

Дослідження термометричного матеріалу $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$

© Крайовський Володимир, Ромака Володимир, 2012

Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна, vkrayovskyy@lp.edu.ua

Досліджено енергетичні, магнітні та електрокінетичні характеристики термометричного матеріалу $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$ у діапазонах: $T = 80 \div 400$ К, $N_A^{Rh} \approx 9,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ($x = 0,005$) $\div 1,9 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ ($x = 0,10$) і напруженості магнітного поля $H \leq 10$ кГс. Показано, що одержаний термоелектричний матеріал має високу ефективність перетворення теплової енергії в електричну.

Исследованы энергетические, магнитные и электрокинетические характеристики термометрического материала $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$ в диапазонах: $T = 80 \div 400$ К, $N_A^{Rh} \approx 9,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ($x = 0,005$) $\div 1,9 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ ($x = 0,10$) и напряженности магнитного поля $H \leq 10$ кГс. Показано, что полученный термоэлектрический материал имеет высокую эффективность преобразования тепловой энергии в электрическую.

The electron energy state, magnetic and transport characteristics of of thermometric materials $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$ were investigated in the $T = 80 \div 400$ K temperature range and at charge carriers concentration from $N_A^{Rh} \approx 9,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ($x = 0,005$) $\div 1,9 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ ($x = 0,10$) and $H \leq 10$ kGs. It was shown that the obtained thermoelectric material has high efficiency conversion of thermal energy into electrical energy.

Вступ. У роботі [1] було показано, що інтерметалічний напівпровідник n - HfNiSn є одним з перспективних термометричних матеріалів для реалізації на його основі первинних перетворювачів електрорезистивних та термоелектричних термометрів у діапазоні $4,2 \div 1500$ К. Оптимізація параметрів термометричних матеріалів здійснюється шляхом сильного легування напівпровідника. У даній роботі ми продовжимо розпочату в [2] програму досліджень механізмів провідності термометричних матеріалів на основі n - HfNiSn як при різних способах легування, так і типах уведених домішок. Важливість таких досліджень пояснюється тим, що матеріали на основі n - HfNiSn мають стабільні характеристики в температурному інтервалі $T = 4,2 \div 1500$ К. Нижче, на основі проведених досліджень ми покажемо, що легування інтерметалічного напівпровідника n - HfNiSn домішковими атомами Rh дозволяє отримати перспективний термометричний матеріал, а первинні перетворювачі температури, реалізовані на його основі, будуть володіти високою чутливістю та відтворюваністю характеристик.

У роботі [2] запропоновано підхід до дослідження n - HfNiSn , який по іншому, ніж у [3], трактує механізми дефектоутворення і, як наслідок, механізми електропровідності напівпровідника у широкому температурному інтервалі. Було встановлено механізм утворення донорів в n - HfNiSn («априорне легування» [1]) як результат структурної невідповідності сполуки HfNiSn . Суть невідповідності HfNiSn полягає у частковому, до ~ 2 ат.%, зайнятті атомами Ni ($3d^8 4s^2$) кристалграфічної позиції $4a$ атомів Hf ($5d^2 6s^2$), що і є джерелом структурних дефектів донорної природи. Окрім того, в [2] також показано, що сильне легування n - HfNiSn атомами Co, уведеними у кристал шляхом заміщення атомів Ni, запускає механізм генерування структурних дефектів акцепторної природи, змінюючи при цьому ступінь компенсації напівпровідникового матеріалу. Зокрема, введення атомів Co у структуру сполуки HfNiSn упорядковує її кристалічну структуру. А це означає, що атоми Ni повертаються з «чужої» позиції $4a$ у «власну» $4c$. Розрахунки показали, що при складах $\text{HfNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{Sn}$, $x \approx 0,02$, всі атоми Ni покинуть частково зайняту ними позицію атомів Hf. Таким чином, введення в n - HfNiSn домішки Co в діапазоні концентрацій $x = 0 \div 0,02$ призводить до зменшення та ліквідації у напівпровідниковому матеріалі структурних дефектів донорної природи.

Нижче ми представимо результати дослідження нового термометричного матеріалу $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$ одержаного шляхом сильного легування n - HfNiSn атомами Rh, уведеними в кристал шляхом заміщення атомів Ni. Досліджувалася електронна структура матеріалу $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$, його енергетичні, електрокінетичні та магнітні характеристики. Дані результати дозволять передбачити механізми провідності термометричного матеріалу та характеристики первинних термоперетворювачів, реалізованих на його основі. Окрім того, експериментальні дослідження електрокінетичних та магнітних характеристик $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$ дозволять встановити, з одного боку, адекватність отриманої моделі електронної структури напівпровідника, а з іншого – адекватність прогнозованих характеристик первинних перетворювачів температури.

1. Розрахунок електронної структури $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$. Для прогнозування поведінки рівня Фермі (ε_F), ширини забороненої зони (ε_g), електрокінетичних та магнітних характеристик термометричного матеріалу $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$ здійснено розрахунок розподілу електронної густини (DOS) (рис. 1). Однак, перш ніж перейти до аналізу результатів розрахунку електронної структури $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$ необхідно зазначити наступне. Структурні дослідження зразків $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$, $x = 0,005 \div 0,10$, зокрема уточнення їх кристалічної структури методом порошку з одночасним уточненням

ізотропних параметрів атомного заміщення та зайнятості кристалографічних позицій показало, що найменші значення коефіцієнта невідповідності R_B моделі структури та масиву відбить рентгенівського випромінювання отримано для варіанта упорядкованої кристалічної структури. Суть упорядкування, як і у випадку $\text{HfNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{Sn}$ [2], полягає у поверненні атомів Ni з частково зайнятої (до ~ 2 ат.%) позиції 4a у «власну» позицію 4c при одночасному витісненні домішковими атомами Rh атомів Ni з позиції 4c. Розрахунки показали, що при складах $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$, $x \geq 0,02$, всі атоми Ni покинуть позицію атому Ni. А це означає, що введення у структуру сполуки HfNiSn домішкових атомів Rh супроводжується одночасним зменшенням та ліквідацією структурних дефектів донорної природи (до $x \approx 0,02$) та збільшенням числа структурних дефектів акцепторної природи ($0 < x \leq 0,10$). Оскільки домішка Rh впорядковує кристалічну структуру термометричного матеріалу, усі розрахунки його електронної структури проведено для випадку упорядкованої кристалічної структури $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$.

Заміщення атомів Ni на Rh у сполуці HfNiSn принципово не змінює спостережувану форму розподілу електронної густини у відповідності до сильної гібридизації між усіма елементами (рис. 1a). Має місце збільшення «хвостів» зон неперервних енергій, що приводить до зменшення значень ефективної забороненої зони $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$ ($\varepsilon_g(x=0,005) = 505,8$ меВ та $\varepsilon_g(x=0,10) = 463,1$ меВ). Розрахунки показують, що легування напівпровідника електронного типу провідності $n\text{-HfNiSn}$ акцепторною домішкою Rh супроводжується дрейфом рівня Фермі ε_F у напрямі валентної зони (рис. 1a). При незначних концентраціях легуючої домішки атомів Rh відбувається збільшення ступеню компенсації напівпровідникового матеріалу. При концентраціях атомів Rh, що відповідають складам $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$, $x \approx 0,02$, рівень Фермі перетне середину забороненої зони, зміниться тип провідності матеріалу, а дірки стануть головними носіями електрики. Розрахунки показують, що при складах $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$, $x > 0,10$, рівень Фермі перетне рівень протікання валентної зони – реалізується перехід провідності діелектрик-метал [3].

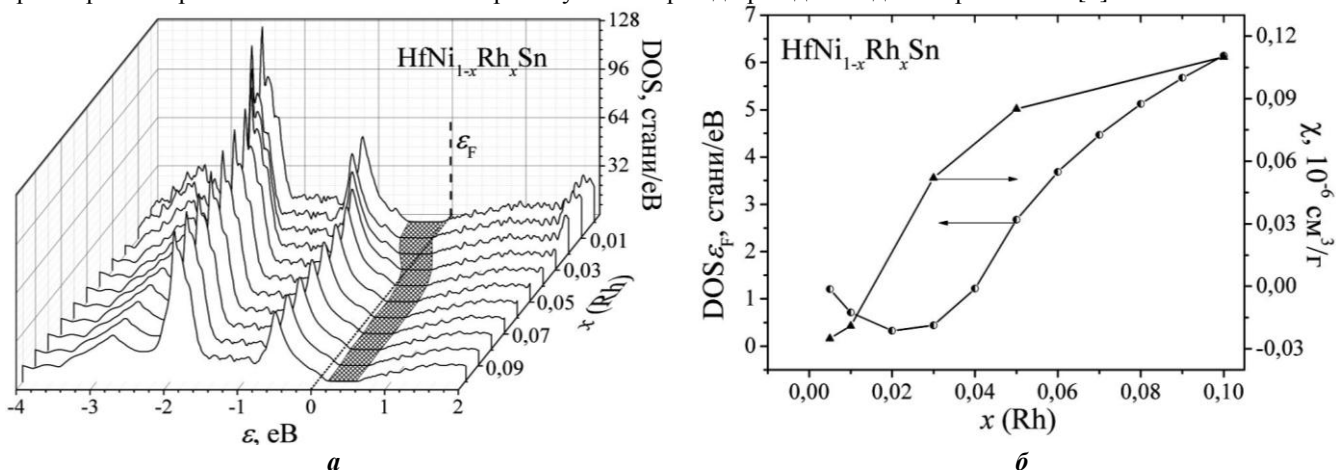


Рис. 1. Зміна значень профілю країв зон (а) та густини станів на рівні Фермі DOS_{ε_F} і значень магнітної сприйнятливості χ при $T=300$ К (б) $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$.

Привертаємо увагу на характер зміни розрахованої густини станів на рівні Фермі DOS_{ε_F} $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$ (рис. 2б), зокрема, на наявність мінімуму при $x \approx 0,02$. З фізичної точки зору абсолютно зрозумілим є наявність мінімуму густини станів на рівні Фермі при проходженні рівнем Фермі середини забороненої зони напівпровідника (при $x \approx 0,02$). З іншого боку, структурні дослідження показали, що в $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$, $x \approx 0,02$, будуть «заліковані» всі структурні дефекти донорної природи, які існують у первісній сполуці HfNiSn , а у кристалі будуть генеруватися лише структурні дефекти донорної природи. Саме цей фізичний процес обумовлює як зменшення розрахованих значень густини станів на рівні Фермі DOS_{ε_F} в $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$, $x < 0,02$, де електрони є основними носіями струму, так і збільшення значень DOS_{ε_F} при $x \geq 0,02$, коли основними носіями електрики будуть дірки. Експериментальні дослідження $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$ мають дати відповідь на ступінь адекватності наведених вище результатів.

2. Дослідження магнітних характеристик $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$. Експериментальні дослідження польових та температурних залежностей магнітної сприйнятливості χ $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$ дозволили одержати результати, які укладаються у запропоновану модель електронної структури термометричного матеріалу. На рис. 2б наведено результати експериментальних вимірювань значень $\chi(x)$ при $T=300$ К і напруженості магнітного поля $H = 10$ кГс. Оскільки інтерметалічний напівпровідник $n\text{-HfNiSn}$ є слабким діамагнетиком ($\chi_{x=0} = -0,082 \cdot 10^{-6}$ см³/Г) [1], то легування напівпровідника найменшими концентраціями домішки Rh призводить до зменшення діамагнітної складової ($\chi_{x=0,005} = -0,025 \cdot 10^{-6}$ см³/Г). З рис. 2б видно, що концентраціям акцепторної домішки, при яких рівень Фермі переходить через середину забороненої зони $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$, відповідають «нульові» значення магнітної сприйнятливості матеріалу, вказуючи на зміну його магнітного стану. При складах $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$, $x \geq 0,03$, матеріал стає парамагнетиком Паулі: $\chi_{x=0,03} = 0,052 \cdot 10^{-6}$ см³/Г. У такому випадку, магнітна сприйнятливість $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$ буде

визначатися магнітною сприйнятливістю основних носіїв струму, а її значення буде пропорційним концентрації вільних дірок p (для парамагнетика Паулі $\chi \sim p$). Оскільки значення $\chi(x)$ збільшуються при збільшенні концентрації атомів Rh в кристалі матеріалу (рис. 2б), засвідчуючи збільшення концентрації дірок, то саме такий хід залежності $\chi(x)$ є можливим лише за умови акцепторної природи утворених структурних дефектів при зайнятті атомами Rh позиції Ni. Даний висновок відповідає результатам структурних досліджень та розрахунку електронної структури термометричного матеріалу $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$.

3. Дослідження електрокінетичних характеристик $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$. На рис. 2 та 3 наведено зміну значень питомого електроопору ρ і коефіцієнта термо-ЕРС α термометричного матеріалу $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$ від температури та складу, відповідно. Для випадку n - HfNiSn температурні залежності питомого електроопору та коефіцієнта термо-ЕРС є типовими для сильнолегованих та компенсованих напівпровідників (СЛКН) [4] з високо- та низькотемпературними активаційними ділянками, які вказують на наявність кількох активаційних механізмів провідності.

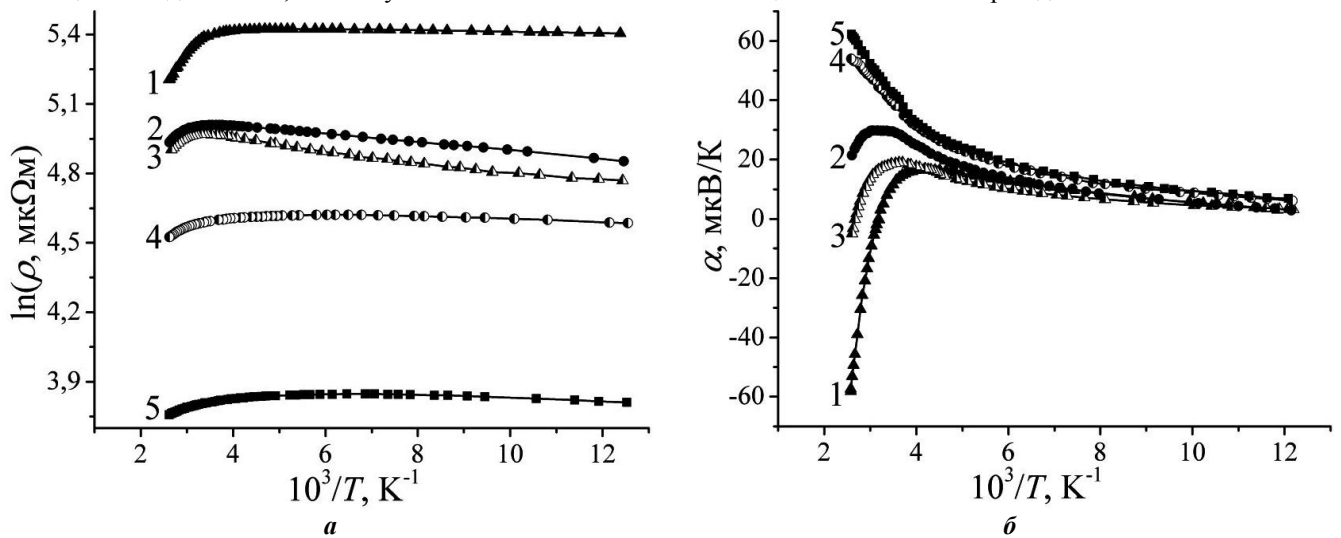


Рис. 2. Температурні залежності питомого електроопору ρ (а) та коефіцієнта термо-ЕРС α (б) $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$:

1- $x=0,005$; 2- $x=0,01$; 3- $x=0,02$; 4- $x=0,03$; 5- $x=0,10$

З активаційних ділянок залежностей $\ln \rho(1/T)$ обчислено значення енергій активації з рівня Фермі ε_F на рівень протікання зони провідності ε_1^p та стрибки електронів ε_3^p по станах з енергіями, близькими до ε_F , а з активаційних ділянок залежностей $\alpha(1/T)$ – значення енергій ε_1^α та ε_3^α , пропорційних амплітуді модуляції зон неперервних енергій та дрібномасштабної флуктуації СЛКН, відповідно [4]. Так, у нелегованому напівпровіднику n - HfNiSn рівень Фермі ε_F розташований у забороненій зоні на відстані 81,3 меВ від рівня протікання зони провідності [1]. Наявність низькотемпературної активаційної ділянки на залежності $\ln \rho(1/T)$ n - HfNiSn вказує на існування стрибкового механізму переносу заряду з енергією активації $\varepsilon_3^p = 8,7$ меВ. Доказом активації електронів з домішкового донорного рівня у зону провідності слугують від'ємні значення коефіцієнта термо-ЕРС n - HfNiSn у всьому температурному діапазоні вимірювань (рис. 2б, 3б).

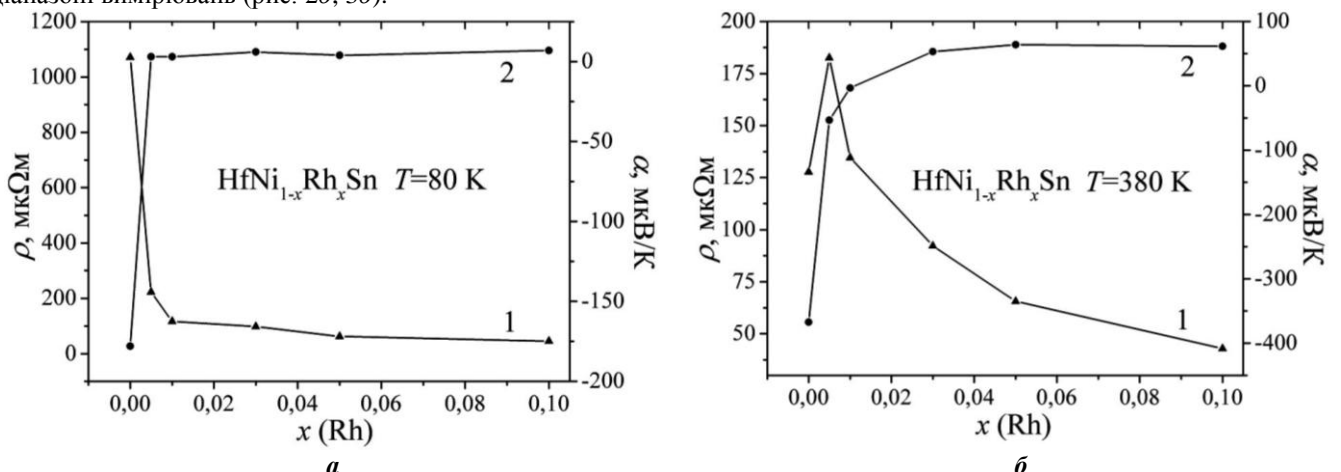


Рис. 3. Зміна значень питомого електроопору ρ (1) та коефіцієнта термо-ЕРС α (2) $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$ при різних температурах: а – $T=80$ K, б – $T=380$ K.

З високо- та низькотемпературних ділянок залежностей $\alpha(1/T)$ обчислено значення енергії активації $\varepsilon_1^\alpha(x=0) = 50,9$ меВ та $\varepsilon_3^\alpha(x=0) = 9,4$ меВ, відповідно. У даному контексті покажемо співвідношення значень енергії активації ε_3^ρ та ε_3^α вказуючи, що потенціальна яма дрібномасштабної флуктуації СЛКП n -HfNiSn є близькою до стану заповнення носіями струму (при усередненій глибині ями 9,4 меВ вона заповнена на 8,7 меВ). В [5] показано, що як тільки значення енергії активації стрибкової провідності ε_3^ρ зрівняється зі значенням ε_3^α , електрони «заллють» дрібномасштабний рельєф СЛКН [4], що приведе до металізації провідності, а на залежностях $\ln \rho(1/T)$ буде відсутня низькотемпературна активаційна ділянка.

Уведення найменшої в експерименті концентрації акцепторної домішки Rh, що відповідає складу HfNi_{1-x}Rh_xSn, $x=0,005$, приводить до радикальних змін як характеру поведінки залежностей $\ln \rho(1/T)$ та $\alpha(1/T)$ (рис. 1), так і значень питомого електроопору та коефіцієнта термо-ЕПС (рис. 2). Так, на залежності $\ln \rho(1/T)$ відсутня низькотемпературна активаційна ділянка, а електроопір зразка зростає при збільшенні температури, вказуючи на металізацію провідності термометричного матеріалу при низьких температурах. Подібний хід мають залежності $\ln \rho(1/T)$ для усіх інших концентрацій акцепторної домішки (рис. 1). Ми вважаємо, що додатні значення коефіцієнта термо-ЕПС та металізація провідності HfNi_{1-x}Rh_xSn при низьких температурах вказують, що концентрація акцепторів в HfNi_{1-x}Rh_xSn стала значною і не лише змінився тип провідності (дірки стали основними носіями струму), а суттєво зменшилася ступінь компенсації напівпровідникового матеріалу і весь дрібномасштабний рельєф залитий дірками [4].

У той же час, існування високотемпературної активації на залежностях $\ln \rho(1/T)$ HfNi_{1-x}Rh_xSn, а також від'ємні значення коефіцієнта термо-ЕПС α для складів $x=0,005$ та $x=0,01$ при температурах $T > 314$ К та $T > 371$ К, відповідно, вказує на те, що в обох зразках концентрація донорів («апріорне легування») все ще переважає концентрацію уведених акцепторів. Спостережувана зміна знака коефіцієнта термо-ЕПС у зразках HfNi_{1-x}Rh_xSn, $x=0,005$ та $x=0,01$, при зміні температури є класичним прикладом залежності ступеню компенсації напівпровідникового матеріалу не лише від концентрації донорів та акцепторів, а і від глибини їх залягання від країв зон неперервних енергій, тобто від температури. Іншими словами, у досліджуваних зразках HfNi_{1-x}Rh_xSn, $x=0,005$ та $x=0,01$, при різних температурах концентрація іонізованих акцепторів і донорів буде різною.

Обґрунтуємо даний висновок. У зразках HfNi_{1-x}Rh_xSn, $x=0,005$ та $x=0,01$, термічний закид електронів з домішкового донорного рівня (іонізація донора) на рівень протікання зони провідності є енергетично більш утрудненим, а значить і концентрація іонізованих донорів буде меншою, у порівнянні із закидом дірок з домішкового акцепторного рівня (іонізація акцептора) на рівень протікання валентної зони. Це пов'язано з тим, що глибина залягання донорного рівня в HfNi_{1-x}Rh_xSn, $x=0,005$ та $x=0,01$, є сумірною з енергією активації $\varepsilon_1^\rho = 81,3$ n -HfNiSn меВ,

а енергія іонізації дірок з рівня Фермі (рис. 4), зафіксованого на домішковому акцепторному рівні, на рівень протікання валентної зони є сумірною зі значеннями $\varepsilon_1^\rho(x=0,005) = 25,3$ меВ та $\varepsilon_1^\rho(x=0,01) = 14,6$ меВ, відповідно. В обох випадках, як при активації електронів у зону провідності, так і дірок у валентну зону ми говоримо «сумірна», оскільки розрахунки показують також зменшення значень ефективної забороненої зони HfNi_{1-x}Rh_xSn, викликаного збільшенням «хвостів зон», що незначно змінить і розташування домішкових рівнів відносно рівнів протікання зон неперервних енергій.

У даному зв'язку показовими є залежності зміни значень питомого електроопору $\rho(x)$ при $T=80$ К та $T=380$ К (рис. 3). Так, при $T=80$ К, коли є відсутньою активація носіїв струму з рівня на рівні протікання зон неперервних енергій, провідність термометричного матеріалу визначається або стрибковим механізмом (для

n -HfNiSn), або металічною провідністю, коли дрібномасштабний рельєф залитий дірками (для HfNi_{1-x}Rh_xSn). У цьому випадку має місце зменшення значень питомого електроопору від значень $\rho(x=0) = 1071,09$ мкОм·м до $\rho(x=0,005) = 222,44$ мкОм·м та $\rho(x=0,01) = 116,49$ мкОм·м. У той же час, при $T=380$ К, коли фактором, що визначає провідність напівпровідникового матеріалу, є зміна концентрації саме вільних носіїв струму через термічний закид електронів та дірок з відповідних домішкових рівнів, залежність $\rho(x)$ суттєво відрізняється від такої при $T=80$ К. Так, значення питомого електроопору при легуванні напівпровідника найменшою концентрацією домішки збільшується від значень $\rho(x=0) = 127,68$ мкОм·м до $\rho(x=0,005) = 182,47$ мкОм·м. І лише при концентрації

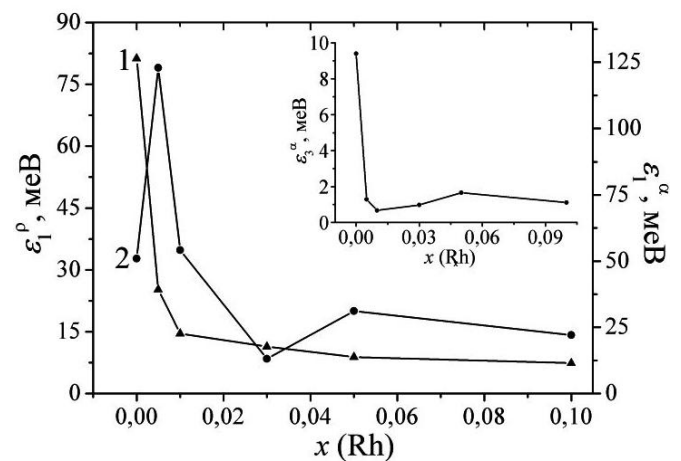


Рис. 4. Зміна значень енергій активації $\varepsilon_1^\rho(x)$ (1), $\varepsilon_1^\alpha(x)$ (2) та $\varepsilon_3^\alpha(x)$ (вставка) HfNi_{1-x}Rh_xSn

домішки, що відповідає складу $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$, $x=0,01$, значення $\rho(x)$ починають зменшуватися ($\rho(x=0,01) = 134,63 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$).

Покажемо, а на перший погляд і парадоксальним, є те, що значення питомого електроопору для зразка з $x=0,01$ при $T=80 \text{ К}$ ($116,49 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$) є меншим, ніж при $T=380 \text{ К}$ ($134,63 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$), коли абсолютне число вільних носіїв струму набагато перевищує таке при $T=80$. Даний експериментальний факт зайвий раз показує різну ступінь компенсації напівпровідникового матеріалу $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$ при різних температурах.

Аналізуючи хід залежностей $\rho(x)$ (рис. 3б), ми виявили, що екстремум на залежності при $x=0,005$ з'являється вже при $T \geq 250 \text{ К}$, коли відбувається іонізація донорів, що збільшує ступінь компенсації напівпровідникового матеріалу. А раз так, то повинна зростати і амплітуда модуляції зон неперервних енергій. Саме про це свідчить хід залежності $\varepsilon_1^\alpha(x)$ (рис. 4). Оскільки значення енергії активації ε_1^α пропорційне амплітуді модуляції зон неперервних енергій [4], то легування n - HfNiSn найменшою концентрацією акцепторної домішки Rh супроводжується збільшенням значень амплітуди модуляції від $\varepsilon_1^\alpha(x=0) = 50,9 \text{ меВ}$ до $\varepsilon_1^\alpha(x=0,005) = 122,9 \text{ меВ}$. Навіть при концентрації акцепторів, що відповідає складу $x=0,01$, амплітуда модуляції все ще є більшою за таку для випадку n - HfNiSn ($\varepsilon_1^\alpha(x=0,01) = 54,08 \text{ меВ}$), що вказує на все ще суттєву компенсацію напівпровідникового матеріалу при високих температурах.

При подальшому легуванні n - HfNiSn акцепторною домішкою Rh ($x>0,02$) провідність термометричного матеріалу зростає через наближення рівня Фермі до рівня протікання валентної зони, що суттєво полегшує термічний закид дірок з утвореного акцепторного рівня. Цей супроводжується зменшенням ступеню компенсації напівпровідникового матеріалу, зменшуючи амплітуду модуляції зон неперервних енергій та дрібномасштабної флуктуації, про що свідчить хід залежностей $\varepsilon_1^\alpha(x)$ та $\varepsilon_3^\alpha(x)$, відповідно (рис. 4). Існування високотемпературної активації у зразках $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$, $x=0,10$, показує, що дана концентрація домішки є недостатньою для реалізації переходу провідності діелектрик-метал, а рівень Фермі є віддаленим від рівня протікання валентної зони енергетичним зазором $\varepsilon_1^p(x=0,10) = 7,3 \text{ меВ}$.

Висновки. Таким чином, у результаті проведеного дослідження електронної структури, магнітних та електрокінетичних характеристик термометричного матеріалу $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$ встановлено:

– легування напівпровідника n - HfNiSn домішкою Rh супроводжується одночасним зменшенням і ліквідацією структурних дефектів донорної природи (до $x \approx 0,02$) та збільшенням концентрації дефектів акцепторної природи ($0 < x \leq 0,10$);

– експериментально доведено факт різного ступеню компенсації напівпровідникового матеріалу при різних температурах;

– результати розрахунку електронної структури термометричного матеріалу $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$, що базуються на запропонованій моделі просторового розташування атомів, узгоджуються з результатами магнітних та кінетичних характеристик напівпровідникового матеріалу;

– отриманий та досліджений термометричний матеріал $\text{HfNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Sn}$ може бути використаний для реалізації на його основі первинних перетворювачів температури електрорезистивних та термоелектричних термометрів, характеристики яких нечутливі до впливу зовнішнього магнітного поля.

Робота виконувалася у рамках гранту Національної академії наук України (№ 0106U000594).

1. Ромака В.А., Ромака В.В., Стадник Ю.В. Інтерметалічні напівпровідники: властивості та застосування (Львівська політехніка, 2011, 488 с.). 2. V. A. Romaka, P. Rogl, Yu. V. Stadnyk, V. V. Romaka, E. K. Hlil, V. Ya. Krayovskii, and A. M. Horyn. Features of the Conduction Mechanisms of the n-HfNiSn Semiconductor Heavily Doped with the Co Acceptor Impurity // Semiconductors. – 2012. – V. 46, №9. – p. 1106–1113; 3. Mott N.F. Metal-Insulator Transitions (Second Edition, London-Bristol: Taylor & Francis, 1990, 266 p.); 4. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников (М., Наука, 1979, 416 с.); 5. Romaka V.A., Stadnyk Yu.V., Romaka V.V., Fruchart D., Gorelenko Yu.K., Chekurin V.F., Horyn A.M. Features of Electrical Conductivity in the n-ZrNiSn Intermetallic Semiconductor Heavily Doped with the In Acceptor Impurity // Semiconductors. – 2007. – Vol. 41, №9. – p. 1041-1047;