_D a_{CD} + y_C y_E a_{CE}, \quad (8)$$

где y_i – содержание одиночного компонента в своей подрешетке,

$$y_A + y_B + y_C = y_D + y_E = 1. \quad (9)$$

Избыточные потенциалы γ_{ij} описываются квазихимическим приближением:

$$\begin{cases} RT \ln \gamma_{AD}^{is} = y_B^2 \alpha_{AB}^s + y_C^2 \alpha_{AC}^s + y_E^2 \alpha_{DE}^s + y_B y_C (\alpha_{AB}^s + \alpha_{AC}^s - \alpha_{BC}^s), \\ RT \ln \gamma_{AE}^{is} = y_B^2 \alpha_{AB}^s + y_C^2 \alpha_{AC}^s + y_D^2 \alpha_{ED}^s + y_B y_C (\alpha_{AB}^s + \alpha_{AC}^s - \alpha_{BC}^s), \\ RT \ln \gamma_{BD}^{is} = y_A^2 \alpha_{BA}^s + y_C^2 \alpha_{BC}^s + y_E^2 \alpha_{DE}^s + y_A y_C (\alpha_{BA}^s + \alpha_{BC}^s - \alpha_{AC}^s), \\ RT \ln \gamma_{BE}^{is} = y_A^2 \alpha_{BA}^s + y_C^2 \alpha_{BC}^s + y_D^2 \alpha_{ED}^s + y_A y_C (\alpha_{BA}^s + \alpha_{BC}^s - \alpha_{AC}^s), \\ RT \ln \gamma_{CD}^{is} = y_A^2 \alpha_{CA}^s + y_B^2 \alpha_{CB}^s + y_E^2 \alpha_{DE}^s + y_A y_B (\alpha_{CA}^s + \alpha_{CB}^s - \alpha_{AB}^s), \\ RT \ln \gamma_{CE}^{is} = y_A^2 \alpha_{CA}^s + y_B^2 \alpha_{CB}^s + y_D^2 \alpha_{ED}^s + y_A y_B (\alpha_{CA}^s + \alpha_{CB}^s - \alpha_{AB}^s), \end{cases} \quad (10)$$

где

$$\begin{cases} \alpha_{AB}^s = \alpha_{BA}^s = y_D^2 \alpha_{ADB D}^s + y_E \alpha_{AEB E}^s, \\ \alpha_{AC}^s = \alpha_{CA}^s = y_D^2 \alpha_{ADC D}^s + y_E \alpha_{AEC E}^s, \\ \alpha_{BC}^s = \alpha_{CB}^s = y_D^2 \alpha_{BDC D}^s + y_E \alpha_{BEC E}^s, \\ \alpha_{DE}^s = \alpha_{ED}^s = y_A^2 \alpha_{ADA E}^s + y_B \alpha_{BDB E}^s + y_C \alpha_{CDE}^s, \end{cases} \quad (11)$$

Разработанный нами алгоритм позволяет решать как прямую задачу (входные параметры – температура равновесия и состав твердой фазы, отвечающий ожидаемым приборным характеристикам, которые, в свою очередь, требуют согласования по постоянной кристаллической решетки, коэффициенту термического расширения и энергии фундаментального перехода), так и обратную – по заданной жидкой фазе ищется температура роста и состав твердого раствора.

Расчетные параметры заданы в таблице 1. Для трехкомпонентных подсистем альфа-коэффициенты интерполировались по бинарным составляющим арсенида-антимонида индия, легированного висмутом [14]. Параметры компонентов расплава брались из работы [5], за исключением выделенных звездочкой – они найдены опытным путем (см. табл. 2).

Таблица 1

Альфа-коэффициенты для двойных компонентов МТР

Система	α^S , Дж/моль
InAs-InSb	11900,0
GaAs-GaSb	14246,0
InAs-GaAs	12528,1
InSb-GaSb	9637,0
InBi-GaBi	4360,0
InBi-InSb	5800,0
GaBi-GaSb	7420,0

Таблица 2

Альфа-, бета-коэффициенты для пар атомов расплава

Система	α^L , Дж/моль	β^L , Дж/моль
In - Sb	-17,225+3,44T	520*
In - As	1717-26,65T	900*
In - Bi	1260*	-
Ga - Sb	14750-21,5T	880
Ga - As	-11,702-1,93T	1300
Ga - Bi	685*	-
As - Sb	3140	1460
As - Bi	6985	2400*
Sb - Bi	2950*	3250*
In - Ga	4441,4	1050

Таблица 3

Равновесные составы пятикомпонентной системы

(x –сурьма, y-висмут, z – галлий в твердой фазе). Температура 825 К

№	x	y	z	X_{Sb}^L	X_{Bi}^L	X_{Ga}^L	X_{Sb}^L	X_{Bi}^L	X_{Ga}^L
1	0,94	0,002	0,04	0,41	0,15	0,11	0,46	0,24	0,15
2	0,96	0,002	0,03	0,41	0,18	0,09	0,48	0,18	0,09
3	0,96	0,002	0,04	0,41	0,17	0,08	0,44	0,16	0,09
4	0,93	0,003	0,04	0,41	0,12	0,08	0,36	0,16	0,08
5	0,98	0,002	0,05	0,46	0,12	0,07	0,40	0,18	0,09
6	0,92	0,003	0,06	0,36	0,15	0,08	0,41	0,18	0,08

Таблица 4

Равновесные составы пятикомпонентной системы

(x –сурьма, y-висмут, z – галлий в твердой фазе). Температура 713 К

№	x	y	z	X_{Sb}^L	X_{Bi}^L	X_{Ga}^L	X_{Sb}^L	X_{Bi}^L	X_{Ga}^L
1	0,94	0,020	0,06	0,44	0,21	0,18	0,46	0,18	0,22
2	0,96	0,030	0,05	0,47	0,15	0,16	0,44	0,13	0,19
3	0,92	0,014	0,05	0,47	0,13	0,16	0,45	0,13	0,17
4	0,89	0,015	0,09	0,41	0,13	0,18	0,40	0,13	0,16
5	0,87	0,018	0,07	0,42	0,12	0,17	0,41	0,13	0,16
6	0,91	0,025	0,07	0,48	0,14	0,18	0,45	0,16	0,18

На рис. 1 отображены результаты моделирования – коэффициенты распределения как функции состава.

Результаты расчетов показали, что максимально достижимое содержание висмута в твердых растворах следующее: в системах

InSbBi – 0,04 мол. дол.; в GaSbBi – 0,015; в GaInSbBi – 0,02;
в ПТР GaInAsSbBi – 0,0008.

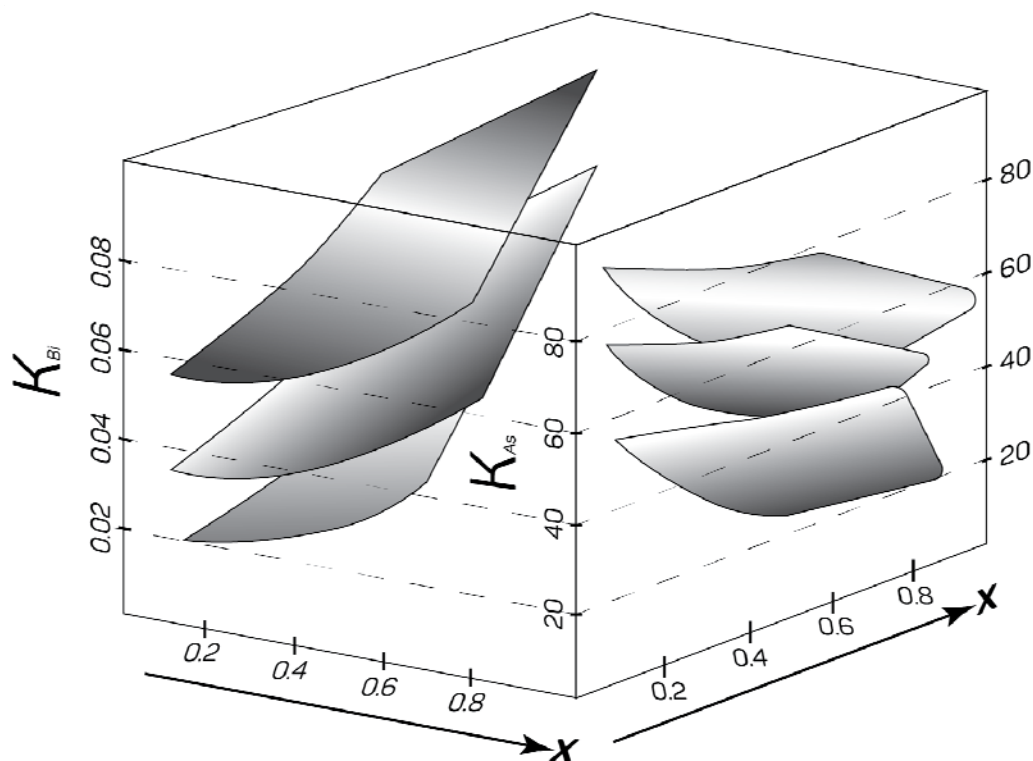


Рис. 1. Поверхности равновесных значений коэффициентов сегрегации висмута и мышьяка. Ординаты вглубь куба – содержание Bi в жидкой фазе

Рентгеноструктурный анализ многокомпонентных твердых растворов

Был получен ряд образцов на основе ЧТР InAsSbBi/InSb. Использовался метод порошка. Рентгенограммы снимались на дифрактометре ДРОН-3М (эксперимент осуществлялся в Cu α -излучении от 20° до 90°, использовался никелевый фильтр, напряжение на трубке 35 кВ, ток до 30 мА, скорость движения: счетчика – 0,1 град/мин, ленты самописца 20 мм/мин, ширина щелей ¼ мм. По центрам тяжести пиков рентгенограмм измеряли угол дифракции 2 θ для компонентов твердого раствора и экспериментальное значение межплоскостного расстояния $d_{\text{эксп}}$. Индексы Миллера (hkl) определялись по квадратичной форме сингонии и

исследовались на соответствие кристаллографической постоянной [15].
Данные измерений содержатся в таблице 5 для антимионида-висмутита индия.

Таблица 5

Параметры структуры твердого раствора InSb-InAsSbBi

(данные настоящей работы)

h	k	l	$2\theta, \text{Å}$	$d_{\text{эксп}}, \text{Å}$	I, отн. ед.	$d_{\text{расч}}, \text{Å}$
1	1	1	23,767	3,74062	98,3	3,7408
2	0	0	27,514	3,23948	0,02	3,2392
2	2	0	39,300	2,29066	79,66	2,2902
3	1	1	46,444	1,95345	49,02	1,9533
2	2	2	48,642	-	0,00	1,8703
4	0	0	56,795	1,61975	13,24	1,6197
3	3	1	62,434	1,48636	19,78	1,4862
4	2	0	64,241	1,44875	0,01	1,4488
4	2	2	71,240	1,32255	26,43	1,3225
5	1	1	76,312	1,24686	10,86	1,2469
3	3	3	76,312	1,24686	3,63	1,2469
4	4	0	84,530	1,14534	8,44	1,1453
5	3	1	89,398	1,09513	15,05	1,0952
6	0	0	91,018	-	0,00	1,0798
4	4	2	91,018	-	0,00	1,0798
6	2	0	97,517	1,02442	13,25	1,0244

Проведено сравнение результатов по As с данными авторов [15-18], имело место совпадение с точностью до 0,001. По кривой отражения на краевых значениях 2θ измерялась постоянная решетки a . Была установлена зависимость ее от уровня легирования висмутом (рис. 2).

Эталонная линия соответствовала $2\theta = 71,865^\circ$ ($hkl = 422$); значение $d_{\text{эсп}}$ составило $1,3126 \text{ \AA}$; постоянная решетки $a = 6,434 \text{ \AA}$. Содержание As и Bi не превышало $0,015$ мол. дол.

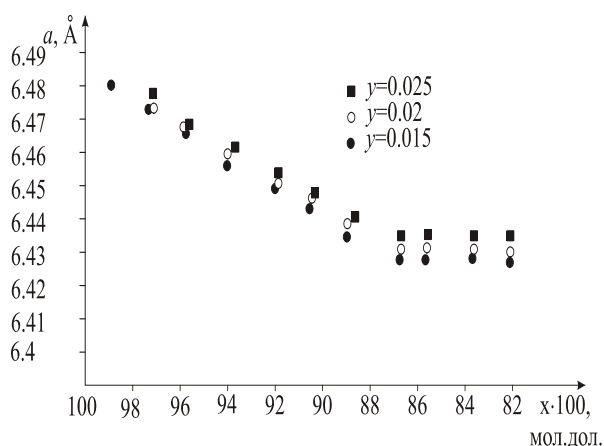


Рис. 2. Постоянная решетки системы InAsSbBi как функция состава (X_{Bi}^{S}) (эксперимент)

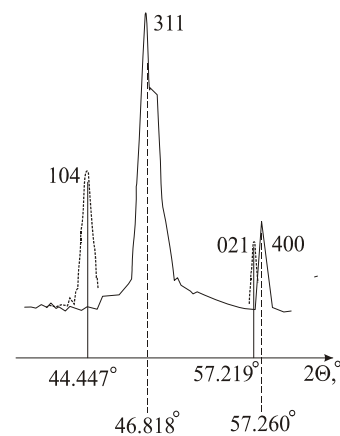


Рис. 3.

Возникновение кривых мышьяка (отображены пунктиром) при его

содержании 1,2 ат %, висмута – X_{Bi}^{S} 1,7 ат %

Электрофизические свойства твердой фазы систем, легированных висмутом

Холловские измерения проводились в магнитном поле низкой напряженности ($H = 3200$ эрстед) при температурах жидкого азота и комнатной. Содержание примесей не превышало 1016 см^{-3} . Распределение электронов по координате эпитаксиального роста исследовалось методом послойного травления. Вычисление электрофизических характеристик осуществлялось, согласно [5],

$$\sigma = \frac{\sigma_{n+1} d_{n+1} - \sigma_n d_n}{\Delta d},$$

$$\mu = \frac{\bar{\mu}_{n+1} \bar{\sigma}_{n+1} d_{n+1} - \bar{\mu}_n \bar{\sigma}_n d_n}{\bar{\sigma}_{n+1} d_{n+1} - \bar{\sigma}_n d_n},$$

где σ_n, μ_n – усредненные характеристики пленок с поперечным размером $\Delta d = d_{n+1} - d_n$. Контакты были изготовлены из индия, легированного теллуром. Твердые растворы InAsSbBi и GaInSbAsBi обладали проводимостью *n*-типа. Параметры пятикомпонентной системы сведены в таблицу 6.

Таблица 6

Концентрация и подвижность электронов в пятикомпонентном твердом растворе при различных уровнях X_{Bi}^{S} (*y*)

<i>y</i> , мол. дол.	$n \times 10^{-16}, 10^{-3}$ T=77 К	$\mu \times 10^{-4}$, см ² /(В×с) T = 77 К	$n \times 10^{-16}$, см ⁻³ T= 300 К	$\mu \times 10^{-4}$, см ² /(В×с) T = 300 К
0,005	1,2	86	1,4	2,8
0,008	1,2	112	1,6	3,4
0,011	1,5	136	2,0	3,2
0,012	1,8	172	2,3	3,6
0,015	1,9	185	2,3	3,8
0,017	2,1	178	2,4	3,6
0,022	2,2	192	2,6	3,6

Значения электрофизических параметров существенно зависят от уровня X_{Bi}^{S} (*y*). Очевидно, это является следствием сложного поведения висмута в твердой фазе, в первую очередь, сопряженного с растяжением решетки. Максимальные значения подвижности составили $9,57 \cdot 10^5$ см²/(В×с) (77 К) и $0,77 \cdot 10^5$ см²/(В×с) (295 К). Зависимость концентрации носителей от поперечной координаты приведена на рис. 4. Незначительное повышение *n*(*d*) наблюдалось до значений толщины 35 мкм, далее средний угол наклона кривой скачком увеличивается; на наш взгляд, термодинамически равновесное замещение атомами висмута сурьмы завершается и имеет место внедрение первых в междоузлия; взаимодействие

соседних атомов с валентными электронными оболочками V_i становится более симметричным, что обуславливает рост концентрации; однако и дефектность пленки к ее тыльной стороне должна возрастать. Отмеченные предположения нуждаются в детальном дополнительном исследовании; возможно, известный из различных источников [4,5,7] рост дефектности вызван целым комплексом причин. Данные настоящей работы, несомненно, пополнят арсенал прикладной физики электронных технологий, войдя в один ряд с такими публикациями, посвященным системам с висмутом, как [19,20].

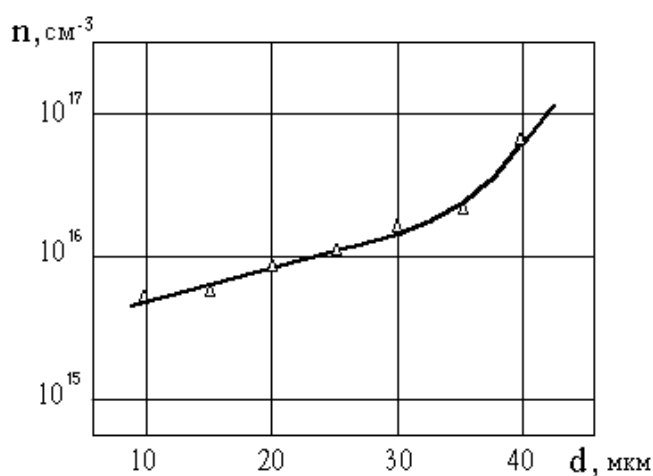


Рис. 4. Распределение концентрации носителей заряда по поперечной к слою координате пятикомпонентного твердого раствора

Выводы

В работе проведено моделирование и расчеты равновесных составов жидкой и твердой фаз многокомпонентных полупроводниковых систем на основе соединений АЗВ5. Применена модель избыточных термодинамических функций, в которой учитываются процессы образования ассоциатов в расплаве вблизи температур солидуса. Определены предельные концентрации легирующих компонентов – мышьяка и висмута. Исследована структура твердых растворов, уточнены кристаллофизические параметры легированного V_i антимонида-арсенида индия. Приведены результаты

электрофизических измерений и на качественном уровне описаны механизмы легирования узкозонных твердых растворов.

Литература

1. Stringfellow, O.G., 1974. Calculation of Ternary and Quarternary III - V - Phase Diagrams. Crystall Growth, 27: С. 21-27.

2. Кузнецов В.В., Москвин П.П., Сорокин В.С. Неравновесные явления при жидкостной гетероэпитаксии полупроводниковых твердых растворов. М.: Металлургия, 1991. 175 с.

3. Рубцов Э. Р. Особенности фазовых превращений в системах твердых растворов с низкой термодинамической устойчивостью: автореф. дис. ... канд. ф.-м. СПб., 1994. 16 с.

4. Благин А.В., Калинин В.В., Лебедев В.И., Лунин Л.С. Физика кристаллизации и дефектов твердотельных структур на микро- и наноуровне. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2009. 288 с.

5. Лозовский В.Н., Лунин Л.С., Благин А.В. Градиентная жидкофазная кристаллизация многокомпонентных полупроводниковых материалов. Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ, 2003. 376 с.

6. Баранник А.А., Благин А.В., Киреев Е.И., Лунина М.Л. Кинетика кристаллизации в висмутсодержащих гетеросистемах Al-In-Sb-Bi и Ga-As-P-Bi // Неорганические материалы. 2008. №12. С. 1430-1433.

7. Лунина М.Л. Гетероструктуры на основе висмутсодержащих твердых растворов АЗВ5, полученные методом зонной перекристаллизации градиентом температуры: автореф. дис. ... канд. ф.-м. Ставрополь, 2008. 22 с.

8. Баранник А.А., Благина Л.В., Драка О.Е., Подщипков Д.Г. Физико-химические основы получения многокомпонентных полупроводников с заданной субструктурой, Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ ЮФУ, 2009. 204 с.

9. Пигулев Р.В. Получение и исследование многокомпонентных гетероструктур на основе твердых растворов АЗВ5: автореф. дис. ... канд. техн. Ставрополь, 2007. 20 с.

10. Литвак А.М., Чарыков Н.А. Новый термодинамический метод расчета фазовых диаграмм двойных и тройных систем, содержащих In, Ga, As и Sb // Неорганические материалы. 1991. №2 Т.27. С. 225-230.

11. Михайлова М.П., Литвак А.М., Чарыков Н.А. InGaAsSbP – новый материал инфракрасной оптоэлектроники // ФТП. 1997. №4 Т.31. С. 410-415.

12. Соединения АЗВ5 / Лебедев В.В., Под ред. Лебедев В.В., Стрельченко С.С. М.: Металлургия, 1984. 144 с.

13. Термодинамические свойства веществ / Рябин В.А., Под ред. Рябин В.А., Свит Т.Ф., Остроумов М.А. Л.: Химия, 1977. 389 с.

14. Акчурин Р.Х., Жегалин В.А., Сахарова Т.В. Анализ фазовых равновесий в системе In–As–Sb–Bi в связи с жидкофазной эпитаксией твердых растворов $InAs_{1-x-y}Sb_xBi_y$ // Изв. вузов. Сер. Цв. металлургия. 1995. №7. С. 12-16.

15. Акчурин Р.Х., Акимов О.В. Тонкослойные упругонапряженные гетероструктуры $InAs_{1-x-y}Sb_xBi_y/InSb$: расчет некоторых физических параметров // Физика и техника полупроводников. 1995. №2 Т.29. С. 362-369.

16. Акчурин Р.Х., Сахарова Т.В., Жегалин В.А. Получение тонких слоев InSb методом ЖФЭ // Неорганические материалы. 1995. №11 Т.31. С. 1431-1436.

17. Акчурин Р.Х., Сахарова Т.В., Жегалин В.А. Эпитаксиальный рост $InAs_{1-x-y}Sb_xBi_y$ на подложках из InSb из висмутовых растворов // Неорганические материалы. 1992. №2 Т.28. С. 502-506.

18. Zav'yalov, V.V., E.A. Zotova and E.Yu. Shamparov, 2008. A Two-Channel Two-Frequency Low-Temperature Photodetector at Wavelengths of 119

and 220 mm of an H₂O Laser. Instruments and Experimental Techniques, 3(51): 428–433.

19. Благин А.В., Благина Л.В., Нефедова Н.А. и др. Физические свойства светоизлучающих твердых растворов, изопериодных антимониду галлия. // Инженерный вестник Дона, 2017, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/arhive/n4y2017/4613.

20. Хасбулатов С.В., Павелко А.А., Шилкина Л.А. и др. Исследования высокотемпературного мультиферроика феррита висмута, легированного самарием // Инженерный вестник Дона, 2015, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3428.

References

1. Stringfellow, O.G., 1974. Phase Diagrams. Crystall Growth, 27, pp. 21-27.
2. Kuznetsov V.V., Moskvina P.P., Sorokin V.S. Neravnovesnye yavleniya pri zhidkostnoy geteroepitaksii poluprovodnikovyykh tverdykh rastvorov [The nonequilibrium phenomena at liquid heteroepitaxy of semiconductor solid solutions]. M. Metallurgiya, 1991. 175 p.
3. Rubtsov E. R. Osobennosti fazovykh prevrashcheniy v sistemakh tverdykh rastvorov s nizkoy termodinamicheskoy ustoychivost'yu [Features of phase transformations in the systems of solid solutions with low thermodynamic stability]. avtoref. dis. ... kand. f.-m. SPb., 1994. 16 p.
4. Blagin A.V., Kalinchuk V.V., Lebedev V.I., Lunin L.S. Fizika kristallizatsii i defektov tverdotel'nykh struktur na mikro- i nanourovne [Physics of crystallization and defects of solid-state structures on micro and a nanolevel]. Rostov-na-Donu. YuNTs RAN, 2009. 288 p.
5. Lozovskiy V.N., Lunin L.S., Blagin A.V. Gradientnaya zhidkofaznaya kristallizatsiya mnogokomponentnykh poluprovodnikovyykh materialov [Gradient

liquid-phase crystallization of multicomponent semiconductor materials]. Rostov-na-Donu: SKNTs VSh, 2003. 376 p.

6. Barannik A.A., Blagin A.V., Kireev E.I., Lunina M.L. Neorganicheskie materialy. 2008. №12. pp. 1430-1433.

7. Lunina M.L. Geterostruktury na osnove vismutsoderzhashchikh tverdykh rastvorov A₃V₅, poluchennye metodom zonnoy perekristallizatsii gradientom temperatury [The heterostructures on a basis the vismutsoderzhashchikh of solid A₃B₅ solutions received by method of zonal recrystallization by temperature gradient]. avtoref. dis. ... kand. f.-m. Stavropol, 2008. 22 p.

8. Fiziko-khimicheskie osnovy polucheniya mnogokomponentnykh poluprovodnikov s zadannoy substrukturoy [Physical and chemical bases of receiving multicomponent semiconductors with the set substructure]. Barannik A.A., Blagina L.V., Draka O.E., Podshchipkov D.G., Rostov-na-Donu: SKNTs VSh YuFU, 2009. 204 p.

9. Pigulev R.V. Poluchenie i issledovanie mnogokomponentnykh geterostruktur na osnove tverdykh rastvorov A₃V₅ [Receiving and research of multicomponent heterostructures on the basis of solid A₃B₅ solutions]. avtoref. dis. ... kand. tekhn. Stavropol, 2007. 20 p.

10. Litvak A.M., Charykov N.A. Neorganicheskie materialy. 1991. №2 T.27. pp. 225-230.

11. Mikhaylova M.P., Litvak A.M., Charykov N.A. FTP. 1997. №4 T.31. pp. 410-415.

12. Soedineniya A₃V₅ [Combination A₃B₅]. Lebedev V.V., Pod red. Lebedev V.V., Strel'chenko S.S. M. Metallurgiya, 1984. 144 p.

13. Termodinamicheskie svoystva veshchestv [Thermodynamic properties of substances]. Ryabin V.A., Pod red. Ryabin V.A., Svit T.F., Ostroumov M.A. L. Khimiya, 1977. 389 p.



14. Akchurin R.Kh., Zhegalin V.A., Sakharova T.V. *Izv. vuzov. Ser. Tsv. metallurgiya*. 1995. №7. pp. 12-16.

15. Akchurin R.Kh., Akimov O.V. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 1995. №2 T.29. pp. 362-369.

16. Akchurin R.Kh., Sakharova T.V., Zhegalin V.A. *Neorganicheskie materialy*. 1995. №11 T.31. pp. 1431-1436.

17. Akchurin R.Kh., Sakharova T.V., Zhegalin V.A. *Neorganicheskie materialy*. 1992. №2 T.28. pp. 502-506.

18. Zav'yalov, V.V., E.A. Zotova and E.Yu. Shamparov, 2008. *Instruments and Experimental Techniques*, 3(51), pp. 428–433.

19. Blagin A.V., Blagina L.V., Nefedova N.A. i dr. *Inzhenernyj vestnik Dona (Rus)*, 2017, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/arhive/n4y2017/4613.

20. Khasbulatov S.V., Pavelko A.A., Shilkina L.A. i dr. *Inzhenernyj vestnik Dona (Rus)*, 2015, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3428.