

УДК 548.736.4

ПОТРІЙНА СИСТЕМА Cr–Ga–Si ПРИ 870 К

П. Я. ЛЮТИЙ¹, Я. О. ТОКАЙЧУК², А. О. ФЕДОРЧУК³¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;² Львівський національний університет ім. Івана Франка;³ Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького

За результатами рентгенівського фазового та структурного, а також металографічного аналізів побудовано ізотермічний переріз діаграми стану потрійної системи Cr–Ga–Si при 870 К в повному концентраційному інтервалі. При температурі дослідження тернарні сполуки не утворюються. Встановлено існування та прецизійно визначено область гомогенності твердого розчину заміщення $\text{Cr}_3\text{Si}_{1-x}\text{Ga}_x$ ($x = 0\text{--}0,357$) за результатами уточнення кристалографічних параметрів методом Рітвельда (структурний тип Cr_3Si , символ Пірсона $cP8$, просторова група $Pm\bar{3}n$, $a = 4,556\text{--}4,5844(7)$ Å, $R_B = 0,0353$, $R_p = 0,009$, $R_{wp} = 0,014$, $\chi^2 = 3,68$) та металографічного аналізу.

Ключові слова: діаграма стану, ізотермічний переріз, кристалічна структура, структурний тип.

Галій має низьку температуру топлення та інші унікальні фізичні властивості, тому науковців зацікавлюють його сплави, дослідження взаємодії галію з іншими металами чи неметалами в подвійних, потрійних та багатокомпонентних системах. У періодичній системі він розташований між металами і неметалами, через що можна очікувати цікаві властивості його сполук з іншими елементами. Відомі багатокомпонентні галіди широко застосовують у різних галузях промисловості, науки та техніки, а галій – як легувальний додаток до вже відомих сплавів, а також для створення нових матеріалів з цінними властивостями. Модифікаторами галію і його сплавів можуть виступати *d*-метали, фізико-хімічні властивості яких у комбінації з властивостями галію сприяють розробці нових матеріалів.

Дослідження взаємодії компонентів у потрійних системах за участю двох напівметалічних елементів (*p*-елементів), зокрема галію та силіцію, з перехідними чи рідкісноземельними металами важливі з огляду на можливість встановити вплив концентрації валентних електронів *X*-компонента (Ga, Si) за незначної різниці їхніх розмірів на характер фазових рівноваг, утворення, стабільність області гомогенності інтерметалічних фаз. Систематичне дослідження подвійних, потрійних та складніших систем дасть можливість встановити взаємозв'язок між складом, структурою та властивостями сполук, а отже, інтенсифікувати розробку нових матеріалів з наперед заданими характеристиками.

Потрійним системам за участю рідкісноземельних металів (Y, La–Nd, Sm, Gd, Er), галію та силіцію властиве утворення протяжних твердих розчинів заміщення на основі бінарних сполук та відносно невеликої кількості тернарних фаз з широкими областями гомогенності [1–8]. Такі особливості пов'язують з близькою спорідненістю Ga та Si як за хімічною природою, так і за розмірами атомів. Потрійні системи за участю перехідних металів, галію та силіцію вивчали, в основному, щодо утворення тернарних сполук, а ізотермічні перерізи діаграм стану побудовані лише для систем з Ti [9, 10], Mn [11], Ni [12], Cu [13, 14], Y [15], Zr [9]

та Мо [16]. В системах з ванадієм та ніобієм досліджували лише утворення тернарних сполук $V_3Ga_{0,5}Si_{0,5}$ та $Nb_3Ga_{0,5}Si_{0,5}$ [17]. Для систем $M-Ga-Si$ (M – d -метал IV періоду) характерним є формування невеликої кількості тернарних сполук, як правило постійного складу, зі структурами, близькоспорідненими до структур бінарних фаз, та обмежених твердих розчинів на основі деяких бінарних сполук. Систему $Cr-Ga-Si$ досі систематично не вивчали, у літературі відсутні відомості як про фазові рівноваги, так і про існування тернарних сполук. У споріднених системах $Cr-\{B, Al\}-Si$ утворюються протяжні тверді розчини заміщення на основі деяких бінарних сполук та потрійні сполуки (одна – у системі з бором та три – з алюмінієм) [18–21].

Експериментальні методи. Для дослідження взаємодії компонентів у потрійній системі $Cr-Ga-Si$ синтезовано 43 сплави. Зразки готували сплавлянням шихти з вихідних компонентів високої чистоти: галію Гл-0, хрому ОСЧ та кремнію Кр-00 (чистота всіх компонентів 99,99 mass.%) в електродуговій печі на мідному водоохолоджуваному поді в атмосфері очищеного аргону. Як гетер використовували губчастий титан. Зразки гомогенізували шляхом відпалу в вакуумованих кварцових ампулах при 870 К впродовж 720 h і гартували у холодній воді. Рентгенівський фазовий аналіз сплавів виконували за порошкограмми, знятими в камерах РКД-57,3 (CrK -випромінювання) і дифрактограмми, одержаними на дифрактометрі ДРОН-2,0М (FeK_{α} -випромінювання). Для масивів рентгенівських порошкових дифракційних даних уточнювали профільні та структурні параметри усіх наявних фаз методом Рітвелда за допомогою комплексів програм WinCSD [22] та FullProf Suite [23]. Для уточнення меж твердих розчинів та підтвердження деяких фазових рівноваг виконали металографічний аналіз сплавів, використовуючи сканівний електронний мікроскоп EVO-40XVP зі системою мікроаналізу INCA Energy 350. Зразки для цього шліфували алмазною пастою (розмір зерна 1/4 мікрона) та протравлювали 5%-им розчином HNO_3 в етиловому спирті.

Результати досліджень. Підтверджено існування ряду бінарних галідів та силіцидів хрому при 870 К, за винятком сполуки $CrGa$ (структурний тип $MnGa$). Кристалографічні характеристики бінарних сполук у системах $Cr-Ga$ та $Cr-Si$ при 870 К подано в табл. 1. Уточнені параметри елементарних комірок бінарних фаз добре узгоджуються з літературними.

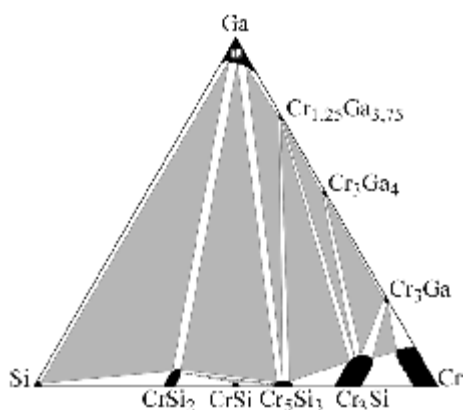


Рис. 1. Ізотермічний переріз діаграми стану системи $Cr-Ga-Si$ при 870 К.

Fig. 1. Isothermal section of the phase diagram of $Cr-Ga-Si$ ternary system at 870 K.

Ізотермічний переріз діаграми стану системи $Cr-Ga-Si$ при 870 К, побудований за результатами рентгенівського фазового аналізу всіх синтезованих сплавів, зображено на рис. 1. При температурі дослідження у системі утворюються десять однофазних, сімнадцять двофазних та вісім трифазних областей. Наведено (табл. 2) уточнені після рентгенівського фазового та структурного аналізів кристалографічні параметри фаз та їхній розрахований вміст у деяких трифазних зразках. Слід зауважити, що при температурі дослідження галій перебуває у рідкому стані, що унеможливило його ідентифікацію дифракційними методами, а його присутність фіксували візуально (під час гомогенізаційного відпалу зразків надлишковий галій витікав зі сплавів).

Таблиця 1. Кристалографічні характеристики бінарних сполук систем Cr–Ga та Cr–Si (курсивом виділені уточнені нами параметри комірки)

Сполука	Структ. тип	Просторова група	Символ Пірсона	Параметри комірки, Å			Літ.
				<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
Cr _{1,25} Ga _{3,75}	PtHg ₄	<i>Im</i> $\bar{3}m$	<i>cI10</i>	5,64	–	–	[24]
				5,6506(5)	–	–	
Cr ₃ Ga ₄	Fe ₃ Ga ₄	<i>C2/m</i>	<i>mS42</i>	10,135	7,845 $\beta = 105,06^\circ$	7,986	[25]
				1,0134(8)	7,853(2) $\beta = 105,6(5)^\circ$	8,02207(4)	
Cr ₃ Ga	Cr ₃ Ga	<i>Pm</i> $\bar{3}n$	<i>cP8</i>	4,652	–	–	[26]
				4,646(2)	–	–	
CrSi ₂	CrSi ₂	<i>P6222</i>	<i>hP9</i>	4,422	–	6,351	[27]
				4,430(2)	–	6,370(3)	
Cr ₅ Si ₃	W ₅ Si ₃	<i>I4/mmc</i>	<i>tI32</i>	9,170	–	4,636	[28]
				9,1644(11)– 9,1720(9)	–	4,6402(9)– 4,6334(8)	
Cr ₃ Si	Cr ₃ Si	<i>Pm</i> $\bar{3}n$	<i>cP8</i>	4,556	–	–	[29]

Таблиця 2. Результати рентгенофазового аналізу деяких трифазних сплавів системи Cr–Ga–Si

Склад сплаву, at. %			Присутні фази	Вміст, mass. %	Параметри комірки, Å		
Cr	Ga	Si			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
15	15	70	Si	11,99	5,431(7)	–	–
			CrSi ₂	88,01	4,432(6)	–	6,373(1)
40	10	50	CrSi ₂	58,15	4,4500(8)	–	6,370(1)
			Cr ₅ Si ₃	41,85	9,178(5)	–	4,644(3)
33	47	20	Cr ₅ Si ₃	85,86	9,170(3)	–	4,641(2)
			Cr _{1,25} Ga _{3,75}	14,14	5,66(2)	–	–
50	25	25	Cr ₅ Si ₃	66,77	9,1752(9)	–	4,6423(5)
			Cr _{1,25} Ga _{3,75}	23,22	5,651(3)	–	–
			Cr ₃ Si	10,00	4,5573(4)	–	–
50	45	5	Cr ₃ Ga ₄	59,98	10,146(6)	7,861(5)	8,023(5)
			Cr _{1,25} Ga _{3,75}	4,75	5,67(3)	–	–
			Cr ₃ Si	35,27	4,56(2)	–	–
70	25	5	Cr ₃ Ga ₄	59,57	10,168(1)	7,874(2) $\beta = 105,51(4)$	8,0273(5)
			Cr ₃ Si	14,42	4,6062(4)	–	–
			Cr ₃ Ga	26,01	4,6464(2)	–	–
80	14	6	Cr ₃ Ga	54,84	4,6368(9)	–	–
			Cr ₃ Si	38,56	4,599(2)	–	–
			Cr	6,60	2,9063(5)	–	–

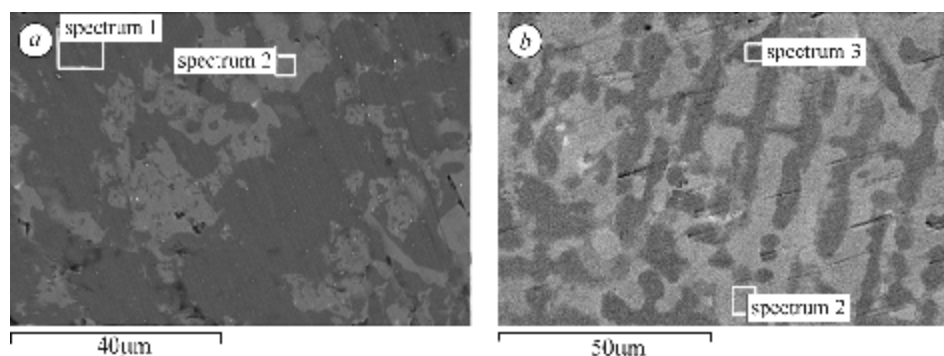


Рис. 2. Мікроструктура сплавів системи Cr–Ga–Si: *a* – Cr₄₀Ga₁₀Si₅₀ (спектр 1 – CrSi_{1,89}Ga_{0,11}, спектр 2 – Cr₅Si₃); *b* – Cr₈₀Ga₁₀Si₁₀ (спектр 2 – Cr₃Si_{0,72}Ga_{0,28}, спектр 3 – Cr_{0,86}Ga_{0,09}Si_{0,05}).

Fig. 2. Microstructure of Cr–Ga–Si alloys: *a* – Cr₄₀Ga₁₀Si₅₀ (spectrum 1 – CrSi_{1.89}Ga_{0.11}, spectrum 2 – Cr₅Si₃); *b* – Cr₈₀Ga₁₀Si₁₀ (spectrum 2 – Cr₃Si_{0.72}Ga_{0.28}, spectrum 3 – Cr_{0.86}Ga_{0.09}Si_{0.05}).

Для підтвердження потрійної рівноваги системи CrSi₂–Cr₅Si₃–Ga та уточнення меж твердих розчинів заміщення на основі бінарних сполук CrSi₃ та CrSi₂ металографічно дослідили кілька сплавів, застосовуючи енергійно-дисперсійний рентгенівський спектральний аналіз (EDX) (рис. 2). Встановлено, що зразок складу Cr₄₀Ga₁₀Si₅₀ (рис. 2*a*) містить фази CrSi_{1,89}Ga_{0,11} (спектр 1) та Cr₅Si₃ (спектр 2), а зразок складу Cr₈₀Ga₁₀Si₁₀ (рис. 2*b*) – Cr₃Si_{0,72}Ga_{0,28} (спектр 2) та Cr_{0,86}Ga_{0,09}Si_{0,05} (спектр 3). Склад Cr₃Si_{0,643}Ga_{0,357} відповідає крайньому складу твердого розчину заміщення атомів Si атомами Ga у бінарній фазі Cr₃Si.

Таблиця 3. Координати, ізотропні параметри коливання атомів і коефіцієнти заповнення позицій у структурі Cr₃Si_{0,723(6)}Ga_{0,279(6)} (структурний тип Cr₃Si, символ Пірсона *cP8*, просторова група *Pm3̄n*, *a* = 4,5844(7) Å, *R_B* = 0,0373, *R_p* = 0,009, *R_{wp}* = 0,014, χ^2 = 3,56)

Атом	ПСТ	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	КЗП	<i>B</i> _{iso} , Å ²
Cr	6c	1/4	0	1/2	1	1,0(2)
Si	2a	0	0	0	0,723(6)	1,2(2)
Ga					0,279(6)	

При 870 К тернарні сполуки у системі Cr–Ga–Si не утворюються. Бінарні сполуки системи Cr–Ga практично не розчиняють третього компонента, тоді як на основі сполук CrSi₂ та Cr₃Si формуються протяжні тверді розчини заміщення. Незважаючи на ізоструктурність бінарних сполук Cr₃Ga та Cr₃Si (структурний тип Cr₃Si, просторова група *Pm3̄n*, символ Пірсона *cP8*), неперервний ряд твердих розчинів між ними не утворюється. Двофазну область між цими фазами зафіксовано в результаті рентгенофазового аналізу сплавів складу Cr₇₅Ga₁₈Si₇ та Cr₇₅Ga₁₂Si₁₃, які містять дві ізоструктурні фази з різними параметрами елементарної комірки. Протяжність твердого розчину Cr₃Si_{1-x}Ga_x вздовж ізоконцентрації 75 at.% Cr встановлено за результатами EDX аналізу зразка складу Cr₈₀Ga₁₀Si₁₀ (рис. 2*b*). Кристалографічні параметри фази зі структурою типу Cr₃Si уточнено методом Рітвельда за масивом рентгенівських порошкових даних однофазного зразка складу Cr₇₅Ga₉Si₁₆ (рис. 3, табл. 3). Уточнення коефіцієнтів заповнення позиції (КЗП) 6c, статистично зайнятої атомами галію та силіцію, вказує на склад

$\text{Cr}_3\text{Si}_{0,723(6)}\text{Ga}_{0,279(6)}$ ($R_B = 0,0373$, $R_p = 0,009$, $R_{wp} = 0,014$, $\chi^2 = 3,56$), а незмінність параметра елементарної комірки цієї фази у зразках з більшим вмістом галію свідчить про те, що $\text{Cr}_3\text{Si}_{0,723(6)}\text{Ga}_{0,279(6)}$ є крайнім складом твердого розчину заміщення на основі бінарного силіциду Cr_3Si . Часткове заміщення атомів силіцію атомами галію приводить до збільшення параметра та об'єму кубічної елементарної комірки ($a = 4,556\text{--}4,5844 \text{ \AA}$, $V = 94,57\text{--}96,35 \text{ \AA}^3$).

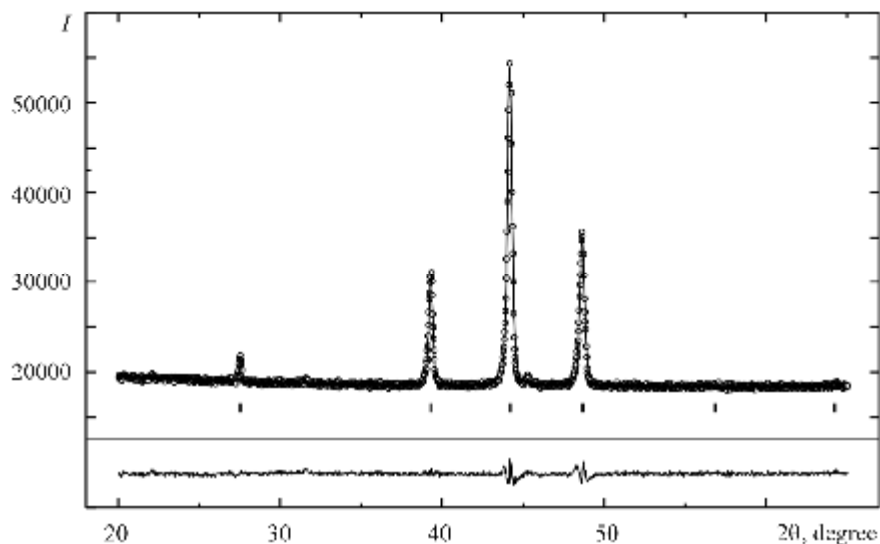


Рис. 3. Експериментальна (точки), розрахована (суцільна лінія) та різницева (суцільна лінія внизу рисунка) дифрактограми зразка складу $\text{Cr}_{75}\text{Ga}_9\text{Si}_{16}$ ($\text{CuK}\alpha$ -випромінювання). Вертикальні риски вказують на положення відбиття hkl бінарної сполуки $\text{Cr}_3\text{Si}_{0,723(6)}\text{Ga}_{0,279(6)}$.

Fig. 3. Experimental (circles), calculated (solid line) and difference (solid line at the bottom) X-ray powder diffraction patterns for $\text{Cr}_{75}\text{Ga}_9\text{Si}_{16}$ alloy ($\text{CuK}\alpha$ -irradiation). Vertical bars indicate the Bragg positions of $\text{Cr}_3\text{Si}_{0,723(6)}\text{Ga}_{0,279(6)}$ binary compound.

Обговорення результатів. У системі Cr-Ga-Si при 870 К тернарні сполуки не утворюються, як і в дослідженій раніше системі Cu-Ga-Si . В обох системах існують протяжні складні тверді розчини на основі d -металів (Cr, Cu). Однак, на відміну від системи Cu-Ga-Si [13, 14], в якій при 870 К бінарні галіди купруму перебувають в рівновазі з кремнієм, у системі Cr-Ga-Si подібні рівноваги не спостерігаються. Натомість, два бінарні силіциди CrSi_2 і Cr_5Si_3 утворюють двофазні рівноваги з галієм, який при температурі дослідження перебуває в рідкому стані. Також відмінною рисою цих систем є існування твердих розчинів різної протяжності на основі деяких бінарних сполук хрому та їхня відсутність у системі Cu-Ga-Si . Очевидно, це зумовлено різною кристалічною структурою бінарних фаз у подвійних системах, що обмежують досліджені потрійні.

Порівнюючи систему Cr-Ga-Si зі спорідненими $\text{Cr}\{B, Al\}\text{-Si}$ [18–21], можна зробити такий висновок: після заміни Ga на B або Al утворюються протяжніші тверді розчини на основі бінарних сполук та тернарні фази різної стехіометрії. Оскільки електронна конфігурація зовнішнього енергетичного рівня атомів бору, алюмінію та галію однакова (s^2p^1), то, очевидно, вплив валентних p -електронів не є визначальний для утворення тернарних сполук у системах $M-X-Si$ ($M - d$ -метал IV періоду, $X - p$ -елемент III групи). Натомість, розмірний фактор та кристалічні структури бінарних фаз можуть бути домінуючими критеріями для прогнозування характеру взаємодії компонентів у таких системах.

ВИСНОВКИ

Тернарні сполуки у системі Cr–Ga–Si при 870 К не утворюються, а розчинність третього компонента у бінарних фазах подвійних систем Cr–Ga та Cr–Si обмежена. Вплив валентних *p*-електронів на характер взаємодії компонентів у системах *M–X–Si* (*M* – *d*-метал IV періоду, *X* – *p*-елемент III групи) не є домінуючий.

РЕЗЮМЕ. С помощью рентгеновского фазового и структурного, а также металлографического анализов построено изотермическое сечение диаграммы состояния тройной системы Cr–Ga–Si при 870 К в полном концентрационном интервале. При температуре исследования тернарные соединения не образуются. Установлено существование и precisely определена область гомогенности твердого раствора замещения Cr₃Si_{1-x}Ga_x (*x* = 0–0,357) по результатам уточнения кристаллографических параметров методом Ритвелда (структурный тип Cr₃Si, символ Пирсона *cP8*, пространственная группа *Pm $\bar{3}n$* , *a* = 4,556–4,5844(7) Å, *R_B* = 0,0353, *R_p* = 0,009, *R_{wp}* = 0,014, χ^2 = 3,68) и металлографического анализа.

SUMMARY. Isothermal section of phase diagram of the Cr–Ga–Si system at 870 K was constructed in the whole concentration range using X-ray phase, structural and metallographic analyses of the synthesized alloys. Ternary compounds are not formed at the investigation temperature. The existence of the solid solution of substitution type, based on binary Cr₃Si, was established and its homogeneity range (Cr₃Si_{1-x}Ga_x, *x* = 0–0.357) was precisely determined by means of Rietveld refinement of the crystallographic parameters (structure type Cr₃Si, Pearson symbol *cP8*, space group *Pm $\bar{3}n$* , *a* = 4.556–4.5844(7) Å, *R_B* = 0.0353, *R_p* = 0.009, *R_{wp}* = 0.014, χ^2 = 3.68) and metallographic analysis.

Автори висловлюють подяку д.т.н. І. І. Булику (ФМІ) за сприяння в виконанні мікроструктурного та рентгенівського локального спектрального аналізів.

1. Токайчук Я. О. Синтез, структура та властивості нових сполук Галію з *p*-елементами IV групи та рідкісноземельними металами церієвої групи: Автореф. дис. ... канд. хім. наук. – Львів, 2004. – 20 с.
2. Tokajchuk Ya. O., Fedorchuk A. A., and Mokra I. R. Interaction among the components in La–Ga–Si system at 870 K // Polish. J. Chem. – 2000. – **74**. – P. 745–748.
3. Потрійна система Се–Ga–Si при 870 К / Я. Токайчук, А. Федорчук, І. Мокра, О. Бодак // Вісник Львів. ун-ту. Сер. хім. – 2002. – Вип. 41 – С. 40–45.
4. Токайчук Я. О., Федорчук А. О., Мокра І. Р. Потрійна система Pr–Ga–Si // Там же. – 2000. – Вип. 39. – С. 25–29.
5. Phase relations in the Nd–Ga–Si system at 870 K / Ya. O. Tokaychuk, A. O. Fedorchuk, O. I. Vodak, and I. R. Mokra // J. Alloys. Compd. – 2004. – **367**. – P. 64–69.
6. Головата Н. В. Характер фазових рівноваг та термодинамічні властивості сплавів потрійних систем Gd–Al–Ga, Gd–Ge–Ga і Gd–Si–Ga: Автореф. дис. ... канд. хім. наук. – К., 1999. – 20 с.
7. Кристалічна структура DyGa_{1,40-1,22}Si_{0,60-0,78} / О. С. Голдак, Я. О. Токайчук, А. О. Федорчук, І. Р. Мокра // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. хім. – 2004. – Вип. 44. – С. 41–43.
8. Нові сполуки в системі Er–Ga–Si / С. Я. Пукас, Р. Черни, М. Б. Маняко, Р. Є. Гладисевський // Укр. хім. журн. – 2007. – **73**. – С. 18–26.
9. Заводяний В. В. Кристалічна структура сплавів і характер взаємодії металів в системах (Ti, La, Ho)–Al–Ga, (Ti, Zr)–Si–Ga: Автореф. дис. ... канд. фіз-мат. наук. – Львів, 2004. – 23 с.
10. Isothermal section of the Ti–Si–Ga system in the Ti-rich corner at 1350°C / N. V. Antonova, L. A. Tretyachenko, O. Ph. Galadzhly, and T. Ya. Velikanova // J. Alloys Compd. – 1998. – **267**. – P. 167–170.
11. Нога А. С. Изотермическое сечение системы Mn–Ga–Si // Тез. докл. V Всесоюз. конф. по кристаллохимии интерметаллических соединений. – Львов, 1989. – С. 77.
12. El Boragy M., Rajasekharan T., and Schubert K. On the mixtures NiGa_xSi_N, NiIn_xSi_N, NiIn_xGe_N and NiGa_xSn_N // Z. Metallk. – 1982. – **73**. – P. 193–197.
13. Лютий П., Токайчук Я., Федорчук А. Потрійна система Cu–Ga–Si при 870 К // 36. наук. праць 12 наук. конф. “Львівські хімічні читання-2009”. – Львів, 2009. – Н34.

14. Потрійна система Cu–Ga–Si при 870 К / П. Лютий, І. Мокра, Я. Токайчук, А. Федорчук // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. хім. (в друці).
15. Снека М. В. Фазові рівноваги в системах Y–{Al, Si, Ge}–Ga, кристалічна структура і властивості потрійних сполук: Автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук. – К., 2003. – 25 с.
16. Andruszkiewicz R. and Horyn R. The Mo–Ga–Si system and X-ray data fo K-phase $\text{Mo}_{2.85}\text{Ga}_2\text{Si}_{4.15}$ and A-phase $\text{Mo}_{2.8}\text{Ga}_2\text{Ge}_{4.2}$. New superconductors of the CrSi₂-type structure // J. Less-Comm. Met. – 1986. – **119**. – P. 91–97.
17. Zegler S. T. and Downey J. W. Ternary Cr₃O-type phases with vanadium // Z. Metallk. – 1974. – **65**. – P. 709–713.
18. The isothermal section of the Al–Cr–Si system at 800°C and the crystal structure of τ_2 (Cr₃Al₃Si) / H. L. Chen, F. Weitzer, J. C. Schuster, et al. // J. Alloys Compd. – 2007. – **436**. – P. 313–318.
19. Милян В. В., Пелун Г. Я. Фазовые равновесия в системе Cr–Al–Si // Вестник Львов. ун-та. Сер. хим. – 1986. – Вып. 27. – С. 45–47.
20. Gupta S. P. Formation of intermetallic compounds in the Cr–Al–Si // Mater. Characteriz. – 2004. – **52**. – P. 355–370.
21. Кузьма Ю. Б., Чабан Н. Ф. Двойные и тройные системы, содержащие Бор – М.: Металлургия, 1990. – 319 с.
22. CSD – universal program package for single crystal or powder structure data treatment / L. G. Akselrud, Yu. M. Grin, V. K. Pecharsky, et al. // Coll. Abstr. 12th Eur. Crystallogr. Meet. – Moscow, 1989. – **3**. – P. 155.
23. Rodríguez-Carvajal J. Recent developments of the program FullProf // Newsletter Commission on powder diffraction (IUCr). – 2001. – **26**. – P. 12–19.
24. Einige strukturelle Ergebnisse an metallischen Phasen (6) / K. Schubert, T. R. Anantharaman, H. O. K. Ata et al. // Naturwissenschaften. – 1960. – **47**. – P. 512.
25. Structures cristallines des phases Fe₃Ga₄ et Cr₃Ga₄ / M. J. Philippe, B. Malaman, B. Roques, et al. // Acta Crystallogr. – 1975. – **B31**. – P. 477–482.
26. Meissner H. G. and Schubert K. Zum aufbau einiger zu T⁵-Ga homologer und quasihomologer Systeme. II. Die systeme Chrom-Gallium, Mangan-Gallium und Eisen-Gallium sowie einige bemerkungen zum aufbau der systeme Vanadium–Antimon und Vanadium–Arsen // Z. Metallkd. – 1965. – **56**. – P. 523–530.
27. Borén B. Röntgenuntersuchung der legierungen von Silicium mit Chrom, Mangan, Kobalt und Nickel // Ark. Kemi Mineral. Geol. – 1934. – **11A**. – P. 10.
28. Dauben C. H., Templeton D. H., and Myers C. E. The crystal structure of Cr₃Si₃ // J. Phys. Chem. – 1956. – **60**. – P. 443–445.
29. Jauch W., Schultz A. J., and Heger G. Single-crystal time-of-flight neutron diffraction of Cr₃Si and MnF₂: comparison with monochromatic-beam techniques // J. Appl. Crystallogr. – 1987. – **20**. – P. 117–119.

Одержано 22.01.2010