

ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$

INVESTIGATION OF KINETIC CHARACTERISTICS OF SENSITIVE ELEMENTS OF THERMOCONVERTERS BASED ON $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$

*Крайовський В. Я., канд. техн. наук, доцент, Рокоманюк М. В., пров. спеціаліст,
Ромака В. А., д-р техн. наук, проф.*

*Національний університет “Львівська політехніка”, Україна,
Стадник Ю. В., канд. хім. наук, пров. наук. співр., Ромака Л. П., канд. хім. наук,
пров. наук. співр., Горинь А. М., канд. хім. наук, ст. наук. співр.*

*Львівський національний університет ім. І. Франка, Україна
e-mail: volodymyr.kraiovskiy@gmail.com*

*Volodymyr Krayovskyy, Ph. D., As.-Prof., Mariya Rokomanyu, Senior Specialist,
Volodymyr Romaka, Dr. Sc., Prof.*

Lviv Polytechnic National University, Ukraine

*Yuriy Stadnyk, Ph.D., Senior Scientist, Lyubov Romaka, Ph.D., Senior Scientist,
Andriy Horyn, Ph. D., Senior Research,*

*Ivan Franko National University of Lviv, Ukraine
e-mail: volodymyr.kraiovskiy@gmail.com*

<https://doi.org/10.23939/istcmtn2019.03>.

Анотація. Виконано математичне моделювання та експериментальні вимірювання кінетичних та енергетичних характеристик чутливих елементів термоперетворювачів на основі термометричного матеріалу $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ у діапазоні температур 80–400 К. Попередні дослідження електрофізичних, енергетичних та структурних властивостей термометричних матеріалів, отриманих легуванням напівгейслерової фази $TiCoSb$ атомами Ni та V , відповідно, показали, що вони володіють стабільними та відтворюваними характеристиками у температурному діапазоні 4,2–1000 К. Встановлено, що результати моделювання термометричних характеристик чутливих елементів на основі $TiCo_{1-x}Ni_xSb$ та $Ti_{1-x}V_xCoSb$ не узгоджувалися з результатами експериментальних вимірювань, що унеможливило їхнє використання для виготовлення чутливих елементів термометрів опору та термоелектричних перетворювачів. Моделювання електронної структури термометричних матеріалів $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ методом функцій Гріна (метод Корінґи–Кона–Ростокера (KKR)) у наближенні когерентного потенціалу (Coherent Potential Approximation) та локальної густини (Local Density Approximation) з використанням ліцензованого програмного забезпечення AkaiKKR та SPR-KKR для обмінно-кореляційного потенціалу з параметризацією Moruzzi-Janak-Williams показало, що заміщення атомів Ti на Mo генерує у кристалі структурні дефекти донорної природи (у Mo більше 3d-електронів, ніж у Ti), а в забороненій зоні поблизу зони провідності ε_C утворюється домішковий донорний рівень (зона) e_D^2 . Експериментальні вимірювання електрокінетичних характеристик термометричних матеріалів $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ встановили наявність високотемпературних активаційних ділянок на залежностях питомого опору $\ln(\rho(1/T))$, що вказує на розташування рівня Фермі ε_F у забороненій зоні напівпровідника, а це можливо за умови генерування акцепторів, які захоплюють вільні електрони, зменшуючи їхню концентрацію, та гальмують рух рівня Фермі ε_F до рівня протікання зони провідності ε_C . Отже, легування сполуки $TiCoSb$ домішкою Mo призводить до генерування у кристалі структурних дефектів акцепторної та донорної природи. Встановлено механізми електропровідності чутливих елементів термоперетворювачів.

Ключові слова: електронна структура, електроопір, коефіцієнт термо-ЕРС.

Abstract. Mathematical modeling and experimental measurements of the kinetic and energy characteristics of the sensitive elements of thermo converters based on the thermometric material $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ in the temperature range 80–400 K was carried out. Previous studies of the electrophysical, energetic, and structural properties of thermometric materials obtained by doping the $TiCoSb$ semi-Heisler phase with Ni and V atoms respectively have shown that they are inherent in the stable and reproducible characteristics at 4.2–1000 K. It was revealed that the results of modeling the thermometric characteristics of the sensitive elements based on $TiCo_{1-x}Ni_xSb$ and $Ti_{1-x}V_xCoSb$ did not agree with the experimental results. This made impossible to use the mentioned materials for the manufacturing the sensitive elements of resistance thermometers and thermoelectric transducers. Modeling of Electronic Structure of $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ Thermometric Material with help of The Korringa–Kohn–Rostoker (KKR) Green Function Method in Coherent Potential Approximation and Local Density Approximation using AkaiKKR and SPR-KKR Software of the exchange-correlation potential with the parameterization of Moruzzi-Janak-Williams have envisaged that the substitution of Ti at Mo generates structural defects of the donor nature in the crystal (Mo has more 3d electrons than in Ti), and in the bandgap near the conduction band ε_C impurity donor level (zone) e_D^2 . Measurements of the electrokinetic characteristics of $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$

thermometric materials determined the presence of high-temperature activation sites on the specific resistance of $\ln(\rho(1/T))$, indicating the location of the Fermi level ϵ_F in the Forbidden Zone of a Semiconductor, which is possible under the condition of generating acceptors that capture free electrons, reducing their concentration, and slowing the movement of the Fermi level to the level of the conductivity zone. Thus, doping the TiCoSb compound with the Mo admixture produces the generation of structural defects of the acceptor and donor natures in the crystal. Mechanisms of electrical conductivity of sensing elements of thermoconverters are established.

Key words: Electronic structure, Resistivity, Thermo-power coefficient.

Вступ

Відомо, що температурна та часова стабільність характеристик засобів вимірювання температури визначається стабільністю та відтворюваністю характеристик матеріалу чутливого елемента перетворювача [1]. У роботах [2] досліджено електрофізичні, енергетичні та структурні властивості термометричних матеріалів, отриманих легуванням напівгейслерової фази TiCoSb атомами Ni та V, відповідно. Отримані термометричні матеріали $\text{TiCo}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}$ та $\text{Ti}_{1-x}\text{V}_x\text{CoSb}$ володіли стабільними та відтворюваними характеристиками у температурному діапазоні 4,2–1000 К. Однак під час досліджень виявилось, що результати моделювання термометричних характеристик чутливих елементів на основі $\text{TiCo}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}$ та $\text{Ti}_{1-x}\text{V}_x\text{CoSb}$ не узгоджувалися з результатами експериментальних вимірювань, що унеможливило їхнє використання для виготовлення чутливих елементів термометрів опору та термоелектричних перетворювачів.

Запропонована робота є розвитком досліджень [2] та одночасно першим кроком комплексного дослідження механізмів і умов входження домішкових атомів різного типу у матрицю напівгейслерової фази TiCoSb з метою з'ясування придатності цього матеріалу для отримання лінійки чутливих елементів термоперетворювачів електрорезистивних та термоелектричних термометрів. У цій роботі наведено результати моделювання електронної структури та кінетичних характеристик чутливих елементів на основі термометричного матеріалу $\text{Ti}_{1-x}\text{Mo}_x\text{CoSb}$ для упорядкованого варіанта його структури, а також результати експериментальних вимірювань їхніх кінетичних характеристик.

Недоліки

У [2] встановлено, що характеристики чутливих елементів термоперетворювачів на основі термометричних матеріалів $\text{TiCo}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}$ та $\text{Ti}_{1-x}\text{V}_x\text{CoSb}$ не узгоджувалися з результатами експериментальних вимірювань.

Мета роботи

Дослідження умов отримання термометричних матеріалів для виготовлення чутливих елементів термоперетворювачів із максимальною чутливістю у температурному діапазоні 80–1070 К.

1. Методики досліджень

Термометричні матеріали $\text{Ti}_{1-x}\text{Mo}_x\text{CoSb}$ синтезовано у лабораторії Інституту фізичної хімії Віденського університету. Методом рентгеноструктурного аналізу (метод порошку) отримано масиви даних (дифрактометр Guinier–Huber image plate system, $\text{CuK}\alpha_1$) та їхній основі розраховано структурні характеристики. Хімічний та фазовий склад зразків контролювали за допомогою мікрозондового аналізатора (EPMA, energy-dispersive X-ray analyzer). Розрахунки електронної структури виконано методом функцій Гріна (метод Корінгі–Кона–Ростокера (KKR)) у наближенні когерентного потенціалу (Coherent Potential Approximation) та локальної густини (Local Density Approximation) із використанням ліцензованого програмного забезпечення AkaiKKR та SPR-KKR для обмінно-кореляційного потенціалу із параметризацією Moruzzi–Janak–Williams [3]. Зону Бріллюена розділили на 1000 k -точок, які використовували для моделювання енергетичних характеристик розрахунком DOS. Ширина енергетичного вікна становила 22 еВ, її вибирали так, щоб захопити всі напівостовні стани p -елементів. Положення рівня Фермі ϵ_F визначено з точністю ± 8 меВ. Температурні та концентраційні залежності питомого електроопору (ρ) та коефіцієнта термо-ЕРС (α) відносно міді вимірювали у діапазоні температур $T = 80\text{--}400$ К у зразках складів $\text{Ti}_{1-x}\text{Mo}_x\text{CoSb}$, $x = 0,01\text{--}0,10$.

2. Моделювання електронної структури $\text{Ti}_{1-x}\text{Mo}_x\text{CoSb}$

Для прогнозування поведінки енергії Фермі ϵ_F , ширини забороненої зони ϵ_g , кінетичних характеристик термометричного матеріалу $\text{Ti}_{1-x}\text{Mo}_x\text{CoSb}$ здійснено розрахунок розподілу густини електронних станів (DOS) (рис. 1) для упорядкованого варіанта його структури, в якій відбувається заміщення у позиції $4a$ атомів Ti на Mo. З урахуванням електронної будови атомів Ti ($3d^24s^2$) та Mo ($4d^55s^1$) можемо прогнозувати, що заміщення атомів Ti на Mo генерує у кристалі структурні дефекти донорної природи (у Mo більше $3d$ -електронів, ніж у Ti), а в забороненій зоні поблизу зони провідності ϵ_C утворюється домішковий донорний рівень (зона e_D^2).

Оскільки у напівпровіднику TiCoSb рівень Фермі ε_F розташований поблизу середини забороненої зони ε_g , то за найменших концентрацій донорної домішки Mo (рівень Фермі ε_F $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ починає дрейфувати до зони провідності ε_C , яку перетне за $x \approx 0,03$. Водночас відбудеться перехід провідності діелектрик-метал, що є переходом Андерсона, а електрони в $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ будуть основними носіями електрики. За цих умов у експерименті ми повинні отримати від'ємні значення коефіцієнта термо-ЕРС $\alpha(x)$.

Розрахунок розподілу густини електронних станів DOS для упорядкованої структури $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ дає змогу моделювати поведінку питомого опору $\rho(x, T)$, коефіцієнта термо-ЕРС $\alpha(x, T)$,

коефіцієнта теплопровідності $\kappa(x, T)$ тощо. На рис. 2, як приклад, наведено результати моделювання поведінки коефіцієнта термо-ЕРС $\alpha(x, T)$ $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ з використанням відомого рівняння (1):

$$\alpha = \frac{2p^2 k^2 T}{3 e} \left(\frac{d}{de} \ln g(\varepsilon_F) \right) \quad (1)$$

де $g(\varepsilon_F)$ – густина електронних станів на рівні Фермі ε_F . Результати моделювання коефіцієнта термо-ЕРС $\alpha(x, T)$ $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ свідчать про стрімке зменшення значень зі зростанням концентрації донорної домішки. Результати кінетичних та енергетичних досліджень $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ показують відповідність цих розрахунків процесам у термоелектричному матеріалі.

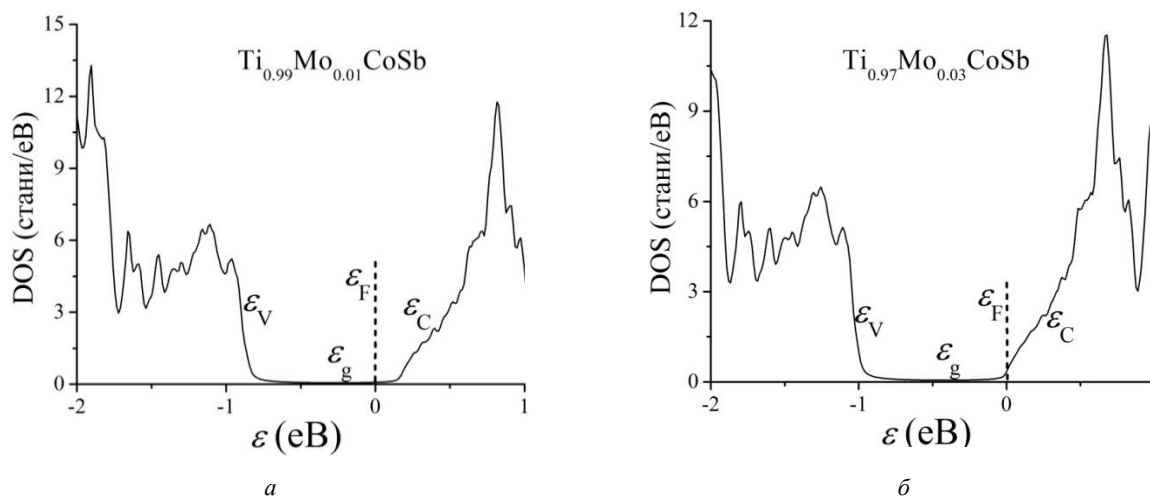


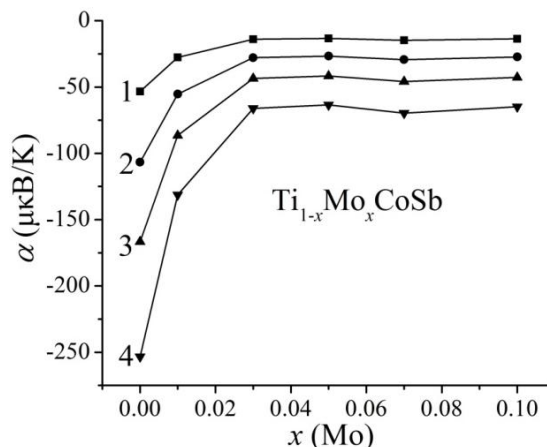
Рис. 1. Моделювання електронної структури термометричних матеріалів $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$

Fig. 1. Modeling of electronic structure of thermometric materials $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$

Рис. 2. Моделювання поведінки коефіцієнта термо-ЕРС чутливого елемента $Ti_{1-x}Mo_xCoSb-Cu$ за температур: 1 – $T=80$ K; 2 – $T=250$ K; 3 – $T=300$ K; 4 – $T=380$ K

Fig. 2. Modeling the behavior of the thermo-EMF coefficient of $Ti_{1-x}Mo_xCoSb-Cu$ sensitive element at temperatures:

1 – $T = 80$ K; 2 – $T = 250$ K; 3 – $T = 300$ K; 4 – $T = 380$ K



3. Дослідження електродинамічних та енергетичних характеристик $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$

Температурні та концентраційні залежності питомого опору $\rho(T, x)$ та коефіцієнта термо-ЕРС $\alpha(T, x)$ $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ наведено на рис. 3 і 4. Залежності $\ln(\rho(1/T))$ та $\alpha(1/T)$ $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ типові для сильно легованих та компенсованих напівпровідників (СЛКН), а наявні активаційні ділянки вказують на кілька механізмів перенесення заряду. Залежності $\ln(\rho(1/T))$ $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ описуються відомим співвідношенням (2), а температурні залежності коефіцієнта термо-ЕРС $\alpha(1/T)$ – залежністю (3):

$$r(T) = r_{01} \exp\left(\frac{e_1^r}{k_B T}\right) + r_{03} \exp\left(\frac{e_3^r}{k_B T}\right), \quad (2)$$

де e_1^r – енергія активації із рівня Фермі ϵ_F у зону неперервних енергій; e_3^r – енергія активації стрибкової провідності по локалізованих станах із енергіями, близькими до енергії Фермі ϵ_F . На основі високотемпературних активаційних ділянок залежностей $\ln(\rho(1/T))$ з використанням (2) розраховано енергію активації електронів з рівня Фермі ϵ_F у зону провідності, що дає змогу визначити положення рівня Фермі ϵ_F у забороненій зоні напівпровідника $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$, а також значення енергії стрибкової провідності e_3^r . А з високо- та низькотемпературних ділянок залежностей коефіцієнта термо-ЕРС $\alpha(1/T)$, використовуючи рівняння (3), ми обчислили енергії активації e_1^a та e_3^a , значення яких пропорційні до амплітуди модуляції зон неперервних енергій та дрібномасштабних флуктуацій СЛКН, відповідно:

$$a = \left(\frac{k_B}{e} \left(\frac{e_i^a}{k_B T} \right) - g + 1 \right), \quad (3)$$

де γ – параметр, близький до 1.

Легування напівгейслерової фази $TiCoSb$ атомами Mo приводить до зміни поведінки температурних та концентраційних залежностей питомого опору $\rho(x, T)$ та коефіцієнта термо-ЕРС $\alpha(x, T)$ (рис. 3 і 4). За результатами розрахунків DOS ми прогнозували, що заміщення атомів Ti на Mo генеруватиме у $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ структурні дефекти донорної природи, чому відповідатимуть від'ємні значення коефіцієнта термо-ЕРС $\alpha(x, T)$. Справді, значення коефіцієнта термо-ЕРС $\alpha(x, T)$ $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ за всіх концентрацій та температур залишаються від'ємними. Окрім того, генерування донорів мало би привести до зростання концентрації вільних електронів, що спричинить зменшення значень питомого опору $\rho(x, T)$.

Абсолютно неочікуваним виявилось збереження високотемпературних активаційних ділянок на залежностях $\ln(\rho(1/T))$ для всіх досліджених зразків $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ (рис. 3). Наявність високотемпературної активації на залежностях $\ln(\rho(1/T))$ вказує на розташування рівня Фермі ϵ_F у забороненій зоні. Своєю чергою, від'ємні значення коефіцієнта

термо-ЕРС $\alpha(x, T)$ $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ свідчать, що рівень Фермі ϵ_F лежить у забороненій зоні біля зони провідності ϵ_C . Отриманий експериментальний результат не узгоджується з результатами моделювання енергетичних характеристик $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ для упорядкованого варіанта структури, в якій відбувається заміщення у позиції $4a$ атомів Ti на Mo , що генерує структурні дефекти донорної природи. Адаже згідно з розрахунками (рис. 1) вже за концентрацій $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$, $x \geq 0,03$, мали перетнутися рівні Фермі ϵ_F та протікання зони провідності ϵ_C , що повинно привести до металізації провідності.

Неочікуваною також виявилася зміна значень питомого опору $\rho(x, T)$ $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ (рис. 4). Як бачимо, на ділянці концентрацій $x=0,01-0,05$ значення питомого опору $\rho(x, T)$ $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ збільшуються. І це при тому, що у кристалі за розрахунками мали би генеруватися донори, що повинно привести до зменшення значень $\rho(x, T)$ через збільшення концентрації вільних електронів у разі наближення рівня Фермі до краю зони провідності ϵ_C . Збільшення значень питомого опору $\rho(x, T)$ $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ можливе лише за умови зменшення концентрації вільних електронів. Це можливо лише у разі генерування у кристалі $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ структурних дефектів акцепторної природи за невідомим досі механізмом.

Отже, наявність високотемпературної активації на залежностях $\ln(\rho(1/T))$ та зростання значень питомого опору $\rho(x, T)$ $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$, зумовлені розташуванням рівня Фермі ϵ_F у забороненій зоні напівпровідника, є свідченням того, що у кристалі, окрім донорів, з'являються дефекти акцепторної природи за невідомим механізмом. Акцептори захоплюють вільні електрони, зменшуючи їхню концентрацію, та гальмують рух рівня Фермі ϵ_F до рівня протікання зони провідності ϵ_C .

Оскільки у зразках $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ відбувається термічний закид електронів з рівня Фермі ϵ_F на рівень протікання зони провідності з енергією активації $e_1^r(x)$, то обчисливши з високотемпературних активаційних ділянок залежностей $\ln(\rho(1/T))$ (рис. 5) значення енергії $e_1^r(x)$, зможемо ідентифікувати характер руху рівня Фермі ϵ_F у забороненій зоні ϵ_g .

На рис. 5 показано зміну значень енергії активації $e_1^r(x)$ термочутливого матеріалу $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$. Уведення у напівгейслерову фазу $TiCoSb$ найменшої в експерименті концентрації донорної домішки Mo прогнозовано змінює положення рівня Фермі ϵ_F , наблизивши його до рівня протікання зони провідності на відстань $e_1^r(x)$ ($x=0,01$)=14,6 меВ. Нагадаємо, що у $TiCoSb$ рівень Фермі ϵ_F розміщений на відстані 106,1 меВ від рівня протікання зони провідності. Однак на ділянці концентрацій $x=0,1 \div 0,05$ рівень Фермі ϵ_F віддаляється від краю зони провідності на відстань 37,4 меВ, вказуючи на появу в кристалі акцепторів невідомої природи.

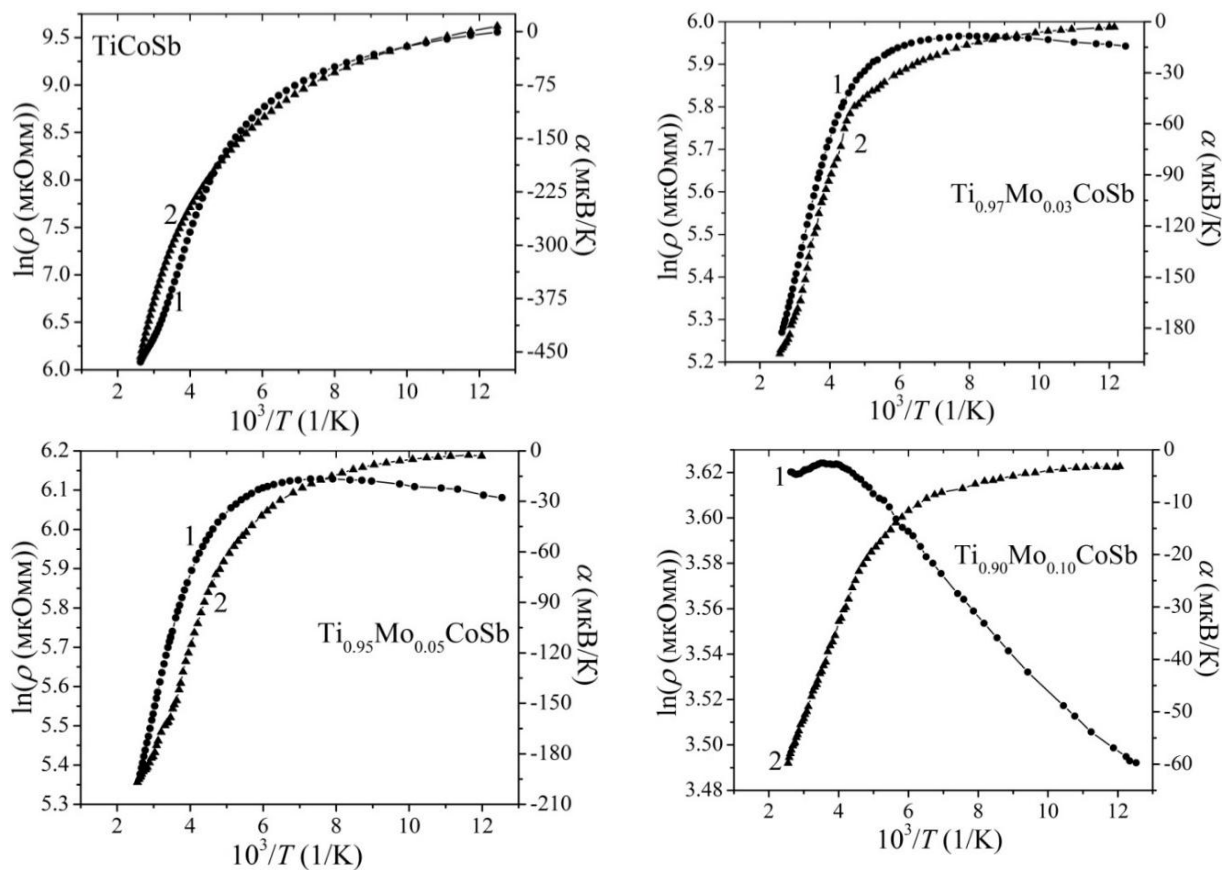


Рис. 3. Температурні залежності питомого опору $\ln \rho(1/T)$ (1) та коефіцієнта термо-ЕРС $\alpha(1/T)$ (2) $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$

Fig. 3. Temperature dependences of resistivity $\ln \rho(1/T)$ (1) and coefficient of thermo-EMF $\alpha(1/T)$ (2) of $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$

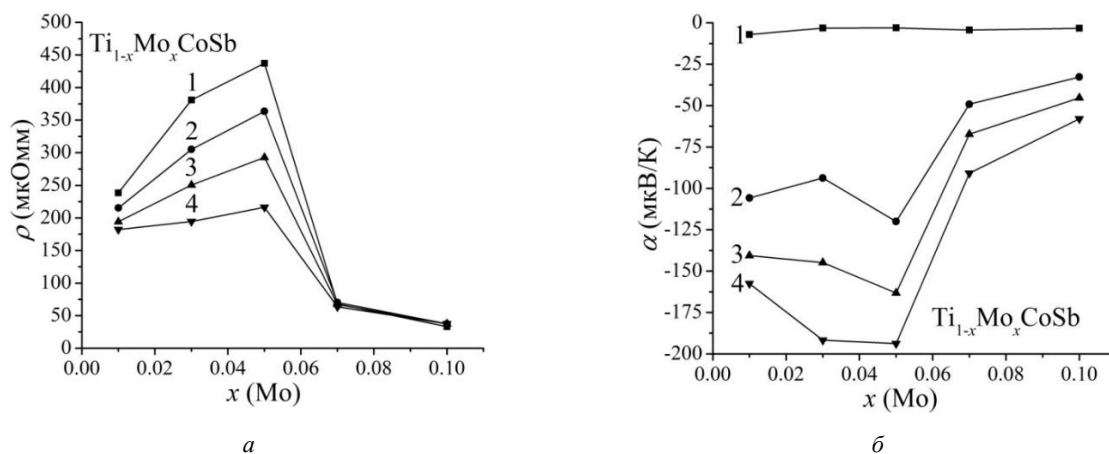


Рис. 4. Зміна значень питомого опору $\rho(x)$ (а) та коефіцієнта термо-ЕРС $\alpha(x)$ (б) $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ за температур: 1 – $T=80$ K; 2 – $T=250$ K; 3 – $T=300$ K; 4 – $T=380$ K

Fig. 4. Change of values of resistivity $\rho(x)$ (a) and coefficient of thermo-EMF $\alpha(x)$ (b) $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ at temperatures: 1 – $T=80$ K; 2 – $T=250$ K; 3 – $T=300$ K; 4 – $T=380$ K

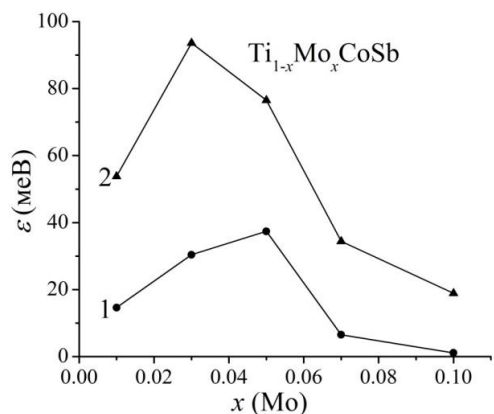


Рис. 5. Зміна значень енергій активації $e_1^r(x)$ (1)

та $e_1^a(x)$ (2) $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$

Fig. 5. Change of activation energies $e_1^r(x)$ (1)

and $e_1^a(x)$ (2) $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$

Кількість атомів Мо, уведених у структуру напівгегслерової фази $TiCoSb$, змінювалася за лінійним законом. За формальними ознаками, якби в $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ відбувалося лише заміщення у позиції 4a атомів Ті на атоми Мо, то генерувалися б лише структурні дефекти донорної природи, концентрація яких збільшувалася б також за лінійним законом. Це зумовило би лінійну зміну швидкості руху рівня Фермі ϵ_F до валентної зони $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$. Однак, навіть за значної концентрації донорної домішки, $N_D^V \approx 1,1 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ для $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$, $x=0,07$, рівень Фермі ϵ_F все ще залишається у забороненій зоні напівпровідника.

Причиною “гальмування” руху рівня Фермі ϵ_F у $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ може бути лише одна обставина – одночасне з донорами генерування акцепторів, які захоплюють вільні електрони, що змінює ступінь компенсації напівпровідника. Для підтвердження цього висновку з активаційних ділянок залежностей $\alpha(1/T)$ обчислено значення енергій активації $e_1^a(x)$ (рис. 5, б), які показують ступінь компенсації $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ (співвідношення іонізованих донорів та акцепторів). З рис. 5, б бачимо, що за незначних концентрацій домішки Мо значення енергії активації $e_1^a(x)$ зростає від $e_1^a(x=0,01)=53,8 \text{ меВ}$ до $e_1^a(x=0,03)=93,6 \text{ меВ}$. Таке зростання значень $e_1^a(x)$ у напівпровіднику електронного типу вказує, що швидкість генерування акцепторів невідомого походження вища, ніж донорів. За ще більших концентрацій домішки Мо, $x>0,03$ відбувається зменшення значень $e_1^a(x)$, що вказує на більшу швидкість генерування донорів, ніж акцепторів.

Висновки

Отриманий експериментальний результат не відповідає висновкам, зробленим на підставі розрахунків розподілу густини електронних станів $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ за умови заміщення у позиції 4a атомів Ті на Мо, що генерує структурні дефекти донорної природи. Очевидно, у матеріалі $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$ відбуваються непрогнозовані структурні зміни, які впливають на електронну структуру та кінетичні властивості. Завдання полягає в ідентифікації цих змін, що дасть змогу прогнозувати характеристики зазначеного матеріалу та чутливих елементів термометрів на його основі.

Подяка

Автори висловлюють вдячність колективу кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету “Львівська політехніка” за надану допомогу та всемірне сприяння у підготовці та виконанні цієї роботи.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність будь-якого фінансового або іншого можливого конфлікту, що стосується роботи.

Література

- [1] S.Yatsyshyn, B. Stadnyk, Ya. Lutsyk, L. Buniak, *Handbook of Thermometry and Nanothermometry*. Barcelona, Spain: IFSA Publishing, 2015.
- [2] V. Romaka, Yu. Stadnyk, L. Akselrud, V. Romaka, D. Frushart, P. Rogl, V. Davydov, Yu. Gorelenko, “Mechanism of Local Amorphization of a Heavily Doped $Ti_{1-x}V_xCoSb$ Intermetallic Semiconductor”, *Semiconductors.*, vol. 42, no. 7, pp. 753–760, 2008.
- [3] V. Moruzzi, J. Janak, A. Williams, *Calculated Electronic Properties of Metals*. NY: Pergamon Press, 1978.

References

- [1] S. Yatsyshyn, B. Stadnyk, Ya. Lutsyk, L. Buniak, *Handbook of Thermometry and Nanothermometry*. Barcelona, Spain: IFSA Publishing, 2015.
- [2] V. Romaka, Yu. Stadnyk, L. Akselrud, V. Romaka, D. Frushart, P. Rogl, V. Davydov, Yu. Gorelenko, “Mechanism of Local Amorphization of a Heavily Doped $Ti_{1-x}V_xCoSb$ Intermetallic Semiconductor”, *Semiconductors.*, vol. 42, no. 7, pp. 753–760, 2008.
- [3] V. Moruzzi, J. Janak, A. Williams, *Calculated Electronic Properties of Metals*. NY: Pergamon Press, 1978.