

## МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ

## SENSOR MATERIALS

PACS 61.05.CP, 61.50.AH

УДК 546:548.736

### КРИСТАЛІЧНА СТРУКТУРА ТА МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВІВ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ У СИСТЕМІ Tm-Ge-Si

*Р. С. Козак<sup>1</sup>, С. Я. Пукас<sup>1</sup>, Ю. К. Гореленко<sup>1</sup>, Р. Є. Гладисhevський<sup>1</sup>,  
Д. В. Лабовка<sup>2</sup>, Л. І. Паньків<sup>2</sup>, В. М. Цмоць<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Кафедра неорганічної хімії Львівського національного університету імені Івана Франка,  
вул. Кирила і Мефодія, 6, 79005 Львів, Україна  
e-mail: s\_pukas@franko.lviv.ua

<sup>2</sup>Науково-дослідна лабораторія матеріалів твердотільної мікроелектроніки,  
Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка,  
вул. І. Франка, 24, 82100 Дрогобич, Україна  
e-mail: lyuda\_pankiv@mail.ru

### КРИСТАЛІЧНА СТРУКТУРА ТА МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВІВ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ У СИСТЕМІ Tm-Ge-Si

*Р. С. Козак, С. Я. Пукас, Ю. К. Гореленко, Р. Є. Гладисhevський,  
Д. В. Лабовка, Л. І. Паньків, В. М. Цмоць*

**Анотація.** Сплави твердих розчинів у системі Tm-Ge-Si досліджено методами рентгенівської дифракції і магнітної сприйнятливості (МС). Встановлено, що кристалічна структура даних сплавів належить до гексагонального структурного типу  $AlB_2$ , у якій для атомів малого розміру (Si, Ge) характерна тригонально-призматична координація. Результати вимірювань МС в залежності від температури (80–800 К) та напруженості магнітного поля (0,5–4,0 кЕ) свідчать про наявність парамагнітної складової, яка добре описується законом Кюрі-Вейсса і не залежить від напруженості магнітного поля. Також визначені магнітні характеристики досліджуваних матеріалів (параметр Вейсса, ефективний магнітний момент на формульну одиницю і константа Кюрі).

**Ключові слова:** кристалічна структура, твердий розчин, магнітна сприйнятливість, парамагнетизм

### CRYSTAL STRUCTURE AND MAGNETIC PROPERTIES OF SOLID SOLUTIONS IN THE Tm-Ge-Si SYSTEM

*R. S. Kozak, S. Ya. Pukas, Yu. K. Gorelenko, R. E. Gladyshevskii,  
D. V. Labovka, L. I. Pan'kiv, V. M. Tsmots*

**Abstract.** Solid solutions in the Tm-Ge-Si system have been studied by X-ray diffraction data and magnetic susceptibility (MS) techniques. It was found that the crystal structure of the alloys corre-

sponds to the hexagonal type  $AlB_2$ , in which tri-capped trigonal prism coordination is observed for the small atoms (Si, Ge). The results of MS measurements as a function of temperature (80–800 K) and magnetic field (0.5–4.0 kOe) show the existence of a field-independent paramagnetic component well described by the Curie-Weiss law. The magnetic characteristics of the materials (Weiss parameter, effective magnetic moment per formula unit and Curie constant) were also determined.

**Keywords:** crystal structure, solid solution, magnetic susceptibility, paramagnetism

## КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ В СИСТЕМЕ Tm-Ge-Si

*Р. С. Козак, С. Я. Пукас, Ю. К. Гореленко, Р. Е. Гладышевский,  
Д. В. Лабовка, Л. И. Паньків, В. М. Цмоць*

**Аннотация.** Сплавы твердых растворов в системе Tm-Ge-Si исследованы методами рентгеновской дифракции и магнитной восприимчивости (МВ). Обнаружено, что кристаллическая структура данных сплавов принадлежит к гексагональному типу  $AlB_2$ , в которой для атомов малых размеров (Si, Ge) характерна тригонально-призматическая координация. Результаты измерений МВ в зависимости от температуры (80–800 К) и напряженности магнитного поля (0,5–4,0 кЭ) свидетельствуют о наличии парамагнитной составляющей, которая хорошо описывается законом Кюри-Вейсса и не зависит от напряженности магнитного поля. Также определены магнитные характеристики исследованных материалов (параметр Вейсса, эффективный магнитный момент на формульную единицу и константа Кюри).

**Ключевые слова:** кристаллическая структура, твердый раствор, магнитная восприимчивость, парамагнетизм

### 1. Вступ

У споріднених системах  $R$ -Ge-Si, де  $R = La, Ce, Pr, Gd$ , на ізоконцентраті 0,333 ат. частки  $R$  утворюються неперервні ряди твердих розчинів на основі дефектних дисиліцидів та дигерманідів [1–4]. В межах цих твердих розчинів відбувається перехід від тетрагональної структури типу  $\alpha$ -ThSi<sub>2</sub> до ромбічної структури типу  $\alpha$ -GdSi<sub>2</sub>. У системі із Gd на ізоконцентраті 0,400 ат. частки Gd також має місце неперервний ряд твердих розчинів на основі бінарних сполук із гексагональною структурою типу  $AlB_2$ . Взаємодія компонентів у системі Y-Ge-Si дещо відрізняється: неперервний ряд твердих розчинів вздовж ізоконцентраті 0,333 ат. частки Y відсутній, натомість утворюються тернарні сполуки  $YGe_{0,6}Si_{1,4}$  та  $YGe_{0,2}Si_{1,8}$  із структурами типів  $\alpha$ -GdSi<sub>2</sub> та  $\alpha$ -ThSi<sub>2</sub>, відповідно. Аналогічно системі Gd-Ge-Si у системі Y-Ge-Si на ізоконцентраті 0,400 ат. частки Y утворюється неперервний ряд твердих розчинів із структурою типу  $AlB_2$ .

Відомості про дослідження потрійної системи Tm-Ge-Si відсутні. Подвійна система Tm-Ge, яка обмежує досліджувану потрійну,

досить добре вивчена та описана в літературі [5]; в області 0,333–0,400 ат. частки Tm при 873 К утворюються три сполуки:  $Tm_{0,9}Ge_2$ ,  $TmGe_{1,9}$  та  $Tm_2Ge_3$ . Германід  $Tm_{0,9}Ge_2$  є дефектним, його кристалічна структура належить до ромбічного структурного типу ZrSi<sub>2</sub>. Сполука  $TmGe_{1,9}$  має область гомогенності ( $\sim 0,02$  ат. частки); їй властивий поліморфізм:  $\alpha$ -модифікація ( $TmGe_{1,9}$ ) має ромбічну структуру власного типу, що є зрощенням фрагментів структур  $DyGe_{1,85}$  та ZrSi<sub>2</sub>; кристалічна структура  $\beta$ -модифікації ( $TmGe_{1,83}$ ) належить до ромбічного структурного типу  $DyGe_{1,85}$ . Температура поліморфного переходу  $\beta$ - $Tm_5Ge_9 \leftrightarrow \alpha$ - $Tm_5Ge_9$  зростає від 1223 до 1295 К при збільшенні вмісту Ge. Для сполуки  $Tm_2Ge_3$  характерна власна моноклінна структура. Діаграма стану подвійної системи Tm-Si ще не повністю досліджена [5]; є відомості про існування дефектного дисиліциду  $TmSi_{1,67}$  із структурою типу  $AlB_2$ .

Метою даної роботи є вивчення особливостей взаємодії компонентів у потрійній системі Tm-Ge-Si в області 0,333–0,400 ат. частки Tm при 873 К, зокрема, визначення розчинності третього компоненту в бінарних сполуках, пошук тернарних сполук, встановлення фазових

рівноваг, а також вивчення магнітних властивостей окремих твердих розчинів.

## 2. Експериментальна частина

Для проведення дослідження нами синтезовано 4 подвійні та 17 потрібних сплавів. Зразки готували сплавлянням шихти з компактних металів високої чистоти (Tm — 99,82 %, Ge та Si — 99,999 %) в електродуговій печі в атмосфері аргону під тиском ~50 кПа. Сплави гомогенізували у вакуумованих кварцових ампулах при 873 К впродовж 720 годин у муфельній печі опору VULKAN A-550 з автоматичним регулюванням температури і гартували у холодній воді. Рентгенівський фазовий аналіз проводили за дифрактограмами, одержаними за допомогою дифрактометра ДРОН-2.0М (проміння Fe K $\alpha$ ). Розрахунки проводили з використанням програм LATCON [6], (уточнення параметрів елементарних комірок), DBWS-9807 [7] (уточнення структури методом Рітвельда), POWDER CELL [8] (розрахунок теоретичних дифрактограм), а також баз даних TYPX [9] (стандартизовані дані структурних типів неорганічних сполук) і PAULING FILE [10] (структурні характеристики неорганічних сполук).

Для твердого розчину Tm(Si, Ge)<sub>1,67</sub> проведено вивчення магнітних властивостей. Питому статичну магнітну сприйнятливість (МС) вимірювали відносним методом Фарадея на зразках масою до 6 мг [11]. Максимальна похибка експерименту не перевищувала 2 %. За еталон було взято HgCo(NCS)<sub>4</sub> (гідраргірум (II) тетратіоціанатокобальт (II)), МС якого при 293 К дорівнює  $16.43 \times 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$ , а при 77 К —  $63,34 \times 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$  [12].

## 3. Результати та їх обговорення

На основі проведеного фазового аналізу сплавів при температурі 873 К нами підтверджено існування чотирьох бінарних сполук: TmGe<sub>2</sub>, TmGe<sub>1,9</sub>, Tm<sub>2</sub>Ge<sub>3</sub> та TmSi<sub>1,67</sub>. У таблиці 1 подано уточнені параметри елементарних комірок цих сполук. У всіх двокомпонентних зразках в області дигерманіду Тулію присутня фаза TmGe<sub>1,9</sub>. Сполука TmGe<sub>1,83</sub> існує при вищих температурах, тому на дифрактограмах подвійних зразків вона не спостерігалася. Проте, ця фаза присутня у трикомпонентних зразках. Додавання третього компоненту, в даному випадку Si, знижує температуру існування фази.

Таблиця 1

Бінарні сполуки, підтверджені в досліджуваній області при 873 К.

Сполука	Структурний тип	Просторова група	Параметри комірки, Å		
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
TmGe <sub>2</sub>	ZrSi <sub>2</sub>	<i>Cmcm</i>	4,0089(1)	15,7266(4)	3,86902(9)
TmGe <sub>1,9</sub>	TmGe <sub>1,9</sub>	<i>Pmma</i>	3,8783(3)	4,0354(3)	22,553(3)
Tm <sub>2</sub> Ge <sub>3</sub>	Tm <sub>2</sub> Ge <sub>3</sub>	<i>C2/c</i>	9,012(1)	6,7417(8)	7,742(2)
			$\beta = 115,44(2)^\circ$		
TmSi <sub>1,67</sub>	AlB <sub>2</sub>	<i>P6/mmm</i>	3,7652(4)	-	4,0669(5)

Зразки на ізоконцентраті 0,333 ат. частки Tm в області багатій на Si виявилися двофазними. У них присутні фази Tm(Si, Ge)<sub>1,5</sub> та (Ge, Si). Це вказує на утворення твердого розчину заміщення атомів Si на атоми Ge в сполуці TmSi<sub>1,67</sub>, який простягається вздовж ізоконцентрати ~ 0,375 ат. частки Tm до вмісту Ge ~ 0,28 ат. частки. Графічна залежність зміни параметрів елементарної комірки в області твердого розчину Tm(Si, Ge)<sub>1,67</sub> від кількості заміщеного атома малого розміру представлена на рисунку 1(а,б). Параметр *a* твердого розчину Tm(Si, Ge)<sub>1,67</sub> при заміщенні менших за розміром атомів Si на ато-

ми Ge зростає. Це пояснюється тим, що контактні відстані в структурі типу AlB<sub>2</sub> спостерігаються в площині *xy*, де атоми малого розміру утворюють графітоподібні сітки. Вісь *z* проходить перпендикулярно до площини сіток, тому природа *p*-елементу на параметр *c* практично не впливає.

Аналогічний твердий розчин утворюється на основі бінарного германіду Tm<sub>2</sub>Ge<sub>3</sub> (TmGe<sub>1,5</sub>) при 873 К. У подвійному сплаві кристалічна структура цього германіду відповідає власній моноклінній структурі, яка є надструктурою до гексагонального типу AlB<sub>2</sub> і характеризується

впорядкованим розміщенням вакансій в положеннях атомів Ge: кожен четвертий атом малого розміру відсутній у порівнянні з типом  $AlB_2$ . Додавання навіть невеликих кількостей Si до  $Tm_2Ge_3$  ( $TmGe_{1,5}$ ) приводить до розупорядкування вакансій, тому відповідний твердий розчин  $Tm(Ge,Si)_{1,5}$  описується структурою типу  $AlB_2$ . Зміна параметрів елементарної комірки в області цього твердого розчину узгоджується з атомними радіусами складових компонентів та вказує, що він простягається до вмісту Si 0,10 ат. частки.

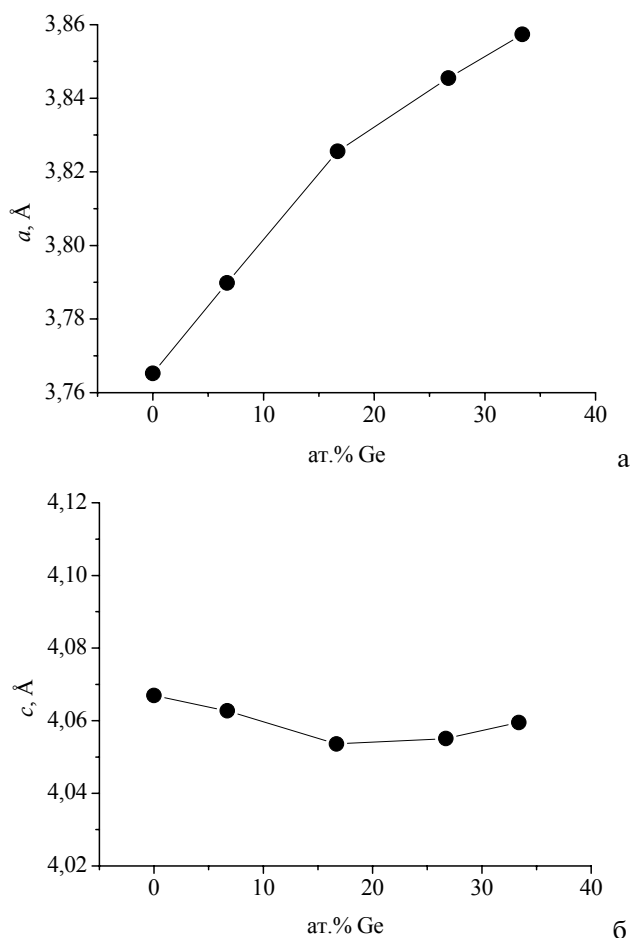


Рис. 1. Зміна параметрів елементарної комірки в області твердого розчину Ge в  $TmSi_{1,67}$ .

На нашу думку, однофазна область, що простягається вздовж ізоконцентрати  $\sim 0,333$  ат. частки Tm в потрібній системі Tm-Ge-Si в області високого вмісту Ge є твердим розчином Si у сполуці  $TmGe_{1,83}$ . Згідно з діаграмою стану системи Tm-Ge [5] структура типу  $DyGe_{1,85}$  реалізується в температурному інтервалі 1223-1313 K ( $\beta$ - $TmGe_{1,9}$ ). Додавання  $\sim 0,05$  ат. частки Si зменшує нижню границю існування цієї структурної модифікації, тоб-

то  $\beta$ -модифікація сполуки  $TmGe_{1,9}$  ( $TmGe_{1,83}$ ) при 873 K стабілізується Силіцієм. Детальний аналіз параметрів елементарної комірки, проведений на основі зразків, які містять цю фазу вказує на комбінований характер твердого розчину. Поступове додавання Si до вмісту  $\sim 0,10$  ат. частки супроводжується заміщенням Ge/Si і включенням додаткових атомів Si в порожнини структури (параметри елементарної комірки збільшуються), тоді як подальше додавання Si до вмісту  $\sim 0,20$  ат. частки характеризується лише заміщенням (параметри комірки зменшуються).

На рис. 2 зображено протяжність твердих розчинів із структурою типу  $AlB_2$ , та можливий обрис області гомогенності сполуки із структурою типу  $DyGe_{1,85}$ , а також ймовірні фазові рівноваги в області 0,333-0,400 ат. частки Tm.

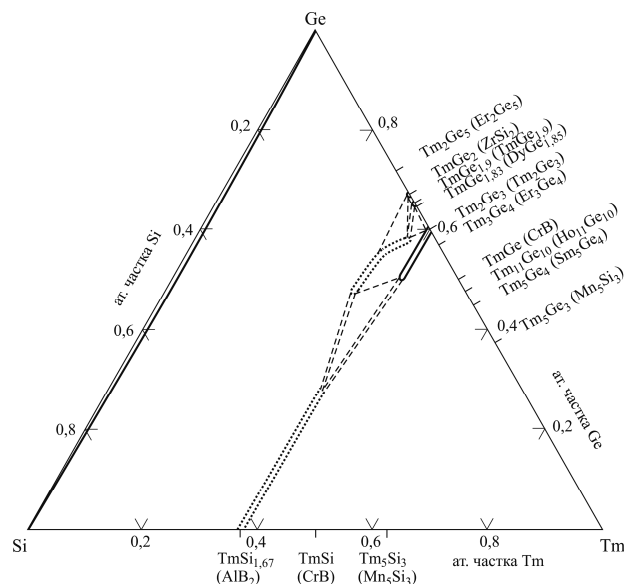


Рис. 2. Протяжність твердих розчинів та ймовірні фазові рівноваги в області 0,333-0,400 ат. частки Tm при 873 K.

Для структур типів  $AlB_2$  та  $Tm_2Ge_3$  характерною є виключно тригонально-призматична координація атомів Si та Ge [13]. Більше того, простір у цих структурах (рис.3) повністю викладений тригональними призмами, у вершинах яких знаходяться атоми R. У структурах сполук  $TmGe_{1,83}$  (структура типу  $DyGe_{1,85}$ ),  $TmGe_{1,9}$  (структура власного типу),  $Tm_{0,9}Ge_2$  (структура типу  $ZrSi_2$ ) частині атомів Ge також характерна тригонально-призматична координація, однак простір не повністю викладений з тригональних призм  $R_6$ . Як видно з рис.3, в структурі типу  $DyGe_{1,85}$  можна виділити триша-

рові блоки тригональних призм. Дефектність по Ge в бінарній  $\text{TmGe}_{1,83}$  спостерігається в центральному шарі блоку тригональних призм. В цьому шарі знаходиться 4-х (де кількість вакансій  $x = 1,33$ ) із 16-х атомів Ge в елементарній комірці. Отже, кожна третя тригональна призма  $R_6$  в цьому шарі незаповнена. Поступове заміщення більших за розміром атомів Ge меншими атомами Si сприяє поступовому заповненню порожніх тригональних призм. Коли усі тригональні призми заповнені має місце лише твердий розчин заміщення.

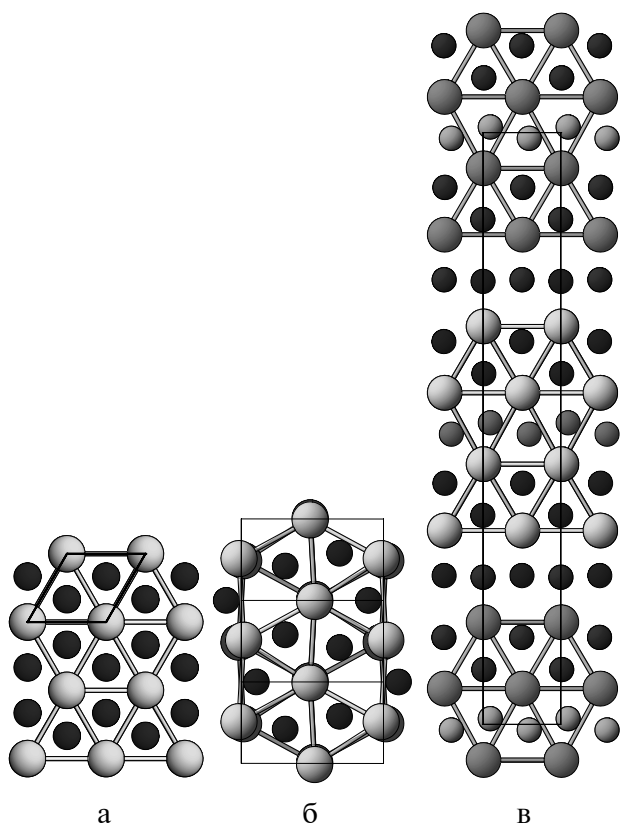


Рис. 3. Проекції кристалічних структур типів  $\text{AlB}_2$  вздовж  $[001]$  (а),  $\text{Tm}_2\text{Ge}_3$  —  $[210]$  (б) та  $\text{DyGe}_{1,85}$  —  $[100]$  (в).

Досліджено магнітні властивості сплавів твердого розчину  $\text{Tm}(\text{Si}, \text{Ge})_{1,67}$ .

Проведено вимірювання:

- залежності питомої статичної магнітної сприйнятливості від напруженості магнітного поля  $\chi(H)$  при температурах 293 і 80 К;
- температурних залежностей МС  $\chi(T)$  зразків в магнітному полі напруженістю  $H = 0,5$  кЕ в області 80-800 К.

На рис. 4 і 5 подано залежності  $\chi(H)$  сплавів твердого розчину  $\text{Tm}(\text{Si}, \text{Ge})_{1,67}$  при 293 К та 80 К відповідно.

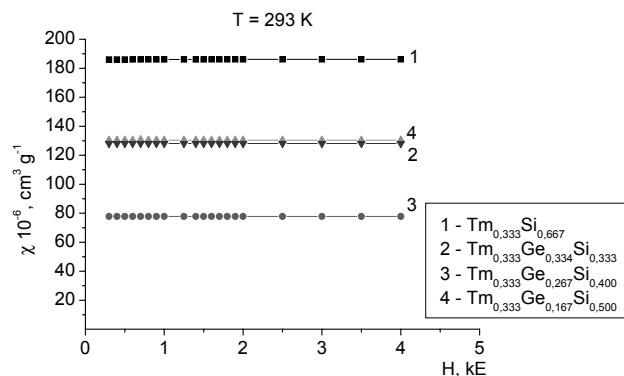


Рис. 4. Залежність магнітної сприйнятливості сплавів твердого розчину  $\text{Tm}(\text{Si}, \text{Ge})_{1,67}$  від напруженості магнітного поля при  $T = 293$  К.

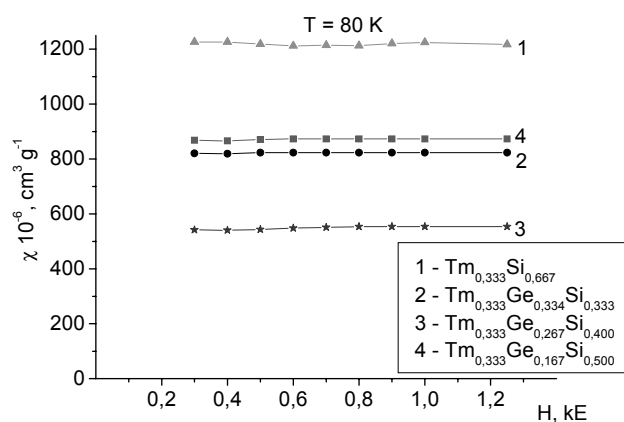


Рис. 5. Залежність магнітної сприйнятливості сплавів твердого розчину  $\text{Tm}(\text{Si}, \text{Ge})_{1,67}$  від напруженості магнітного поля при  $T = 80$  К.

Встановлено, що магнітна сприйнятливість цих зразків (криві 1-4) позитивна і не залежить від напруженості магнітного поля, що свідчить про відсутність домішкових магнітних фаз у сплавах.

Температурні залежності  $\chi(T)$  у магнітному полі  $H = 0,5$  кЕ зразків 1-4 в інтервалі температур 80-800 К подано на рис. 6. Видно, що зі зростанням температури МС монотонно спадає.

Температурні залежності оберненої величини магнітної сприйнятливості подвійного зразка  $\text{Tm}_{0,333}\text{Si}_{0,667}$  та потрійних зразків  $\text{Tm}_{0,333}\text{Si}_{0,333}\text{Ge}_{0,334}$ ,  $\text{Tm}_{0,333}\text{Si}_{0,400}\text{Ge}_{0,267}$ ,  $\text{Tm}_{0,333}\text{Si}_{0,500}\text{Ge}_{0,167}$  у магнітному полі  $H = 0,5$  кЕ представлено на рис. 7 та 8.

Зображені на рис. 7 і 8 експериментальні точки добре апроксимуються лінійною залежністю, яка задовольняє закону Кюри-Вейсса:

$$\chi = C / (T + \Theta). \quad (1)$$

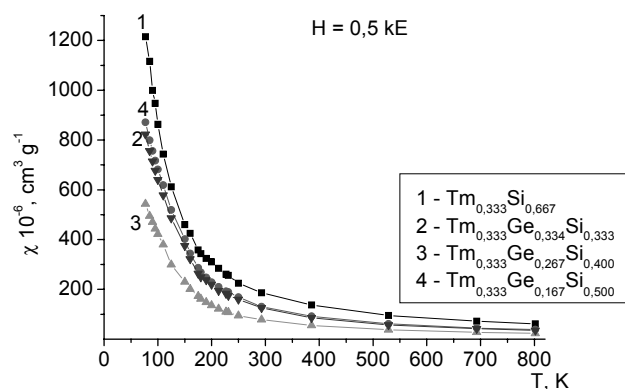


Рис. 6. Температурні залежності магнітної сприйнятливості сплавів твердого розчину  $\text{Tm}(\text{Si}, \text{Ge})_{1,67}$  в магнітному полі  $H = 0,5 \text{ кЕ}$ .

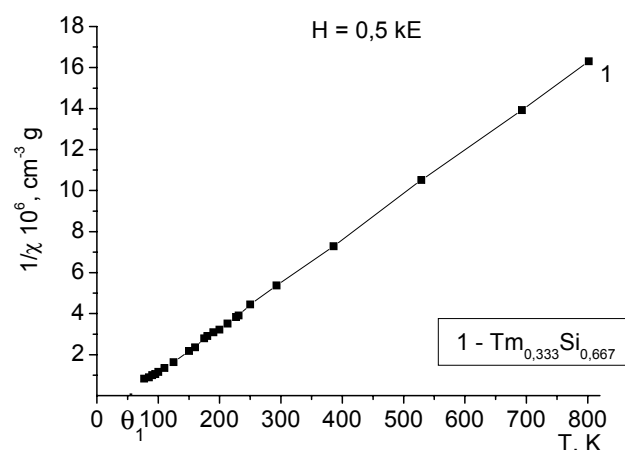


Рис. 7. Температурна залежність оберненої величини магнітної сприйнятливості сполуки  $\text{TmSi}_{1,67}$  у магнітному полі  $H = 0,5 \text{ кЕ}$ .

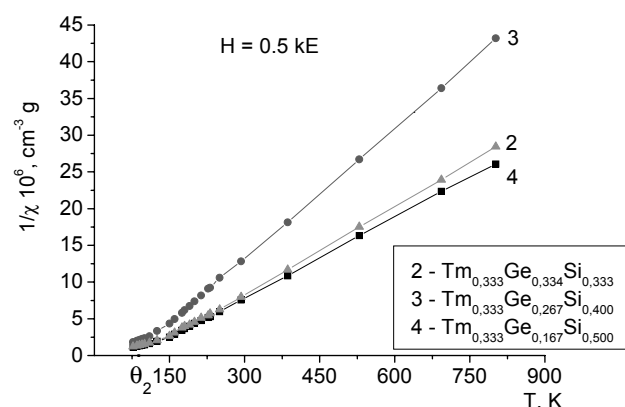


Рис. 8. Температурна залежність оберненої величини магнітної сприйнятливості сплавів твердого розчину  $\text{Tm}(\text{Si}, \text{Ge})_{1,67}$  у магнітному полі  $H = 0,5 \text{ кЕ}$ .

Визначено параметри Вейсса  $\Theta_1$  — для подвійного зразка і  $\Theta_2$  — для потрійних сплавів.

Використавши одержані значення  $\Theta$ , об-

числено ефективний магнітний момент на формульну одиницю:

$$\mu_{\text{eff}}^i / f.u. = 2.828 \cdot \sqrt{\chi^i M (T^i - \Theta)}. \quad (2)$$

На рис.9 представлено температурні залежності ефективного магнітного моменту подвійного і потрійних сплавів твердого розчину в магнітному полі  $H = 0,5 \text{ кЕ}$ .

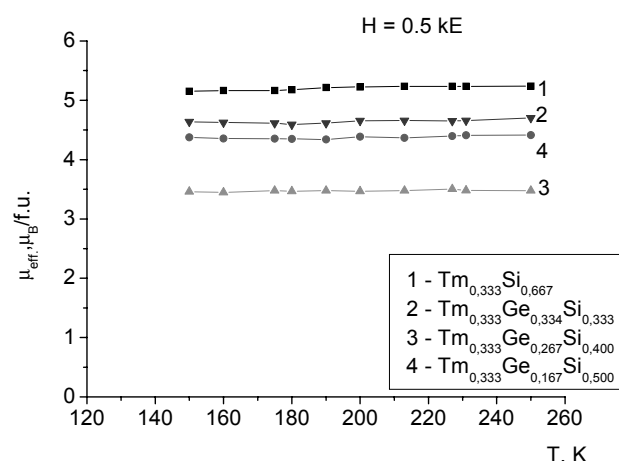


Рис. 9. Температурна залежність ефективного магнітного моменту сплавів твердого розчину  $\text{Tm}(\text{Si}, \text{Ge})_{1,67}$  в магнітному полі  $H = 0,5 \text{ кЕ}$ .

Константу Кюрі  $C$  визначено за формулою:

$$C = \mu_{\text{eff}}^2 N_A / 3k, \quad (3)$$

де  $\mu_{\text{eff}}$  — ефективний магнітний момент на формульну одиницю;  $N_A$  — число Авогадро;  $k$  — стала Больцмана [14].

Експериментально одержані та розраховані параметри подано в таблиці 2.

#### 4. Висновки

Кристалічна структура досліджуваних сплавів у системі  $\text{Tm-Ge-Si}$  належить до гексагонального типу  $\text{AlB}_2$ , в якій для атомів малих розмірів ( $\text{Si}, \text{Ge}$ ) характерна тригонально-призматична координація.

Результати вимірювань МС в залежності від температури (80-800 К) та напруженості магнітного поля (0,5-4,0 кЕ) свідчать про наявність парамагнітної складової, яка добре описується законом Кюрі-Вейсса і не залежить від напруженості магнітного поля.

Визначено магнітні характеристики досліджуваних матеріалів, а саме параметри Вейсса для подвійної сполуки  $\text{TmSi}_{1,67}$  ( $\Theta_1 = 50 \text{ К}$ ) і зразків потрійної системи  $\text{Tm}(\text{Si}, \text{Ge})_{1,67}$ .

Таблиця 2

Магнітні характеристики сплавів твердого розчину  $\text{Tm}(\text{Si}, \text{Ge})_{1,67}$ .

Сплав	Параметр Вейсса ( $\Theta$ ), К	$\mu_{\text{eff}}, \mu_B / f.u.$	Константа Кюри-Вейсса (C), $\text{см}^3 \text{К/г}$
$\text{Tm}_{0,333}\text{Si}_{0,667}$	50	5,20	3,38
$\text{Tm}_{0,333}\text{Ge}_{0,334}\text{Si}_{0,333}$	79	4,59	2,63
$\text{Tm}_{0,333}\text{Ge}_{0,267}\text{Si}_{0,40}$	79	3,45	1,49
$\text{Tm}_{0,333}\text{Ge}_{0,167}\text{Si}_{0,50}$	79	4,31	2,32

( $\Theta_2 = 79 \text{ K}$ ), ефективні магнітні моменти на формульну одиницю ( $\mu_{\text{eff}}, \mu_B / f.u.$ ) та константи Кюри (C). На основі отриманих результатів можна припустити, що існує слабка феромагнітна взаємодія між магнітними атомами Тулію, в користь чого свідчать додатні значення параметрів Вейсса ( $\Theta_1 > 0$  і  $\Theta_2 > 0$ ). Також виявлено, що для подвійного зразка  $\text{Tm}_{0,333}\text{Si}_{0,667}$  і для потрійних зразків  $\text{Tm}_{0,333}\text{Si}_{0,500}\text{Ge}_{0,167}$ ,  $\text{Tm}_{0,333}\text{Si}_{0,400}\text{Ge}_{0,267}$ ,  $\text{Tm}_{0,333}\text{Si}_{0,333}\text{Ge}_{0,334}$  в області 80-150 K на залежностях  $\chi^{-1}(T)$  має місце відхилення від прямолінійності. Згідно з [14] це відхилення може бути пов'язане із впливом кристалічного поля сусідніх йонів на орбітальний момент 4f-електронів.

### Література

1. Муратова Л.А. Тройные системы (иттрий, лантан, церий, празеодим, гадолиний)-германий-кремний. Автореф. дисс. канд. хим. наук: 02.00.01 / Львов. гос. ун-т. — Львов, 1976. — 24 с.
2. Бодак О.И., Муратова Л.А. Система La-Ge-Si в области 0.5-1.0 ат. частки La // Вісн. Львів. ун-ту, Сер. хім. — 1981. — Вип. 23. — С. 67-69.
3. Бодак О.И., Муратова Л.А., Мокра И.Р. Тройные системы Y-{Ni, Co, Mo, Ce}-Si и Y-Ge-Si // В кн.: Структура фаз, фазовые превращения и диаграммы состояния систем. — М.: Наука, 1974. — С. 182-186.
4. Бодак О.И., Муратова Л.А. Система церий — германий — кремний в области 0-0.420 атомных долей церия // Вестн. Львов. ун-та, Сер. хім. — 1979. — Вып. 21. — С. 55-57.
5. Okamoto H. Desk Handbook: Phase Diagrams for Binary Alloys. — Materials Park (OH): American Society for Metals, 2000. — 828 p.
6. Schwarzenbach D. LATCON: Refine Lattice Parameters. — Lausanne, Switzerland: University of Lausanne, 1966.
7. Young R.A., Larson A.C., Paiva-Santos C.O. Rietveld Analysis of X-Ray and Neutron Powder Diffraction Patterns. — Atlanta, GA: School of Physics, Georgia Institute of Technology, 1998.
8. Kraus W., Nolze G. PowderCell for Windows. — Berlin, Germany: Federal Institute for Materials Research and Testing, 1999.
9. Parthé E., Gelato L., Chabot B., Penzo M., Cenxual K., Gladyshevskii R. TYPX. Standardized Data and Crystal Chemical Characterization of Inorganic Structure Types. — Heidelberg: Springer-Verlag, 1993. — Vol. 1-4. — 1596 p.
10. Villars P., Cenxual K., Daams J.L.C., Hulliger F., Okamoto H., Osaki K., Prince A., Iwata S. // Pauling File. Inorganic Materials Database and Design System. Binaries Edition. — Bonn (Germany): Crystal Impact (Distributor), 2001.
11. Цмоць В.М., Паньків І.С., Паньків Л.І., Павловський Ю.В., Петренко В.В., Кавецький Т.С., Лабовка Д.В., Лучкевич М.М., Охримович Р.В., Салань В.П., Цюпер М.В. Пристрій для вимірювання магнітної сприйнятливості матеріалів. — Патент України №77284 (Бюл. № 11, 15.11.2006).
12. Bunzli J.-C. G. Comment of the Use of  $\text{HgCo}(\text{NCS})_4$  as Susceptibility Standard // Inorg. Chim. Acta. — 1979. — Vol. 36. — P. 413-414.
13. Крипкевич П.И. Структурные типы интерметаллических соединений. — М.: Наука, 1977. — 288 с.
14. Вонсовский С.В. Магнетизм. — М.: Наука, 1971. — 1031 с.