ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ Ті_{1-х}Мо_хCoSb

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

Крайовський В. Я., канд. техн. наук, доц., 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.kraiovskyi@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.kraiovskyi@gmail.com

https://doi.org/10.23939/istcmtm2019.03.028

Анотація. Виконано математичне моделювання та експериментальні вимірювання кінетичних та енергетичних характеристик чугливих елементів термоперетворювачів на основі термометричного матеріалу Ті_{1-х}Мо_хCoSb 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 TiCo1-xNixSb та Ті_{1-х}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 Ті_{1-х}Мо_хCoSb методом функцій Гріна (метод Корінги-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 обміннокореляційного потенціалу з параметризацією Moruzzi-Janak-Williams показало, що заміщення атомів Ті на Мо генерує у кристалі структурні дефекти донорної природи (у Мо більше Зд-електронів, ніж у Ті), а в забороненій зоні поблизу зони провідності $\varepsilon_{\rm C}$ утворюється домішковий донорний рівень (зона) $\varepsilon_{\rm D}^2$. Експериментальні вимірювання електрокінетичних характеристик термометричних матеріалів Ті_{1-х}Мо_хCoSb встановили наявність високотемпературних активаційних ділянок на залежностях питомого опору $\ln(\rho(1/T))$, що вказує на розташування рівня Фермі $\varepsilon_{\rm F}$ 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 Мо 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 $\varepsilon_{\rm C}$ impurity donor level (zone) $\varepsilon_{\rm D}^2$.

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 thermo converters 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, від-Отримані термометричні повідно. матеріали TiCo_{1-r}Ni_rSb та Ti_{1-r}V_rCoSb володіли стабільними та відтворюваними характеристиками у температурному діапазоні 4,2-1000 К. Однак під час досліджень виявилося, що результати моделювання термометричних характеристик чутливих елементів на основі ТіСо_{1-х}Ni_xSb та Ті_{1-х}V_xCoSb 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 Ti_{1-x}Mo_xCoSb 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 $TiCo_{1-x}Ni_xSb$ та $Ti_{1-x}V_xCoSb$ 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 Ті_{1-х}Мо_хCoSb синтезовано у лабораторії Інституту фізичної хімії Віденського університету. Методом рентгеноструктурного аналізу (метод порошку) отримано масиви даних (дифрактометр Guinier-Huber image plate system, CuKa₁) та їхній основі розраховано структурні характеристики. Хімічний та фазовий склади зразків контролювали за допомогою мікрозондового аналізатора (EPMA, energy-dispersive X-ray analyzer). Розрахунки електронної структури виконано методом функцій Гріна (метод Корінги-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 к-точок, які використовували для моделювання енергетичних характеристик розрахунком DOS. Ширина енергетичного вікна становила 22 еВ, її вибирали так, щоб захопити всі напівостовні стани р-елементів. Положення рівня Фермі є визначено з точністю ±8 меВ. Температурні та концентраційні залежності питомого електроопору (р) та коефіцієнта термо-ЕРС (а) відносно міді вимірювали у діапазоні температур T = 80-400 К у зразках складів $Ti_{1-x}Mo_xCoSb$, x = 0,01-0,10.

2. Моделювання електронної структури Ti_{1-r}Mo_rCoSb

Для прогнозування поведінки енергії Фермі $\varepsilon_{\rm F}$, ширини забороненої зони $\varepsilon_{\rm g}$, кінетичних характеристик термометричного матеріалу Ті_{1-х}Мо_хCoSb здійснено розрахунок розподілу густини електронних станів (DOS) (рис. 1) для упорядкованого варіанта його структури, в якій відбувається заміщення у позиції 4*a* атомів Ті на Мо. З урахуванням електронної будови атомів Ті ($3d^24s^2$) та Мо ($4d^55s^1$) можемо прогнозувати, що заміщення атомів Ті на Мо генерує у кристалі структурні дефекти донорної природи (у Мо більше 3*d*електронів, ніж у Ті), а в забороненій зоні поблизу зони провідності $\varepsilon_{\rm C}$ утворюється домішковий донорний рівень (зона) $\varepsilon_{\rm p}^2$. Оскільки у напівпровіднику ТіСоSb рівень Фермі $\varepsilon_{\rm F}$ розташований поблизу середини забороненої зони $\varepsilon_{\rm g}$, то за найменших концентрацій донорної домішки Мо (рівень Фермі $\varepsilon_{\rm F}$ Ti_{1-x}Mo_xCoSb починає дрейфувати до зони провідності $\varepsilon_{\rm C}$, яку перетне за $x\approx0,03$. 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-EPC $\alpha(x, T)$,

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

$$\alpha = \frac{2\pi^2}{3} \frac{k^2 T}{e} \left(\frac{d}{d\varepsilon} \ln g(\varepsilon_F) \right), \tag{1}$$

де $g(\varepsilon_F)$ – густина електронних станів на рівні Фермі ε_F . Результати моделювання коефіцієнта термо-ЕРС $\alpha(x, T)$ Ті_{1-х}Мо_xCoSb свідчать про стрімке зменшення значень зі зростанням концентрації донорної домішки. Результати кінетичних та енергетичних досліджень Ті_{1-х}Мо_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 Ті_{1-х}Мо_хCoSb-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 електрокінетичних та енергетичних характеристик Ti1-хMoxCoSb

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

$$\rho(T) = \rho_{01} \exp\left(\frac{\varepsilon_1^{\rho}}{k_B T}\right) + \rho_{03} \exp\left(\frac{\varepsilon_3^{\rho}}{k_B T}\right), \qquad (2)$$

де ε_1^{ρ} – енергія активації із рівня Фермі ε_F у зону неперервних енергій; ε_3^{ρ} – енергія активації стрибкової провідності по локалізованих станах із енергіями, близькими до енергії Фермі є_г. На основі високотемпературних активаційних ділянок залежностей $\ln(\rho(1/T))$ з використанням (2) розраховано енергію активації електронів з рівня Фермі є_F у зону провідності, що дає змогу визначити положення рівня Фермі є_г у забороненій зоні напівпровідника Ті_{1-х}Мо_хCoSb, а також значення енергії стрибкової провідності ε_{3}^{ρ} . А з високо- та низькотемпературних ділянок залежностей коефіцієнта термо-EPC a(1/T), використовуючи рівняння (3), ми обчислили енергії активації ε_1^{α} та ε_3^{α} , значення яких пропорційні до амплітуди модуляції зон неперервних енергій та дрібномасштабних флуктуацій СЛКН, відповідно:

$$\alpha = \left(\frac{k_B}{e} \left(\frac{\varepsilon_i^{\alpha}}{k_B T}\right) - \gamma + 1\right),\tag{3}$$

де у – параметр, близький до 1.

Легування напівгейслерової фази TiCoSb атомами Мо приводить до зміни поведінки темконцентраційних залежностей пературних та 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 Ті на Мо генеруватиме у Ті_{1-х}Мо_хCoSb структурні дефекти донорної природи, чому відповідатимуть від'ємні значення коефіцієнта термо-ЕРС а(х, Т). 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 $\alpha(x, T)$ Ті_{1-х}Мо_хСоSb свідчать, що рівень Фермі $\varepsilon_{\rm F}$ лежить у забороненій зоні біля зони провідності $\varepsilon_{\rm C}$. Отриманий експериментальний результат не узгоджується з результатами моделювання енергетичних характеристик Ті_{1-х}Мо_хСоSb для упорядкованого варіанта структури, в якій відбувається заміщення у позиції 4*a* атомів Ті на Мо, що генерує структурні дефекти донорної природи. Адже згідно з розрахунками (рис. 1) вже за концентрацій Ті_{1-х}Mo_xCoSb, $x \ge 0,03$, мали перетнутися рівні Фермі $\varepsilon_{\rm F}$ та протікання зони провідності $\varepsilon_{\rm C}$, що повинно привести до металізації провідності.

Неочікуваною також виявилася зміна значень питомого опору $\rho(x, T)$ Ті_{1-х}Мо_хCoSb (рис. 4). Як бачимо, на ділянці концентрацій x=0,01-0,05 значення питомого опору $\rho(x, T)$ Ті_{1-х}Мо_хCoSb 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 $\rho(x, T)$ Ті_{1-х}Мо_хCoSb можливе лише за умови зменшення концентрації вільних електронів. Це можливо лише у разі генерування у кристалі Ті_{1-х}Мо_хCoSb структурних дефектів акцепторної природи за не відомим досі механізмом.

Отже, наявність високотемпературної активації на залежностях $\ln(\rho(1/T))$ та зростання значень питомого опору $\rho(x, T)$ Ті_{1-х}Мо_хCoSb, 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 Ті_{1-х}Мо_хCoSb відбувається термічний закид електронів з рівня Фермі ε_F на рівень протікання зони провідності з енергією активації $\varepsilon_1^{\rho}(x)$, то обчисливши з високотемпературних активаційних ділянок залежностей $\ln(\rho(1/T))$ (рис. 5) значення енергії $\varepsilon_1^{\rho}(x)$, зможемо ідентифікувати характер руху рівня Фермі ε_F у забороненій зоні ε_{ρ} .

На рис. 5 показано зміну значень енергії активації $\varepsilon_{1}^{\rho}(x)$ термочутливого матеріалу Ti_{1-x}Mo_xCoSb. Уведення у напівгейслерову фазу TiCoSb найменшої в експерименті концентрації донорної домішки Мо прогнозовано змінює положення рівня Фермі $\varepsilon_{\rm F}$, наблизивши його до рівня протікання зони провідності на відстань $\varepsilon_{1}^{\rho}(x)$ (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÷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 $\alpha(1/T)(2)$ Ti1-хMoxCoSb

Fig. 3. Temperature dependences of resistivity $\ln \rho(1/T)(1)$ and coefficient of thermo-EMF α (1/T)(2) of Ti1-xMoxCoSb



Рис. 4. Зміна значень питомого опору $\rho(x)$ (a) 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



and $\varepsilon_1^{\alpha}(x)$ (2) $Ti_{l-x}Mo_xCoSb$

Кількість атомів Мо, уведених у структуру напівгейслерової фази ТіСоSb, змінювалася за лінійним законом. За формальними ознаками, якби в Ті_{1-х}Мо_хСоSb відбувалося лише заміщення у позиції 4*а* 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 Ті_{1-х}Мо_хСоSb. Однак, навіть за значної концентрації донорної домішки, $N_D^V \approx 1,1 \cdot 10^{21}$ см⁻³ для Ті_{1-х}Мо_хСоSb, *х*=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 $\varepsilon_1^{\alpha}(x)$ (рис. 5, б), які показують ступінь компенсації Ті_{1-х}Мо_хCoSb (співвідношення іонізованих донорів та акцепторів). З рис. 5, б бачимо, що за незначних концентрацій домішки Мо значення енергії активації зростає від ε_1^{α} (x=0,01)=53,8 $\varepsilon_{1}^{\alpha}(x)$ меВ до ε_1^{α} (x=0,03)=93,6 меВ. Таке зростання значень ε_1^{α} (x) у напівпровіднику електронного типу провідності вказує, що швидкість генерування акцепторів невідомого походження вища, ніж донорів. За ще більших концентрацій домішки Мо, x>0,03 відбувається зменшення значень $\varepsilon_1^{\alpha}(x)$, 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 4*a* 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 термоперетворювачів на його основі.

Подяка

Автори висловлюють вдячність колективу кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету "Львівська політехніка" за надану допомогу та всемірне сприяння у під-готовці 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 $Ti_{1-x}V_x$ CoSb 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 $Ti_{1-x}V_x$ CoSb 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.