

УДК 54-165:54-171:546.86'19

СКРЫТАЯ ОБЛАСТЬ РАСПАДА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ В СИСТЕМЕ Sb–As

© 2001 г. Т.П. Сушкова, Г.В. Семенова

Воронежский государственный университет

Расчет концентрационной зависимости относительной интегральной молярной свободной энергии Гиббса на основании модельных представлений теории регулярных растворов и физической концепции раствора позволил установить координаты области возможного распада твердых растворов $Sb_{1-x}As_x$ при низкой температуре. Показано, что основной причиной отклонения от идеальности в поведении твердых растворов являются упругие напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Диффузионный распад многокомпонентных твердых растворов представляет интерес в связи с практическим использованием материалов на их основе. Распад твердых растворов может благоприятно влиять на свойства материала, например, в случае дисперсионного упрочнения [1] или при получении наноструктурированного состояния [2]. Однако часто нежелательный распад может приводить к потере полезных свойств материала или к изменению его свойств со временем. В связи с этим при создании материалов на основе компонентов, образующих твердые растворы, очень важно знать равновесную фазовую диаграмму системы как при высоких температурах, когда равновесие достигается довольно быстро, так и при низких температурах, когда диффузионная подвижность атомов, составляющих систему, мала, и полное равновесие недостижимо.

Среди разнообразных материалов, применяемых в современной электронной технике, большую роль играют соединения типа $A^{III}B^V$ и твердые растворы на их основе. Возможность непрерывного изменения свойств системы при изменении состава, характерная для непрерывного ряда твердых растворов, позволяет получать материалы с оптимальными характеристиками. В твердых растворах $A^{III}B^V C^V_{1-x}$ в качестве компонентов часто выступают сурьма и мышьяк, совместное присутствие которых, во многом определяет и характер равновесий в многокомпонентной системе. В бинарной системе Sb–As образуется непрерывный ряд твердых растворов с минимальной точкой [3]. Однако, в литературе имеются данные [4] о том, что в сплавах $Sb_{1-x}As_x$, отожженных при $T = 473 - 673$ К в течение 100 дней, наблюдается чрезвычайно медленное превращение, заключающееся в распаде высоко-

температурного твердого раствора на два других, содержащих примерно 20–25 ат. % As и 70 ат. % Sb. Термодинамический анализ, проведенный в [3] на основании тензиметрических данных, также показывает, что в системе Sb–As наблюдается тенденция к распаду твердого раствора при пониженных температурах.

Целью настоящей работы является оценка стабильности твердых растворов $Sb_{1-x}As_x$, что позволит прогнозировать устойчивость при субсолидусных температурах тройных твердых растворов в системах с участием этих компонентов.

РАСЧЕТ ОБЛАСТИ РАСПАДА И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $Sb_{1-x}As_x$

Возможность образования в системе неустойчивых фаз и распада их на два сосуществующих твердых раствора различного состава можно анализировать на основе общих термодинамических представлений о фазовых равновесиях. Удобным представляется анализ концентрационной зависимости относительной интегральной молярной свободной энергии Гиббса (G^M), особенно если термодинамические свойства твердой фазы можно описать с помощью модели, устанавливающей зависимость параметра взаимодействия $W(x_i, T)$ от концентрации или температуры.

На основании тензиметрических данных в работе [3] установлено, что для твердых растворов $Sb_{1-x}As_x$ эта величина зависит как от температуры, так и от концентрации. Если предположить, что зависимость $W = f(T, x)$ определяется уравнением $W = Ax + B$, где A и B, в свою очередь, зависят от температуры как $A = a_0 + aT$; $B = b_0 + bT$, то экспериментальные значения параметра взаимодействия в твердом состоянии могут быть аппроксимированы уравнением:

$$W_s = -9,8368x + 0,0216xT - 0,0343T + 39,7417 \text{ (кДж/моль)} \quad (1)$$

Условия равновесия фаз α и β , на которые распадается бинарный твердый раствор, определяются известной системой уравнений

$$\partial G^{M(\alpha)}(x)/\partial x = 0, \partial G^{M(\beta)}(x)/\partial x = 0, \quad (2)$$

где x – концентрация второго компонента (As) в твердой фазе, $G^M(x)$ – энергия Гиббса смешения твердой фазы:

$$G^M(x) = x(1-x)W(x, T) + RT[x \ln x + (1-x) \ln(1-x)]. \quad (3)$$

После стандартных преобразований системы (2) условия равновесия можно записать следующим образом:

$$RT \ln(1-x_1) + x_1^2(B+x_1A) - x_1^2(1-x_1)A = \quad (4)$$

$$RT \ln(1-x_2) + x_2^2(B+x_2A) - x_2^2(1-x_2)A$$

$$RT \ln x_1 + (1-x_1)^2(B+x_1A) + x_1(1-x_1)^2A = \quad (5)$$

$$RT \ln x_2 + (1-x_2)^2(B+x_2A) + x_2(1-x_2)^2A,$$

где x_1 и x_2 – содержание второго компонента (мышьяка) в фазах α и β , на которые распадается твердый раствор.

По уравнению (3) была рассчитана концентрационная зависимость энергии Гиббса смешения твердой фазы (G^M -х кривые) для разных значений температуры (рис.1).

Решение системы уравнений (4) и (5) дает положение границ области распада (бинодаль). Результаты расчета представлены на рис.2.

При использовании модельных представлений параметр взаимодействия включает в себя лишь члены, определяемые величиной энергии взаимодействия между частицами, т.е. учитывает “химические” эффекты. В более общем случае необходимо учесть и упругие напряжения.

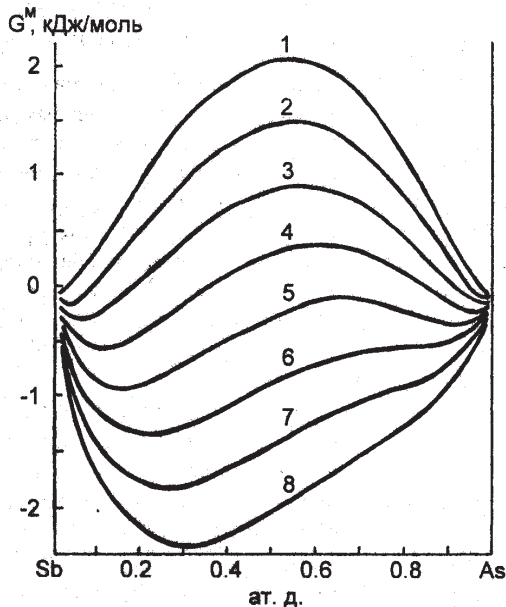


Рис. 1. Концентрационная зависимость энергии Гиббса смешения сплавов $Sb_{1-x}As_x$ при температуре T (K): 1 – 573, 2 – 623, 3 – 673, 4 – 723, 5 – 773, 6 – 823, 7 – 873, 8 – 923

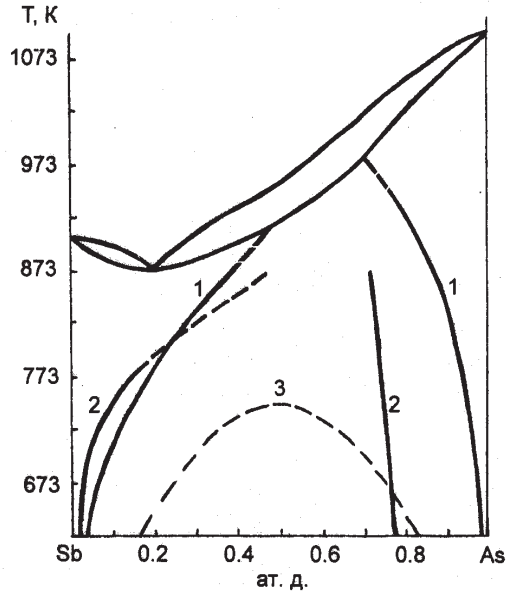


Рис. 2. Кривые распада твердых растворов $Sb_{1-x}As_x$: 1 – расчет с использованием модельных приближений теории растворов ($W=f(x,T)$); 2 – расчет в соответствии с физической концентрацией твердого раствора; экспериментальные данные [4]

Существует подход, позволяющий проводить расчет кривых ограниченной растворимости и бинодальных кривых, не привлекая модельные приближения растворов и не используя величину энергии смешения или другие термодинамические данные по фазовым диаграммам [5,6]. При этом неупорядоченный твердый раствор, образованный изоморфными компонентами рассматривается как аддитивная система, состоящая из следующих невзаимодействующих подсистем: а) атомных полиэдров среднего размера при $T=0$ К, образующих решетку идеального по периодичности кристалла; б) статистических смещений центров “реальных” атомных полиэдров относительно центров атомных полиэдров среднего размера; в) фононов; г) термически возбужденных электронов. Выражение для свободной энергии твердого раствора в этом случае имеет вид

$$G(x, T) = H^0(x) + G_{упр}(x, T) + G_{внбр}(x, T) + G_{эл}(x, T) - TS_{контф}(x), \quad (6)$$

где $H^0(x)$ – энергия химической связи атомов в кристаллической решетке при 0 К (без учета энергии нулевых колебаний и энергии упругих искажений). Все остальные компоненты свободной энергии соответствуют перечисленным выше независимым подсистемам. Расчет проводился при температуре, большей дебаевской (Θ). Поэтому:

$$G_{внбр}(x, T) = G_{внбр}[\Theta(x, T)/T] \approx -RT - 3RT \ln(T/\Theta(x, T)) + 9/8(R\Theta(x, 0)). \quad (7)$$

Было принято

$$\Theta(x, T) = \Theta(x, 0)[1 - \alpha_v(x, T)\gamma_r(x)t], \quad (8)$$

где $t = T - \Theta(x, 0)$; $\alpha_v(x, T) = 3\alpha_n(x, T)$; $\alpha_n(x, T) = 0$ при $t \leq 0$ и $\alpha_n(x, T) = \alpha_n(x)$ при $t \geq 0$; $\alpha_n(x, T)$ – линейный коэффициент термического расширения; γ_r – константа Грюнайзена.

Автором [7] было показано, что энергия подсистемы флуктуационных волн статистических смещений в упруго-изотропных кристаллах совпадает с выражением для упругой энергии, полученным в рамках теории упругости. Поэтому в первом приближении

$$G_{\text{упр}}(x, T) = \varphi d(x, T)[\Delta d(T)]^2 E(x, T) x(1-x), \quad (9)$$

где $\varphi = 3\pi N_A z/16$, z – координационное число (для ромбоэдрической структуры As и Sb $z = 6$);

$$d(x, T) = d(x, 0)[1 + \alpha_n(x, T)t], \quad (10)$$

$d(x, 0)$ – кратчайшее расстояние между центрами средних атомных полиэдров для сплава заданного состава при $t \leq 0$;

$$\Delta d(T) = d_{\text{As}} - d_{\text{Sb}}; \quad (11)$$

$$E(x, T) = E(x, 0)[1 - \beta(x, T)t], \quad (12)$$

$E(x, T)$ – модуль Юнга твердого раствора; $\beta(x, T) = 2\alpha_v(x, T)\gamma_r(x)$ – температурный коэффициент модуля Юнга.

В [8] показано, что концентрационная зависимость параметров элементарной ячейки медленно охлажденных сплавов $\text{Sb}_x\text{As}_{1-x}$ подчиняется закону Вегарда в пределах ошибки эксперимента, поэтому зависимость $d(x, 0)$ считали аддитивной. Кратчайшие межатомные расстояния в чистых As и Sb в плоскости (110) были рассчитаны как $d = a/2$, где a – параметр элементарной ячейки в гексагональной установке [8] при 78 К.

Данные о концентрационной зависимости модуля Юнга, коэффициента линейного расширения, константы Грюнайзена и температуры Дебая для сплавов $\text{Sb}_x\text{As}_{1-x}$ в литературе отсутствуют, поэтому соответствующие зависимости также считали аддитивными. (Сведения о том, что для сплавов $\text{Sb}_x\text{Bi}_{1-x}$ температура Дебая – величина аддитивная, приводятся в [8].) Все необходимые для расчета параметры представлены в таблице 1.

Табл. 1.

Характеристики чистых компонентов

Параметр	As	Sb	Источник
Θ_d , К	285	200	[12]
E , ГПа	7,75	56,9	[13]
$a_{\text{гекс}}$, нм	0,37595	0,43012	[8]
α_n , 10^{-6} К	4,7	8,5	[10]
γ_r	0,16*	0,86	*- наш расчет, [14]

В связи с отсутствием в справочной литературе величины константы Грюнайзена для мышьяка, она была оценена нами по формуле $\gamma_r = 3\alpha_n V/(\chi C_v)$ [9], где $V = 12,95 \text{ см}^3/\text{моль}$ [10] – молярный объем, $C_v \approx C_p$,

$C_p = 24,64 \text{ Дж/моль}\cdot\text{К}$ [10] – молярная теплоемкость, $\chi = 4,56 \cdot 10^{-6} \text{ атм}^{-1}$ [11] – коэффициент изотермической сжимаемости мышьяка.

Предварительная оценка свободной энергии термически возбужденных электронов показала, что данная величина на несколько порядков меньше остальных слагаемых формулы (6) и в дальнейших расчетах нами не учитывалась. Действительно, для полуметаллов количество свободных электронов невелико, поэтому электронная составляющая свободной энергии раствора не играет значительной роли.

Для построения концентрационной зависимости энергии Гиббса смещения твердых растворов необходимо рассчитать избыточную энтропию смешения и энтальпию смешения:

$$S^E(x, T) = S^{\text{мб}}(x, T) - [(1-x)S_{\text{Sb}} + xS_{\text{As}}], \quad (13)$$

$$H^E(x, T) = \Delta H^0(x) + H^E_{\text{выбр}}(x, T) + H^E_{\text{упр}}(x, T), \quad (14)$$

где $S^{\text{мб}}(x, T) = S_{\text{выбр}}(x, T) + S_{\text{упр}}(x, T)$ – избыточная энтропия твердого раствора, S_{As} и S_{Sb} – энтропии чистых компонентов при температуре T ;

$$S_{\text{выбр}}(x, T) = -\partial G_{\text{выбр}}/\partial T = 4R - 3R \ln(\Theta(x, T)/T) + 3RT(\beta/2)/(1-t\beta/2); \quad (15)$$

$$S_{\text{упр}}(x, T) = -\partial G_{\text{упр}}/\partial T = -G_{\text{упр}}(x, T)[\partial \ln d(x, T)/\partial T + 2\partial \ln \Delta d(T)/\partial T + \partial \ln E(x, T)/\partial T]; \quad (16)$$

$$H^E_{\text{выбр}}(x, T) = H_{\text{выбр}}(x, T) - [(1-x)H_{\text{Sbвыбр}} + xH_{\text{Asвыбр}}]; \quad (17)$$

$$H_{\text{выбр}}(x, T) = \partial(G_{\text{выбр}}/T)/\partial(1/T) = 9/8(R\Theta(x, 0)) + 3RT + 3RT^2(\beta/2)/(1-t\beta/2); \quad (18)$$

$$H^E_{\text{упр}}(x, T) = H_{\text{упр}}(x, T) = \partial(G_{\text{упр}}/T)/\partial(1/T) = -TG_{\text{упр}}(x, T)[\partial \ln d(x, T)/\partial T + 2\partial \ln \Delta d(T)/\partial T + \partial \ln E(x, T)/\partial T] + G_{\text{упр}}(x, T); \quad (19)$$

Величина $\Delta H^0(x)$ была исключена из формулы (14), т.к. рассчитать ее в настоящее время не представляется возможным.

Расчет по формулам (13) – (19) позволяет определить вклад энтропийного и энтальпийного факторов в величину избыточной энергии Гиббса смешения фаз, оценить степень отклонения твердых растворов от идеальности, построить G^M -х кривые и по точкам перегиба на последних установить границы области расслоения в твердой фазе. Результаты расчета представлены на рис. 2, 3.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Общий вид концентрационных зависимостей G^M -х в системе Sb-As, построенных как на основе модельных представлений (четырёхпараметрическая модель), так и с учетом упругих искажений (рис. 2), однозначно указывает на возможность распада твердого раствора с понижением температуры. Это согласуется с общим видом диаграммы состояния данной системы, поскольку наличие минимума на фазовой диаграмме с непрерывным рядом твердых растворов часто является свидетельством возможности превращений при

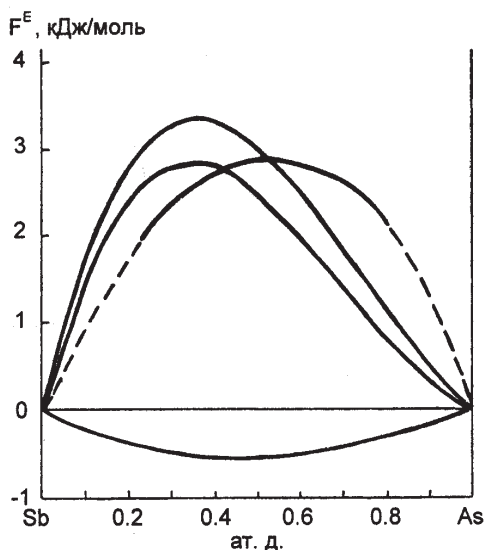


Рис. 3. Концентрационная зависимость избыточных функций смешения сплавов $Sb_{1-x}As_x$ при $T=873$ К. 1 – G^E , 2 – H^M , 3 – TS^E , 4 – G^E по данным [3]

температурах ниже солидуса. При анализе ряда систем, в которых, как и в системе $Sb-As$, оба элемента находятся в одной группе периодической системы и образуют непрерывный ряд твердых растворов с минимумом можно отметить, что решающим фактором, определяющим характер взаимодействия, является разница в атомных размерах. Компоненты такого рода систем обладают одинаковым электронным строением, типом кристаллической структуры и характером химической связи и именно поэтому в зависимости от разницы в размерах могут образовывать либо ограниченные, либо непрерывные растворы с возможными превращениями ниже линии солидуса. Ярким примером является система $Cu-Au$, характеризующаяся образованием соединений Курнакова. Разница в атомных размерах для системы $Sb-As$ составляет 12,2% и находится вблизи так называемой “благоприятной” зоны, определяемой в соответствии с правилом Руайе.

Значения термодинамической активности компонентов в системе $Sb-As$, оцененные в [3] на основании экспериментальных данных, свидетельствуют о положительном отклонении вдоль линии трехфазного равновесия. Однако при понижении температуры эта тенденция нарастает и система характеризуется достаточно большими положительными значениями избыточной свободной энергии, наличие которой, в основном, связано с энтальпией смешения $H^M > 0$.

Расчет относительной интегральной молярной свободной энергии Гиббса, проведенный в настоящей

работе, позволил не только выявить тенденцию к распаду высокотемпературного твердого раствора, но и оценить координаты области расслоения.

На рис. 2 приведены кривые расслоения твердых растворов, рассчитанные двумя независимыми методами. Наблюдается хорошее качественное (и даже количественное со стороны Sb) соответствие вида кривых и их положения на диаграмме состояния. Купол распада асимметричен и имеет скрытый максимум при $x \sim 0,65$ ат.д. As и при температуре $\sim 923-973$ К. Концентрационный интервал, в котором твердые растворы распадаются, увеличивается с понижением температуры, и при $T < 600$ К твердофазная растворимость по расчетным данным не превышает 1% с обеих сторон. При высоких температурах ширина однофазной области со стороны Sb в 2-3 раза больше, чем со стороны As , что, возможно, связано с размерным фактором. Твердый раствор на основе сурьмы, обладающей большими размерами атомов и большим параметром решетки, при увеличении концентрации второго компонента остается стабильным в большем концентрационном интервале, чем твердый раствор на основе мышьяка.

Кривые расслоения имеют асимметричный температурный спад (рис. 2). Вероятно, причиной этого является то, что температурный коэффициент модуля Юнга β для Sb почти в 10 раз больше, чем для As , что обеспечивает более резкое уменьшение упругой энергии твердого раствора (и его стабилизацию) с возрастанием температуры.

Вид G^M -х кривых сплавов $Sb_{1-x}As_x$ (рис. 1) также указывает на то, что рассматриваемые твердые растворы имеют тенденцию к распаду. С понижением температуры энергия Гиббса смешения фаз растет и при $T < 773$ К переходит в область положительных значений, при этом уменьшается стабильность однофазного состояния. Появление на G^M -х кривых при $T < 923$ К второго минимума означает, что в этой области температур происходит распад гомогенного твердого раствора на две отличающиеся по составу фазы.

Следует отметить, что рассчитанный нами купол распада твердых растворов превышает экспериментальные данные [4] и по значению критической температуры, и по концентрационному интервалу. Экспериментально этот распад не был зафиксирован, не считая данных работы [4], по-видимому, по той причине, что из-за низкой температуры солидуса диффузионная подвижность атомов слишком мала для того, чтобы фазы разделились в пространстве.

Общим недостатком модельного описания поведения твердых растворов является отсутствие учета разницы молярных объемов компонентов, поскольку внимание уделяется лишь чисто “химическому”

СКРЫТАЯ ОБЛАСТЬ РАСПАДА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ В СИСТЕМЕ Sb-As

фактору – разнице энергий взаимодействия атомов того или иного сорта. Второй подход, представленный в настоящей работе, позволил не только избежать этого недостатка, но и вскрыть влияние каждой составляющей избыточной свободной энергии, приводящей к отклонению от идеальности. Функции смещения, характеризующие поведение твердых растворов $Sb_{1-x}As_x$, были рассчитаны в [3,8] на основании данных тензиметрических исследований. Однако оценить эти характеристики при температурах ниже 853 К не удалось ввиду малых значений давления насыщенного пара.

Расчет, проведенный в настоящей работе на основании физической концепции твердого раствора, позволил получить значения избыточных характеристик в широком температурном интервале. Как следует из рис. 3, величина свободной энергии смещения при 873 К достаточно хорошо согласуется с данными [3]. Анализ полученных данных (табл. 2) позволяет определить, с влиянием каких факторов связано положительное отклонение от идеальности.

Определяющий вклад в величину избыточной энергии смещения вносит энтальпийный фактор, на что указывают небольшие значения избыточной энтропии сме-

щения. Наибольший вклад, определяющий положительное отклонение от идеальности, вносит упругая энергия ($H_{упр}^M$). Характер концентрационной зависимости G^E , отличающийся наличием максимума при ~ 30 ат. % As, также связан с изменением именно этой характеристики. Изменения энтропии, связанные с упругими напряжениями, наоборот, крайне невелики.

Анализ температурной зависимости термодинамических характеристик показывает, что упругие составляющие как энтальпии, так и энтропии изменяются крайне незначительно. Изменение избыточной энергии Гиббса с ростом температуры связано, в основном, с возрастанием вибрационной составляющей энтропии.

ВЫВОДЫ

На основании расчета относительной интегральной молярной энергии Гиббса в зависимости от температуры и концентрации твердых растворов $Sb_{1-x}As_x$ установлена тенденция к распаду при пониженных температурах. Область возможного расслоения характеризуется асимметричностью, а критическая температура распада достигает 923 – 970 К. Оценка избыточных термодинамических характеристик сплавов $Sb_{1-x}As_x$ показала, что система характеризуется положительным отклонением

Табл. 2.

Термодинамические функции (Дж/моль) твердых растворов $Sb_{1-x}As_x$

x, ат.д. As	$H_{вibr}^E$	$H_{упр}^M$	$S_{вibr}^E$	$S_{упр}^M$	TS^E	G^E	G^M
T=573 K							
0,02	-1,33	366,5	-0,039	-0,013	-29,6	394,7	-72,1
0,10	-6,10	1547,5	-0,176	-0,060	-134,9	1676,3	128,4
0,20	-10,82	2457,0	-0,305	-0,107	-236,2	2682,4	299,7
0,30	-14,17	2848,3	-0,391	-0,138	-302,9	3137,1	228,4
0,40	-16,16	2835,6	-0,437	-0,149	-336,0	3155,5	-49,2
0,50	-16,80	2527,8	-0,445	-0,143	-337,3	2848,3	-452,2
0,60	-16,10	2028,4	-0,419	-0,122	-310,0	2322,3	-882,4
0,70	-14,06	1435,6	-0,359	-0,091	-258,0	1679,5	-1229,2
0,80	-10,70	842,4	-0,268	-0,056	-185,7	1017,4	-1365,4
0,90	-6,01	336,3	-0,148	-0,023	-98,0	428,4	-1119,6
0,98	-1,31	49,9	-0,032	-0,004	-20,2	68,8	-398,0
T=873 K							
0,02	-3,17	366,7	-0,042	-0,012	-46,9	410,5	-300,7
0,1	-14,53	1548,4	-0,187	-0,058	-214,6	1748,5	-609,9
0,2	-25,74	2458,0	-0,326	-0,106	-376,6	2808,9	-821,3
0,3	-33,67	2849,0	-0,418	-0,137	-484,3	3299,6	-1131,9
0,4	-38,35	2835,9	-0,468	-0,149	-538,4	3335,9	-1546,6
0,5	-39,82	2527,7	-0,477	-0,143	-541,8	3029,7	-1998,9
0,6	-38,12	2028,0	-0,449	-0,123	-499,3	2489,2	-2392,3
0,7	-33,26	1435,2	-0,385	-0,092	-416,4	1818,6	-2613,0
0,8	-25,27	842,1	-0,288	-0,057	-300,9	1117,6	-2512,6
0,9	-14,18	336,2	-0,159	-0,024	-159,4	481,4	-1876,9
0,98	-3,08	49,9	-0,134	-0,004	-32,9	79,7	-631,5

от идеальности, связанным, в основном, с наличием упругих напряжений в решетке твердого раствора, величина же избыточной энтропии смешения невелика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панин В.Е., Дударев Е.Ф., Бушнев Л.С. Структура и механические свойства твердых растворов замещения. М.: Металлургия. 1971. 205 с.
2. Андриевский Р.А. // Успехи химии. 1994. Т. 65. № 5. С. 431-435.
3. Семенова Г.В., Гончаров Е.Г. Твердые растворы в тройных системах с участием элементов пятой группы. М. МФТИ. 2000. 160 с.
4. Trzebiatowski W., Bryjak E. // Z. Anorg. Chem. 1938. В. 238. Р. 255-267.
5. Удовский А.Л., Вамберский Ю.В., Иванов О.С. // Докл. АН СССР. 1973. Т. 209. С. 1377-1380.
6. Удовский А.Л., Иванов О.С. // ЖФХ. 1977. Т. 51. № 4. С. 796-800.
7. Кривоглаз М.А. Теория рассеяния рентгеновских лучей и тепловых нейтронов реальными кристаллами. М. Наука. 1967.
8. Угай Я.А., Гончаров Е.Г., Семенова Г.В., Лазарев В.Б. Фазовые равновесия между фосфором, мышьяком, сурьмой и висмутом. М. Наука. 1989. 233 с.
9. Шаскольская М.П. Кристаллография. М. Высш. шк. 1984. 376 с.
10. Эмсли Дж. Элементы. М. Мир. 1993. 256 с.
11. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И.К.Кикоина. М. Энергоатомиздат. 1976. 1008 с.
12. Блатт Ф. Физика электронной проводимости в твердых телах. М. Мир. 1971. 470 с.
13. Свойства элементов. Справочник / Под ред. Г.В.Самсонова. М. Металлургия. 1976. 600 с.
14. Физические величины. Справочник / Под ред. Григорьева И.С., Мейлиховой Е.З. М. Энергоатомиздат. 1991. 1232 с.
15. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Статистическая физика. М. Наука. 1964. 450 с.