

УДК 546:548

В.М. Михалічко ^а, Л.О. Федина ^б, А.О. Федорчук ^в, М.Ф. Федина ^гКРИСТАЛІЧНА СТРУКТУРА НОВОГО ТЕРНАРНОГО СИЛІЦИДУ ErRe_2Si_4 ^а Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна^б Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів, Україна^в Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, Львів, Україна^г Національний лісотехнічний університет України, Львів, Україна

Рентгенівським дифракційним методом порошку вивчено кристалічну структуру нової тернарної сполуки ErRe_2Si_4 (дифрактометр STOE Stadi P, CuK_α -випромінювання, власний структурний тип (СТ), символ Пірсона (СП) $mS28$, просторова група (ПГ) $C2/c$, $a=7,82062(8)$, $b=8,10405(9)$, $c=7,72107(8)$ Å, $\beta=117,0952(10)^\circ$, $R_w=0,0951$, $R_p=0,0719$, $\chi^2=3,19$). Досліджена структура ErRe_2Si_4 є новим структурним типом інтерметалічних сполук, похідним від структури типу AlB_2 : положення $1a$ просторової групи $P6/mmm$, зайняте атомами Al, відповідає положенню $4d$ групи $C2/c$, яке займають атоми Er, а положення $2d$ атомів B – двом положенням $4e$, зайнятим атомами Si. Два додаткові положення $8f$ в ErRe_2Si_4 займають атоми Re і Si, відповідно. Кристалічна структура сполуки ErRe_2Si_4 побудована з ланцюгів із атомів Re та Si, які утворюють каркас, у пустотах якого розташовані атоми Er. За найближчим координаційним оточенням атомів Er структура знайденої тернарної сполуки близькоспоріднена зі структурами бінарних силіцидів $\text{Er}_3\text{Si}_{4,7}$ ($oS16$, $Amm2$) та $\text{ErSi}_{1,67}$ ($hP3$, $P6/mmm$).

Ключові слова: рідкісноземельний метал, ербій, реній, кремній, тернарна сполука, кристалічна структура, структурний тип.

DOI: 10.32434/0321-4095-2025-160-3-28-35

Вступ

Тернарні системи, що містять тугоплавкі метали, вивчали систематично досить рідко через складнощі у синтезі зразків, що характеризуються високими температурами плавлення та високою вартістю компонентів. Інтерметаліди з таких компонентів вирізняються пластичністю, твердістю сплавів, стійкістю до агресивних середовищ, мають високі показники електроопору та жароміцності та каталітичну активність, тому їх вивчали на предмет утворення сполук відомих структурних типів. Так, з ренієм і рідкісноземельними металами ітрієвої підгрупи і кремнієм сис-

тематично досліджено тільки систему з Y при 1070 K, в якій при температурі дослідження існують дві тернарні сполуки: YRe_4Si_2 зі структурою типу ZrFe_4Si_2 та $\text{Y}_2\text{Re}_3\text{Si}_5$ (структурний тип (СТ) $\text{U}_2\text{Mn}_3\text{Si}_5$). В інших системах встановили утворення тернарних силіцидів цих же структурних типів: ZrFe_4Si_2 з Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu та $\text{U}_2\text{Mn}_3\text{Si}_5$ – з Gd, Tb, Dy, Ho, Er, і Tm [1].

При систематичному дослідженні системи Er–Re–Si при 1070 K нами знайдена нова тернарна сполука ErRe_2Si_4 , визначенню кристалічної структури якої присвячена ця стаття.

© В.М. Михалічко, Л.О. Федина, А.О. Федорчук, М.Ф. Федина, 2025



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

V.M. Mykhalichko, L.O. Fedyna, A.O. Fedorchuk, M.F. Fedyna

Методика експериментальних досліджень

Синтез зразків масою 1 г здійснювали в два етапи:

1) спіканням спресованих у таблетки порошків металів високої чистоти у вакуумованих ампулах при температурі 1073 К (48 год) та 1373 К (10 год) (усі компоненти подрібнювали до порошку (Re і Si) або стружки (Er), користуючись у першому випадку агатовою ступкою, а в другому – надфелями з берилієвої бронзи; зважену з точністю до 0,001 г шихту ретельно перемішували і пресували в сталевій прес-формі за кімнатної температури і тиску $\sim 1,2$ ГПа за допомогою гідравлічного преса П-10 з електричним приводом);

2) електродуговою плавкою спечених у таблетки компонентів в атмосфері аргону на мідному водоохолоджуваному поді. Гетером слугував губчастий титан. Для усунення мікронапружень натерті у порошок зразки для рентгенівської дифракції відпалювали у вакуумованих кварцових ампулах при 473 К впродовж 2 год.

Для наважок використовували метали високої чистоти: ербій (99,83 мас.% Er), реній (99,99 мас.% Re) та кремній (99,99 мас.% Si). Склад сплавів контролювали порівнянням маси шихти та виготовлених зразків. Сплави гомогенізували при 1070 К протягом 750 год у вакуумованих кварцових ампулах у муфельних електропечах VULCAN A-550 з автоматичним регулюванням температури з точністю $\pm 5^\circ\text{C}$. Температуру відпалу вибирали згідно з температурними даними для відомих тернарних сполук та, враховуючи діаграми стану для подвійних систем Er–Re, Er–Si та Re–Si, а також температуру гомогенізації зразків у раніше дослідженій системі Y–Re–Si. Зразки після відпалу гартували у холодній воді, не розбиваючи ампул.

Рентгенівський фазовий аналіз виконували за дифрактограмами порошку, отриманими на дифрактометрі ДРОН-2М (FeK_α -випромінювання, $20^\circ \leq 2\theta \leq 90^\circ$, крок сканування $0,05^\circ$, час сканування в точці 10 с). Порошкові дані для уточнення структурних параметрів отримали на автоматичному порошковому дифрактометрі STOE Stadi P, CuK_α -випромінювання в інтервалі $8\text{--}120^\circ 2\theta$ з кроком сканування $0,02^\circ \theta/2\theta$ та експозицією в точці 11 с.

Профільні і структурні параметри уточнювали методом Рітвельда: порівнянням теоретично розрахованих профілів дифрактограм з експериментальними. Усі розрахунки виконували з використанням комплексу програм FullProf Suite [2].

Результати досліджень

Було рентгенографічно досліджено десять сплавів у частині системи з приблизним вмістом ербію 20–30 ат.% та ренію – більше 30 ат.%. Одержати однофазний зразок не вдалося, тому для повного вивчення кристалічної структури використано масив дифракційних даних двофазного сплаву складу $\text{Er}_{20}\text{Re}_{20}\text{Si}_{60}$. Тернарний силіцид ErRe_2Si_4 нами одержано вперше. Другою фазою у зразку виявився бінарний силіцид Ербію $\text{ErSi}_{1,67}$ (СТ AlB_2 , ПГ $P6/mmm$, СП $hP3$, $a=3,80047(7)$ Å, $c=4,08988(11)$ Å, $R_B=0,0289$, $R_p=0,0719$).

Експериментальні умови одержання масивів дифракційних даних та результати уточнення структури сполуки ErRe_2Si_4 наведено в табл. 1 та на рис. 1, а координати та ізотропні параметри колювання атомів – у табл. 2, міжатомні віддалі та координаційні числа атомів – у табл. 3. Скорочення міжатомних віддалей знаходяться у межах, що допустимі для інтерметалічних сполук. Найбільше скорочення спостерігається між атомами кремнію та ренію (Si3--Re 3,54%, Si2--Re 3,31%, Si2--Re 3,31%), кремнію та ербію (Si2--Er 2,90%), що може свідчити про часткову локалізацію електронної густини та частку ковалентного зв'язку.

Координаційними многогранниками атомів Er є деформовані пентагональні антипризми з шістьма додатковими атомами (двома Re і чотирма Si), атомів Re – тетрагональні призми з чотирма додатковими атомами (двома Er і двома Si), атомів Si – тригональні призми з трьома додатковими атомами (двома Re і одним Si), 10- та 11-вершинники (рис. 2).

Новий структурний тип ErRe_2Si_4 належить до родини структур, похідних від типу AlB_2 . Положення 1a просторової групи $P6/mmm$, яке зайняте атомами Al у вихідній структурі, відповідає положенню 4d просторової групи $C2/c$, тоді як положення 2d атомів бору – двома положеннями 4e, зайнятих атомами Si. Таким чином, кількість атомів у елементарній комірці збільшується в чотири рази. Окрім цього, у структурі є два додаткові положення 8f, зайняті атомами Re і Si.

Обговорення результатів

Взаємодія компонентів у системі Er–Re–Si, структури простих речовин якої належать до типів Mg (ербій, реній) і C-алмаз (кремній), а електронні конфігурації атомів: Er – $[\text{Xe}]6s^25d^44f^2$, Re – $[\text{Xe}]6s^24f^45d^5$ і Si – $[\text{Ne}]3s^23p^2$, зумовлює появу нової інтерметалічної сполуки ErRe_2Si_4 , структура якої належить до моноклінної сингонії і власного типу.

Таблиця 1

Експериментальні умови отримання масиву дифракційних даних та результати уточнення структури сполуки ErRe_2Si_4

Склад зразка	$\text{Er}_{20}\text{Re}_{20}\text{Si}_{60}$
Вміст фази, мас. %	73,5(4)
Склад сполуки	ErRe_2Si_4
Структурний тип	власний СТ
Символ Пірсона, просторова група	$mS28, C2/c$
Параметри комірки:	
$a, \text{Å}$	7,82062(8)
$b, \text{Å}$	8,10405(9)
$c, \text{Å}$	7,72107(8)
$\beta, ^\circ$	117,0952(10)
Об'єм комірки $V, \text{Å}^3$	435,645(8)
Густина $D_X, \text{г}\cdot\text{см}^{-3}$	9,941
Параметр текстури G , [напрям]	0,975(2), [101]
Інтервал $2\theta, ^\circ$ / крок, $^\circ$ / час сканування, с	6–110 / 0,015 / 320
Параметри ширини піків:	
U	0,007(1)
V	0,006(1)
W	0,0086(3)
Параметр змішування η	0,577(6)
Параметри асиметрії піків:	
P_1	0,088(3)
P_2	0,028(1)
Фактори розбіжності:	
R_B	0,0558
R_F	0,0362
R_p	0,0719
R_{wp}	0,0951
χ^2	0,0319
Кількість уточнених параметрів	38

З кристалохімічного аналізу випливає, що структуру силіциду ErRe_2Si_4 слід розглядати як таку, що складається з окремих ланцюгів виключно з атомів одного компонента – Er, Re або Si (рис. 3).

На формування структури сполуки ErRe_2Si_4 також впливає електронна будова атомів Re (5 неспарених електронів на валентному d -підрівні) і їхня неабияка схильність до утворення металічних зв'язків з помітною ковалентною складовою [3,4]. В структурі є пари атомів Re ($\delta_{\text{Re-Re}}=2,936(2) \text{ Å}$). Ці пари Re_2 з'єднуються між собою ($\delta_{\text{Re-Re}}=3,041(2) \text{ Å}$), утворюючи зигзагоподібні ланцюги, які в просторі орієнтовані вздовж кристалографічного напрямку [110] (рис. 3).

Атоми Si у структурі сполуки ErRe_2Si_4 також

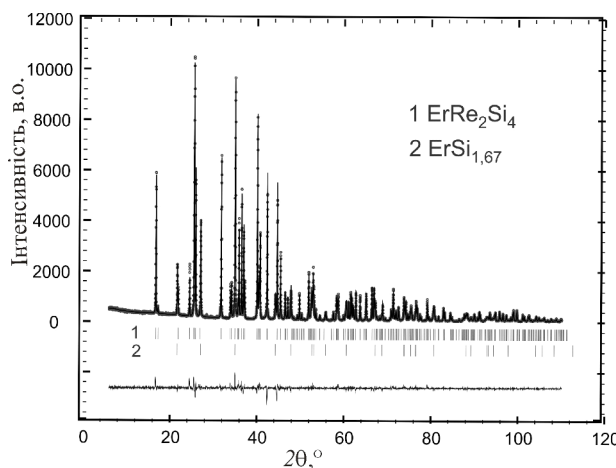


Рис. 1. Експериментальні (точки), розраховані (суцільна лінія) та різниці (суцільна лінія внизу рисунка) дифрактограми зразка складу $\text{Er}_{20}\text{Re}_{20}\text{Si}_{60}$ (CuK_α -випромінювання). Вертикальні риси вказують на положення відбитів hkl тернарної ErRe_2Si_4 (1) та бінарної сполуки $\text{ErSi}_{1,67}$ (2)

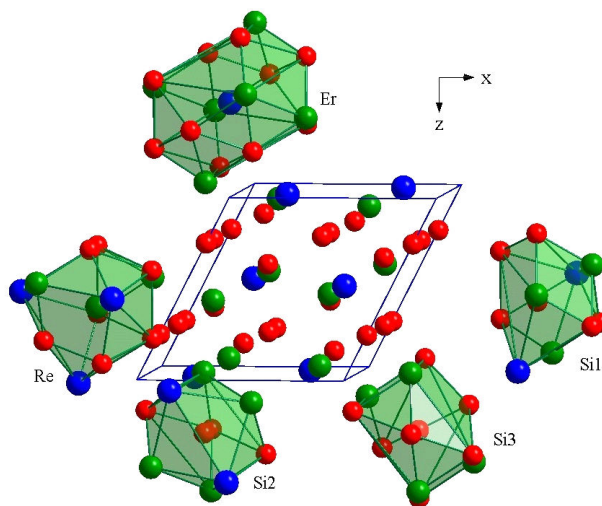


Рис. 2. Елементарна комірка структури сполуки ErRe_2Si_4 та координаційні многогранники атомів

утворюють ланцюги, проте вони характеризуються більш складною будовою. Так, атом $\text{Si}2$ сполучається з атомом $\text{Si}3$ на відстані $2,391(13) \text{ Å}$ та двома атомами $\text{Si}1$ на відстані $2,481(7) \text{ Å}$, що зумовлює появу плоских угруповань $[\text{Si}_4]$. Вони з'єднуються атомами $\text{Si}1$ ($\delta_{\text{Si1-Si1}}=2,589(8) \text{ Å}$), формуючи складні розгалужені ланцюги, орієнтовані вздовж кристалографічного напрямку [201] (рис. 3).

Таким чином, кристалічну структуру сполуки ErRe_2Si_4 можна розглядати як таку, що побудована з ланцюгів з атомів Re та Si, які утворюють каркас, у пустотах якого розташовані атоми

Таблиця 2

Координати та ізотропні параметри зміщення атомів у структурі сполуки ErRe_2Si_4

Атом	ПСТ	x	y	z	$B_{\text{ізо}}, \text{\AA}^2$
Er	4d	1/4	1/4	1/2	0,74(5)
Re	8f	0,16309(14)	0,12464(12)	0,07260(14)	0,08(2)
Si1	8f	0,1566(9)	0,4322(9)	0,1318(9)	1,43(10)
Si2	4e	0	0,0050(11)	1/4	1,43(10)
Si3	4e	0	0,7080(11)	1/4	1,43(10)

Таблиця 3

Міжатомні відстані (δ), скорочення міжатомних віддалей ($\Delta\delta$) та координаційні числа (КЧ) атомів у структурі сполуки ErRe_2Si_4 (власний СТ, ПГ $C2/c$, СП $mS28$)

АТОМИ		δ , Å	$\Delta\delta^*$, %	КЧ	АТОМИ		δ , Å	$\Delta\delta$, %	КЧ
Er	-2Si2	2,842(7)	-2,90	16	Re	-Si3	2,450(3)	-3,54	12
	-2Si1	2,968(7)	1,40			-Si2	2,456(4)	-3,31	
	-2Si1	2,996(6)	2,36			-Si2	2,458(4)	-3,23	
	-2Re	3,1822(12)	1,77			-Si1	2,547(7)	0,28	
	-2Re	3,2146(12)	2,80			-Si1	2,588(6)	1,89	
	-2Re	3,2173(10)	2,89			-Si1	2,591(8)	2,01	
	-2Si1	3,225(7)	10,18			-Si3	2,597(5)	2,24	
	-2Si3	3,3309(9)	13,80			-Re	2,9360(17)	7,15	
						-Re	3,0406(14)	10,97	
			-Er	3,1822(12)	1,77				
			-Er	3,2146(12)	2,80				
			-Er	3,2173(10)	2,89				
Si1	-Si2	2,481(7)	6,03	10	Si3	-Si2	2,391(13)	2,18	11
	-Re	2,547(7)	0,28			-2Re	2,450(3)	-3,54	
	-Re	2,588(6)	1,89			-2Re	2,597(5)	2,24	
	-Si1	2,589(8)	10,64			-2Si1	2,864(7)	22,39	
	-Re	2,591(8)	2,01			-2Si1	2,891(10)	23,55	
	-Si3	2,864(7)	22,39			-2Si1	3,021(9)	29,10	
	-Si3	2,891(10)	23,55						
	-Er	2,968(7)	1,40						
	-Er	2,996(6)	2,36						
-Si3	3,021(9)	29,10							
Si2	-Si3	2,391(13)	2,18	9					
	-2Re	2,456(4)	-3,31						
	-2Re	2,458(4)	-3,23						
	-2Si1	2,481(7)	4,74						
	-2Er	2,842(7)	-2,90						

Примітка: * $\Delta = (\delta - \Sigma r) / \Sigma r \cdot 100\%$, $r(\text{Er}) = 1,757 \text{ \AA}$, $r(\text{Re}) = 1,370 \text{ \AA}$, $r(\text{Si}) = 1,170 \text{ \AA}$.

Er. Характер поєднання ланцюгів з атомів Er, Re та Si показаний на рис. 4.

Кристалічну структуру ErRe_2Si_4 також можна надати як найщільнішу укладку поліедрів навколо атомів з найменшою відносною електронегативністю (найбільшого розміру) [5]. Аналіз відносних електронегативностей елементів Er, Re та Si за Полінгом ($\chi(\text{Er}) = 1,24$, $\chi(\text{Re}) = 1,90$, $\chi(\text{Si}) = 1,89$) засвідчує, що найбільш електропозитивним є Er.

Найближче координаційне оточення атомів Er формується атомами Re і Si у вигляді деформованої пентагональної антипризми з шістьма додатковими атомами, розміщеними в її екваторіальній площині $[\text{Er}(\text{Re}_4\text{Si}_7)]_n$ (рис. 5а). Ці 16-вершинники з'єднуються між собою за допомогою пентагональних граней, утворюючи колони вздовж кристалографічного напрямку [101] (рис. 5б). З'єднання колон між собою відбувається за допомогою граней поліедрів в двох інших

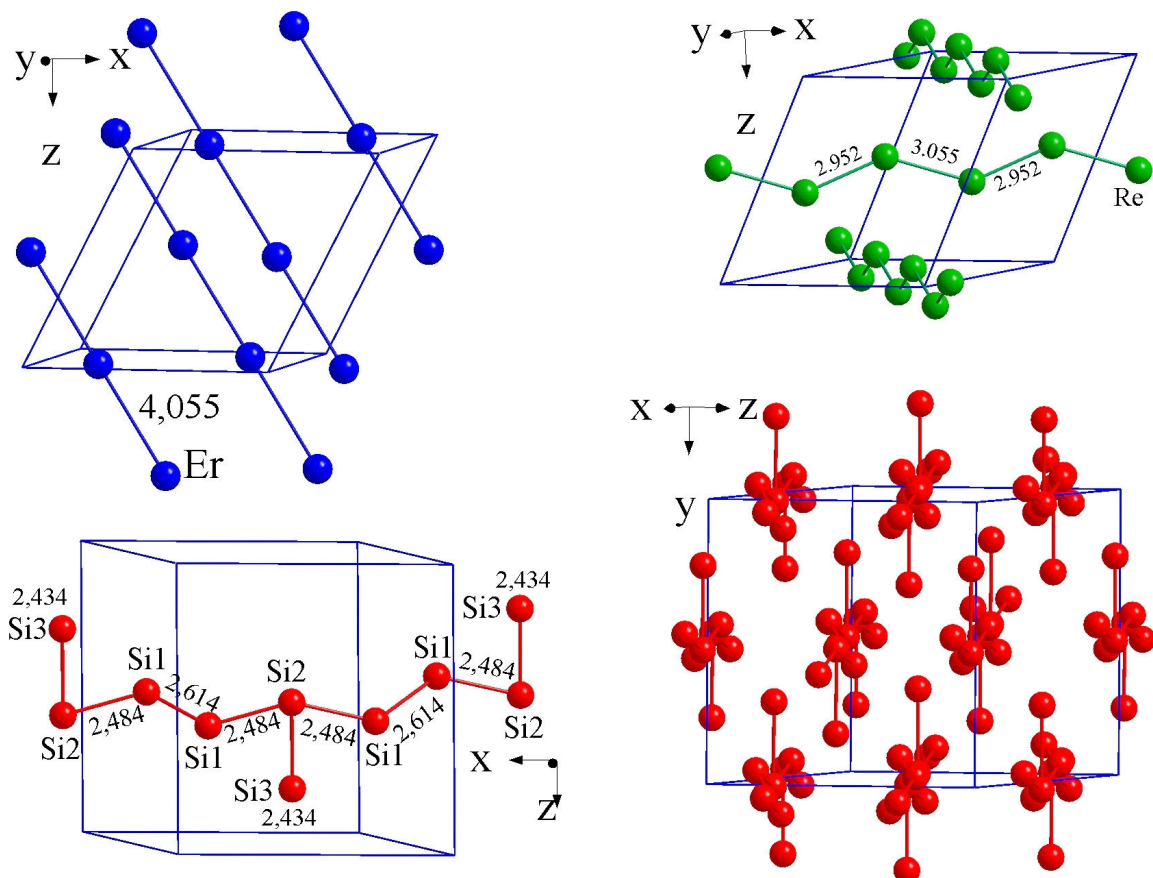


Рис. 3. Лінійні ланцюги з атомів Er, зигзагоподібні ланцюги з атомів Re та розгалужені складні ланцюги з атомів Si у структурі сполуки ErRe_2Si_4

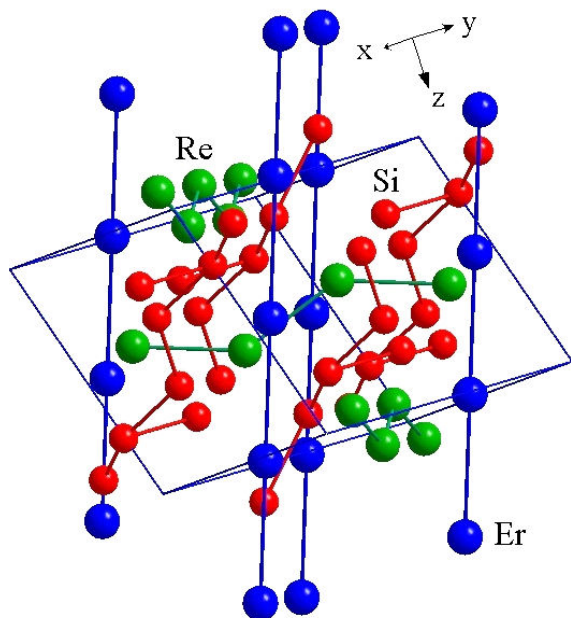


Рис. 4. Структура сполуки ErRe_2Si_4 , як поєднання ланцюгів з атомів Er, Re і Si

напрямах і зумовлює появу щільної укладки, показаної на рис. 5в. В укладці поліедрів атомів Er в структурі сполуки ErRe_2Si_4 можна виділити невеликі пустоти у формі деформованих октаедрів (довжина найкоротшого ребра октаедра становить $2,450(3) \text{ \AA}$).

Такі ж координаційні многогранники спостерігаються і у структурі сполуки $\text{Er}_3\text{Si}_{4,7}$ (*o*S16, *Amm*2) [6]: для атомів Er – пентагональні призми з шістьма додатковими атомами та для атомів Si – тригональні призми з трьома та чотирма додатковими атомами. Обидві структури є спорідненими до типу AlB_2 (*h*P3, *P6/mmm*) для ErSi_2 [7]. У вихідній структурі наявні два типи шарів: на висоті $z=0$ – шар трикутників з щільно укладених атомів Al, та на висоті $z=1/2$ – шар шестикутників з атомів B. Подібні шари знайдено в структурі $\text{ErSi}_{1,67}$ [8]. Відмінність між цими структурами полягає у дефектності шару, утвореного атомами малого розміру (для формування шестикутника в $\text{Er}_3\text{Si}_{4,7}$ бракує одного атома). У структурі сполуки ErRe_2Si_4 кількість шарів в межах періоду трансляції є більшою: шари з сильно

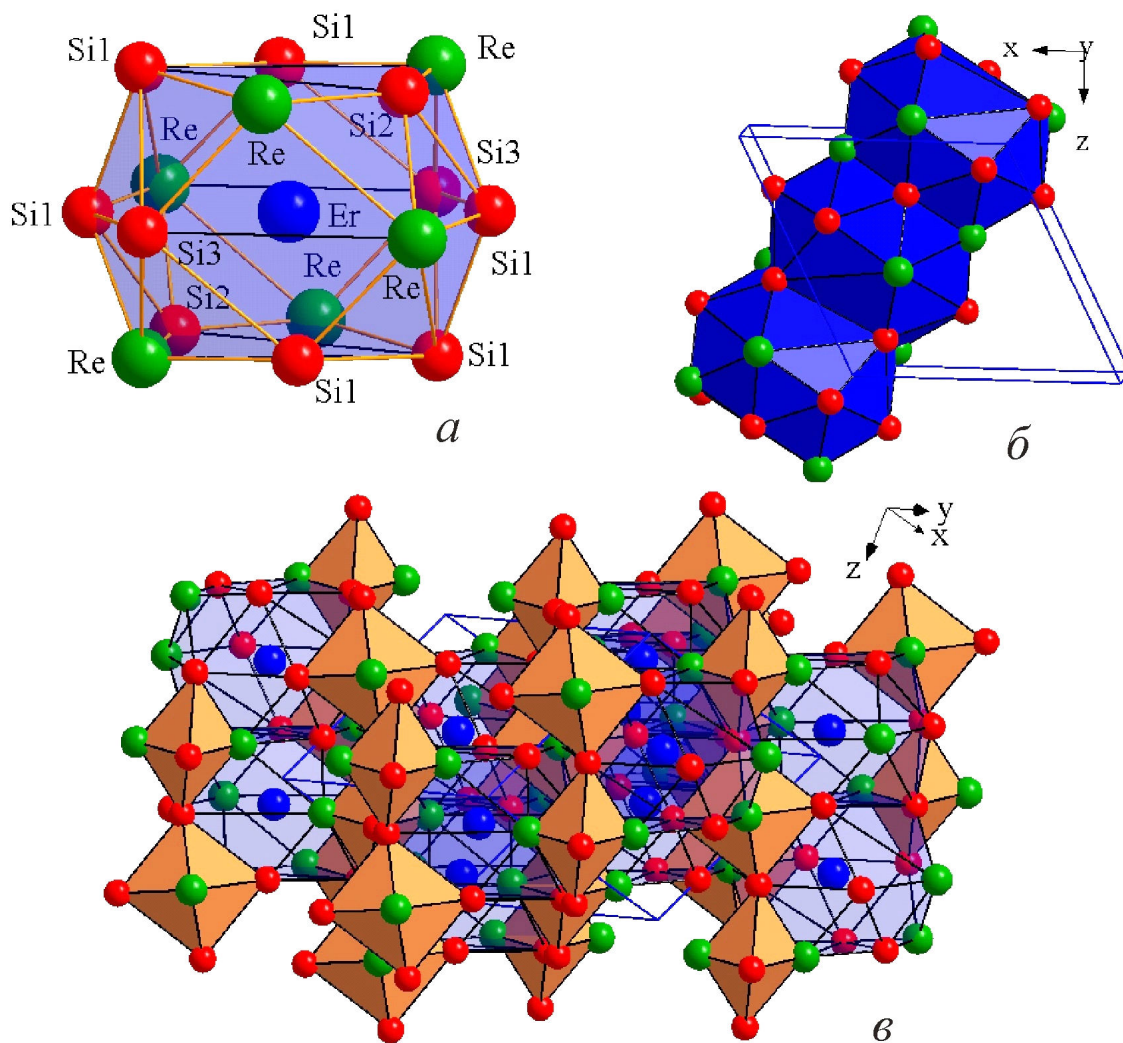


Рис. 5. Найближче координаційне оточення атомів Er (а), з'єднання поліедрів гранями в колони (б) та каркас кристалічної структури сполуки ErRe_2Si_4 (в)

деформованих шестикутників, утворених атомами Si знаходяться на висотах $z=1/4$ і $3/4$, а шари з атомів Er – при $z \approx 0$ і $1/2$ (рис. 6). Відмінність полягає у включенні двох додаткових атомів (Re і Si) у трикутники з атомів Er, що гофрує відповідні шари.

Висновки

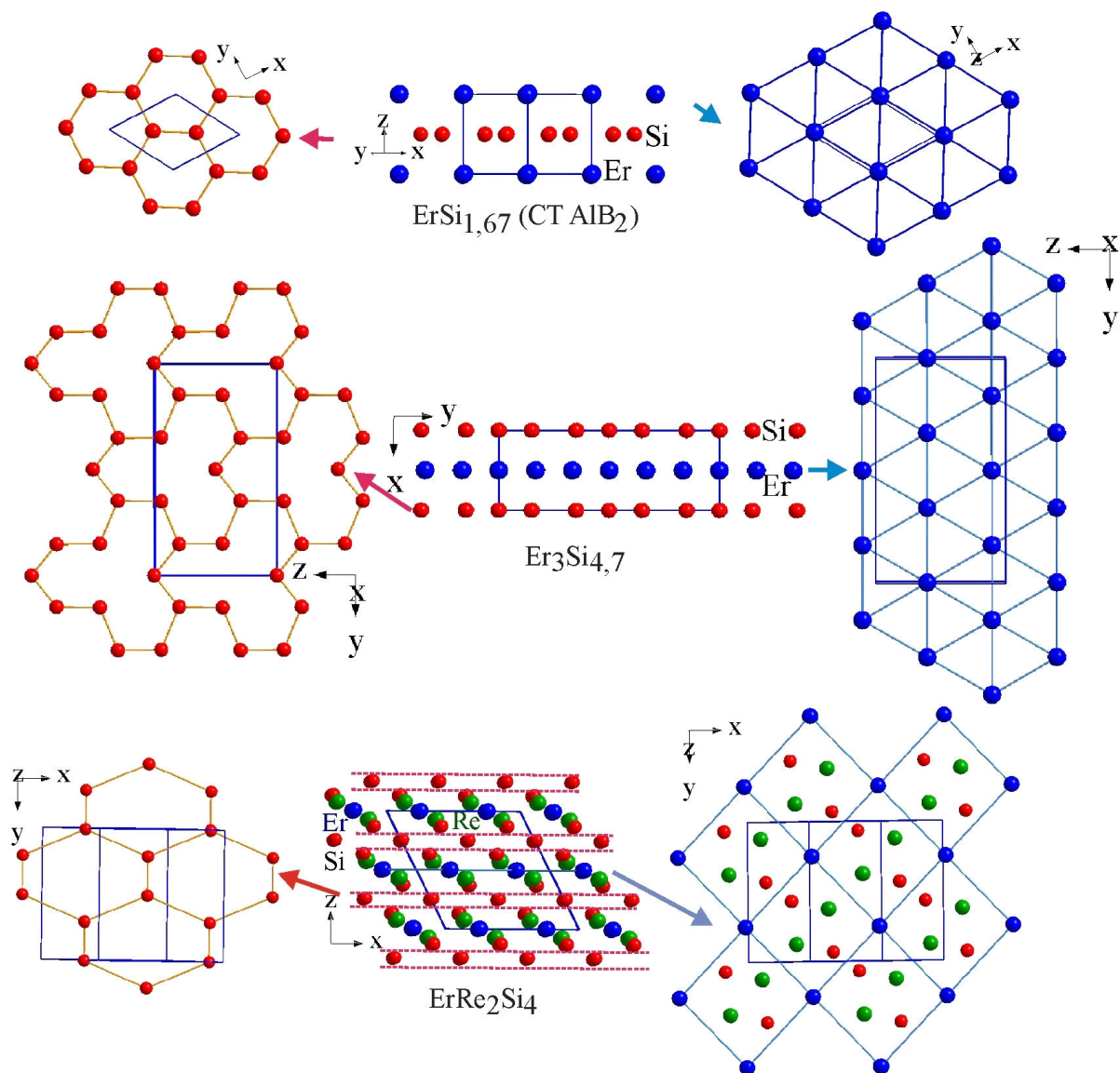
Рентгенівським дифракційним методом порошку (дифрактометр STOE Stadi P, CuK_α -випромінювання) вивчено кристалічну структуру нової тернарної сполуки ErRe_2Si_4 , власний СТ, ПГ $C2/c$, СП $mS28$), яка є новим структурним типом інтерметалічних сполук. Новий структурний тип ErRe_2Si_4 належить до родини структур, похідних від типу AlB_2 . Положення $1a$ і $2d$ просторової групи $P6/mmm$, трансформуються у $4d$ і $4e$ просторової групи $C2/c$, а також ви-

никають два додаткові положення $8f$, зайняті атомами Re і Si. Таким чином, кількість атомів у елементарній комірці збільшується в чотири рази.

Кристалічну структуру сполуки ErRe_2Si_4 можна розглядати як таку, що побудована з ланцюгів з атомів Re та Si, які утворюють каркас, у пустотах якого розташовані атоми Er.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Villars P., Cenzual K. Pearson's crystal data: crystal structure database for inorganic compounds. – Materials Park (Ohio): ASM International, 2013/14.
2. Rodriguez-Carvajal J. Recent developments of the program FullProf // Commission on Powder Diffraction (IUCr). Newsletter. – 2001. – Vol.26. – P.12-19.

Рис. 6. Шари у структурах сполук $\text{ErSi}_{1.67}$, $\text{Er}_3\text{Si}_{4.7}$ і ErRe_2Si_4

3. *Molecules* containing rare-earth atoms solely bonded by transition metals / Butovskii M., Doring C., Bezugly V., Wagner F. R., Grin Yu., Kempe R. // *Nat. Chem.* – 2010. – Vol.2. – P.741-744.

4. Mykhalichko V., Kozak R., Gladyshevskii R. The new monoclinic structure type Gd_4ReGe_8 // *Chem. Met. Alloys.* – 2015. – Vol.8. – P.55-62.

5. Федорчук А, Федина М, Кітик І. Найближче координаційне оточення атомів у структурах неорганічних сполук. – Чернівці: Видавничий дім «Родовід», 2013. – 198 с.

6. $\text{Er}_3\text{Si}_{5-x}$ – a modulated derivative of the structure type AlB_2 / Pukas S., Akselrud L., Cerny R., Gladyshevskii R. // *Chem. Met. Alloys.* – 2008. – Vol.1. – P.185-191.

7. Chen X., Ni C., Wang D.C. Investigation on the 773 K isothermal section of the Er–Ni–Si ternary phase diagram by X-ray powder diffraction // *J. Phase Equilib. Diffus.* – 2020. – Vol.41. – P.138-147.

8. The ternary RE–Si–B systems (RE = Dy, Ho, Er and Y) at 1270 K: solid state phase equilibria and magnetic properties of the solid solution $\text{REB}_{2-x}\text{Si}_x$ (RE = Dy and Ho) / Roger J., Babizhetskii V.S., Guizouarn T., Hiebl K., Guerin R., Halet J.F. // *J. Alloys Compd.* – 2006. – Vol.417. – P.72-84.

Надійшла до редакції 11.12.2024

CRYSTAL STRUCTURE OF THE NEW TERNARY SILICIDE ErRe_2Si_4 *V.M. Mykhalichko*^a, *L.O. Fedyna*^b, *A.O. Fedorchuk*^c, *M.F. Fedyna*^{d,*}^a Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine^b Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine^c S.Z. Gzhytskyj Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies, Lviv, Ukraine^d National University of Forest and Wood Technology of Ukraine, Lviv, Ukraine

* e-mail: fmf@ua.fm

The crystal structure of a new ternary compound, ErRe_2Si_4 , was studied using the powder X-ray diffraction method (STOE Stadi P diffractometer, $\text{CuK}\alpha$ -radiation, original structure type, Pearson code $mS28$, space group $C2/c$, $a=7.82062(8)$ Å, $b=8.10405(9)$ Å, $c=7.72107(8)$ Å, $\beta=117.0952(10)^\circ$, $R_B=0.0951$, $R_p=0.0719$, $\chi^2=3.19$). The structure of ErRe_2Si_4 represents a new structural type of intermetallic compounds derived from the AlB_2 -type structure. The $1a$ position of the space group $P6/mmm$, occupied by Al atoms, corresponds to the $4d$ position of the $C2/c$ group, which is occupied by Er atoms, while the $2d$ position of B atoms corresponds to two $4e$ positions occupied by Si atoms. Two additional $8f$ positions in ErRe_2Si_4 are occupied by Re and Si atoms, respectively. The crystal structure of ErRe_2Si_4 is built from chains of Re and Si atoms forming a framework with Er atoms located in the voids. Based on the nearest coordination environment of Er atoms, the structure of this ternary compound is closely related to crystal structures of the binary silicides $\text{Er}_3\text{Si}_{4.7}$ ($oS16$, $Amm2$) and $\text{ErSi}_{1.67}$ ($hP3$, $P6/mmm$).

Keywords: rare-earth metal; erbium; rhenium; silicon; ternary compound; crystal structure; structure type.

REFERENCES

1. Villars P, Cenzual K, editors. *Pearson's crystal data: crystal structure database for inorganic compounds*. Materials Park (OH): ASM International, release 2013/14.
2. Rodriguez-Carvajal J. Recent developments of the program FullProf, in Commission on Powder Diffraction (IUCr). *Newsletter*. 2001; 26: 12-19.
3. Butovskii MV, Doring C, Bezugly V, Wagner FR, Grin Yu, Kempe R. Molecules containing rare-earth atoms solely bonded by transition metals. *Nat Chem*. 2010; 2: 741-744. doi: 10.1038/nchem.718.
4. Mykhalichko V, Kozak R, Gladyshevskii R. The new monoclinic structure type Gd_4ReGe_8 . *Chem Met Alloys*. 2015; 8: 55-62. doi: 10.30970/cma8.0312.
5. Fedorchuk A, Fedyna M, Kityk I. *Naiblyzhche koordynatsiine otchennya atomiv u strukturakh neorganichnykh spoluk* [The nearest coordination environment of atoms in the structures of inorganic compounds]. Chernivtsi (Ukraine): Rodovid Publishing House; 2013. 198 p. (in Ukrainian).
6. Pukas S, Akselrud L, Cerny R, Gladyshevskii R. $\text{Er}_3\text{Si}_{5-x}$ – a modulated derivative of the structure type AlB_2 . *Chem Met Alloys*. 2008; 1: 185-191. doi: 10.30970/cma1.0057.
7. Chen X, Ni C, Wang DC. Investigation on the 773 K isothermal section of the Er-Ni-Si ternary phase diagram by X-ray powder diffraction. *J Phase Equilib Diffus*. 2020; 41: 138-147. doi: 10.1007/s11669-020-00788-3.
8. Roger J, Babizhetskyy V, Guizouarn T, Hiebl K, Guerin R, Halet JF. The ternary RE-Si-B systems (RE = Dy, Ho, Er and Y) at 1270 K: solid state phase equilibria and magnetic properties of the solid solution $\text{REB}_{2-x}\text{Si}_x$ (RE = Dy and Ho). *J Alloys Compd*. 2006; 417: 72-84. doi: 10.1016/j.jallcom.2005.09.012.