ISSN 2078-5615. Вісник Львівського університету. Серія хімічна. 2026. Випуск 68. С. 13–21
Visnyk of the Lviv University. Series Chemistry. 2026. Issue 68. P. 13–21

УДК 546.882

ІЗОТЕРМІЧНИЙ ПЕРЕРІЗ ДІАГРАМИ СТАНУ СИСТЕМИ Gd–Cu–Sb ПРИ 870 K

Л. Ромака*, Г. Ничипорук, Ю. Стадник, М. Коник

Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Кирила і Мефодія, 6, 79005 Львів, Україна
**e-mail: lyubov.romaka@gmail.com*

Взаємодію компонентів у потрійній системі Gd–Cu–Sb досліджено методами рентгенівського, мікроструктурного аналізів та енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії в повному інтервалі концентрацій за температури 870 K. За цих умов система характеризується існуванням трьох тернарних сполук: $Gd_3Cu_{22}Sb_9$ (структурний тип $Dy_3Cu_{20+x}Sb_{11-x}$, просторова група *F*-43*m*), $Gd_3Cu_3Sb_4$ (структурний тип $Y_3Au_3Sb_4$, просторова група *I*-43*d*), $GdCu_{1+x}Sb_2$ (структурний тип $HfCuSi_2$, просторова група *P*4/*nmm*). Розчинність купруму в бінарній сполуці GdSb (структурний тип NaCl) сягає 8 ат. %.

Ключові слова: інтерметаліди, потрійна система, фазові рівноваги, кристалічна структура.

DOI: https://doi.org/10.30970/vch.6801.013

1. Вступ

Дослідження хімічної взаємодії компонентів у багатокомпонентних системах слугує основою для пошуку нових матеріалів. Серед тернарних антимонідів сполуки складу $R_3Cu_3Sb_4$ (*R* = Y, La–Sm, Gd–Er) зі структурою типу $Y_3Au_3Sb_4$ (просторова група (ПГ) *I*-43*d*) [1] володіють напівпровідниковими властивостями [2]. Кристалічна структура сполук $R_3Cu_3Sb_4$ є більш складною порівняно з напівпровідниковими фазами напів-Гейслера *R*NiSb (структурний тип (СТ) MgAgAs), що забезпечує їхню низьку теплопровідність. Експериментальні дослідження взаємодії компонентів у металічних системах дають змогу отримати важливу інформацію стосовно утворення, температурної і концентраційної стабільності та структурних параметрів проміжних фаз для подальшого вивчення фізичних властивостей інтерметалідів. Взаємодію компонентів у потрійних системах *R*–Cu–Sb повністю вивчено для *R* = Y, La, Ce, Nd, Ho і Tm [3–8]. Для інших рідкісноземельних металів досліджували лише кристалографічні характеристики та фізичні властивості окремих сполук. Інформації щодо діаграми фазових рівноваг потрійної системи Gd–Cu–Sb в літературних джерелах немає – повідомлено про тернарні сполуки $GdCuSb_2$ (СТ $HfCuSi_2$) [9], $Gd_3Cu_3Sb_4$ (СТ $Y_3Au_3Sb_4$) [1], $GdCu_2Sb_2$ (СТ $CaBe_2Ge_2$) [10] і $Gd_3Cu_{22}Sb_9$ (СТ $Dy_3Cu_{20+x}Sb_{11-x}$) [11].

У цій праці наведено результати експериментального дослідження взаємодії компонентів у системі Gd–Cu–Sb при 870 K.

© Ромака Л., Ничипорук Г., Стадник Ю. та ін., 2026

2. Матеріали та методика експерименту

З метою побудови діаграми фазових рівноваг системи Gd–Cu–Sb зразки для досліджень виготовлено методом електродугового сплавлення шихти вихідних компонентів (вміст основного компонента: гадоліній – 99,9 мас. %; купрум– 99,99; стибій – 99,999). Для компенсації втрат стибію під час електродугового плавлення використано надлишок 2–3 мас. % Sb залежно від складу сплавів. Гомогенізувальне відпалювання проводили за температури 870 K упродовж 720 год. Фазовий аналіз виготовлених зразків виконували шляхом порівняння експериментальних дифрактограм, одержаних з використанням дифрактометра ДРОН-2.0M (Fe *K*α-випромінювання) із теоретичними дифрактограмами чистих компонентів, бінарних сполук і відомих тернарних сполук. Хімічний склад зразків і вміст компонентів у фазах визначали за результатами енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (ЕДРС) (електронний мікроскоп TescanVega 3 LMU). Для кожної фази виконано 4–5 вимірювань з метою отримання середнього значення. Для розрахунку кристалографічних параметрів фаз використовували пакет програм WinCSD [12], а для уточнення кристалічної структури – FullProff [13].

3. Результати досліджень та їх обговорення

Для дослідження взаємодії компонентів у системі Gd–Cu–Sb інформацію про діаграми стану подвійних систем Gd–Cu, Cu–Sb і Gd–Sb, які обмежують досліджувану потрійну систему, використано з довідників [14, 15]. За температури відпалювання 870 K у системі Cu–Sb підтверджено існування сполук Cu_3Sb (СТ BiF_3) і Cu_2Sb (СТ Cu_2Sb). Область гомогенності бінарної сполуки Cu_3Sb, яку визначено за результатами локального рентгеноспектрального аналізу, обмежується складами $Cu_{78,11}Sb_{21,89}$ і $Cu_{67,45}Sb_{32,55}$. У системі Gd–Sb згідно з діаграмою стану [14] за температури 870 K підтверджено існування сполук Gd_5Sb_3 (СТ Mn_5Si_3), Gd_4Sb_3 (СТ Th_3P_4), GdSb (СТ NaCl) і Gd_2Sb_5 (СТ Dy_2Sb_5) [16]. У подвійній системі Gd–Cu підтверджено існування всіх сполук за температури 870 K, що відповідають літературним даним: $GdCu_6$ (СТ $CeCu_6$), $GdCu_5$ (СТ $CaCu_5$), $GdCu_2$ (СТ KHg_2), GdCu (СТ CsCl).

Розчинність третього компонента в бінарних сполуках систем Cu–Sb і Gd–Cu за умов дослідження є незначною (до ~1,5 ат. %). У системі Gd–Sb бінарна сполука GdSb (стр. тип NaCl) розчиняє до ~8 ат. % Cu, що підтверджено результатами ЕДРС аналізу ($Gd_{45,75}Cu_{7,93}Sb_{46,32}$). Параметри елементарної комірки змінюються від a = 0,6219(1) (для сполуки GdSb) до a = 0,6231(2) нм (для зразка $Gd_{45}Cu_{10}Sb_{45}$). Помітної розчинності купруму в інших бінарних сполуках цієї системи не спостерігали.

Діаграму фазових рівноваг системи Gd–Cu–Sb побудовано при 870 K у повному інтервалі концентрацій за результатами рентгенівського фазового, мікроструктурного та локального рентгеноспектрального аналізів виготовлених зразків (рис. 1). Вона налічує 16 одно-, 32 дво- і 17 трифазових полів. Фазовий склад окремих сплавів системи Gd–Cu–Sb наведено в табл. 1. Фотографії поверхонь мікрошліфів шести зразків подано на рис. 2, 3.

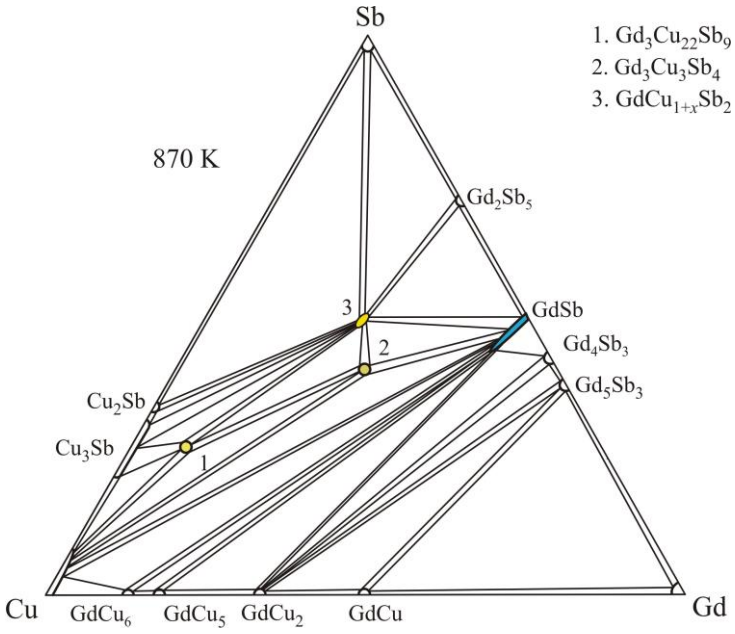


Рис. 1. Ізотермічний переріз діаграми стану системи Gd–Cu–Sb при 870 K
Fig. 1. Isothermal section of the Gd–Cu–Sb system at 870 K

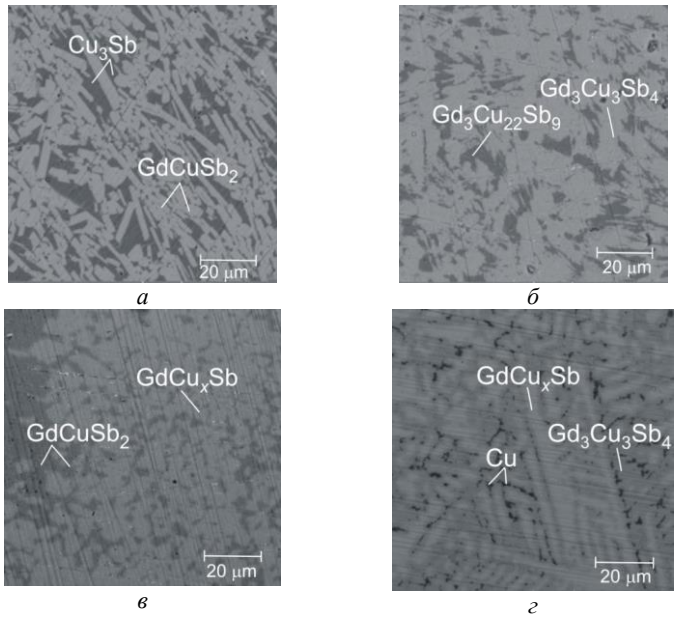


Рис. 2. Фотографії мікроструктур сплавів: *а* – $Gd_{15}Cu_{45}Sb_{40}$; *б* – $Gd_{20}Cu_{45}Sb_{35}$; *в* – $Gd_{40}Cu_{10}Sb_{50}$; *г* – $Gd_{33}Cu_{29}Sb_{38}$
Fig. 2. Electron microphotographs of the alloys: *a* – $Gd_{15}Cu_{45}Sb_{40}$; *b* – $Gd_{20}Cu_{45}Sb_{35}$; *c* – $Gd_{40}Cu_{10}Sb_{50}$; *d* – $Gd_{33}Cu_{29}Sb_{38}$

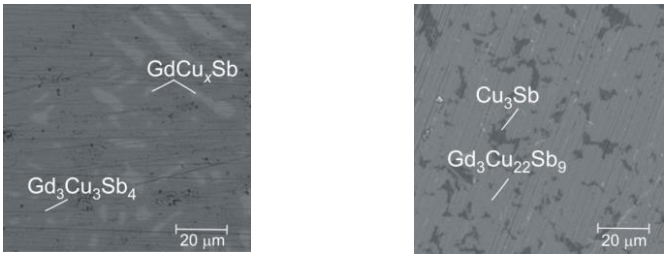
Таблиця 1

Фазовий склад сплавів системи Gd–Cu–Sb

Table 1

Phase composition of the alloys from Gd–Cu–Sb system

Склад сплавів/ ЕДРС дані, ат. %	Фаза	Структурний тип	Періоди ґратки, нм			ЕДРС, ат. %		
			a	*b*	*c*	Gd	Cu	Sb
$Gd_{30}Cu_{50}Sb_{20}$	$GdCu_xSb$	NaCl	0,6233(1)					
	$GdCu_5$	$CaCu_5$	0,5005(2)		0,4132(3)			
$Gd_{45}Cu_{35}Sb_{20}$	$GdCu_2$	KHg_2	0,4323(3)	0,6847(4)	0,7321(4)			
	Gd_5Sb_3	Mn_5Si_3	0,8986(3)		0,6327(2)			
	Gd_4Sb_3	Th_3P_4	0,6216(3)					
$Gd_8Cu_{66}Sb_{26}$	$Gd_3Cu_{22}Sb_9$	$Dy_3Cu_{22}Sb_9$	1,6669(3)			8,81	65,16	26,03
$Gd_{8,13}Cu_{66,29}Sb_{25,58}$	Cu_3Sb	BiF_3	0,5967(3)			0,70	76,88	22,42
$Gd_{10}Cu_{65}Sb_{25}$	$Gd_3Cu_{22}Sb_9$	$Dy_3Cu_{22}Sb_9$	1,6677(2)			8,73	64,92	26,35
$Gd_{10,35}Cu_{65,28}Sb_{24,87}$	$Gd_3Cu_3Sb_4$	$Y_3Au_3Sb_4$	0,9583(2)			30,65	28,91	40,44
	(Cu)	Cu	0,3633(3)				100,0	
$Gd_{60}Cu_{10}Sb_{30}$	Gd_5Sb_3	Mn_5Si_3	0,8986(3)		0,6327(2)			
	GdCu	CsCl	0,3212(2)					
$Gd_{10}Cu_{60}Sb_{30}$	$Gd_3Cu_{22}Sb_9$	$Dy_3Cu_{22}Sb_9$	1,6660(3)					
	Cu_3Sb	BiF_3	0,5968(3)					
	$GdCu_{1+x}Sb_2$	$HfCuSi_2$	0,4282(3)		0,9980(7)			
$Gd_{20}Cu_{45}Sb_{35}$	$Gd_3Cu_3Sb_4$	$Y_3Au_3Sb_4$	0,9584(3)			28,90	30,16	40,94
$Gd_{20,35}Cu_{44,60}Sb_{35,05}$	$Gd_3Cu_{22}Sb_9$	$Dy_3Cu_{22}Sb_9$	1,6675(2)			9,02	65,76	25,22
$Gd_{30}Cu_{30}Sb_{40}$	$GdCu_xSb$	NaCl	0,6231(2)			45,75	7,93	46,32
$Gd_{32,36}Cu_{28,82}Sb_{38,82}$	(Cu)	Cu	0,3631(3)				100,0	
	$Gd_3Cu_3Sb_4$	$Y_3Au_3Sb_4$	0,9584(2)			28,84	30,72	39,44
$Gd_{40}Cu_{15}Sb_{45}$	$GdCu_xSb$	NaCl	0,6223(2)			48,55	2,77	48,68
$Gd_{40,14}Cu_{15,47}Sb_{44,39}$	$Gd_3Cu_3Sb_4$	$Y_3Au_3Sb_4$	0,9583(3)			30,11	28,97	40,92
$Gd_{47}Cu_8Sb_{45}$	$GdCu_xSb$	NaCl	0,6233(2)			45,34	7,67	46,99
$Gd_{47,39}Cu_{8,89}Sb_{43,72}$	$GdCu_2$	KHg_2	0,4323(3)	0,6847(4)	0,7321(4)	31,79	67,28	0,93
$Gd_{20}Cu_{40}Sb_{40}$	$Gd_3Cu_{22}Sb_9$	$Dy_3Cu_{22}Sb_9$	1,6676(2)			8,84	64,70	26,46
$Gd_{20,64}Cu_{36,90}Sb_{42,46}$	$Gd_3Cu_3Sb_4$	$Y_3Au_3Sb_4$	0,9584(3)			30,59	28,87	40,54
	$GdCu_{1+x}Sb_2$	$HfCuSi_2$	0,4281(3)		0,9982(4)	24,90	26,28	48,82
$Gd_{25}Cu_{35}Sb_{40}$	$Gd_3Cu_{22}Sb_9$	$Dy_3Cu_{22}Sb_9$	1,6678(2)			8,73	64,92	26,35
$Gd_{25,64}Cu_{31,90}Sb_{42,46}$	$GdCu_{1+x}Sb_2$	$HfCuSi_2$	0,4282(4)		0,9980(5)	25,02	26,81	48,17
	$Gd_3Cu_3Sb_4$	$Y_3Au_3Sb_4$	0,9582(3)			30,65	27,91	41,44
$Gd_{15}Cu_{45}Sb_{40}$	$GdCu_{1+x}Sb_2$	$HfCuSi_2$	0,4282(3)		0,9981(6)	25,12	27,22	47,66
$Gd_{14,43}Cu_{46,57}Sb_{39,00}$	Cu_3Sb	BiF_3	0,5971(3)			0,72	72,69	26,59
$Gd_{40}Cu_{15}Sb_{45}$	$GdCu_xSb$	NaCl	0,6224(2)			48,55	3,77	47,68
$Gd_{40,14}Cu_{15,47}Sb_{44,39}$	$Gd_3Cu_3Sb_4$	$Y_3Au_3Sb_4$	0,9583(3)			30,11	28,97	40,92
$Gd_{20}Cu_{35}Sb_{45}$	$GdCu_{1+x}Sb_2$	$HfCuSi_2$	0,4282(3)		0,9980(5)	24,84	26,98	48,18
$Gd_{20,33}Cu_{35,86}Sb_{43,82}$	Cu_3Sb	BiF_3	0,5969(3)			0,57	72,86	26,56
$Gd_{40}Cu_{10}Sb_{50}$	$GdCu_xSb$	NaCl	0,6225(2)			48,31	5,58	48,11
$Gd_{40,47}Cu_{11,67}Sb_{47,86}$	$GdCu_{1+x}Sb_2$	$HfCuSi_2$	0,4282(2)		0,9982(6)	25,86	26,42	47,72
$Gd_{30}Cu_{15}Sb_{55}$	$GdCu_{1+x}Sb_2$	$HfCuSi_2$	0,4279(3)		0,9975(4)			
	GdSb	NaCl	0,6222(2)					
	Gd_2Sb_5	Dy_2Sb_5	сліди					



а *б*

Рис. 3. Фотографії мікроструктур сплавів: *а* – $Gd_{40}Cu_{15}Sb_{45}$; *б* – $Gd_8Cu_{66}Sb_{26}$
Fig. 3. Electron microphotographs of the alloys: *a* – $Gd_{40}Cu_{15}Sb_{45}$; *b* – $Gd_8Cu_{66}Sb_{26}$

За температури 870 K у системі Gd–Cu–Sb підтверджено існування трьох відомих раніше сполук [1, 9, 11], кристалографічні характеристики яких наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Кристалографічні характеристики тернарних сполук системи Gd–Cu–Sb

Table 2

Crystallographic characteristics of ternary compounds from Gd–Cu–Sb system

Сполуки	Структурний тип	Просторова група	Періоди гратки, нм		
			a	*b*	*c*
$Gd_3Cu_{22}Sb_9$	$Dy_3Cu_{20+x}Sb_{11-x}$	*F*-43*m*	1,6677(2)	–	–
$Gd_3Cu_3Sb_4$	$Y_3Au_3Sb_4$	*I*-43*d*	0,95827(6)	–	–
$GdCu_{1+x}Sb_2$	$HfCuSi_2$	*P*4/*nmm*	0,42801(3)–0,42819(4)	–	0,99771(8)–0,9981(2)

За умов дослідження існування сполуки $GdCu_2Sb_2$ зі структурою типу $CaBe_2Ge_2$ ми не підтвердили, ймовірно вона існує за вищої температури. У праці [17] зазначено, що сполуку $GdCu_2Sb_2$ отримано методом твердофазної реакції. Автори [18] описують структуру сполуки $GdCu_{1,3}Sb_2$ як дефектну зі структурою типу $CaBe_2Ge_2$.

Сполука $GdCuSb_2$ має незначну область гомогенності, яка за даними локального рентгеноспектрального аналізу обмежується складами $Gd_{25,12}Cu_{27,22}Sb_{47,66}$ і $Gd_{24,37}Cu_{24,82}Sb_{50,80}$. Для зразка $Gd_{25}Cu_{25}Sb_{50}$ виконано уточнення кристалічної структури сполуки $GdCuSb_2$ на основі масиву експериментальних відбить *hkl* (рис. 4) в рамках моделі структурного типу $HfCuSi_2$ [19]: ПГ *P*4/*nmm*; *a* = 0,42801(3); *c* = 0,99771(8) нм; R_P = 0,066; R_{wp} = 0,085; R_{Bragg} = 0,087. Координати атомів у цій структурі наведено в табл. 3. Вміст фази GdSb (СТ NaCl, *a* = 0,6251(1) нм) становить ~ 4 %.

Таблиця 3

Координатні параметри атомів структури сполуки $GdCuSb_2$

Table 3

Parameters of the atoms for $GdCuSb_2$ structure

Атом	ПСТ	*x/a*	*y/b*	*z/c*
Gd	2*c*	1/4	1/4	0,2504(1)
Cu	2*b*	3/4	1/4	1/2
Sb1	2*c*	1/4	1/4	0,6600(1)
Sb2	2*a*	3/4	1/4	0

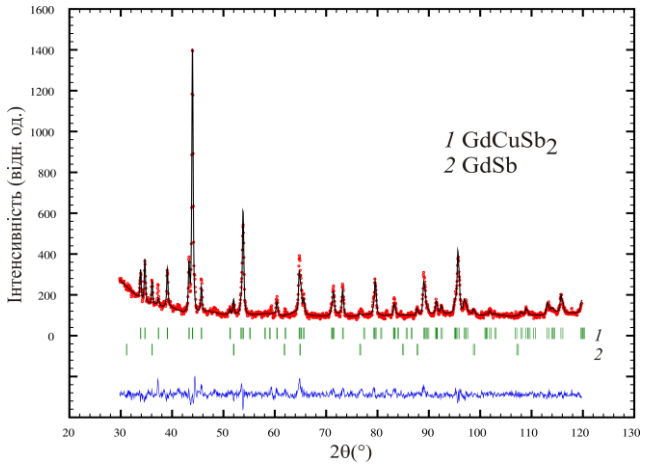


Рис. 4. Спостережувана (кружки), розрахована (лінія)
і різницева (внизу рисунка) дифрактограми сплаву $Gd_{25}Cu_{25}Sb_{50}$
Fig. 4. The observed (circles), calculated (solid line through the circles),
and difference (bottom solid line) X-ray patterns for the $Gd_{25}Cu_{25}Sb_{50}$ alloy

Кристалічну структуру сполуки $GdCuSb_2$ можна зобразити як укладку двох типів тетраедрів, утворених атомами Gd навколо атомів Sb й атомами Sb навколо атомів Cu (рис. 5).

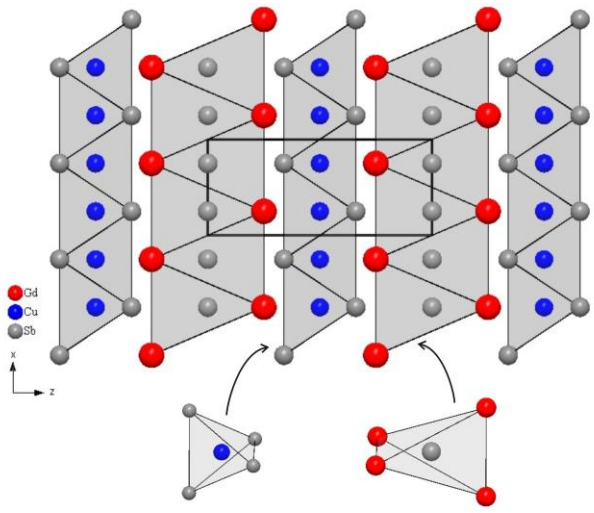


Рис. 5. Укладка тетраедрів у структурі $GdCuSb_2$
Fig. 5. Package of tetrahedrons in $GdCuSb_2$ structure

Аналіз дослідженої системи Gd–Cu–Sb, літературних відомостей стосовно вивчених систем *R*–Cu–Sb (*R* = Y, Ce, Nd, Ho, Tm) та окремих тернарних сполук засвідчує, що антимоніди *R*$CuSb_2$ (СТ $HfCuSi_2$) утворюються з усіма рідкісноземельними металами, за винятком Eu. Сполуки $R_3Cu_3Sb_4$ (СТ $Y_3Au_3Sb_4$) з Eu, Tm, Yb і Lu не реалізуються. Для *R* = Tm, Lu характерним є утворення антимонідів *R*Cu_3Sb_2 зі структурою типу $TmCu_3Sb_2$, для *R* = La, Ce – сполук R_6CuSb_{15} (СТ La_6MnSb_{15}) і $R_6Cu_{43}Sb_{24}$ (СТ $Ce_6Cu_{43}Sb_{24}$) [20, 21]. Детальний аналіз кристалічних структур тернарних сполук, які реалізуються у системах *R*–Cu–Sb, виконали автори [22]. Варто зазначити, що особливістю систем *R*–Cu–Sb є відсутність сполук еквіатомного складу, за винятком сполук *R*CuSb з Eu і Yb зі структурою типу ZrBeSi.

4. Висновки

Діаграму фазових рівноваг потрійної системи Gd–Cu–Sb побудовано за температури 870 K у повному інтервалі концентрацій. Досліджена система за температури 870 K характеризується утворенням трьох тернарних сполук $Gd_3Cu_{22}Sb_9$ (СТ $Dy_3Cu_{20+x}Sb_{11-x}$), $Gd_3Cu_3Sb_4$ (СТ $Y_3Au_3Sb_4$), $GdCuSb_2$ (СТ $HfCuSi_2$). На основі бінарної сполуки GdSb (СТ NaCl) утворюється твердий розчин до вмісту 8 ат. % купруму.

5. Подяка

Роботу виконано в рамках гранту МОН України № 0124U000989.

---

1. *Skolozdra R. V., Salamakha P. S., Ganzyuk A. L., Bodak O. I.* New intermetallic compounds $R_3Cu_3Sb_4$ (*R* = Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er) with semiconducting properties // Inorg. Mater. 1993. Vol. 29. P. 26–29.
2. *Skolozdra R., Baran M., Horyn A., Szewczyk A., Gorelenko Yu., Szymczak H., Szymczak R.* Magnetic and transport properties of $R_3Cu_3Sb_4$ compounds (*R* = La, Ce, Pr, Nd, and Sm) // Acta Phys. Pol. A. 2002. Vol. 102. P. 429–435. DOI: https://doi.org/10.12693/AphysPolA.102.429
3. *Romaka L., Stadnyk Yu., Romaka V. V., Zelinsliy A., Klyzub P., Horyn A.* Phase equilibrium diagram of Y–Cu–Sb system at 870 K // Phys. Chem. Solid State. 2023. Vol. 24(4). P. 610–615. DOI: https://doi.org/10.15330/pcss.24.4.610-615
4. *Zeng L., Zhang J., Liao J., Qin P.* Phase relations in the Cu–La–Sb system at 693 K // J. Alloys Compd. 2006. Vol. 425. P. 109–111. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.12.093
5. *Morozkin A. V., Nikiforov V. N., Imaoka N., Morimoto I.* Ce–Cu–Sb system at 670/870 K // J. Alloys Compd. 2006. Vol. 422. P. L5–L8. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.12.010
6. *Sologub O. L., Salamakha P. S.* Rare-earth-antimony systems // Handbook on the Physics and Chemistry of Rare-Earths, North-Holland, Amsterdam. 2003. Vol. 33. P. 35–146. DOI: https://doi.org/10.1016/S0168-1273(02)33002-2
7. *Zeng L., Ning H.* Isothermal cross-section of the Cu–Ho–Sb phase diagram at 500° C // J. Alloys Compd.2003. Vol. 359. P. 169–171. DOI: https://doi.org/10.1016/S0925-8388(03)00199-3

8. *Fedyna L. O., Fedorchuk A. O., Mykhalichko V. M., Shpyrka Z. M., Fedyna M. F.* Isothermal section of the phase diagram and crystal structures of the compounds in the ternary system Tm–Cu–Sb at 870 K // Solid St. Sci. 2017. Vol. 69. P. 7–12. DOI: https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2017.05.003
9. *Sologub O. L., Hiebl K., Rogl P., Noel H., Bodak O. I.* On the crystal structure and magnetic properties of the ternary rare earth compounds *RET*Sb_2 with *RE* = rare earth and *T* = Ni, Pd, Cu and Au // J. Alloys Compd. 1994. Vol. 210. P. 153–157. DOI: https://doi.org/10.1016/0925-8388(94)90131-7
10. *Kaczmarska K., Pierre J., Gusik A., Slebarski A.* Magnetic, resistivity and ESR studies of the compounds $GdNi_2Sb_2$ and $GdCu_2Sb_2$ // J. Magn. Magn.Mater. 1995. Vol. 147. P. 81–90. DOI: https://doi.org/10.1016/0304-8853(94)01704-2
11. *Fedyna O. L., Bodak O. I., Fedorchuk A. O., Tokaychuk Y. O., Fedyna M. F.* New ternary antimonides with $Dy_3Cu_{20+x}Sb_{11-x}$-type structure // Collected Abstr. 9th Int. Conf. Crystal Chem. Intermet. Compd. 2005. P. 90.
12. *Akselrud L., Grin Yu.* WinCSD: software package for crystallographic calculations (Version 4) // J. Appl. Cryst. 2014. Vol. 47. P. 803–805. DOI: https://doi.org/10.1107/S1600576714001058
13. *Rodríguez-Carvajal J.* Recent Developments of the Program FULLPROF // Commission on Powder Diffraction (IUCr). Newsletter. 2001. Vol. 26. P. 12–19. DOI: http://www.iucr-cpd.org/Newsletters.htm
14. *Massalski T. B.* Binary Alloys Phase Diagrams // ASM International, MetalsPark, Ohio, 1990. Vol. 2. P. 1196–1197.
15. *Okamoto H.* DeskHandbook: Phase Diagrams for Binary Alloys // Materials Park (OH): ASM. 2000.
16. *Jeitschko W., Altmeyer R. O., Schelk M., Rodewald U. C.* Lanthanoid antimonides Ln_2Sb_5 (*Ln* = Sm, Gd, Tb, Dy) and rationalization of chemical bonding withing the antimony polyanion by combining the Zintl-Klemm concept with Bond-Lenght Bond-Strenght relationships // Z. Anorg. Allg. Chem. 2001. Vol. 627. P. 1932–1940. DOI: https://doi.org/10.1002/1521-3749(200108)627:8<1932::AID-ZAAC1932>3.0.CO;2-S
17. *Mulder F. M., Thiel R. C., Buschow K. H. J.* ^{155}Gd Mössbauer effect and magnetic properties of $GdNi_2Sb_2$, $GdCu_2Sb_2$ and $GdAl_2Ga_2$ // J. Alloys Compd. 1994. Vol. 210. P. 335–338. DOI: https://doi.org/10.1016/0925-8388(94)90159-7
18. *Yang X. X., LuY. M., Zhou S. K., Mao S. Y., Mi J. X., Man Z. Y., Zhao J. T. R*$Cu_{1+x}Sb_2$ (*R* = La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho and Y) phases with defect $CaBe_2Ge_2$-type structure // Mater. Sci. Forum.2005. Vol. 475/479. P. 861–864. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.475-479.861
19. *Andruchiv L. S., Lysenko L. O., Yarmolyuk Y. P., Gladyshevskii E. I.* On structure of the compounds $HfCuSi_2$, $HfCuGe_2$, $ZrCuSi_2$ and $ZrCuGe_2$ // Dopov. Akad. Nauk Ukr. RSR, Ser. A. 1975. P. 645–648.
20. *Sologub O. L., Vybornav M. G., Rogl P., Hiebl K., Cordier G., Woll P.* Crystal structure and magnetism of ternary compounds RE_6MSb_{15}, *RE* = La, Ce and *M* = Mn, Cu, Zn // J. Solid State Chem. 1996. Vol. 122. P. 266–272. DOI: https://doi.org/10.1006/jssc.1996.0112
21. *Fedyna L. O., Fedorchuk A. O., Mykhalichko V. M., Fedyna M. F.* Crystal structure of new ternary antimonide $Ce_6Cu_{43}Sb_{24}$ // XIV Intern. conf. on crystal chem. of intermetallic compounds. Lviv, 22–26 september 2019. P. 97.

22. *Fedyna M., Fedyna L., Fedorchuk A.* Ternary antimonides of copper and rare earth metals: features of formation and relationship of crystal structures // Proceedings of the 3rd Intern. Sci. Conf. “Current problems of chemistry, materials science and ecology” (Lutsk, 1–3 june 2023). Lutsk: Teren, 2023. P. 109–114.

THE ISOTHERMAL SECTION OF THE Gd–Cu–Sb PHASE DIAGRAM AT 870 K

L. Romaka[*], H. Nychyporuk, Yu. Stadnyk, M. Konyk

Ivan Franko National University of Lviv,
Kyryla i Mefodiya Str., 6, 79005 Lviv, Ukraine
[*]e-mail: lyubov.romaka@gmail.com

The interaction between the components in the Gd–Cu–Sb ternary system was investigated using the methods of X-ray phase analysis, microstructure and energy dispersive X-ray spectroscopy in the whole concentration range at a temperature of 870 K. The alloys for investigation were prepared by arc melting the stoichiometric amounts of the constituent elements under high purity Ti-gettered argon atmosphere on a water-cooled copper hearth. The arc-melted ingots were then annealed at 870 K in evacuated quartz glass tubes for 720 hours and subsequently cold water quenched. The 2–3 wt. % excess of Sb was required to compensate the evaporative losses during arc-melting. For the characterization of the annealed samples X-ray powder diffraction on diffractometer DRON-2.0M with Fe *K*α-radiation was performed. The chemical and phase compositions of the prepared samples were examined by Scanning Electron Microscopy (SEM) using Tescan Vega 3 LMU electron microscope. At the temperature of investigation Gd–Cu–Sb system is characterized by formation of three ternary compounds: $Gd_3Cu_{22}Sb_9$ ($Dy_3Cu_{20+x}Sb_{11-x}$ structure type, space group *F*-43*m*, a = 1.6677(2) nm), $Gd_3Cu_3Sb_4$ ($Y_3Au_3Sb_4$ structure type, space group *I*-43*d*, a = 0.95827(6) nm), $GdCu_{1+x}Sb_2$ ($HfCuSi_2$ structure type, space group *P*4/*nmm*, a = 0.42801(2), c = 0.99771(8) nm). The solubility of copper in the binary compound GdSb (NaCl structure type) extends up to 8 at. %.

Keywords: intermetallics, ternary system, phase equilibria, crystal structure.

Отримано 14.11.2025;
в остаточному вигляді – 06.01.2026;
прийнято до друку – 12. 02.2026;
оприлюднено онлайн − 06.11.2026.