

ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ В СИСТЕМЕ Sn–As–P

Т. П. Сушкова, Г. В. Семенова, А.В. Наумов, Е. Ю. Проскурина

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»,

Поступила в редакцию: 03.05.2017 г.

Аннотация. Методами рентгенофазового анализа и рентгеноспектрального микроанализа исследованы разрезы $\text{SnAs–Sn}_{0.5}\text{P}_{0.5}$, $\text{Sn}_4\text{As}_3\text{–Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57}$ и $\text{SnAs–Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57}$ тройной системы Sn–As–P. Установлено образование ограниченных твердых растворов на основе соединений SnAs и SnP_3 .

Ключевые слова: фосфиды олова, арсениды олова, твердые растворы.

Abstract. By X-ray phase analysis and X-ray spectral analysis the sections $\text{SnAs–Sn}_{0.5}\text{P}_{0.5}$, $\text{Sn}_4\text{As}_3\text{–Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57}$ and $\text{SnAs–Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57}$ of the ternary system Sn–As–P were studied. The formation of bound solid solutions based on SnAs and SnP_3 compounds was established.

Keywords: Tin phosphides, tin arsenides, solid solutions.

Открытие графена привело к росту интереса исследователей к веществам со слоистой структурой, которые могут быть перспективны для создания новых 2D-материалов. К ним относятся и соединения $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{V}}$, имеющие низкосимметричное кристаллическое строение и обладающие ярко выраженной анизотропией свойств [1-4]. Фосфиды и арсениды олова, а также многокомпонентные интеркалаты на их основе в настоящее время интенсивно исследуются как термоэлектрические материалы для производства, преобразования и хранения энергии [2-6]. Еще больший интерес представляют твердые растворы на основе бинарных соединений, позволяющие за счет варьирования состава изменять свойства материала в широком диапазоне.

В системе «олово – мышьяк» существуют два соединения: Sn_4As_3 , разлагающийся по перитектической реакции, и SnAs, плавящийся конгруэнтно [7]. В системе «олово – фосфор» образуются три стабильные промежуточные фазы: Sn_4P_3 , Sn_3P_4 , SnP_3 . Согласно ранним литературным данным [8, 9] Sn_4P_3 и SnP_3 разлагаются синтетически, а Sn_3P_4 плавится конгруэнтно. Однако результаты работы [10], в которой P - T -диаграмма системы Sn–P была исследована с помощью рентгенофазового, дифференциального термического анализа и

оптико-тензиметрического метода, позволяют утверждать, что фаза Sn_3P_4 образуется по перитектической реакции $\text{Sn}_4\text{P}_3 + \text{SnP}_3 \rightleftharpoons \text{Sn}_3\text{P}_4$ при температуре ~ 733 К.

Для всех стабильных фаз в системе Sn–P (Sn_4P_3 , Sn_3P_4 , SnP_3) и для арсенида Sn_4As_3 обнаружена сходная тригональная кристаллическая структура с пространственной группой $R\bar{3}m$ [11]. Отличие заключается в толщине пакетов, состоящих из чередующихся атомных слоев олова и фосфора (либо мышьяка). Моноарсенид олова SnAs имеет кубическую решетку (структурный тип NaCl) [12]. В работах [13, 14] сообщалось о получении SnP с кубической структурой, однако речь шла о фазе высокого давления. Монофосфид олова, полученный в «обычных» условиях при определенных режимах термообработки, имеет группу симметрии $R\bar{3}m1$ и считается метастабильной в этих условиях фазой [15].

Небольшое отличие радиусов атомов мышьяка и фосфора (9%), являющихся электронными аналогами, и схожесть кристаллических структур Sn_4As_3 и стабильных фосфидов позволяют ожидать образования в системе Sn–As–P достаточно протяженных твердых растворов с анионным замещением. Ранее при изучении политермического разреза $\text{Sn}_4\text{As}_3\text{–Sn}_4\text{P}_3$ [16] было установлено существование непрерывного ряда твердых растворов $(\text{Sn}_4\text{As}_3)_{1-x}(\text{Sn}_4\text{P}_3)_x$ (α -твердый раствор). Цель

настоящей работы заключалась в исследовании возможности формирования твердых растворов на основе других бинарных соединений в системе Sn–As–P.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для экспериментального изучения были выбраны разрезы $\text{SnAs–Sn}_{0.5}\text{P}_{0.5}$, $\text{Sn}_4\text{As}_3\text{–Sn}_3\text{P}_4$, $\text{SnAs–Sn}_3\text{P}_4$. Для получения трехкомпонентных сплавов использовали олово марки ОВЧ-000, мышьяк ОСЧ-9-5, фосфор ОСЧ-9-5. Мышьяк предварительно очищали от оксидов вакуумной сублимацией. Взвешивание осуществляли на весах AR2140 с погрешностью $\pm 1 \cdot 10^{-3}$ г.

Образцы сечения $\text{SnAs–Sn}_{0.5}\text{P}_{0.5}$ синтезировали из предварительно полученных бинарных сплавов. В связи с тем, что фосфид олова Sn_3P_4 очень трудно формируется [2], трехкомпонентные сплавы двух других разрезов готовили не из бинарных соединений, а из простых веществ. Образцы получали одностепенным синтезом в вакуумированных до остаточного давления $5 \cdot 10^{-4}$ гПа кварцевых ампулах, а затем отжигали в течение 150 ч при температуре 773 К.

Сразу оговоримся, что обсуждаемый далее фазовый состав полученных образцов соответствует высокотемпературной области (773 К) диаграммы тройной системы; при более низких температурах отжига он будет иным, что обусловлено перитектоидным превращением $\text{Sn}_4\text{P}_3 + \text{SnP}_3 \rightleftharpoons \text{Sn}_3\text{P}_4$ в системе Sn–P при температуре ~ 733 К [10]. Так как при температуре 773 К фаза Sn_3P_4 уже не существует, сплав соответствующего состава далее будет обозначаться как $\text{Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57}$.

Рентгенофазовый анализ измельченных в порошок образцов проводили на дифрактометре ARL X'TRA в геометрии θ – θ с фокусировкой по Бреггу – Брентано. В качестве источника рентгеновского излучения использовалась медная рентгеновская трубка с максимальной мощностью 2200 Вт; $\lambda(\text{CuK}_{\alpha 1}) = 0.1541$ нм, $\lambda(\text{CuK}_{\alpha 2}) = 0.1544$ нм. Съемку проводили в дискретном режиме с шагом 0.04° и временем экспозиции в каждой точке 3 с. Погрешность определения межплоскостных расстояний d_{hkl} не превышала $5 \cdot 10^{-4}$ нм.

Элементный и фазовый состав некоторых образцов был определен с помощью методов растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа (РЭМ и РСМА). Исследования были выполнены на растровом электронном микроскопе Tescan 5130MM, оснащенном энергодисперсионным детектором (про-

изводство Oxford Instruments) с системой микроанализа «INCA Energy» и YAG-кристаллом в качестве детектора отраженных электронов. При определении количественного состава фаз чувствительность была не ниже 0.1 масс. %. Для изготовления полированных шлифов исследуемые образцы материала смешивались с пластмассой холодного твердения (Протокрил-М) и пропитывались растворителем. Углеродная пленка для создания электропроводности наносилась на поверхность образца на установке «Emitech K 400».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рентгенофазовый анализ показал присутствие в сплавах всех трех изучаемых разрезов α -твердого раствора $(\text{Sn}_4\text{P}_3)_x(\text{Sn}_4\text{As}_3)_{1-x}$ (рис.1). В табл. 1 представлены результаты расчета параметров кристаллической решетки в гексагональной установке и состава α -твердого раствора (расчет состава проведен с использованием закона Вегарда).

Для всех разрезов на дифрактограммах образцов с высоким содержанием мышьяка наряду с рефлексами α -твердого раствора наблюдались также рефлексы моноарсенида олова, смещенные в сторону больших углов (рис. 1,а,б), что свидетельствует об образовании твердого раствора замещения на основе SnAs (обозначим его как β -твердый раствор).

С другой стороны, для образцов, богатых фосфором, наряду с рефлексами α -твердого раствора фиксировались смещенные в сторону меньших углов рефлексы высшего фосфида олова (рис. 1в), что указывает на кристаллизацию твердого раствора на основе SnP_3 (обозначим его как γ -твердый раствор). Замещение атомов фосфора более крупными атомами мышьяка приводит к увеличению межплоскостных расстояний и закономерному смещению рефлексов на дифрактограммах. Наиболее четко это смещение наблюдается для образцов политермического сечения $\text{SnAs–Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57}$ (табл. 2).

В сплавах политермических разрезов $\text{Sn}_4\text{As}_3\text{–Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57}$ и $\text{SnAs–Sn}_{0.5}\text{P}_{0.5}$ с высоким содержанием фосфора γ -твердый раствор также присутствует. Его образование подтверждают и данные рентгеноспектрального микроанализа. На рис. 2 приведены изображения пробы образца состава $(\text{SnAs})_{0.2}(\text{Sn}_{0.5}\text{P}_{0.5})_{0.8}$, полученные в растровом электронном микроскопе, оснащенном приставкой для микроанализа, а в табл. 3 – результаты количественного элементного анализа. Фаза 1 представляет собой γ -твердый раствор, фаза 2 – α .

Таблица 1

Параметры решетки (*a*, *c*, Å) и состав α-твердого раствора, присутствующего в сплавах разрезов $\text{Sn}_4\text{As}_3\text{-Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57}$, $\text{SnAs-Sn}_{0.5}\text{P}_{0.5}$ и $\text{SnAs-Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57}$

	Sn_4As_3	Состав сплавов разреза $\text{Sn}_4\text{As}_3\text{-Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57}$ (мол. д. $\text{Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57}$)								Sn_4P_3
		0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	
Параметр решетки <i>a</i>	4.090	4.079	4.077	4.065	4.052	4.047	4.038	4.025	4.000	3.968
Параметр решетки <i>c</i>	36.060	35.962	35.905	35.913	35.827	35.81	35.776	35.700	35.537	35.33
Состав α-твердого раствора, мол. д. Sn_4P_3		0.09	0.11	0.21	0.31	0.35	0.43	0.53	0.74	-
	Sn_4As_3	Состав сплавов разреза $\text{SnAs-Sn}_{0.5}\text{P}_{0.5}$ (мол. д. $\text{Sn}_{0.5}\text{P}_{0.5}$)					Sn_4P_3			
		0.2	0.4	0.6	0.8	0.9				
Параметр решетки <i>a</i>	4.090	4.056	4.044	4.026	3.9965	3.9795	3.968			
Параметр решетки <i>c</i>	36.060	36.018	35.863	35.705	35.521	35.382	35.33			
Состав α - твердого раствора, мол. д. Sn_4P_3		0.28	0.38	0.53	0.77	0.91	-			
	Sn_4As_3	Состав сплавов разреза $\text{SnAs-Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57}$ (мол. д. $\text{Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57}$)							Sn_4P_3	
		0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9		
Параметр решетки <i>a</i>	4.090	4.056	4.050	4.047	4.039	4.028	4.010	3.991	3.968	
Параметр решетки <i>c</i>	36.060	35.92	35.86	35.82	35.77	35.69	35.60	35.47	35.33	
Состав α – твердого раствора, мол. д. Sn_4P_3		0.28	0.33	0.35	0.42	0.51	0.66	0.81	-	

Таблица 2

Межплоскостные расстояния (*d*) γ-твердого раствора, присутствующего в сплавах разреза $\text{SnAs-Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57}$

Данные ICDD		Состав сплавов разреза $\text{SnAs-Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57}$ (мол. д. $\text{Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57}$)		
hkl (SnP_3)	SnP_3	0.9	0.8	0.7
	d, Å			
012	4.059	4.068	4.074	4.080
110	3.689	3.696	3.702	3.708
003	3.504	3.513	3.517	3.518
202	2.730	2.733	2.738	2.742
104	2.430	2.434	2.437	2.440
122	2.194	2.197	2.200	2.203
300	2.130	2.133	2.136	2.139
024	2.030	-	2.034	2.036
220	1.845	1.846	1.848	1.851
214	1.778	1.783	1.782	1.784
205	1.756	1.756	1.760	1.761

Таблица 3

Состав основных составляющих пробы $(\text{SnAs})_{0.2}(\text{Sn}_{0.5}\text{P}_{0.5})_{0.8}$

Область	Состав, мол. %			Состав твердого раствора
	P	As	Sn	
Фаза 1	69.4	4.1	26.5	$\text{Sn}_{0.265}(\text{P}_{0.944}\text{As}_{0.56})_{0.735}$
Фаза 2	30.2	12.0	57.8	$(\text{Sn}_4\text{As}_3)_{0.28}(\text{Sn}_4\text{P}_3)_{0.72}$

β-Твердый раствор по данным рентгенофазового анализа присутствует в сплавах, содержащих до 60 мол. % $\text{Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57}$ на разрезах $\text{Sn}_4\text{As}_3\text{-Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57}$

и $\text{SnAs-Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57}$, и в сплавах разреза $\text{SnAs-Sn}_{0.5}\text{P}_{0.5}$ до 80 мол. % $\text{Sn}_{0.5}\text{P}_{0.5}$ включительно. Рассчитанные по результатам РФА значения параметра кристаллической решетки β-твердого раствора закономерно уменьшаются при увеличении содержания фосфора в сплавах (табл.4).

Если бы SnP с кубической структурой (известен как фаза высокого давления, получен при давлениях порядка 40000 атмосфер [13, 14]) мог существовать в условиях нашего эксперимента, можно было бы ожидать формирования непрерыв-

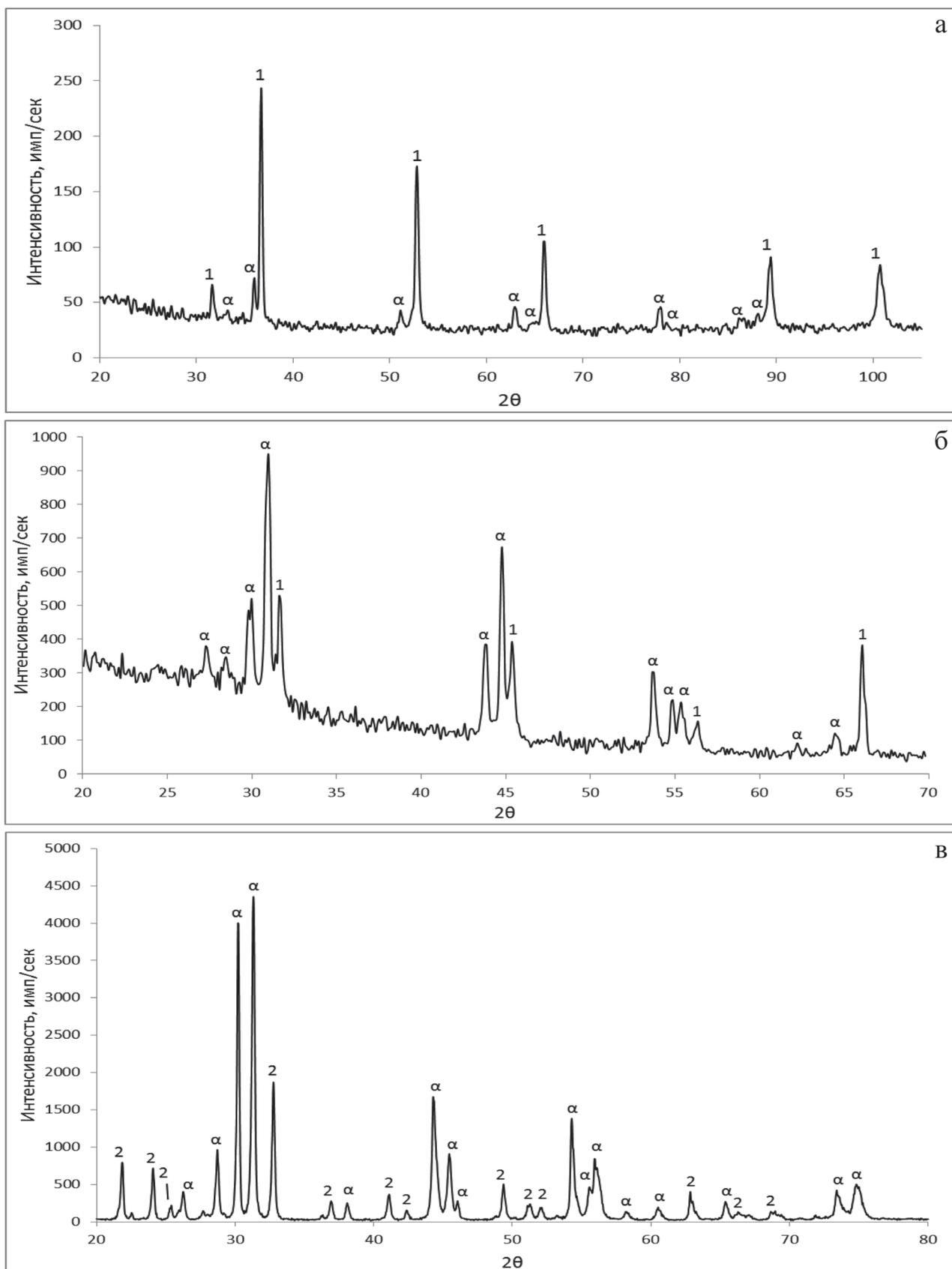


Рис. 1. Дифрактограммы сплавов. Обозначения: а – $(\text{SnAs})_{0,8}(\text{Sn}_{0,5}\text{P}_{0,5})_{0,2}$; б – $(\text{Sn}_4\text{As}_3)_{0,7}(\text{Sn}_{0,43}\text{P}_{0,57})_{0,3}$; в – $(\text{SnAs})_{0,1}(\text{Sn}_{0,43}\text{P}_{0,57})_{0,9}$; Цифрами обозначены смещенные рефлексы фаз: 1 – SnAs; 2 – SnP_3

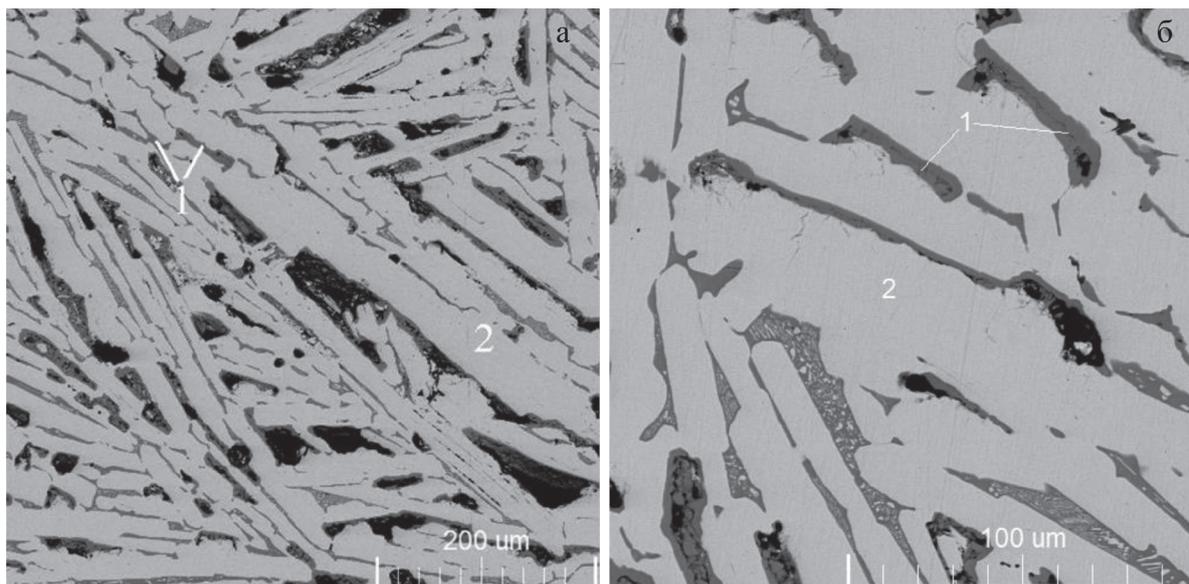


Рис. 2. РЭМ-изображение поверхности образца $(\text{SnAs})_{0,2}(\text{Sn}_{0,5}\text{P}_{0,5})_{0,8}$. Цифрами обозначены: 1 – $\text{Sn}_{0,265}(\text{P}_{0,944}\text{As}_{0,056})_{0,735}$ (γ -твердый раствор); 2 – $(\text{Sn}_4\text{As}_3)_{0,28}(\text{Sn}_4\text{P}_3)_{0,72}$ (α -твердый раствор).

Таблица 4

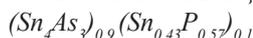
Межплоскостные расстояния (d , Å) и параметр решетки (a , Å) β -твердого раствора, присутствующего в сплавах разрезов $\text{Sn}_4\text{As}_3\text{-Sn}_{0,43}\text{P}_{0,57}$, $\text{SnAs-Sn}_{0,5}\text{P}_{0,5}$ и $\text{SnAs-Sn}_{0,43}\text{P}_{0,57}$

		Состав сплавов разреза $\text{Sn}_4\text{As}_3\text{-Sn}_{0,43}\text{P}_{0,57}$ (мол. д. $\text{Sn}_{0,43}\text{P}_{0,57}$)						
hkl	d_{SnAs}	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
200	2.8620	2.8447		2.8433	2.8283	2.8291	-	-
220	2.0240		2.0165	2.0097	1.9978	2.0005	1.9875	1.9838
222	1.6520	1.6466	1.6429	1.6404	1.6353	1.6331	-	-
400	1.4310	1.4293	1.4265	-	1.4142	-	-	-
Параметр решетки a	5.7237	5.7092	5.7006	5.6837	5.6580	5.6577	5.622	5.611
		Состав сплавов разреза $\text{SnAs-Sn}_{0,43}\text{P}_{0,57}$ (мол. д. $\text{Sn}_{0,43}\text{P}_{0,57}$)						
hkl	d_{SnAs}	0.1	0.3	0.4	0.5	0.6		
111	3.3060	3.295	3.281	3.272	-	-		
200	2.8620	2.855	2.841	2.832	2.831	-		
220	2.0240	2.018	2.008	2.004	2.002	1.987		
222	1.6520	1.647	1.640	1.636	1.634	-		
400	1.4310	1.426	1.419	1.417	1.416	1.411		
Параметр решетки a	5.7239	5.706	5.679	5.667	5.662	5.644		
		Состав сплавов разреза $\text{SnAs-Sn}_{0,5}\text{P}_{0,5}$ (мол. д. $\text{Sn}_{0,5}\text{P}_{0,5}$)						
hkl	d_{SnAs}	0.2	0.4	0.6	0.8			
111	3.3060	3.2874	3.2673	-	3.2278			
200	2.8620	2.8432	2.8283	-	-			
220	2.0240	2.0131	2.0026	1.9818	-			
222	1.6520	1.6457	1.6369	-	-			
400	1.4310	1.4223	1.4162	1.4117	1.4117			
422	1.1680	1.1625	-	1.1609	1.1559			
Параметр решетки a	5.7231	5.6940	5.6652	5.6623	5.6531			

ного ряда твердых растворов между ним ($a(\text{SnP}) = 5.535 \text{ \AA}$ [13]) и кубическим моноарсенидом олова ($a(\text{SnAs}) = 5.724 \text{ \AA}$ [12]), т. к. все кристаллохимические факторы этому благоприятствуют. Однако, при «обычных» давлениях (десятки атмосфер) монофосфид олова может быть получен как метастабильная фаза со структурой симметрии $R\bar{3}m1$ [15], как стабильная в этих условиях фаза такого состава вообще не существует. Этот факт исключает возможность непрерывной растворимости и расчет состава β -твердого раствора по закону Вегарда. Один из исследованных образцов, а именно сплав состава $(\text{SnAs})_{0.9}(\text{Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57})_{0.1}$ был однофазным (β -твердый раствор), что свидетельствует о достаточно высокой растворимости фосфора в моноарсениде олова.

Таблица 5

Состав основных составляющих пробы



Область	Состав, мол. %			Состав твердого раствора
	P	As	Sn	
Фаза 1	5.3	38.1	56.7	$(\text{Sn}_4\text{As}_3)_{0.88}(\text{Sn}_4\text{P}_3)_{0.12}$
Фаза 2	6.6	43.0	50.3	$\text{SnAs}_{0.87}\text{P}_{0.13}$

На рис. 3 представлены результаты электронной микроскопии сплава $(\text{Sn}_4\text{As}_3)_{0.9}(\text{Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57})_{0.1}$. Частицы пробы по составу и строению резко неоднородны, образованы двумя фазами (рис. 3). Согласно данным РСМА (табл. 5), эти фазы представляют собой твердые растворы следующих составов: $(\text{Sn}_4\text{As}_3)_{0.88}(\text{Sn}_4\text{P}_3)_{0.12}$ и $\text{SnAs}_{0.87}\text{P}_{0.13}$. Таким образом, результаты двух независимых методов

исследования – РСМА и РФА – подтверждают образование β -твердого раствора и хорошо согласуются по количественному составу α -твердого раствора (0.12 мол. д. Sn_4P_3 по данным РСМА и 0.11 мол. д. по данным РФА).

Исследование сплавов, составы которых принадлежат политермическим разрезам $\text{SnAs}-\text{Sn}_{0.5}\text{P}_{0.5}$, $\text{Sn}_4\text{As}_3-\text{Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57}$ и $\text{SnAs}-\text{Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57}$, методами РФА, РЭМ и РСМА показало, что в системе Sn–As–P наряду с непрерывным твердым раствором $(\text{Sn}_4\text{As}_3)_{1-x}(\text{Sn}_4\text{P}_3)_x$ формируются достаточно протяженные ограниченные твердые растворы с анионным замещением на основе фаз SnAs и SnP_3 .

Рентгенофазовый анализ проведен на оборудовании ЦКПНО ВГУ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенова Г. В. Твердые растворы в тройных системах с участием элементов пятой группы / Г. В. Семенова, Е. Г. Гончаров. — М.: Моск. физ.-техн. ин-т, 2000. — 160 с.
2. A facile high-yield solvothermal route to tin phosphide Sn_4P_3 / К. А. Kovnir [et al.] // Journal of Solid State Chemistry. — 2006. — Vol. 179, № 7. — С. 3756–3762.
3. A Sn_4As_3 revisited: Solvothermal synthesis and crystal and electronic structure / К. А. Kovnir [et al.] // Journal of Solid State Chemistry. — 2009. — Vol. 182, № 5. — P. 630–639.
4. Highly Disordered Crystal Structure and Thermoelectric Properties of Sn_3P_4 / J. V. Zaikina [et

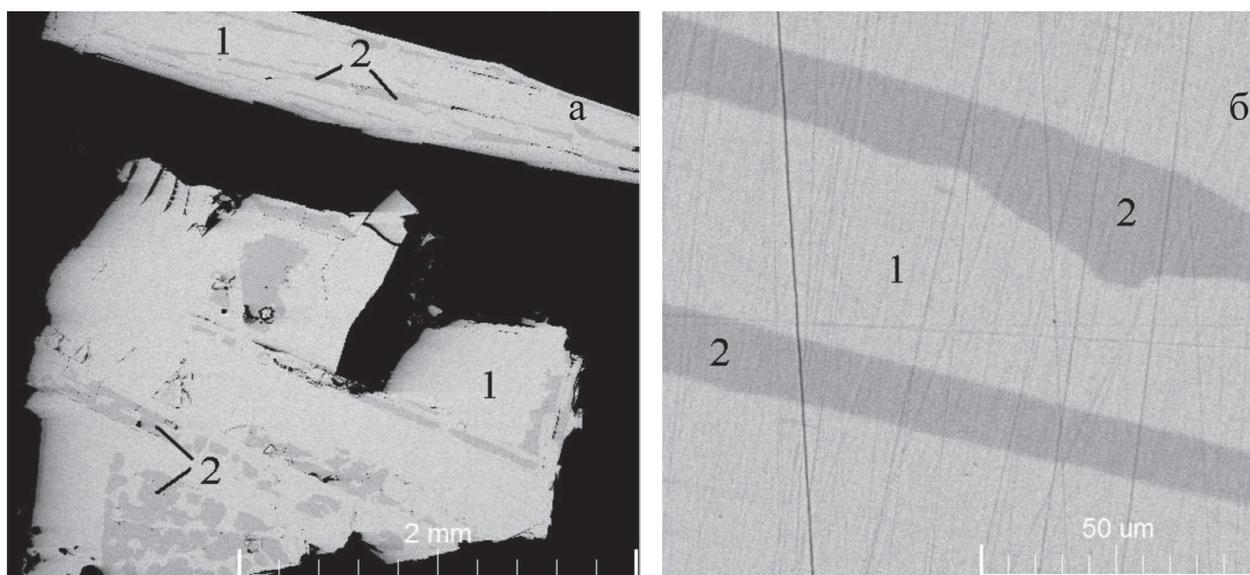


Рис. 3. РЭМ-изображение поверхности образца $(\text{Sn}_4\text{As}_3)_{0.9}(\text{Sn}_{0.43}\text{P}_{0.57})_{0.1}$. Цифрами обозначены: 1 – $(\text{Sn}_4\text{As}_3)_{0.88}(\text{Sn}_4\text{P}_3)_{0.12}$; 2 – $(\text{SnAs})_{0.87}(\text{Sn}_{0.5}\text{P}_{0.5})_{0.13}$

- al.] // Chem. Mater. — 2008. — Vol. 20, №7. — P. 2476–2483.
5. Distribution of phosphorus and arsenic atoms in the solid solution $\text{Sn}_{24}\text{Asx}_{\text{P}19,3-\text{x}}\text{I}_8$ with the structure of clathrate I / E. A. Kelm [et all.] // Russian Chemical Bulletin. — 2009. — Vol. 58, No. 4. — P. 746-750.
6. Shevelkov A.V. Thermoelectric materials: an introduction / A.V. Shevelkov // Dalton Trans. — 2010. — Vol.39. — P. 977–987.
7. Gokcen N.A. The As-Sn (Tin-Arsenic) system / N.A. Gokcen // Bulletin of alloy phase diagrams. — 1990. — Vol. 11, № 3. — P. 243-245.
8. Vivian A.C. The tin-phosphorus system / A.C. Vivian // J. Inst. Met. — 1920. — Vol. 23. — P. 325-336.
9. Arita M. Measurement of vapor pressure of phosphorus over Sn-P alloys by dew point method / M. Arita, K. Kamo // Trans. Jpn. Inst. Met. — 1985. — Vol. 26, №4. — P. 242-250.
10. P-T-x диаграмма системы Sn-P / Е. Ю. Проскурина [и др.] // Конденсированные среды и межфазные границы. — 2015. — Т.17, № 4. — С. 498-509.
11. Olofsson O. X-ray investigation of the tin-phosphorus system / O. Olofsson // Acta Chem. Scand. — 1970. — № 24. — P. 1153-1157.
12. Вдовина Т.З. Фазовая диаграмма системы олово-арсенид олова / Т.З. Вдовина, З.С. Медведева // Журн. неорг. химии. — 1974. — Т.19, № 8. — С. 2257-2260.
13. Donohue P.C. The Synthesis, Structure, and Superconducting Properties of New High-Pressure Forms of Tin Phosphide / P.C. Donohue // Inorganic Chemistry. — 1970. — Vol. 9, № 2. — P. 335-337.
14. Горюнова Н.А. Поведение CdSnP_2 , CdGeP_2 , CdSiP_2 , ZnSnP_2 , ZnGeP_2 , ZnSiP_2 в условиях высоких давлений и температур / Н.А. Горюнова, С.В. Попова, Л.Г. Хвостанцев // Докл. АН СССР. — 1969. — Т.186, №3. — С. 592-596.
15. Gullman J. The crystal structure of SnP / J. Gullman // Journal of solid state chemistry. — 1990. — V.87. — P. 202-206.
16. Семенова Г.В. Политермический разрез Sn_4P_3 - Sn_4As_3 / Г.В. Семенова, Е.Ю. Кононова, Т.П. Сушкова // Журн. неорг. химии. — 2013. — Т.58, № 9. — С. 1242-1245.

Воронежский государственный университет
Семенова Г. В., д.х.н., профессор кафедры общей и неорганической химии
Тел.: +7 (473) 22-08-610
E-mail: semen157@chem.vsu.ru

Voronezh State University
Semenova G. V., PhD (chemistry), D.Sci, Full Professor, Dept. of general and inorganic chemistry
Ph.: +7 (473) 22-08-610
E-mail:semen157@chem.vsu.ru

Сушкова Т. П., к.х.н., доцент кафедры общей и неорганической химии
E-mail: sushtp@yandex.ru

Sushkova T. P., PhD (chemistry), associate professor, Dept. of general and inorganic chemistry
E-mail: sushtp@yandex.ru

Проскурина Е. Ю., к.х.н., ассистент кафедры общей и неорганической химии
Тел.: +7 (473) 220-86-10
E-mail: semen157@chem.vsu.ru

Proskurina E. U., PhD (chemistry), Assistant Professor, Dept. of general and inorganic chemistry
Ph.: +7 (473) 220-86-10
E-mail: semen157@chem.vsu.ru

Наумов А. В., к.х.н., доцент кафедры общей и неорганической химии
Тел.: +7 (473) 220-86-10
E-mail: aither@bk.ru

Naumov A. V., PhD (chemistry), associate professor, Dept. of general and inorganic chemistry
Ph.: +7 (473) 220-86-10
E-mail: aither@bk.ru