

УДК 546.682+548.734+669.18

## СИСТЕМИ $\text{LaNiIn}_{1-x}\text{M}_x$ ( $M = \text{Al}, \text{Ge}$ )

Н. Заремба, Ю. Щепілов, Г. Ничипорук, І. Муць, В. Павлюк, В. Заремба

*Львівський національний університет імені Івана Франка,  
вул. Кирила і Мефодія, 6, 79005 Львів, Україна  
e-mail: halyna.nychyporuk@lnu.edu.ua*

Взаємодію компонентів у системах  $\text{LaNiIn}_{1-x}\text{M}_x$  ( $M = \text{Al}, \text{Ge}$ ) вивчено методами рентгеноструктурного, рентгенівського фазового та, частково, локального рентгеноспектрального аналізів при 870 К у повному концентраційному інтервалі. Визначено обмежену розчинність на основі вихідних сполук еквіатомного складу, визначено межі твердих розчинів й уточнено параметри елементарних комірок для них.

Виявлено існування нової тернарної сполуки еквіатомного складу  $\text{LaNiGe}$  (структурний тип  $\text{LaPtSi}$ , просторова група  $I4_1md$ ,  $a=0,42068(2)$ ,  $c=1,43971(10)$  нм).

Обговорено особливості взаємодії компонентів у досліджених системах.

*Ключові слова:* Індій, твердий розчин, метод порошку, кристалічна структура.

DOI: <https://doi.org/10.30970/vch.6101.044>

### 1. Вступ

Сполуки еквіатомного складу утворюються у переважній більшості систем  $\text{PZM-Ni-X}$  ( $X$  –  $p$ -елемент III–V групи) і володіють цікавими магнітними та транспортними властивостями в широкому інтервалі температур [1]. Кристалічні структури таких сполук з індієм та більшістю з алюмінієм належать до гексагонального типу  $\text{ZrNiAl}$  [2–4], тоді як сполука  $\text{LaNiAl}$  кристалізується у власному структурному типі [5].

Згідно з літературними даними [6, 7] у системі  $\text{La-Ni-Ge}$  існування сполуки еквіатомного складу не визначено, проте існує фаза змінного складу  $\text{La}(\text{Ni},\text{Ge})_2$  зі структурою типу  $\text{AlB}_2$  [8], для якої проводили дослідження фізичних властивостей, і визначено перехід у надпровідний стан при  $T_C = 0,394$  К [9, 10].

Мета нашої праці – дослідження взаємодії компонентів у системах  $\text{LaNiIn}_{1-x}\text{Al}_x$  та  $\text{LaNiIn}_{1-x}\text{Ge}_x$  при 870 К у повному концентраційному інтервалі на предмет взаємного заміщення  $p$ -елементів та вплив такого заміщення на структурні характеристики цих систем.

### 2. Матеріали та методика експерменту

Синтез зразків проведено сплавленням шихти із металів високої чистоти (усі близько 0,998 масової частки основного компонента) в електродуговій печі в атмосфері очищеного аргону. Поверхню лантану механічним способом очищали від оксидів безпосередньо перед зважуванням. Однорідності сплавів досягали кількарразовим переплавленням з подальшим гомогенізуючим відпалом у вакуумованих

кварцових ампулах в електричній муфельній печі СНОЛ з автоматичним регулюванням температури  $\pm 2$  К протягом місяця за температури 870 К. Сплави загартовували у холодній воді без попереднього розбивання ампул. Зразки, як литі, так і відпалені, стійкі до дії атмосферного середовища протягом тривалого часу.

Масиви дифракційних даних отримано з використанням порошкових дифрактометрів ДРОН–2.0М (Fe  $K\alpha$ -випромінювання), PANalytical X'Pert Pro, (Cu  $K\alpha$ -випромінювання) та Stoe Stadi P (Cu  $K\alpha_1$ -випромінювання). Поверхні мікрошліфів окремих сплавів досліджували на скануючому електронному мікроскопі РЕММА–102–02 у міжфакультетській лабораторії низькотемпературних досліджень Львівського національного університету імені Івана Франка. Фазовий аналіз та структурні розрахунки виконано з використанням програм Powder Cell [11], STOE WinXPOW [12] та FullProf [13].

### 3. Результати досліджень та їх обговорення

У результаті фазового аналізу зразків системи  $\text{LaNiIn}_{1-x}\text{Al}_x$  у повному концентраційному інтервалі при 870 К визначено існування двох обмежених твердих розчинів заміщення на основі вихідних сполук:  $\text{LaNiIn}_{1,0-0,8}\text{Al}_{0,0-2}$  (СТ  $\text{ZrNiAl}$ ; ПГ  $P-62m$ ;  $a = 0,7613\text{--}0,7556(1)$ ;  $c = 0,4035\text{--}0,4054(1)$  нм) та  $\text{LaNiAl}_{1,0-0,6}\text{In}_{0,4}$  (СТ  $\text{LaNiAl}$ ; ПГ  $Pnma$ ;  $a = 0,7199\text{--}0,7254(2)$ ;  $b = 0,4203\text{--}0,4214(1)$ ;  $c = 1,6085\text{--}1,6186(4)$  нм). Зразки системи є мультифазовими, у рівновазі з вихідними фазами у всій області концентрацій існує фаза зі структурою типу  $\text{Nd}_{11}\text{Pd}_4\text{In}_9$  [14], а в окремих зразках з високим вмістом алюмінію – фаза  $\text{La}(\text{Ni},\text{Al})_5$  зі структурою типу  $\text{CaCu}_5$  [15]. На рис. 1. зображено дифрактограми, а на рис. 2 – фотографії поверхонь мікрошліфів окремих зразків системи  $\text{LaNiIn}_{1-x}\text{Al}_x$ .

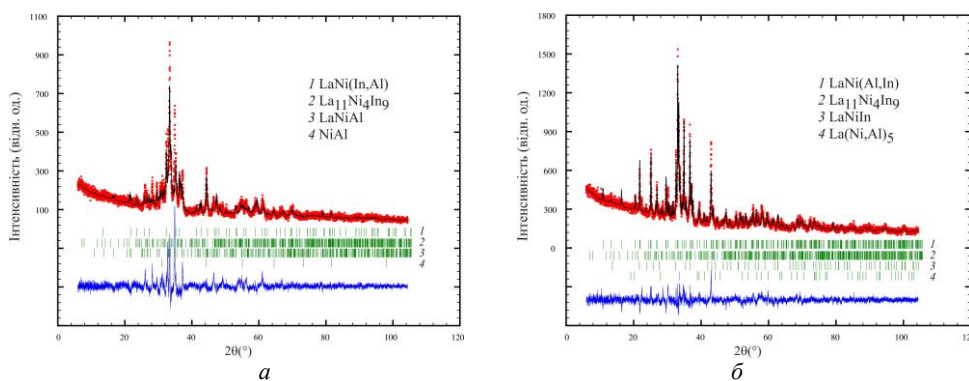


Рис. 1. Експериментальна (точки), розрахована (суцільна лінія) та різницева (знизу) дифрактограми зразків: *a* –  $\text{LaNiIn}_{0,7}\text{Al}_{0,3}$ ; *b* –  $\text{LaNiIn}_{0,3}\text{Al}_{0,7}$  (дифрактометр STOE Stadi P, Cu  $K\alpha_1$ -випромінювання)

Fig. 1. Experimental (circles), calculated (continuous line), and difference (bottom) X-ray patterns of the *a* –  $\text{LaNiIn}_{0,7}\text{Al}_{0,3}$ ; *b* –  $\text{LaNiIn}_{0,3}\text{Al}_{0,7}$  (Stoe Stadi P, Cu  $K\alpha_1$ -radiation) alloys

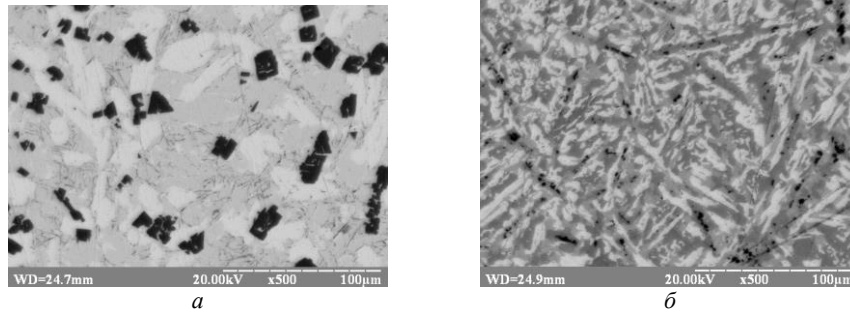


Рис. 2. Фотографії поверхонь мікрошліфів сплавів системи  $\text{LaNiIn}_{1-x}\text{Al}_x$ : *a* –  $\text{LaNiIn}_{0.7}\text{Al}_{0.3}$  (сіра фаза –  $\text{La}_{0.32}\text{Ni}_{0.35}\text{In}_{0.29}\text{Al}_{0.04}$ ; світла фаза –  $\text{La}_{0.45}\text{Ni}_{0.19}\text{In}_{0.36}$ ; темна фаза –  $\text{Ni}_{0.55}\text{Al}_{0.45}$ ); *b* –  $\text{LaNiIn}_{0.4}\text{Al}_{0.6}$  (сіра фаза –  $\text{La}_{0.32}\text{Ni}_{0.34}\text{In}_{0.05}\text{Al}_{0.28}$ ; світла фаза –  $\text{La}_{0.43}\text{Ni}_{0.20}\text{In}_{0.33}\text{Al}_{0.03}$ ; темна фаза –  $\text{La}_{0.23}\text{Ni}_{0.33}\text{In}_{0.04}\text{Al}_{0.39}$ )

Fig. 2. Electron microphotographs of the  $\text{LaNiIn}_{1-x}\text{Al}_x$  system alloys: *a* –  $\text{LaNiIn}_{0.7}\text{Al}_{0.3}$  (gray phase –  $\text{La}_{0.32}\text{Ni}_{0.35}\text{In}_{0.29}\text{Al}_{0.04}$ ; light phase –  $\text{La}_{0.45}\text{Ni}_{0.19}\text{In}_{0.36}$ ; dark phase –  $\text{Ni}_{0.55}\text{Al}_{0.45}$ ); *b* –  $\text{LaNiIn}_{0.4}\text{Al}_{0.6}$  (grey phase –  $\text{La}_{0.32}\text{Ni}_{0.34}\text{In}_{0.05}\text{Al}_{0.28}$ ; light phase –  $\text{La}_{0.43}\text{Ni}_{0.20}\text{In}_{0.33}\text{Al}_{0.03}$ ; dark phase –  $\text{La}_{0.23}\text{Ni}_{0.33}\text{In}_{0.04}\text{Al}_{0.39}$ )

У системі  $\text{LaNiIn}_{1-x}\text{Ge}_x$  при 870 К визначено незначну розчинність Ge у сполуці  $\text{LaNiIn}$  з утворенням обмеженого твердого розчину заміщення складу  $\text{LaNiIn}_{1.0-0.8}\text{Ge}_{0.0-0.2}$  (СТ  $\text{ZrNiAl}$ , ПГ  $P-62m$ ,  $a = 0,7613-0,75828(7)$ ,  $c = 0,4035-0,40662(4)$  нм). Незначна кількість In (до 6 ат. %) розчиняється у сполуці  $\text{LaNiGe}$  (СТ  $\text{LaPtSi}$ , ПГ  $I4_1md$ ), існування якої визначено вперше. Твердий розчин заміщення існує при складі  $\text{LaNiGe}_{1.0-0.8}\text{In}_{0.0-0.2}$  з такими параметрами елементарної комірки:  $a = 0,42068(2)-0,42079(3)$ ,  $c = 1,43693(7)-1,43720(6)$  нм. На рис. 3 і 4 зображено дифрактограми та фотографії поверхонь мікрошліфів окремих зразків системи  $\text{LaNiIn}_{1-x}\text{Ge}_x$ , відповідно.

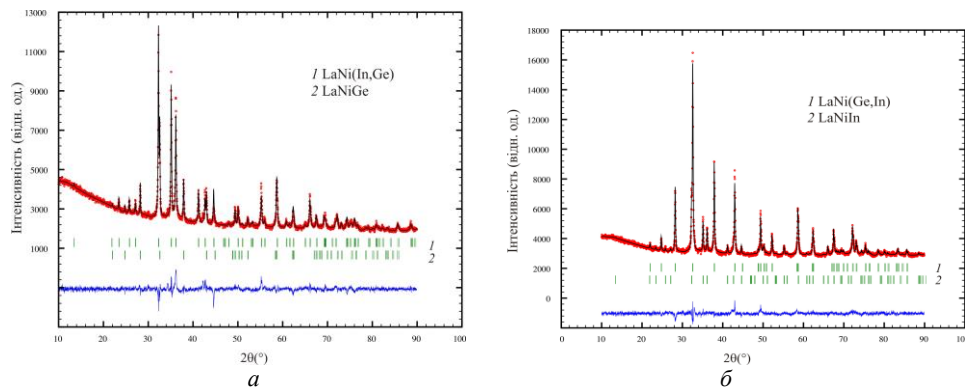


Рис. 3. Експериментальна (точки), розрахована (суцільна лінія) та різницева (знизу) дифрактограми зразків: *a* –  $\text{LaNiIn}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ ; *b* –  $\text{LaNiIn}_{0.2}\text{Ge}_{0.8}$  (дифрактометр PANalytical X'Pert Pro,  $\text{Cu K}\alpha$ -випромінювання)

Fig. 3. Experimental (circles), calculated (continuous line) and difference (bottom) X-ray patterns of the alloys: *a* –  $\text{LaNiIn}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ ; *b* –  $\text{LaNiIn}_{0.2}\text{Ge}_{0.8}$  (PANalytical X'Pert Pro,  $\text{Cu K}\alpha$ -radiation)

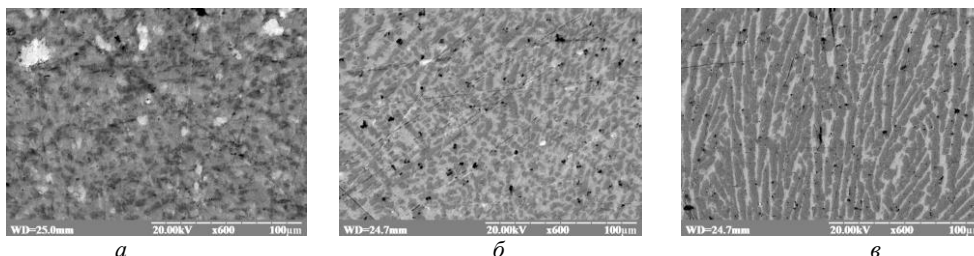


Рис. 4. Фотографії поверхонь мікрошліфів сплавів системи  $\text{LaNiIn}_{1-x}\text{Ge}_x$ : *a* –  $\text{LaNiIn}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$  (сіра фаза –  $\text{La}_{0.30}\text{Ni}_{0.36}\text{In}_{0.31}\text{Ge}_{0.03}$ ; темна фаза –  $\text{La}_{0.29}\text{Ni}_{0.34}\text{In}_{0.02}\text{Ge}_{0.35}$ ); *b* –  $\text{LaNiIn}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$  (сіра фаза –  $\text{La}_{0.31}\text{Ni}_{0.35}\text{In}_{0.31}\text{Ge}_{0.02}$ ; темна фаза –  $\text{La}_{0.28}\text{Ni}_{0.35}\text{In}_{0.01}\text{Ge}_{0.35}$ ); *c* –  $\text{LaNiIn}_{0.3}\text{Ge}_{0.7}$  (сіра фаза –  $\text{La}_{0.31}\text{Ni}_{0.36}\text{In}_{0.30}\text{Ge}_{0.04}$ ; темна фаза –  $\text{La}_{0.29}\text{Ni}_{0.34}\text{In}_{0.01}\text{Ge}_{0.36}$ )

Fig. 4. Electron microphotographs of the  $\text{LaNiIn}_{1-x}\text{Ge}_x$  system alloys: *a* –  $\text{LaNiIn}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$  (gray phase –  $\text{La}_{0.30}\text{Ni}_{0.36}\text{In}_{0.31}\text{Ge}_{0.03}$ ; dark phase –  $\text{La}_{0.29}\text{Ni}_{0.34}\text{In}_{0.02}\text{Ge}_{0.35}$ ); *b* –  $\text{LaNiIn}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$  (gray phase –  $\text{La}_{0.31}\text{Ni}_{0.35}\text{In}_{0.31}\text{Ge}_{0.02}$ ; dark phase –  $\text{La}_{0.28}\text{Ni}_{0.35}\text{In}_{0.01}\text{Ge}_{0.35}$ ); *c* –  $\text{LaNiIn}_{0.3}\text{Ge}_{0.7}$  (gray phase –  $\text{La}_{0.31}\text{Ni}_{0.36}\text{In}_{0.30}\text{Ge}_{0.04}$ ; dark phase –  $\text{La}_{0.29}\text{Ni}_{0.34}\text{In}_{0.01}\text{Ge}_{0.36}$ )

Кристалічну структуру сполуки  $\text{LaNiGe}$  досліджено методом порошку (рис. 5) й уточнено в рамках моделі структурного типу  $\text{LaPtSi}$  [16] (просторова група  $I4_1md$ ,  $a = 0,42068(2)$ ,  $c = 1,43971(10)$  нм,  $R_p = 0,0183$ ,  $R_{wp} = 0,0245$ ,  $R_{Bragg} = 0,0162$ ). Детальний опис синтезу монокристалів і структурних досліджень цієї сполуки, а також її фізичних властивостей є предметом окремої публікації.

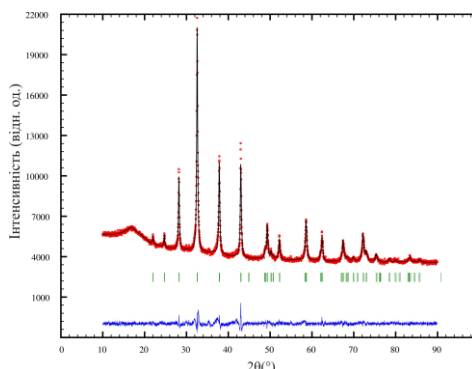


Рис. 5. Експериментальна (точки), розрахована (суцільна лінія) та різницева (знизу) дифрактограми сполуки  $\text{LaNiGe}$

(дифрактометр PANalytical X'Pert Pro,  $\text{Cu K}\alpha$ -випромінювання)

Fig. 5. Experimental (circles), calculated (continuous line) and difference (bottom) X-ray patterns of the  $\text{LaNiGe}$  compound (PANalytical X'Pert Pro,  $\text{Cu K}\alpha$ -radiation)

З огляду на подібність електронної будови атомів індію й алюмінію та відмінність структур вихідних сполук, у системі  $\text{LaNiIn}_{1-x}\text{Al}_x$  утворюються два обмежені тверді розчини, зміна параметрів елементарної комірки яких добре корелює з розмірами атомів In ( $r_{\text{In}} = 0,163$  нм) і Al ( $r_{\text{Al}} = 0,143$  нм) [17]. Зі збільшенням концентрації алюмінію в межах твердого розчину зі структурою типу  $\text{ZrNiAl}$  простежується зменшення періоду  $a$  й незначне зростання періоду  $c$  та зі зменшенням вмісту алюмінію в межах твердого розчину зі структурою типу  $\text{LaNiAl}$  усі параметри комірки зростають (рис. 6, *a*).

Утворення обмежених твердих розчинів незначної протяжності у системі  $\text{LaNiIn}_{1-x}\text{Ge}_x$ , як і в системі  $\text{LaNiIn}_{1-x}\text{Al}_x$ , було прогнозованим, оскільки структурний (атоми індію і германію мають різну електронну будову) і розмірний фактор ( $r_{\text{In}} = 0,166$  нм;  $r_{\text{Ge}} = 0,137$  нм) [17] атомів поряд з різними структурами вихідних сполук вагомо впливають на протяжність твердих розчинів заміщення (рис. 6, б).

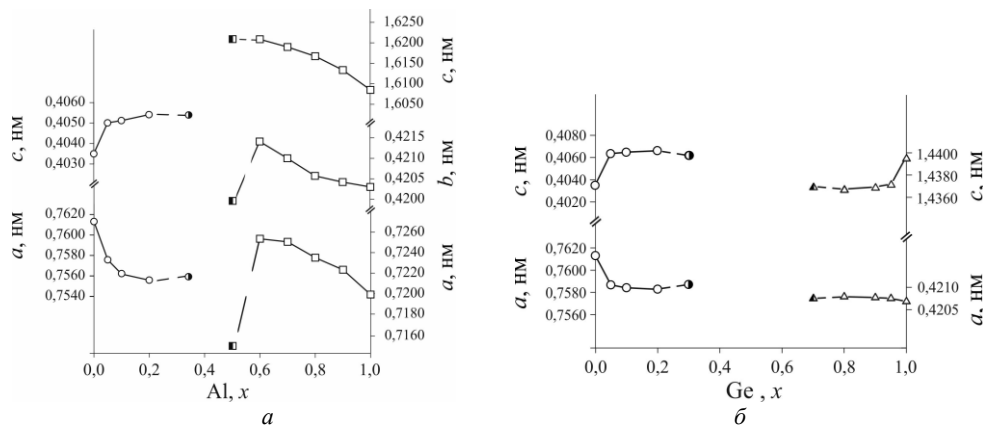


Рис. 6. Зміна параметрів елементарної комірки твердих розчинів систем:

$a$  –  $\text{LaNiIn}_{1-x}\text{Al}_x$ ;  $b$  –  $\text{LaNiIn}_{1-x}\text{Ge}_x$  (○ – ЦТ ZrNiAl; □ – ЦТ LaNiAl; Δ – ЦТ LaPtSi)

Fig. 6. Variation of the unit cell parameters of the solid solutions in the systems:  $a$  –  $\text{LaNiIn}_{1-x}\text{Al}_x$ ;  $b$  –  $\text{LaNiIn}_{1-x}\text{Ge}_x$  (○ – ZrNiAl-type structure; □ – LaNiAl-type structure; Δ – LaPtSi-type structure)

Під час взаємного заміщення атомів  $p$ -елементів у системах  $\text{CeNiAl}_{1-x}\text{Ga}_x$  [18],  $\text{CeNiIn}_{1-x}\text{M}_x$  ( $M = \text{Al}, \text{Ga}$ ) [19],  $\text{RNiIn}_{1-x}\text{Al}_x$  ( $R = \text{Y}, \text{Gd}, \text{Tb}$ ) [20–22] і  $\text{YCuIn}_{1-x}\text{Al}_x$  [23] простежується утворення неперервних рядів твердих розчинів зі структурою типу ZrNiAl та з подібним характером зміни параметрів елементарної комірки. У системах  $\text{RNiIn}_{1-x}\text{Ga}_x$  ( $R = \text{Y}, \text{Gd}$ ) [20, 21],  $\text{YCuIn}_{1-x}\text{Ga}_x$  [23] і  $\text{CeNiIn}_{1-x}\text{M}_x$  ( $M = \text{Ge}, \text{Sb}$ ) [24] простежується обмежена розчинність на основі сполук еквіатомного складу  $\text{RNiIn}$ ,  $\text{RNiGa}$  ( $R = \text{Y}, \text{Gd}$ ) і  $\text{RNiSb}$  ( $R = \text{Y}, \text{Ce}$ ) з різним типом кристалічної структури. Варто зазначити, що параметри елементарних комірок твердих розчинів зі структурою типу ZrNiAl у системах  $\text{CeNiAl}_{1-x}\text{Ga}_x$ ,  $\text{CeNiIn}_{1-x}\text{M}_x$  ( $M = \text{Al}, \text{Ga}$ ),  $\text{GdCuIn}_{1-x}\text{Al}_x$  і  $\text{YCuIn}_{1-x}\text{Al}_x$  змінюються із незначним відхиленням від правила Вегадра, тоді як під час заміщення індію галієм або стибієм простежується практично лінійна зміна параметрів.

#### 4. Висновки

Методами рентгенівського фазового та, частково, EDX аналізів вивчено взаємодію компонентів у системах  $\text{LaNiIn}_{1-x}\text{Al}_x$  та  $\text{LaNiIn}_{1-x}\text{Ge}_x$  при 870 K у повному концентраційному інтервалі.

За температури дослідження в кожній системі визначено часткову розчинність четвертого компонента у вихідних сполуках з утворенням обмежених твердих розчинів, визначено їхні межі та уточнено параметри елементарних комірок.

Уперше виявлено існування нової сполуки еквіатомного складу  $\text{LaNiGe}$  зі структурою типу LaPtSi.

## 5. Подяка

Автори вдячні працівнику університету **Сергію Роману Ярославовичу**, старшому науковому співробітнику Міжфакультетської лабораторії низькотемпературних досліджень ЛНУ ім. І. Франка за допомогу у дослідженні мікрошліфів окремих сплавів.

1. *Gupta S., Suresh K. G.* Review on magnetic and related properties of *RTX* compounds // *J. Alloys Compd.* 2015. Vol. 618. P. 562–606.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.08.079>
2. *Ferro R., Marazza R., Rambaldi G.* Equiatomic Ternary Phases in the Alloys of the Rare Earths with Indium and Nickel or Palladium // *Z. Metallkd.* 1974. Vol. 65. P. 37–39.
3. *Kalychak Ya. M., Zarembo V. I., Pöttgen R., Lukachuk M., Hoffmann R.-D.* Rare Earth–Transition Metal–Indides // In: K. A. Gschneidner, Jr., J.-C. Bünzli, V. K. Pecharsky (Eds.). Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths. Elsevier, Amsterdam. 2005. Vol. 34. P. 1–133.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1273\(04\)34001-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1273(04)34001-8)
4. *Oesterreicher H.* Structural and magnetic studies on rare-earth compounds *RNiAl* and *RCuAl* // *J. Less-Common Met.* 1973. Vol. 30. P. 225–236.
5. *Cordier G., Dörsam G., Knip R.* New intermediate phases in the ternary systems rare earth–transition element–aluminium // *J. Magn. Magn. Mater.* 1988. Vol. 76, 77. P. 653–654.
6. *Salamakha P., Sologub O. L., Bodak O. I.* Ternary rare-earth-germanium systems // In: K. A. Gschneidner, Jr., J.-C. Bünzli, V. K. Pecharsky (Eds.). Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths. Elsevier, Amsterdam. 1999. Vol. 27. P. 1–223.
7. *Zhuang Y., Hu Z., Liu J., Lü J., Yan J.* The 523 K isothermal section of La–Ni–Ge ternary system phase diagram // *J. Alloys and Compd.* 2005. Vol. 387. P. 239–242.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.06.065>
8. *Gladyshevskii E. I., Bodak O. I.* Compounds with structures of the  $AlB_2$  type in the system Ce–Ni–Si and in related systems // *Dopov. Akad. Nauk Ukr. RSR.* 1965. No. 5. P. 601–604 (in Ukrainian).
9. *Chen J. W., Guan S. Y., Wang C. H.* Electrical and magnetic properties of the Ni based ternary compounds  $R_2NiGe_3$  ( $R$  = rare earth ions) // *J. Phys. Conf. Ser.* 2011. Vol. 266. P. 012006(5). DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/266/1/012006>
10. *Chen J. W., Guan S. Y., Wang C. H., Ho S. P.* Superconductivity of the Ni-based ternary compounds with  $AlB_2$ -type structure  $Y_2NiGe_3$  and  $La_2NiGe_3$  // *Physica C* (Amsterdam). 2012. Vol. 477. P. 63–65.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2012.02.028>
11. *Kraus W., Nolze G.* Powder Cell for Windows. Berlin, 1999.
12. STOE WinXPOW, Version 1.2, STOE & CIE GmbH. Darmstadt, 2001.
13. *Rodríguez-Carvajal J.* Recent Developments of the Program FULLPROF // Commission on Powder Diffraction (IUCr). Newsletter. 2001. Vol. 26. P. 12–19.
14. *Pustovoychenko M., Tyvanchuk Yu., Hayduk I., Kalychak Ya.* Crystal structure of the  $RE_{11}Ni_4In_9$  compounds ( $RE$  = La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb and Y) // *Intermetallics.* 2010. Vol. 18. P. 929–932. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2010.01.003>

15. Liao J., Wang H., Chen T.-Yu Experimental investigation and thermodynamic calculation of Ni–Al–La ternary system in Nickel-rich region: a new intermetallic compound Ni<sub>2</sub>AlLa // *Materials* (Basel). 2018. Vol. 11(12). P. 2396(15). DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11122396>
16. Klepp K., Parthé E. RPtSi phases (R = La, Ce, Pr, Nd, Sm and Gd) with an ordered ThSi<sub>2</sub> derivative structure // *Acta Cryst. B*. 1982. Vol. B38. P. 1105–1108.
17. Emsley J. *The Elements*: 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1991. 251 p.
18. Grin Yu. N., Hiebl K., Rogl P. Valence behavior of cerium in ternary gallides // *J. Less-Comm. Met.* 1985. Vol. 110. P. 299–305.
19. Zaremba N., Nychporuk G., Schepilov Yu., Panakhyd O., Muts I., Hlukhyy V., Pavlyuk V. The CeNiIn<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub> (M = Al, Ga) systems at 873 K // *Ukr. Chem. Journ.* 2018. Vol. 84, No. 12. P. 76–84 (in Ukrainian).
20. Horiacha M., Savchuk I., Nychporuk G., Serkiz R., Zaremba V. *The Chemistry*. 2018. Is. 59. Pt. 1. P. 67–75 (in Ukrainian). DOI: <https://doi.org/10.30970/vch.5901.067>
21. Horiacha M., Zinko L., Nychporuk G., Serkiz R., Zaremba V. The GdTIn<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub> (T = Ni, Cu; M = Al, Ga; 0 < x < 1) systems // *Visnyk of the Lviv University. Series Chemistry*. 2017. Is. 58. Pt. 1. P. 77–85 (in Ukrainian).
22. Klicpera M., Javorský P., Daniš S. The change of anisotropy in TbNi (Al, In) compounds studied by low temperature x-ray diffraction // *J. Phys. Conf. Ser.* 2011. Vol. 303. P. 012031(6). DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/303/1/012031>
23. Horiacha M., Rinylo N., Nychporuk G., Serkiz R., Pöttgen R., Zaremba V. The interaction of the components in YCuIn<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub> (M = Al, Ga) systems // *Ukr. Chem. Journ.* 2018. Vol. 84, No. 11. P. 31–37 (in Ukrainian).
24. Zaremba N., Nychporuk G., Schepilov Yu., Serkiz R., Hlukhyy V., Pavlyuk V. The interaction of the components in the CeNiIn<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub> (M = Ge, Sb) systems // *Visnyk of the Lviv University. Series Chemistry*. 2019. Is. 60. Pt. 1. P. 82–90 (in Ukrainian). DOI: <https://doi.org/10.30970/vch.6001.082>

### THE LaNiIn<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub> (M = Al, Ge) SYSTEMS

N. Zaremba, Yu. Schepilov, G. Nychporuk, I. Muts, V. Pavlyuk, V. Zaremba

*Ivan Franko National University of Lviv,  
Kyryla i Mefodiya Str., 6, 79005 Lviv, Ukraine  
e-mail: halyna.nychporuk@lnu.edu.ua*

Interaction of the components in LaNiIn<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub> (M = Al, Ge) systems at 870 K was investigated by means of X-ray phase and partially EDX analysis in full concentration range. The samples for the investigation were synthesized by arc-melting of purity metals with subsequent annealing at 873 K for a month. Phase analysis was carried out by X-ray powder diffraction (DRON-2.0M, Fe K $\alpha$ -radiation, PANalytical X'Pert Pro, Cu K $\alpha$ -radiation and Stoe Stadi P, Cu K $\alpha$ -radiation) and EDX analysis (REMMA-102-02).

The solubility of Indium, Germanium and Aluminum in the ternary equiatomic compounds determined. The existence of two limited solid solutions in the system with Aluminum:  $\text{LaNiIn}_{1.0-0.8}\text{Al}_{0.2}$  (ZrNiAl-type structure, space group  $P-62m$ ,  $a = 0.7613-0.7556(1)$ ,  $c = 0.4035-0.4054(1)$  nm) and  $\text{LaNiAl}_{1.0-0.6}\text{In}_{0.4}$  (LaNiAl structure type, space group  $Pnma$ ,  $a = 0.7199-0.7254(2)$ ,  $b = 0.4203-0.4214(1)$ ,  $c = 1.6085-1.6186(4)$ ) were observed. Two limited solid solutions are formed in the system with Germanium:  $\text{LaNiIn}_{1.0-0.8}\text{Ge}_{0.2}$  (ZrNiAl-type structure, space group  $P-62m$ ,  $a = 0.42075(2)-0.75828(7)$ ,  $c = 0.4035-0.40662(4)$  nm) and  $\text{LaNiGe}_{1.0-0.8}\text{In}_{0.2}$  (LaPtSi-type structure, space group  $I4_1md$ ,  $a = 0.42068(2)-0.42079(3)$ ,  $c = 1.43693(7)-1.43720(6)$  nm).

The existence of a new ternary compound  $\text{LaNiGe}$  was established for the first time and its crystal structure was determined using X-ray powder diffraction: LaPtSi-type structure (space group  $I4_1md$ ,  $a = 0.42068(2)$ ,  $c = 1.43971(10)$  nm,  $R_p = 0.0183$ ,  $R_{wp} = 0.0245$ ,  $R_{Bragg} = 0.0162$ ).

The formation of solid solutions and the character of the unit cell parameters variation in the studied and related systems briefly discussed.

*Keywords:* indium, solid solution, powder data, crystal structure.

Стаття надійшла до редколегії 31.10.2019

Прийнята до друку 14.01.2020