

L. Ромака<sup>1</sup>, Ю. Стадник<sup>1</sup>, В.В. Ромака<sup>2</sup>, А. Зелінський<sup>1</sup>, П. Клизуб<sup>1</sup>, А. Горинь<sup>1</sup>

## Діаграма фазових рівноваг системи Y-Cu-Sb при 870 К

<sup>1</sup>Львівський національний університет ім. І.Франка, Львів, Україна, [lyubov.romaka@gmail.com](mailto:lyubov.romaka@gmail.com)

<sup>2</sup>Інститут дослідження твердого тіла ім. Лейбніца, Дрезден, Німеччина, [yromaka@gmail.com](mailto:yromaka@gmail.com)

Взаємодія компонентів у потрійній системі Y-Cu-Sb досліджена методами рентгенівського, мікроструктурного аналізів та енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії в повному концентраційному інтервалі за температури 870 К. За умов дослідження система характеризується існуванням трьох тернарних сполук: Y<sub>3</sub>Cu<sub>22</sub>Sb<sub>9</sub> (структурний тип Du<sub>3</sub>Cu<sub>20+x</sub>Sb<sub>11-x</sub>, просторова група F-43m, (структурний тип HfCuSi<sub>2</sub>, просторова група P4/nmm, a = 0.42580(1), c = 0.98932(3) нм). Розчинність купруму в бінарній сполуці YSb (структурний тип NaCl) сягає 8 ат. %.

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

Плано до редакції 21.05.2023; прийнято до друку 31.10. 2023.

### Вступ

Основою для пошуку нових матеріалів є дослідження хімічної взаємодії елементів у багатокомпонентних системах. Рідкісноземельні метали (R=Y, La-Sm, Gd-Er) з купрумом і стибієм утворюють сполуки R<sub>3</sub>Cu<sub>3</sub>Sb<sub>4</sub> зі структурою типу Y<sub>3</sub>Au<sub>3</sub>Sb<sub>4</sub> (просторова група I-43d) [1], який є похідним від структурного типу Th<sub>3</sub>P<sub>4</sub> [2]. Як і фази пів-Гейслера RNiSb (структурний тип MgAgAs, просторова група F-43m) [3, 4], сполуки R<sub>3</sub>Cu<sub>3</sub>Sb<sub>4</sub> характеризуються напівпровідниковими властивостями [1, 5, 6]. На відміну від фаз пів-Гейслера RNiSb кристалічна структура сполук R<sub>3</sub>Cu<sub>3</sub>Sb<sub>4</sub> є більш складною, що забезпечує низьку теплопровідність цих фаз. Відомо, що на поведінку електротранспортних властивостей напівпровідникових сполук значний вплив мають як методи синтезу, так і присутність домішкових фаз. Тому при дослідженні взаємодії компонентів у відповідних системах можна отримати важливу інформацію про умови утворення, температурну і концентраційну стабільність, мікроструктуру і кристалічну структуру вихідних тернарних сполук, як основи для пошуку нових напівпровідникових

матеріалів. Діаграми фазових рівноваг потрійних систем R-Cu-Sb побудовані для R=Ce, Nd, Ho, Tm [7-9]. Для інших рідкісноземельних елементів досліджували окремі тернарні сполуки [7].

Метою роботи є експериментальне дослідження взаємодії компонентів у системі Y-Cu-Sb і побудова діаграми фазових рівноваг за температури 870 К.

### I. Методики дослідження

Для побудови діаграми фазових рівноваг системи Y-Cu-Sb сплави синтезували методом електродугового сплавлення шихти металів (вміст основного компонента не менше 99.9 мас. %) в атмосфері аргону (губчатий титан використовували в якості геттеру). Для кращої гомогенізації зразки переплавляли двічі. Втрати Sb в ході плавлення компенсували надлишком стибію 2-3 ваг. %. Гомогенізуюче відпалювання сплавів проводили у вакуумованих кварцевих ампулах за температури 870 К впродовж 700 год з подальшим гартуванням у холодній воді.

Фазовий склад синтезованих зразків визначали на основі аналізу експериментально отриманих дифрактограм (дифрактометр ДРОН-4.0, FeK<sub>α</sub>-

випромінювання) методом порівняння з теоретичними дифрактограмами чистих компонентів, бінарних сполук і відомих тернарних антимонідів (програма PowderCell [10]). Метод енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (ЕДРС) (електронний мікроскопом TESCAN VEGA 3 LMU, оснащений рентгенівським аналізатором з енергодисперсійною спектроскопією) використовували для контролю хімічного складу синтезованих зразків і визначення точного вмісту компонентів у фазах. Для кожної фази в кожному зразку виконували щонайменше п'ять вимірювань. Структурні розрахунки проводили з використанням програм WinCSD [11] і FullProf Suite [12].

Температурні межі існування тернарних сполук досліджували методом диференціального термічного аналізу (ДТА, синхронний термоаналізатор LINSEIS STA RT 1600). Зразки нагрівали в атмосфері аргону до 900°C (1170 К) зі швидкістю 10°C/хв.

## II. Результати експерименту

Для дослідження потрійної системи Y-Cu-Sb відомості про діаграми стану подвійних систем Y-Cu, Y-Sb і Cu-Sb, які обмежують систему Y-Cu-Sb, використані з праць [13, 14]. За температури дослідження в системі Cu-Sb підтверджено утворення сполук  $\text{Cu}_3\text{Sb}$  (структурний тип  $\text{BiF}_3$ ) і  $\text{Cu}_2\text{Sb}$  (структурний тип  $\text{Cu}_2\text{Sb}$ ). Область гомогенності бінарної сполуки  $\text{Cu}_3\text{Sb}$ , яка визначена за результатами локального спектрального аналізу, обмежується складами  $\text{Cu}_{78.11}\text{Sb}_{21.89}$  і  $\text{Cu}_{67.45}\text{Sb}_{32.55}$ . У системі Y-Sb утворюються три бінарні сполуки:  $\text{Y}_3\text{Sb}$  (структурний тип  $\text{Tl}_3\text{P}$ ),  $\text{Y}_5\text{Sb}_3$  (структурний тип  $\text{Mn}_5\text{Si}_3$ ),  $\text{YSb}$  (структурний тип  $\text{NaCl}$ ). Сполука  $\text{Y}_4\text{Sb}_3$  (структурний тип  $\text{Th}_3\text{P}_4$ ) існує за високих температур (вище 1660 К) [13], високотемпературна модифікація сполуки  $\text{Y}_5\text{Sb}_3$  зі структурою типу  $\text{Yb}_5\text{Sb}_3$  отримана за температури 1538 К [15]. Існування сполук  $\text{Y}_3\text{Sb}$ ,  $\text{Y}_5\text{Sb}_3$  і  $\text{YSb}$  в системі Y-Sb за температури 870 К підтверджено нами в ході дослідження системи Y-Ni-Sb [4]. Система Y-Cu характеризується утворенням п'яти сполук:  $\text{YCu}_5$  (структурний тип  $\text{CaCu}_5$ ),  $\text{Y}_{0.8}\text{Cu}_{5.4}$  (структурний тип  $\text{Tb}_{0.78}\text{Cu}_{5.44}$ ),  $\text{YCu}_2$  (структурний тип  $\text{KHg}_2$ ),  $\text{YCu}$  (структурний тип  $\text{CsCl}$ ) і  $\text{Y}_2\text{Cu}_7$  з невідомою структурою. У ході дослідження підтверджено утворення бінарних сполук згідно літературних відомостей, за винятком фази  $\text{Y}_2\text{Cu}_7$ . За умов нашого дослідження зразок відповідного складу містив у рівновазі сполуки  $\text{YCu}_5$  і  $\text{YCu}_2$ .

Діаграма фазових рівноваг системи Y-Cu-Sb побудована при 870 К за результатами рентгенівського фазового, мікроструктурного та рентгеноспектрального аналізів виготовлених зразків (рис. 1). Для підтвердження хімічного та фазового складу зразків використано мікроструктурний та рентгеноспектральний аналізи. Фазовий склад окремих сплавів системи Y-Cu-Sb за результатами рентгенофазового та рентгеноспектрального аналізів наведено в табл. 1. Фотографії мікроструктур для деяких зразків зображено на рис. 2. За температури 870 К у системі Y-Cu-Sb підтверджено утворення

трьох тернарних сполук [1, 16, 17], кристалографічні характеристики яких подані в табл. 2.

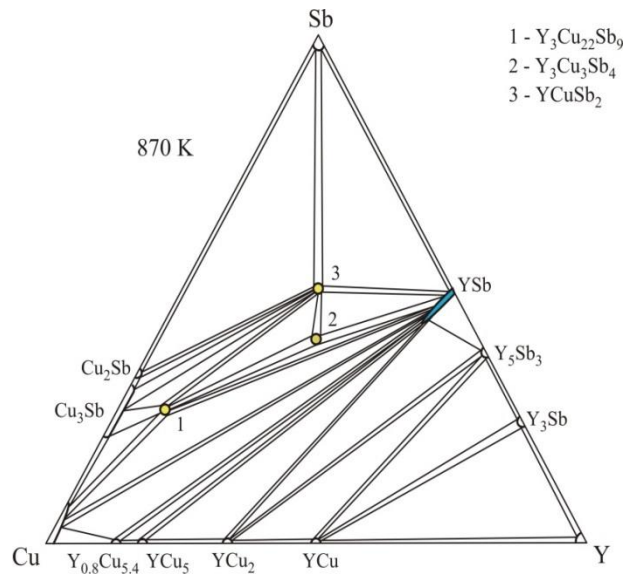


Рис. 1. Ізотермічний переріз діаграми стану системи Y-Cu-Sb при 870 К.

Відомості про сполуку  $\text{YCuSb}_2$  та її належність до структурного типу  $\text{HfCuSi}_2$  наведено в праці [16]. Автори [18] розглядають структуру сполуки  $\text{YCuSb}_2$  як дефектну зі структурою типу  $\text{CaBe}_2\text{Ge}_2$ . Розрахунок кристалічної структури сполуки  $\text{YCuSb}_2$  підтвердив її належність до структурного типу  $\text{HfCuSi}_2$  (просторова група  $P4/nmm$ ,  $R_{\text{Bragg}} = 0.0387$ ,  $R_f = 0.0258$ ) (рис. 3). Розраховані координати атомів у структурі  $\text{YCuSb}_2$  приведені в табл. 3. Згідно виконаних розрахунків і даних ЕДРС ( $\text{Y}_{26.25}\text{Cu}_{24.21}\text{Sb}_{49.54}$ ) сполука  $\text{YCuSb}_2$  за умов дослідження реалізується при стехіометричному складі.

Розчинність третього компонента в бінарних сполуках систем Cu-Sb і Y-Cu за умов дослідження є незначною (до ~1.5 ат. %). В системі Y-Sb бінарна сполука  $\text{YSb}$  (стр. тип  $\text{NaCl}$ ) розчиняє до ~8 ат. % Cu, що підтверджується результатами ЕДРС аналізу ( $\text{Y}_{46.18}\text{Cu}_{8.03}\text{Sb}_{45.79}$ ). Періоди ґратки змінюються від  $a = 0.6184(2)$  (для  $\text{YSb}$ ) до  $a = 0.6192(2)$  нм (для зразка  $\text{Y}_{45}\text{Cu}_{10}\text{Sb}_{45}$ ). Помітної розчинності купруму в інших бінарних сполуках системи Y-Sb не спостерігалось.

Для сполук  $\text{Y}_3\text{Cu}_{22}\text{Sb}_9$  і  $\text{Y}_3\text{Cu}_3\text{Sb}_4$  виконано дослідження з використанням диференціального термічного аналізу (ДТА), які підтвердили обмежений температурний інтервал існування сполук (рис. 4)

Температурні переходи (режим нагрівання) за температур 1064 К для фази  $\text{Y}_3\text{Cu}_{22}\text{Sb}_9$  (температурний перехід при 923 К відповідає температурі плавлення домішкової фази  $\text{Cu}_3\text{Sb}$ ) і 968 К для фази  $\text{Y}_3\text{Cu}_3\text{Sb}_4$  свідчать про розпад обох сполук вище зазначених температур. Зміни маси досліджених зразків у ході вимірювання практично немає.

Таблиця 1.

Фазовий склад і дані ЕДРС окремих зразків системи Y–Cu–Sb

Номинальний склад/склад за ЕДРС, ат. %	Фаза	Стр. тип	Періоди ґратки, нм			Дані ЕДРС, ат. %		
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	Y	Cu	Sb
Y <sub>40</sub> Cu <sub>40</sub> Sb <sub>20</sub>	YSb	NaCl	0.6189(3)					
	YCu <sub>2</sub>	KHg <sub>2</sub>	0.4309(4)	0.6893(3)	0.7307(4)			
Y <sub>65</sub> Cu <sub>15</sub> Sb <sub>20</sub>	YCu	CsCl	0.3472(3)					
	Y <sub>5</sub> Sb <sub>3</sub>	Mn <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>	0.8882(3)		0.6287(3)			
	Y <sub>3</sub> Sb	Ti <sub>3</sub> P	1.2363(5)		0.6178(3)		100.0	
Y <sub>35</sub> Cu <sub>45</sub> Sb <sub>20</sub> Y <sub>37.47</sub> Cu <sub>45.50</sub> Sb <sub>17.03</sub>	YCu <sub>x</sub> Sb	NaCl	0.61891(3)			45.15	8.38	46.47
	YCu <sub>2</sub>	KHg <sub>2</sub>	0.4308(3)	0.6893(4)	0.7307(4)	34.66	64.64	0.70
	YCu <sub>5</sub>	CaCu <sub>5</sub>	0.4989(4)		0.4099(4)	16.54	83.46	
Y <sub>40</sub> Cu <sub>40</sub> Sb <sub>20</sub> Y <sub>37.47</sub> Cu <sub>45.50</sub> Sb <sub>17.03</sub>	YCu <sub>2</sub>	KHg <sub>2</sub>	0.4308(3)	0.6892(4)	0.7307(3)	34.66	64.65	0.69
	YCu <sub>x</sub> Sb	NaCl	0.6190(3)			47.68	5.02	47.30
	YCu <sub>5</sub>	CaCu <sub>5</sub>	0.4988(4)		0.4097(4)	16.44	83.56	
Y <sub>20</sub> Cu <sub>55</sub> Sb <sub>25</sub> Y <sub>21.22</sub> Cu <sub>55.28</sub> Sb <sub>23.50</sub>	YCu <sub>x</sub> Sb	NaCl	0.6190(3)			46.18	8.04	45.78
	Y <sub>3</sub> Cu <sub>22</sub> Sb <sub>9</sub>	Dy <sub>3</sub> Cu <sub>22</sub> Sb <sub>9</sub>	1.6614(7)			8.76	65.42	25.82
	(Cu)	Cu	0.3632(3)				100.0	
Y <sub>10</sub> Cu <sub>55</sub> Sb <sub>35</sub>	Y <sub>3</sub> Cu <sub>22</sub> Sb <sub>9</sub>	Dy <sub>3</sub> Cu <sub>22</sub> Sb <sub>9</sub>	1.6613(7)					
	Cu <sub>3</sub> Sb	BiF <sub>3</sub>	0.5967(3)					
	YCuSb <sub>2</sub>	HfCuSi <sub>2</sub>	0.4259(3)		0.9936(4)			
Y <sub>20</sub> Cu <sub>40</sub> Sb <sub>40</sub> Y <sub>19.93</sub> Cu <sub>41.99</sub> Sb <sub>38.08</sub>	Y <sub>3</sub> Cu <sub>22</sub> Sb <sub>9</sub>	Dy <sub>3</sub> Cu <sub>22</sub> Sb <sub>9</sub>	1.6614(5)			9.19	63.75	27.06
	Y <sub>3</sub> Cu <sub>3</sub> Sb <sub>4</sub>	Y <sub>3</sub> Au <sub>3</sub> Sb <sub>4</sub>	0.9536(3)			30.05	30.26	39.69
	YCuSb <sub>2</sub>	HfCuSi <sub>2</sub>	0.4260(2)		0.9936(4)	27.11	24.62	48.27
Y <sub>48</sub> Cu <sub>12</sub> Sb <sub>40</sub> Y <sub>47.65</sub> Cu <sub>11.25</sub> Sb <sub>41.10</sub>	YCu <sub>x</sub> Sb	NaCl	0.6189(3)			48.61	2.93	48.46
	YCu <sub>2</sub>	KHg <sub>2</sub>	0.43091(3)	0.6891(4)	0.7307(4)	33.48	65.26	1.26
Y <sub>55</sub> Cu <sub>5</sub> Sb <sub>40</sub> Y <sub>55.42</sub> Cu <sub>3.43</sub> Sb <sub>41.15</sub>	Y <sub>5</sub> Sb <sub>3</sub>	Mn <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>	0.8881(3)		0.6288(3)	61.46	0.36	38.18
	YCu <sub>x</sub> Sb	NaCl	0.6187(3)			49.02	2.25	48.73
	YCu <sub>2</sub>	KHg <sub>2</sub>	0.4309(3)	0.6891(3)	0.7308(5)	33.57	66.05	0.38
Y <sub>15</sub> Cu <sub>35</sub> Sb <sub>50</sub>	YCuSb <sub>2</sub>	HfCuSi <sub>2</sub>	0.4260(3)		0.9941(3)			
	Cu <sub>3</sub> Sb	BiF <sub>3</sub>	0.5968(3)					
	(Sb)	As	0.4308(2)		1.1256(4)			

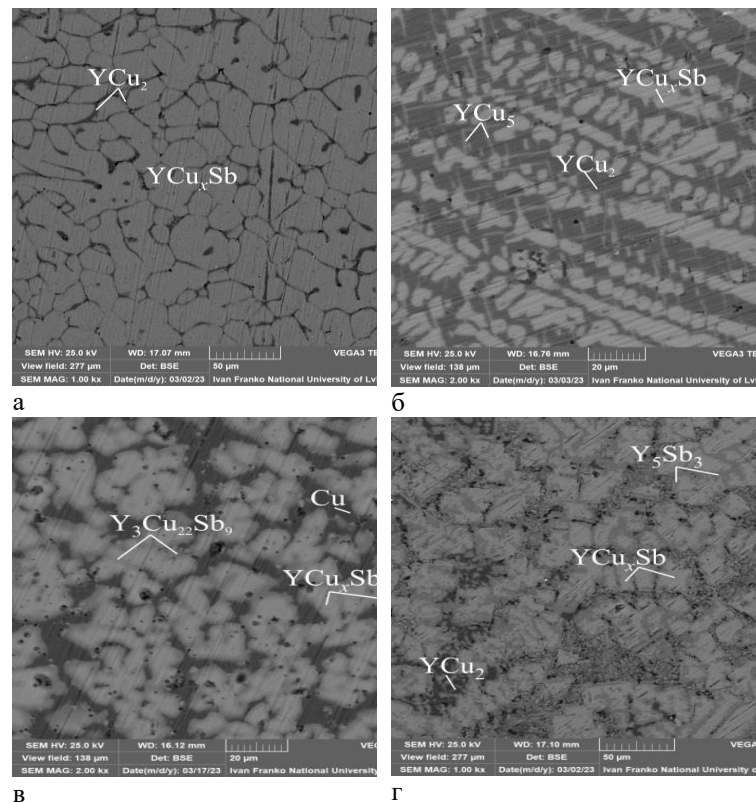


Рис. 2. Фотографії мікроструктур сплавів Y<sub>48</sub>Cu<sub>12</sub>Sb<sub>40</sub> (а), Y<sub>35</sub>Cu<sub>45</sub>Sb<sub>20</sub> (б), Y<sub>20</sub>Cu<sub>55</sub>Sb<sub>25</sub> (в), Y<sub>50</sub>Cu<sub>20</sub>Sb<sub>30</sub> (г).

Таблиця 2.

Кристалографічні характеристики тернарних сполук системи Y-Cu-Sb

Сполуки	Структурний тип	Просторова група	Періоди ґратки, нм		
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Y <sub>3</sub> Cu <sub>22</sub> Sb <sub>9</sub>	Dy <sub>3</sub> Cu <sub>20+x</sub> Sb <sub>11-x</sub>	<i>F</i> -43 <i>m</i>			
Y <sub>3</sub> Cu <sub>3</sub> Sb <sub>4</sub>	Y <sub>3</sub> Au <sub>3</sub> Sb <sub>4</sub>	<i>I</i> -43 <i>d</i>			
YCuSb <sub>2</sub>	HfCuSi <sub>2</sub>	<i>P</i> 4/ <i>nmm</i>	8		8

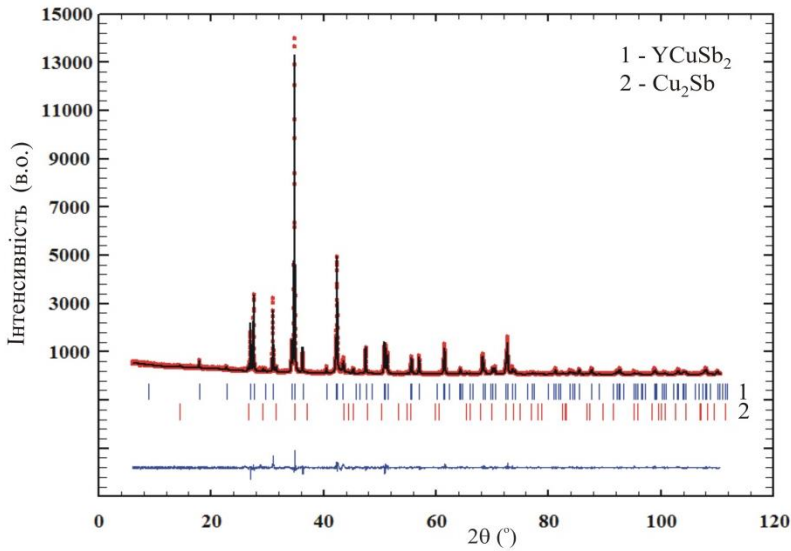


Рис. 3. Спостережувана (кружки), розрахована (лінія) і різницева (внизу рисунка) дифрактограми сплаву Y<sub>25</sub>Cu<sub>25</sub>Sb<sub>50</sub>.

Таблиця 3.

Координати та ізотропні параметри коливання атомів у структурі YCuSb<sub>2</sub>

Атом	ПСТ	<i>x/a</i>	<i>y/b</i>	<i>z/c</i>	<i>B</i> <sub>ізо.</sub> · 10 <sup>2</sup> (нм <sup>2</sup> )
Y	2 <i>c</i>	1/4	1/4	0.2462(2)	0.83(3)
Cu	2 <i>b</i>	3/4	1/4	1/2	0.92(1)
Sb1	2 <i>c</i>	1/4	1/4	0.6626(1)	0.41(3)
Sb2	2 <i>a</i>	3/4	1/4	0	0.52(4)

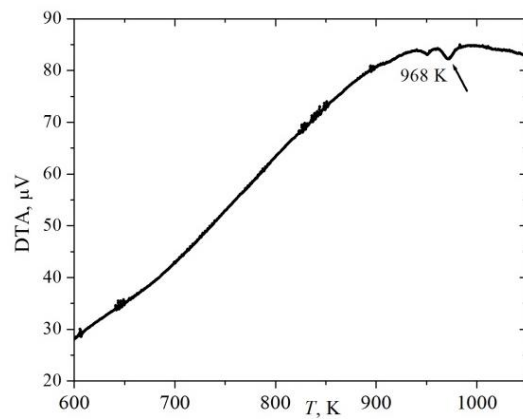
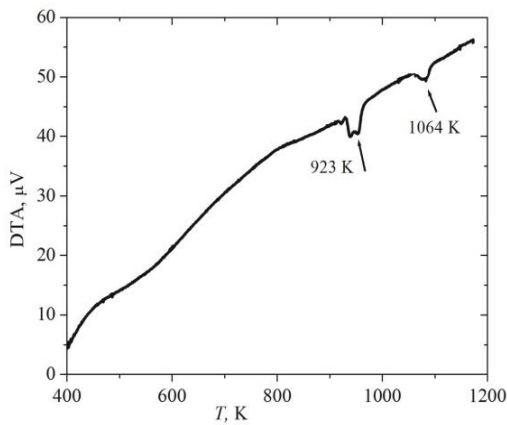


Рис. 4. Графіки ДТА для сполук Y<sub>3</sub>Cu<sub>22</sub>Sb<sub>9</sub> (а) і Y<sub>3</sub>Cu<sub>3</sub>Sb<sub>4</sub> (б).

Аналіз дослідженої системи Y-Cu-Sb, літературних відомостей вивчених систем R-Cu-Sb (R = Ce, Nd, Ho, Tm) та окремих тернарних сполук засвідчує, що антимоніди RCuSb<sub>2</sub> (стр. тип HfCuSi<sub>2</sub>) утворюються зі всіма рідкісноземельними металлами, натомість сполуки R<sub>3</sub>Cu<sub>3</sub>Sb<sub>4</sub> (стр. тип Y<sub>3</sub>Au<sub>3</sub>Sb<sub>4</sub>) з Tm,

Yb і Lu не реалізуються. Для R = Tm, Lu характерним є утворення сполук RCu<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub> зі структурою типу TmCu<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub>. Особливістю систем R-Cu-Sb є відсутність сполук еквіатомного складу, за винятком сполук RCuSb з Eu і Yb зі структурою типу ZrBeSi [19, 20].



## Висновки

Діаграма фазових рівноваг потрійної системи Y–Cu–Sb побудована за температури 870 К у повному інтервалі концентрацій за результатами експериментального дослідження взаємодії компонентів. Досліджена система при 870 К характеризується утворенням трьох тернарних сполук  $Y_3Cu_{22}Sb_9$ ,  $Y_3Cu_3Sb_4$  і  $YCuSb_2$ . На основі бінарної сполуки  $YSb$  (стр. тип NaCl) утворюється твердий розчин до вмісту 8 ат. % купруму. Диференціальний термічний аналіз засвідчив, що сполуки  $Y_3Cu_{22}Sb_9$  і  $Y_3Cu_3Sb_4$  стабільні до температур 1064 К і 968 К, відповідно.

**Ромака Л.** – к.х.н., провідний науковий співробітник Львівського національного університету ім. І. Франка;  
**Стадник Ю.** – к.х.н., провідний науковий співробітник Львівського національного університету ім. І. Франка;  
**Ромака В.** – д.т.н., к.х.н., доктор фізики Інституту дослідження твердого тіла ім. Лейбніца м. Дрезден, Німеччина;  
**Зелінський А.** – к.х.н., науковий співробітник Львівського національного університету ім. І. Франка;  
**Клизуб П.** – студент хімічного факультету Львівського національного університету ім. І. Франка;  
**Горинь А.** – к.х.н., старший науковий співробітник Львівського національного університету ім. І. Франка.

- [1] R.V. Skolozdra, P.S. Salamakha, A.L. Ganzuyuk, O.I. Bodak, *New intermetallic compounds  $R_3Cu_3Sb_4$  ( $R=Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er$ ) with semiconducting properties*, Inorg. Mater. 29, 26 (1993).
- [2] S. Sportouch, M.G. Kanatzidis,  *$Th_3Co_3Sb_4$ : a new room temperature magnet*, J. Solid State Chem. 162, 158 (2001); <https://doi.org/10.1006/jssc.2001.9206>.
- [3] V. V. Romaka, L. Romaka, A. Horyn, P. Rogl, Yu. Stadnyk, N. Melnychenko, M. Orlovskyy, V. Krayovskyy, *Peculiarities of thermoelectric half-Heusler phase formation in Gd-Ni-Sb and Lu-Ni-Sb ternary systems*, J. Solid State Chem. 239, 145 (2016); <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2016.04.029>.
- [4] V.V. Romaka, L. Romaka, A. Horyn, Yu. Stadnyk, *Experimental and theoretical investigation of the Y-Ni-Sb and Tm-Ni-Sb system*, J. Alloys Compd. 855, 157334 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157334>.
- [5] R. Skolozdra, M. Baran, A. Horyn, A. Szewczyk, Yu. Gorelenko, H. Szymczak, R. Szymczak, *Magnetic and transport properties of  $R_3Cu_3Sb_4$  compounds ( $R=La, Ce, Pr, Nd, and Sm$ )*, Acta Phys. Pol. A 102, 429 (2002); <https://doi.org/10.12693/AphysPoA.102.429>.
- [6] K. Fess, W. Kaefer, Ch. Turner, K. Friemelt, Ch. Kloc, E. Bucher, *Magnetic and thermoelectric properties of  $R_3Cu_3Sb_4$  ( $R=La, Ce, Gd, Er$ )*, J. Appl. Phys. 83, 2568 (1998); <https://doi.org/10.1063/1.367018>.
- [7] O.L. Sologub, P.S. Salamakha, Rare-earth-antimony systems in: K.A. Gschneidner, J.-C.G. Bunzli, V.K. Pecharsky (Eds.), Handbook on the Physics and Chemistry of Rare-Earths, 33, North-Holland, Amsterdam, 2003, pp. 35–146.
- [8] L. Zeng, H. Ning, *Isothermal cross-section of the Cu–Ho–Sb phase diagram at 500°C*, J. Alloys Compd. 359, 169 (2003); [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(03\)00199-3](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(03)00199-3).
- [9] L.O. Fedyna, A.O. Fedorchuk, V.M. Mykhalichko, Z.M. Zhpyrka, M.F. Fedyna, *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. 69, 7 (2017); <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2017.05.003>.
- [10] W. Kraus, G. Nolze, *POWDER CELL – a program for the representation and manipulation of crystal structures and calculation of the resulting X-ray powder patterns*, J. Appl. Crystallogr. 29, 301 (1996); <https://doi.org/10.1107/S0021889895014920>.
- [11] L. Akselrud, Yu. Grin, *WinCSD: software package for crystallographic calculations (Version 4)*. J. Appl. Crystallogr. 47, 803 (2014); <https://doi.org/10.1107/S1600576714001058>.
- [12] T. Roisnel, J. Rodriguez-Carvajal, *WinPLOTR: a Windows tool for powder diffraction patterns analysis*, Mater. Sci. Forum, 378–381, 118 (2001); <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.378-381.118>.
- [13] T.B. Massalski, Binary Alloy Phase Diagrams, ASM, Metals Park, Ohio (1990).
- [14] H Okamoto. Desk Handbook: Phase Diagrams for Binary Alloys, Materials Park (OH): ASM (2000).
- [15] Y.A. Mozharivskyy, H.F. Franzen, *High-temperature modification of  $Y_5Sb_3$  and its ternary analogue  $Y_5Ni_xSb_{3-x}$* , J. Alloys Compd. 319, 100 (2001); [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(00\)01463-8](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(00)01463-8).
- [16] O.L. Sologub, K. Hiebl, P. Rogl, H. Noel, O.I. Bodak, *On the crystal structure and magnetic properties of the ternary rare earth compounds  $RETSb_2$  with  $RE=$  rare earth and  $T= Ni, Pd, Cu$  and  $Au$* , J. Alloys Compd. 210, 153 (1994); [https://doi.org/10.1016/0925-8388\(94\)90131-7](https://doi.org/10.1016/0925-8388(94)90131-7).
- [17] O.L. Fedyna, O.I. Bodak, A.O. Fedorchuk, Y.O. Tokaychuk, M.F. Fedyna, *New ternary antimonides with  $Dy_3Cu_{20+x}Sb_{11-x}$ -type structure*, Abstr. 9<sup>th</sup> Int. Conf. Crystal Chem. Intermet. Compd. 90 (2005).
- [18] X.X. Yang, Y.M. Lu, S.K. Zhou, S.Y. Mao, J.X. Mi, Z.Y. Man, J.T. Zhao,  *$RCu_{1+x}Sb_2$  ( $R= La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho$  and  $Y$ ) phases with defect  $CaBe_2Ge_2$ -type structure*, Mater. Sci. Forum 475/479, 861 (2005); <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.475-479.861>.
- [19] T. Mishra, I. Schellenberg, M. Eul, R. Pöttgen, *Structure and properties of  $EuTSb$  ( $T=Cu, Pd, Ag, Pt, Au$ ) and  $YbIrSb$* , Z. Kristallogr. Cryst. Mater. 226, 590 (2011); <https://doi.org/10.1524/zkri.2011.1387>.
- [20] H. Flandorfer, K. Hiebl, C. Godart, P. Rogl, A. Saccone, R. Ferro, *The crystal structure and magnetic properties of  $YbMSb$ ,  $M=Cu, Ag, Au$* , J. Alloys Compd. 256, 170 (1997); [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(96\)03007-1](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(96)03007-1).

L. Romaka<sup>1</sup>, Yu. Stadnyk<sup>1</sup>, V.V. Romaka<sup>2</sup>, A. Zelinskiy<sup>1</sup>,  
P. Klyzub<sup>1</sup>, A. Horyn<sup>1</sup>

## Phase equilibrium diagram of Y-Cu-Sb system at 870 K

<sup>1</sup>Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine, [lyubov.romaka@gmail.com](mailto:lyubov.romaka@gmail.com)

<sup>2</sup>Institute for Solid State Research, IFW-Dresden, Dresden, Germany, [vromaka@gmail.com](mailto:vromaka@gmail.com)

The interaction of the components in the Y-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 870 K. At the temperature of investigation Y-Cu-Sb system is characterized by the formation of three ternary compounds:  $Y_3Cu_{22}Sb_9$  ( $Dy_3Cu_{20+x}Sb_{11-x}$  structure type, space group  $F-43m$ ,  $a = 1.6614(3)$  nm),  $Y_3Cu_3Sb_4$  ( $Y_3Au_3Sb_4$  structure type, space group  $I-43d$ ,  $a = 0.95357(5)$  nm),  $YCuSb_2$  ( $HfCuSi_2$  structure type, space group  $P4/nmm$ ,  $a = 0.42580(1)$ ,  $c = 0.98932(3)$  nm). The solubility of copper in the binary compound YSb (NaCl structure type) extends up to 8 at. %.

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