
**ВПЛИВ ЛЕГУВАННЯ ІНТЕРМЕТАЛІЧНОГО
НАПІВПРОВІДНИКА $n\text{-ZrNiSn}$ ДОНОРНОЮ ДОМІШКОЮ Bi
НА КОЕФІЦІЄНТ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ Z^***

*Ромака В.А.^{1,2}, Стадник Ю.В.³, Рогль П.⁴, Ромака В.В.²,
Хліл Е.К.⁵, Лах О.І.⁶, Горинь А.М.³*

(¹Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. Підстригача

НАН України, вул. Наукова, 3-б, Львів, 79060, Україна;

*²Національний університет “Львівська політехніка”,
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна;*

*³Львівський національний університет ім. І. Франка,
вул. Кирила і Мефодія, 6, Львів, 79005, Україна;*

*⁴Інститут фізичної хімії Віденського університету,
Варингерштрассе, 42, Відень, А-1090, Австрія;*

*⁵Інститут Нееля Національного центру наукових досліджень,
просп. де Мартирз, 25, Гренобль, 38042, Франція;*

⁶АТЗТ «НВО «Термоприлад» ім. В.І. Лаха, вул. Наукова, 3, Львів, 79060, Україна)

- Досліджено структурні, енергетичні, електрокінетичні та магнітні характеристики інтерметалічного напівпровідника $n\text{-ZrNiSn}$, сильнолегованого домішкою Bi . Показано, що одержаний термоелектричний матеріал $ZrNiSn_{1-x}Bi_x$ має високу ефективність перетворення теплової енергії в електричну у діапазоні температур $T = 80 \div 400$ К.

Вступ

Зростаючий інтерес до нелегованих та легованих інтерметалічних напівпровідників структурного типу $MgAgAs$ ($ZrNiSn$, $TiNiSn$, $HfNiSn$, $TiCoSb$) зумовлений одночасно високими значеннями їх електропровідності (σ) та коефіцієнта термоЕРС (α), що, в свою чергу, забезпечує високу ефективність перетворення теплової енергії в електричну і робить ці напівпровідники найбільш досліджуваними новими термоелектричними матеріалами [1 – 5]. У запропонованій роботі, продовжуючи дослідження впливу сильного легування ($N_A, N_D \sim 10^{19} \div 10^{21}$ см⁻³) цього класу напівпровідників на їх структурні, енергетичні, електрофізичні та магнітні властивості, визначено умови виникнення максимуму коефіцієнта термоелектричної потужності Z^* ($Z^* = \alpha^2 \cdot \sigma$) у $n\text{-ZrNiSn}$ за легування дононою домішкою Bi . Проаналізовано особливості зміни кристалічної та електронної структур, температурні залежності питомого електроопору, коефіцієнта термоЕРС та магнітної сприйнятливості (χ) напівпровідникового твердого розчину $ZrNiSn_{1-x}Bi_x$ у діапазоні концентрацій домішки Bi , що відповідає складам $x = 0 \div 0.10$. Методики отримання зразків, структурних досліджень, розрахунку зонної структури, кінетичних та магнітних характеристик подано у [4].

Дослідження кристалічної структури $ZrNiSn_{1-x}Bi_x$

Для прецизійного уточнення періодів елементарної комірки $ZrNiSn_{1-x}Bi_x$ і встановлення кристалографічних параметрів – координат атомів, теплових параметрів, зайнятості кристалографічних позицій використовувалися масиви даних, одержані як методами порошку на автоматичному дифрактометрі Guinier-Huber image plate system ($CuK\alpha_1$; $8 \leq 2\theta \leq 100$) за наявності еталону Ge ($a_{Ge} = 0.565791$ нм), так і монокристалу (дифрактометр Enraf-Nonius CAD-4,

MoK_α -випромінювання). Всі розрахунки, пов'язані із розшифруванням та уточненням кристалічної структури, здійснені з використанням пакету програм WinCSD [6]. Фазовий і хімічний склад зразків контролювався за допомогою електронної мікроскопії та мікронзондового аналізу (скануючий електронний мікроскоп JEOL-840A).

Рентгенівські фазовий та структурний аналізи показали, що досліджувані зразки $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$ є однофазними (структурний тип MgAgAs , просторова група ($F\bar{4}3m$): на рентгенівських дифрактограмах відсутні відбиття, які можна було би ідентифікувати з неконтрольованими фазами, а кристалічна структура $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$ упорядкована. Фотографія поверхні зразка $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$ вказує на однорідність отриманих зразків (рис. 1). Експериментальним свідченням того, що у $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$ наявне монотонне та прогнозоване заміщення атомів Sn на атоми Bi служать результати досліджень зміни концентрації атомів Sn (рис. 2).

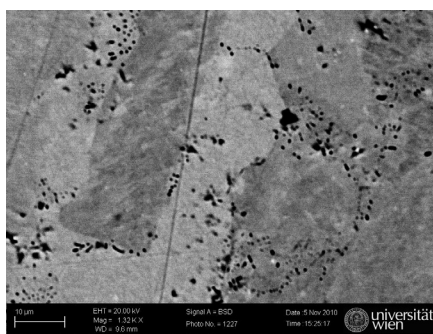


Рис. 1. Поверхня $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$ (збільшення $\times 1320$).

Наші попередні дослідження показали, що кристалічна структура $n\text{-ZrNiSn}$ є неупорядкованою [7], що зумовлене частковим зайняттям атомами меншого розміру Ni ($r_{\text{Ni}} = 0.124$ нм) кристаліграфічної позиції атомів Zr ($r_{\text{Zr}} = 0.160$ нм). У праці [4] показано, що з введенням у структуру сполуки ZrNiSn незначних концентрацій атомів великого розміру, наприклад, рідкісноземельних металів шляхом заміщення атомів Zr чи атомів In та Sb шляхом заміщення атомів Sn , домішкові атоми по – різному впливають на упорядкованість та стабільність кристалічної структури напівпровідника. Не вдаючись у деталі, про що можна почитати у [4], зазначимо, що зі заміщенням незначних концентрацій атомів олова атомами In та Sb не відбувалося упорядкування кристалічної структури напівпровідника.

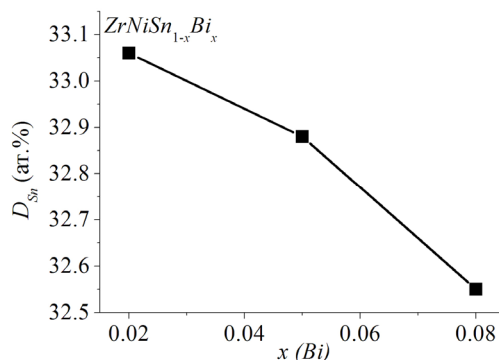


Рис. 2. Зміна значень концентрації атомів Sn у $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$.

З введенням у структуру сполуки ZrNiSn домішкових атомів Bi шляхом заміщення атомів Sn можна було очікувати монотонного збільшення значень параметра елементарної комірки у $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$. Однак, як можемо бачити з рис. 3 а, введення у структуру сполуки ZrNiSn

найменш досяжних концентрацій атомів Bi ($x = 0.005$) призводить до стрімкого зменшення значень параметра елементарної комірки. Такий результат на перший погляд не логічний, адже атомний радіус Bi ($r_{Bi} = 0.170$ нм) є більшим, ніж атомний радіус Sn ($r_{Sn} = 0.158$ нм), що мало би супроводжуватися збільшенням значень $a(x)$. Це у свою чергу робить можливим взяти під сумнів висновок про упорядкованість кристалічної структури зразка $ZrNiSn_{0.995}Bi_{0.005}$. З концентраціями домішки Bi , що відповідає складам $ZrNiSn_{1-x}Bi_x$, $x > 0.005$, значення $a(x)$ прогнозовано збільшуються, а упорядкованість кристалічної структури напівпровідника не викликає сумніву.

Той факт, що значення атомних радіусів елементів Zr , Sn та Bi є близькими, то гіпотетичне зайняття атомами Bi ще і кристалографічних позицій Zr і/або Ni призвело би до збільшення значень $a(x)$ $ZrNiSn_{1-x}Bi_x$, але ніяк не до їх зменшення. Виявлене зменшення значень $a(x)$ для зразка $ZrNiSn_{0.995}Bi_{0.005}$ є можливим лише із зайняттям атомами найменшого розміру Ni кристалографічних позицій Zr і/або Sn . Таке заміщення в обох випадках буде генерувати у кристалі структурні дефекти донорної природи, які відрізняються від таких за заміщення атомів Sn на Bi . У такому разі на температурних залежностях кінетичних коефіцієнтів $ZrNiSn_{1-x}Bi_x$ ми вправі очікувати їх прояву у вигляді кількох активаційних ділянок як результат активації електронів з двох різних домішкових рівнів у зону провідності напівпровідника. Забігаючи наперед, зазначимо, що це припущення знайшло своє експериментальне підтвердження.

Кристалохімічний аналіз також показав, що міжатомні відстані $Ni-Sn(Bi)$, $Zr-Sn(Bi)$ та $Ni-Zr$ менші, ніж сума відповідних атомних радіусів (рис. 3 б). Проте ця зміна відносно нелегованої сполуки незначна. Це пов'язано з тим, що домінуючим чинником, який визначає розчинність Bi у $ZrNiSn$, є різниця в електронній будові атомів Sn та Bi , а саме в конфігурації зовнішніх електронних рівнів. Для атомів Bi на відміну від атомів Sn не характерна sp^3 гібридизація, а валентність IV проявляється у сполуках з великою різницею в електронегативностях. Саме тому заміна Sn на Bi призводить до руйнування структури типу $MgAgAs$, а сама розчинність буде незначною. Враховуючи, що сполука $ZrNiSn$ володіє напівпровідниковими властивостями, то заміщення атомів Sn ($5s^25p^2$) атомами Bi ($6s^26p^3$) супроводжується генерування структурних дефектів донорної природи і металізацією провідності $ZrNiSn_{1-x}Bi_x$.

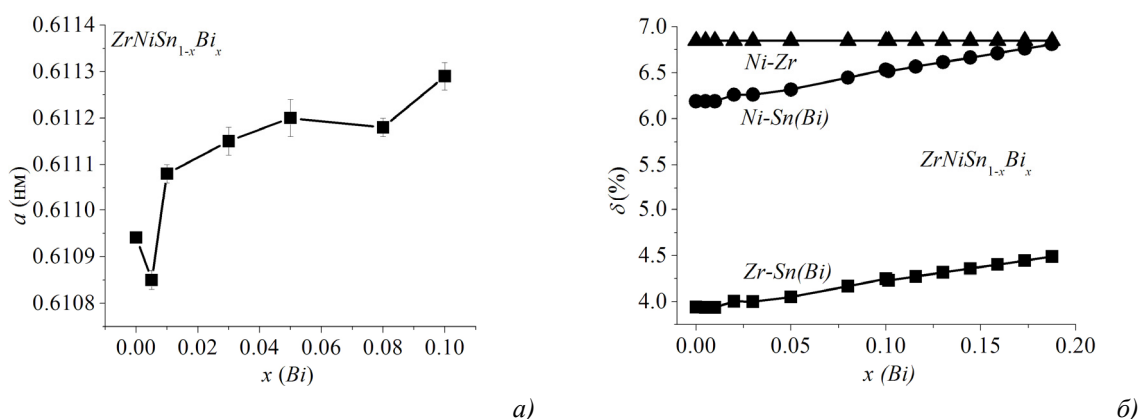


Рис. 3. Зміна значень параметра елементарної комірки $a(x)$ (а) та відносного скорочення міжатомних відстаней $\delta(x)$ (б) у кристалічній структурі $ZrNiSn_{1-x}Bi_x$.

Оскільки атоми Bi займають одну і ту ж кристалографічну позицію, це дає можливість з високою точністю легувати напівпровідник та отримувати матеріал $ZrNiSn_{1-x}Bi_x$ з наперед

заданими характеристиками у діапазоні концентрацій $x = 0 \div 0.10$. Отже, лише на основі структурних досліджень можемо прогнозувати відтворюваність та стабільність властивостей твердого розчину $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$, що дасть можливість керувати основними фізичними закономірностями функцій перетворення термоелектричних матеріалів на основі $n\text{-ZrNiSn}$.

Дослідження розподілу густини станів $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$

Для прогнозування поведінки рівня Фермі, значень електропровідності, коефіцієнта термоЕРС, магнітної сприйнятливості з легуванням інтерметалічного напівпровідника $n\text{-ZrNiSn}$ домішкою Bi здійснений розрахунок розподілу електронної густини (DOS) (метод Коррінгі-Кона-Ростокера (KKR) в наближеннях когерентного потенціалу (CPA) та локальної густини (LDA)). Враховуючи, що легування $n\text{-ZrNiSn}$ домішкою Bi упорядковує кристалічну структуру, розрахунки проведено для випадку упорядкованої кристалічної структури $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$. На рис. 4 наведено результати розрахунків розподілу електронної густини $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$ для концентрації атомів Bi : $x = 0$, $x = 0.005$, $x = 0.05$, $x = 0.10$.

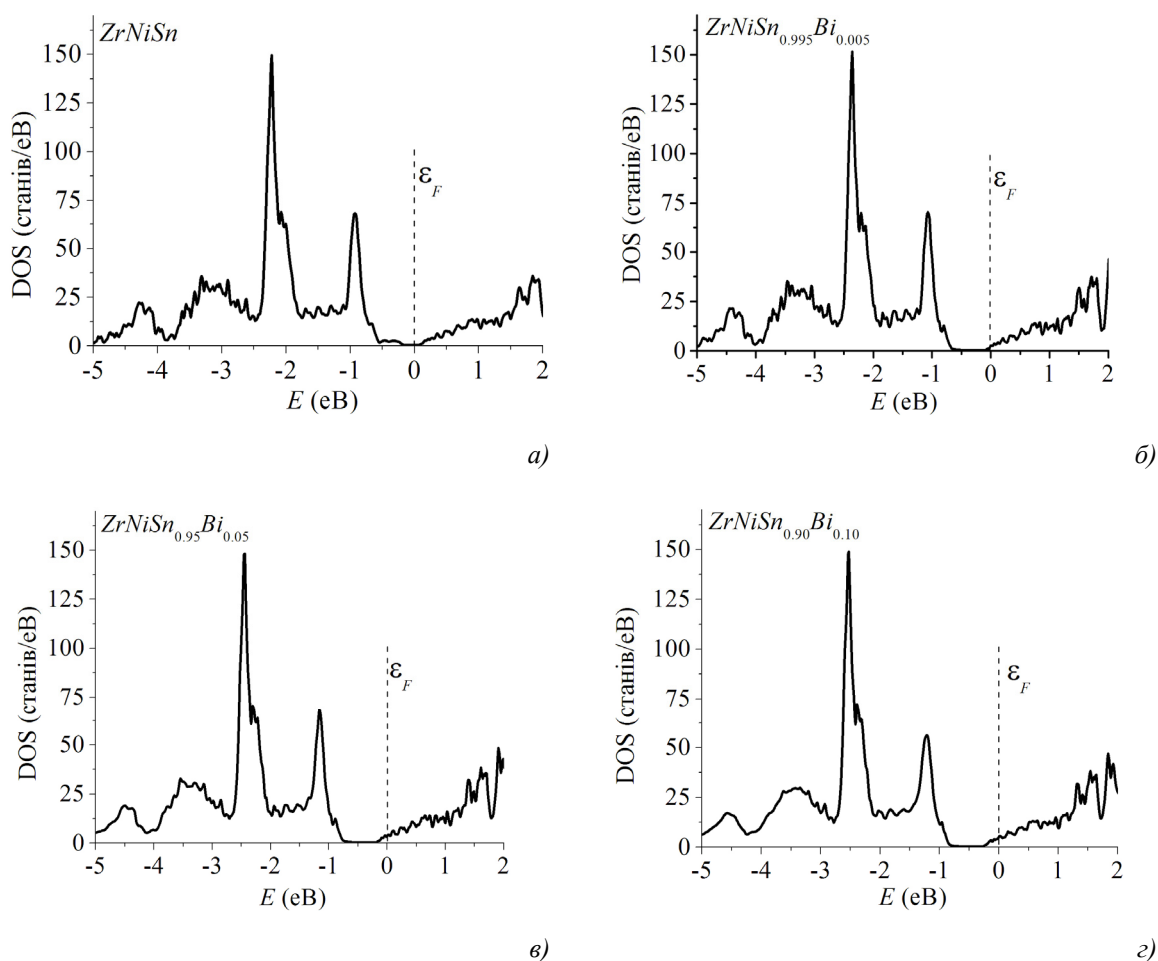


Рис. 4. Розподіл густини станів (DOS) $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$.

Заміна атомів Sn на Bi не змінює спостережуваної форми розподілу електронної густини у відповідності до сильної гібридизації між всіма елементами. Легування $n\text{-ZrNiSn}$ донорною домішкою Bi супроводжується дрейфом рівня Фермі (ϵ_F) у напрямку зони провідності. За певних концентрацій атомів Bi рівень Фермі перетне дно зони провідності й увійде у зону неперервних енергій – відбудеться перехід провідності діелектрик-метал

(перехід Андерсона) [8]. Відповідно до цього значення коефіцієнта термоЕРС $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$ не змінять знака, а електрони залишатимуться основними носіями електричного струму. У цьому контексті необхідно зазначити, що з перетином рівнем Фермі зони провідності $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$ за певної концентрації атомів Bi повинно супроводжуватися виконанням умови отримання максимальних значень коефіцієнта термоелектричної потужності Z^* [5]. Це робить даний матеріал перспективним термоелектричним матеріалом з високою ефективністю перетворення теплової енергії в електричну. В експерименті також має бути зменшення значень енергії активації із рівня Фермі на край рухливості зони провідності у міру наближення рівня Фермі до дна зони провідності.

Експериментальні результати дослідження польових та концентраційних залежностей магнітної сприйнятливості (χ) $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$ підтверджують висловлені вище міркування відносно зміни електронного стану напівпровідника. Відомо, що інтерметалічний напівпровідник $n\text{-ZrNiSn}$ є слабким діаманетиком ($\chi = -0.07 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$). Уведення незначних концентрацій атомів Bi супроводжується зміною магнітного стану – від слабого діаманетика до парамагнетика Паулі (рис. 5). У такому випадку магнітна сприйнятливість $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$ буде визначатися магнітною сприйнятливістю основних носіїв струму, зокрема їхньою концентрацією (n) (для парамагнетика Паулі значення $\chi \sim n$). Враховуючи те, що атоми Bi , займаючи кристалографічну позицію атомів Sn , генерують у кристалі дефекти донорної природи, що призведе до зростання концентрації вільних електронів, то подібним чином повинні змінюватися значення магнітної сприйнятливості. На рис. 5 наведений хід залежності $\chi(x)$, побудований на основі результатів експериментальних досліджень $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$ за $T = 300 \text{ К}$ та напруженості магнітного поля $H = 0.5 \text{ Тл}$, а також теоретично розрахована зміна значень густини станів на рівні Фермі. Можемо переконалися, що дані залежності є подібними. Цей та інші експериментальні результати підтвердили, що запропонована нами модель зміни кристалічної структури $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$ та результати розрахунку розподілу електронної густини адекватно відображають фізичні процеси у речовині.

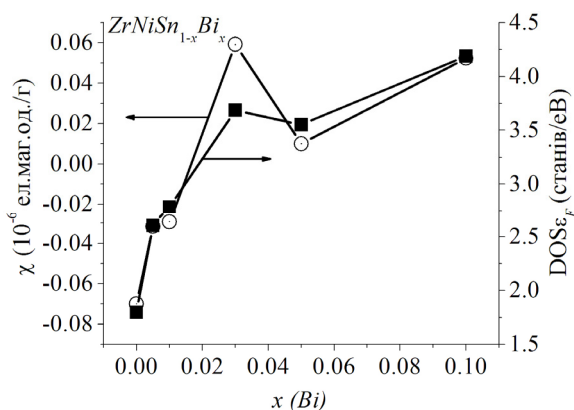


Рис. 5. Зміна значень магнітної сприйнятливості (χ) (експеримент) та густини станів на рівні Фермі ($\text{DOS}\varepsilon_F$) $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$.

Таким чином, здійснені дослідження кристалічної та електронної структур $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$ показали, що легування $n\text{-ZrNiSn}$ домішкою Bi дає можливість прогнозувати отримання термоелектричних матеріалів з наперед заданими властивостями, керувати їх характеристиками, а $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$ може бути перспективним термоелектричним матеріалом зі стабільними характеристиками та привабливим для практичної реалізації.

Дослідження електрокінетичних властивостей $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$

На рис. 6 наведено температурні залежності питомого електроопору та коефіцієнта термоЕРС $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$. Можемо бачити, що зміна значень питомого електроопору для $n\text{-ZrNiSn}$ є типовою для легованих напівпровідників із наявними високо- та низькотемпературною активаційними ділянками. Так, у нелегованому напівпровіднику $n\text{-ZrNiSn}$ рівень Фермі (ϵ_F) розташовується у забороненій зоні на відстані 28.9 меВ від рівня протікання зони провідності [4]. У такому випадку, зі збільшенням температури, при енергіях, які будуть більшими або сумірними значенню глибини залягання рівня Фермі, відбувається перехід електронів із домішкового донорного рівня на край зони провідності. Саме цей факт забезпечує наявність високотемпературної активаційної ділянки на температурній залежності $\ln \rho(1/T)$ $n\text{-ZrNiSn}$ (рис. 6 а) [4]. У той же час наявність низькотемпературної активаційної ділянки засвідчує існування стрибкового механізму переносу заряду по локалізованих станах домішкового донорного рівня [8]. Перетин рівнів Фермі та протікання зони провідності супроводжується значним зменшенням значень питомого електроопору $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$ (рис. 7 а) через збільшення концентрації вільних електронів, наприклад, за 80 К, від значень $\rho(x=0) = 129.1$ мкОм·м до значень $\rho(x=0.01) = 22.49$ мкОм·м.

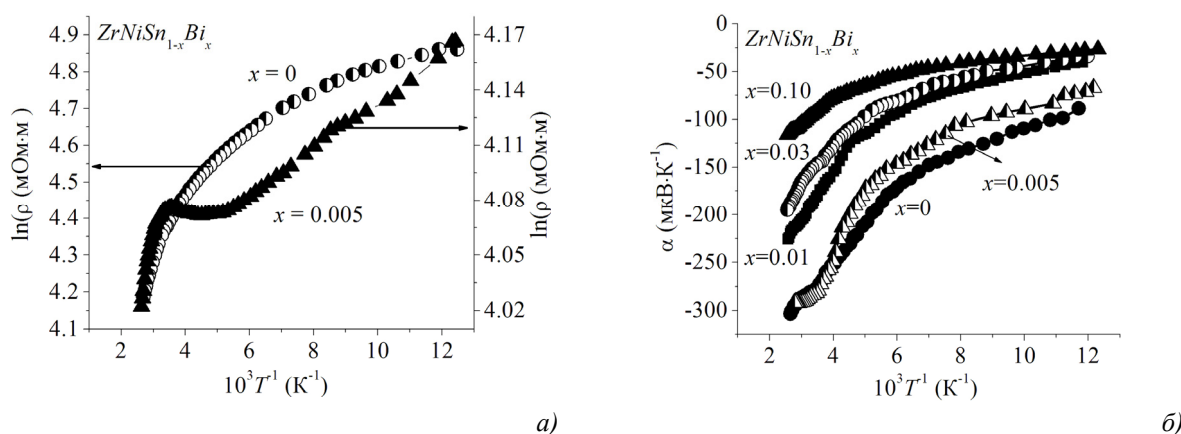


Рис. 6. Температурні залежності питомого електроопору (а) та коефіцієнта термоЕРС (б) $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$.

Уведення найменш досяжної в експерименті концентрації донорної домішки Bi , що відповідає складу $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$, ($x=0.005$), супроводжується радикальною зміною поведінки залежності $\ln \rho(1/T)$ (рис. 1 а), на якій чітко проявляються три області, що засвідчує зміну енергетичних рівнів у забороненій зоні такого напівпровідника. Скажімо, за низьких температур активаційна ділянка виникає внаслідок закиду електронів із дрібного донорного рівня (зони), глибина залягання якої становить $\epsilon_1^p = 1.3$ меВ. Далі за проміжних температурах, на залежності $\ln \rho(1/T)$ спостерігається плато із незначним мінімумом, що свідчить про виснаження дрібного донорного рівня (зони) – всі носії з даного рівня (зони) перейшли у зону провідності. За високих температур активаційна ділянка виникає внаслідок переходу електронів із другого домішкового донорного рівня, глибина залягання якого становить $\epsilon_1^p = 11.5$ меВ. З концентрацією Bi , що відповідає складам $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$, $x \geq 0.01$, активаційні ділянки зникають, провідність набуває металічного характеру, що вказує на перетин рівнем Фермі дна зони провідності – реалізується перехід провідності діелектрик-метал, передбачений розрахунками DOS $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$.

Таким чином, виходячи з наведених експериментальних результатів температурної

залежності питомого опору $\ln \rho(1/T)$ $\text{ZrNiSn}_{0.995}\text{Bi}_{0.005}$, виявлено дві активаційні ділянки як результат активації електронів із двох різних домішкових рівнів. Це припущення виглядає логічним, якщо нагадати результати структурного аналізу зразка $\text{ZrNiSn}_{0.995}\text{Bi}_{0.005}$, який володіє двома різними структурними дефектами донорної природи. Ми вважаємо, що цей структурний феномен проявив себе на температурних залежностях питомого електроопору $\ln \rho(1/T)$ $\text{ZrNiSn}_{0.995}\text{Bi}_{0.005}$.

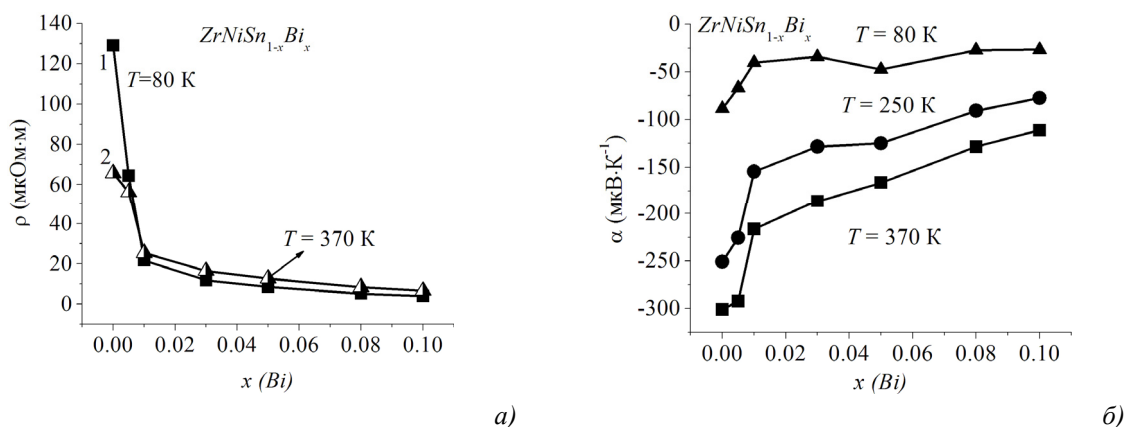


Рис. 7. Концентраційні залежності питомого електроопору (а) та коефіцієнта термоЕРС (б) $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$.

Експериментальним доказом того, що домішка Bi виступає як донор, є від'ємний знак коефіцієнта термоЕРС $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$ (рис. 6 б, 7 б) у всьому дослідженому діапазоні концентрацій. У свою чергу, металізація провідності призведе до зменшення значень коефіцієнта термоЕРС $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$. Можна припустити, що у районі концентрації донорної домішки Bi , $x > 0.01$, яка, з одного боку, забезпечить високі значення електропровідності, а з іншого — значення коефіцієнта термоЕРС будуть ще відносно високі, коефіцієнт термоелектричної потужності $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$ буде мати екстремум. З високотемпературних ділянок залежностей $\alpha(1/T)$ $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$ (рис. 6 б) обчислені значення амплітуди великомасштабної флуктуації зон неперервних енергій (ϵ_1^α) та усередненої амплітуди потенціальної ями дрібномасштабної флуктуації (ϵ_3^α) (рис. 8). Поведінка зміни значень ϵ_1^α та ϵ_3^α є прогнозованою. Справді, введення у напівпровідник електронного типу провідності донорної домішки супроводжується зменшенням ступеня компенсації напівпровідника [4] і, як наслідок, амплітуда флуктуації зменшується. Крім того, має місце кореляція, яка також спостерігалася вище, між значеннями амплітуди великомасштабної флуктуації та глибиною потенціальної ями дрібномасштабної флуктуації: чим менша амплітуда флуктуації, тим менша потенціальна яма дрібномасштабної флуктуації.

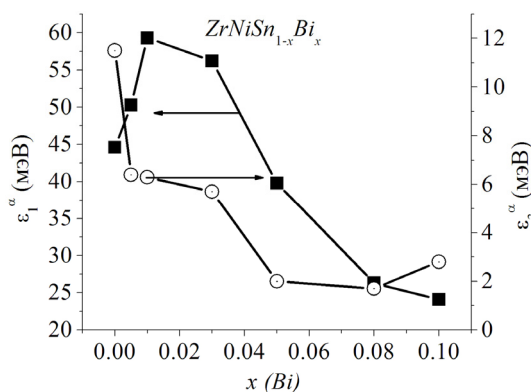


Рис. 8. Зміна значень енергій активації $\epsilon_1^\alpha(x)$ та $\epsilon_3^\alpha(x)$ $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$.

Таким чином, за керування термоелектричними характеристиками $n\text{-ZrNiSn}$ шляхом легування донорною домішкою Bi супроводжується зменшенням ступеня компенсації напівпровідника, дрейфом рівня Фермі у напрямку рівня протікання зони провідності, реалізації переходу провідності діелектрик-метал.

Дослідження коефіцієнта термоелектричної потужності $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$

У праці [5] встановлено, що умовою виникнення максимальних значень коефіцієнта термоелектричної потужності Z^* в інтерметалічних напівпровідниках є фіксація рівня Фермі порогом рухливості однієї із зон неперервних енергій. Беручи до уваги, що $n\text{-ZrNiSn}$ є напівпровідником електронного типу провідності, можемо припустити, що така ситуація буде реалізована введенням у напівпровідник незначної концентрації донорної домішки Bi . На рис. 9 показано концентраційні $Z^*(x)$ та температурні $Z^*(T)$ залежності коефіцієнта термоелектричної потужності $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$. Зроблене вище припущення, що у районі перетину рівнів Фермі та протікання зони провідності $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$ на залежностях коефіцієнта термоелектричної потужності будуть екстремуми, знаходить своє підтвердження. Таким чином, отриманий напівпровідниковий твердий розчин $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$ за своїми характеристиками набагато переважає $n\text{-ZrNiSn}$ і є перспективним термоелектричним матеріалом.

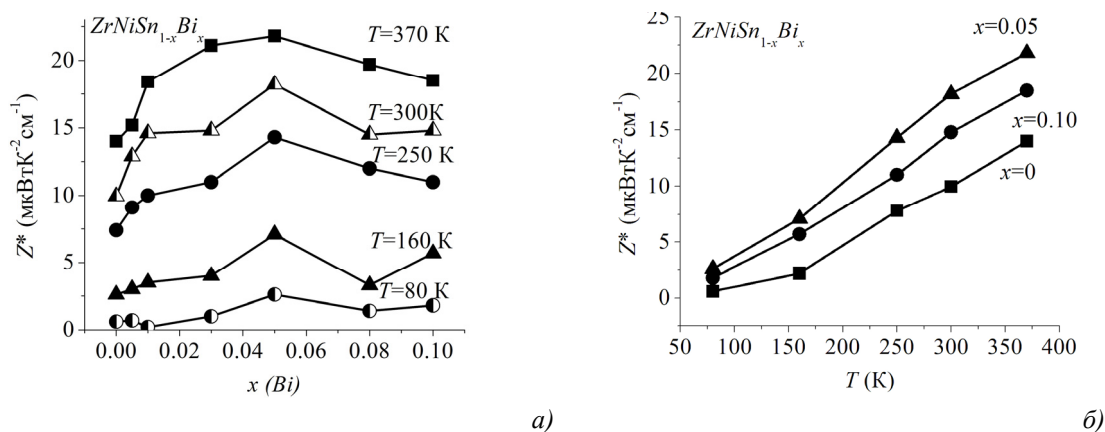


Рис. 9. Концентраційні (а) та температурні (б) залежності коефіцієнта термоелектричної потужності Z^* $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$.

Висновки

Таким чином, у результаті комплексних досліджень кристалічної структури, енергетичного спектру, електрокінетичних та магнітних властивостей інтерметалічного напівпровідника $n\text{-ZrNiSn}$, сильнолегованого донорною домішкою Bi , вдалося спрогнозувати та отримати новий термоелектричний матеріал $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$, який за своїми характеристиками набагато переважає $n\text{-ZrNiSn}$ і є перспективним термоелектричним матеріалом.

Дослідження виконано в рамках грантів Національної академії наук України (№ 0106U000594) Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (№ ДР 0111U001088).

Література

1. Culp S.R., Poon S.J., Hickman N., Tritt T.M., Blumm J. Effect of substitutions on the thermoelectric figure of merit of half-Heusler phases at 800°C // Appl. Phys. Letters, Vol. 88, № 16, 042106-1-3 (2006).
2. Kawaharada Y., Uneda H., Muta H., Kurosaki K., Yamanaka S. High temperature thermoelectric

- properties of NiZrSn half-Heusler compounds // J. of Alloys and Compounds, Vol. 364, 59 (2004).
- Uher C., Yang J., Hu S., Morelli D.T., Meisner G.P. Transport properties of pure and doped MNiSn ($M = \text{Zr}, \text{Hf}$) // Phys. Rev. B, Vol. 59, № 13, 8615 (1999).
 - Ромака В.А. Інтерметалічні напівпровідники: властивості та застосування / Ромака В.А., Ромака В.В., Стадник Ю.В. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 488 с.
 - Условия достижения максимальных значений коэффициента термоэлектрической мощности в интерметаллических полупроводниках структурного типа MgAgAs / В.А. Ромака, Д. Фрушарт, Ю.В. Стадник [и др.] // ФТП. – 2006. – Т. 40, № 11, с. 1309.
 - Akselrud L.G., Grin Yu.N., Zavalii P.Yu., Pecharsky V.K., Fundamenskii V.S. CSD – universal program package for single crystal or powder structure data treatment // 12 Eur. Crystallogr. Meeting / Coll. Abstr., Vol. 3, Moscow: Nauka, 155 (1989).
 - Особенности интерметаллического полупроводника $n\text{-ZrNiSn}$, сильно легированного атомами редкоземельных металлов / В.А. Ромака, Д. Фрушарт, Е.К. Хлил [и др.] // ФТП. – 2010 – Т. 44, № 3, с. 310.
 - Мотт Н. Электронные процессы в некристаллических веществах / Н. Мотт, Э. Дэвис. – М.: Наука, 1982. – 368 с. (пер. с англ.: Mott N.F., Davis E.A. Electron processes in non-crystalline materials, Oxford, Clarendon Press, 1979).
 - Шкловский Б.И. Переход от металлической проводимости к активационной в компенсированных полупроводниках / Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос // ЖЭТФ. – 1971. – Т. 61, № 2. – с. 816.
 - Шкловский Б.И. Полностью компенсированный кристаллический полупроводник как модель аморфного полупроводника / Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос // ЖЭТФ. – 1972. – Т. 62, № 3. – с. 1156.

Надійшла до редакції 31.10.2011.