

УДК 537.32

Горський П.В. док. фіз.-мат. наук^{1,2}

Горський П.В.

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України, вул. Науки, 1,
Чернівці, 58029, Україна; e-mail: anatysh@gmail.com;

²Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58000, Україна

ПРО ПРИНЦИПОВУ ВІДМІННІСТЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ КОМПОЗИТІВ ВІД ЛЕГОВАНИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА НАСЛІДКИ З НЕЇ

Показано, що якщо вплив легуючих домішок на термоелектричний матеріал зводиться лише до зміни концентрації вільних носіїв заряду у ньому, то, наприклад, для матеріалу на основі телуриду вісмуту навіть за температури 400 К неможливо отримати значення безрозмірної термоелектричної ефективності, яке б істотно перевищувало 1. З іншого боку безрозмірна термоелектрична ефективність термоелектричних композитів на основі напівпровідникових матеріалів з металевими нанокластерами або наночастинками може істотно перевищувати 1, якщо вони справді є композитами, тобто матеріалами, кожна складова яких, увійшовши до складу композиту, зберігає притаманні їй макроскопічні значення кінетичних коефіцієнтів та їх температурні залежності. В цьому разі підвищення добротності такого термоелектричного композиту зводиться до оптимізації його складу і вирішення питання про технологічні можливості виготовлення саме цього композиту. Однак слід мати на увазі, що відповідь на питання про практичне застосування таких композитів, якщо вони навіть будуть створені і їх параметри будуть стабільно відтворюваними, залежить від можливості створення з їх застосуванням пристроїв, які б мали не лише високі споживчі характеристики, а й відповідну стабільність, надійність, довговічність та ресурсну стійкість. Бібл. 6, рис. 6.

Ключові слова: термоелектричний матеріал, легування, безрозмірна термоелектрична ефективність, поріг перколяції, композит, наночастинки, оптимальний склад композиту.

Вступ

Сьогодні значні зусилля фахівців у сфері термоелектричного матеріалознавства спрямовані на розв'язання як теоретичних так і практичних завдань, пов'язаних з пошуком шляхів підвищення безрозмірної термоелектричної ефективності як легованих термоелектричних матеріалів, так і композитів. Однак попри ці зусилля істотного прогресу у даному напрямку або не досягнуто, або окремі високі результати не є стабільно відтворюваними. З цієї точки зору зусилля, спрямовані, наприклад, на створення надграток або матеріалів із квантовими ямами, заслуговують на окремий аналіз. Але метою даної статті є неупереджений аналіз ситуації у царині створення і застосування ТЕМ на основі «традиційних» сплавів системи $Bi(Sb) - Te(Se)$.

Про обмеженість можливостей легованих ТЕМ

Для доведення цієї обмеженості розрахунковим шляхом дослідимо вплив концентрації легуючих домішок на безрозмірну термоелектричну ефективність ТЕМ за наступних модельних припущень:

- 1) зонний спектр носіїв заряду у ТЕМ є параболічним та ізотропним з незалежною від температури ефективною масою;
- 2) квазіпружне розсіювання носіїв заряду в актуальній температурній області відбувається на деформаційному потенціалі акустичних фонових з незалежним від енергії перерізом і довжиною вільного пробігу, обернено пропорційною до температури;
- 3) ґраткова частина теплопровідності напівпровідника визначається розсіюванням фонових одного на одному з перекиданням і є обернено пропорційною до температури, підлягаючи законові Лейбфріда-Шлемана [1, 2];
- 4) легуючі домішки не впливають ні на що окрім концентрації вільних носіїв заряду у матеріалі.

За умови справедливості цих припущень показник розсіювання носіїв заряду $r = -0.5$.

Для подальших розрахунків припустимо, що за деякої температури T_0 нам відомі термоелектричні параметри нелегованого ТЕМ, а саме його термоЕРС α_{s0} , електропровідність σ_{s0} та теплопровідність κ_{s0} . Припустимо також, що відносне збільшення концентрації вільних носіїв заряду у ТЕМ після введення у нього легуючої домішки дорівнює x .

Побудова необхідних температурних залежностей та концентраційних залежностей характеристик легованого ТЕМ на основі відомих загальних співвідношень [1] здійснюється у наступному порядку.

Зі співвідношення для термоЕРС

$$\alpha_{s0} = \frac{k}{e} \left[\frac{2F_1(\eta_0)}{F_0(\eta_0)} - \eta_0 \right] \quad (1)$$

знаходимо зведений хімічний потенціал η_0 газу носіїв заряду у нелегованому матеріалі за температури T_0 .

Тоді з рівняння

$$\frac{T^{1.5} F_{0.5}(\eta)}{(1+x) T_0^{1.5} F_{0.5}(\eta_0)} = 1 \quad (2)$$

визначаємо температурну залежність зведеного хімічного потенціалу η газу носіїв заряду від температури T у заданому інтервалі температур за довільної концентрації легуючих домішок.

Зі співвідношення

$$\alpha_s = \frac{k}{e} \left[\frac{2F_1(\eta)}{F_0(\eta)} - \eta \right] \quad (3)$$

визначаємо температурну залежність термоЕРС легованого ТЕМ.

Зі співвідношення

$$L_s(\eta) = \left(\frac{k}{e} \right)^2 \left[\frac{3F_2(\eta)}{F_0(\eta)} - \frac{4F_1^2(\eta)}{F_0^2(\eta)} \right] \quad (4)$$

визначаємо температурну залежність числа Лоренца легованого ТЕМ.

Температурна залежність електропровідності легованого ТЕМ за зазначених вище модельних припущень визначається так:

$$\sigma_s = \sigma_{s0} \cdot \left(1 + x\right) \left(\frac{T_0}{T}\right)^{1.5} \frac{F_0(\eta) F_{0.5}(\eta_0)}{F_{0.5}(\eta) F_0(\eta_0)}. \quad (5)$$

Температурна залежність теплопровідності легованого ТЕМ з врахуванням усього, сказаного вище, визначається так:

$$\kappa_s = \sigma_s L_s(\eta) T + [\kappa_{s0} - \sigma_{s0} L_s(\eta_0) T_0] \frac{T_0}{T}. \quad (6)$$

У формулах (1) – (5) через $F_m(\eta)$ позначено інтеграли Фермі, які визначаються наступним співвідношенням:

$$F_m(\eta) = \int_0^{\infty} x^m [\exp(x - \eta) + 1]^{-1} dx. \quad (7)$$

Співвідношення (1) – (7) повністю визначають температурні залежності термоЕРС, електропровідності та теплопровідності легованого ТЕМ.

Розрахункові концентраційні залежності безрозмірної термоелектричної ефективності легованого ТЕМ за температур 200 та 400 К наведено на рис. 1.

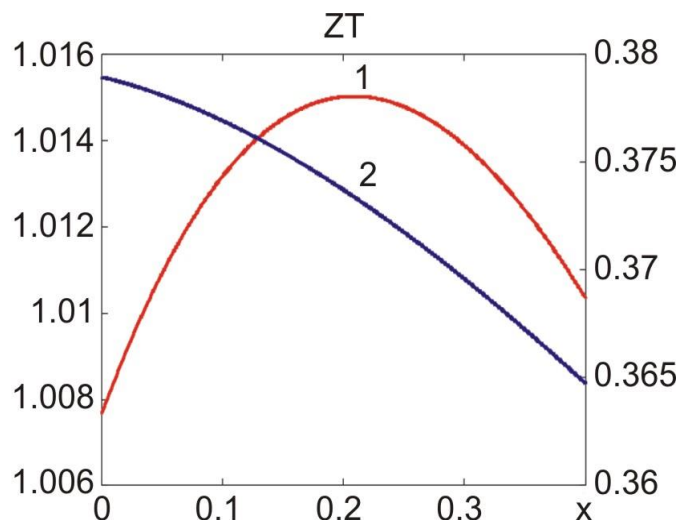


Рис. 1. Концентраційні залежності безрозмірної термоелектричної ефективності легованого ТЕМ за температур:
1 – 400 К (вісь зліва), 2 – 200 К (вісь справа)

При побудові графіків взято такі параметри TEM: $\alpha_{s0} = 200$ мкВ/К, $\sigma_{s0} = 800$ См/см, $\kappa_{s0} = 1.4$ Вт/(м·К) [1].

З графіків видно, що за температури 400 К навіть найвище значення безрозмірної термоелектричної ефективності легованого матеріалу, яке відповідає його «оптимальному» складу поблизу $x = 0.2$, лише приблизно на 0.01, тобто менш ніж на 1 % перевищує значення термоелектричної ефективності вихідного матеріалу. Існування оптимуму у даному випадку пояснюється двома конкуруючими чинниками: збільшенням електропровідності та зменшенням термоЕРС зі зростанням концентрації носіїв заряду. За нижчої температури, коли газ вільних носіїв заряду є досить сильно виродженим, концентраційна залежність безрозмірної термоелектричної ефективності теж є слабкою (найбільше значення відрізняється від найменшого у розглянутому інтервалі концентрацій носіїв заряду приблизно на 5.5%), але ця залежність цілком визначається зниженням термоЕРС.

Отже, ми наочно бачимо обмеженість можливостей легованих TEM. Кращі результати досягаються, коли легування одночасно зменшує граткову складову теплопровідності. Більше того, ефективним є легування TEM ізовалентними домішками, тому що в цьому разі електропровідність, електронна (діркова) частина теплопровідності та термоЕРС матеріалу змінюються відносно мало, а граткова складова теплопровідності змінюється більшою мірою, причому доволі часто у бік зменшення.

Про принципову відмінність термоелектричних композитів від легованих TEM та їх потенційні можливості.

Отже ми бачили, що принципова роль легуючих домішок у традиційному розумінні цього поняття полягає в тому, що вони, змінюючи свій стан, або «постачають» вільні носії заряду того чи іншого знаку, або не постачають носіїв, але впливають на розсіювання або й спектр фононів у TEM, змінюючи у той чи інший бік теплопровідність ґратки і навіть характер її температурної залежності, на чому ми також згодом зупинимось. Ясно, що у такому разі характеристики легованого матеріалу жодним чином не можна описати через макроскопічні характеристики його компонентів. Принциповою особливістю композиту, на відміну від легованого матеріалу, вважається якраз можливість визначення принаймні його кінетичних коефіцієнтів, а саме електропровідності, теплопровідності та термоЕРС через відповідні характеристики окремих компонентів (фаз) та склад композиту без заглиблення у мікроскопічні механізми формування цих характеристик. Саме тому теорію композитів досить часто ототожнюють з теорією «ефективного середовища», яке розуміють як суто макроскопічний об'єкт. Ясно, що тоді композитом може називатись лише такий матеріал, компоненти (фази) якого при входженні в композит, незалежно від його складу, зберігають притаманні їм макроскопічні властивості та їх температурні залежності. «Правила змішування» макроскопічних характеристик, у відповідності з якими визначаються характеристики композиту в цілому, залежать від того, якої концепції «ефективного середовища» притримується дослідник. Наприклад, якщо притримуватись концепції, у відповідності з якою явище перколяції неістотне, то для двофазної системи TEM – метал кінетичні коефіцієнти σ_c , κ_c визначаються так [2]:

$$\sigma_c = \sigma_m v_m + \sigma_s (1 - v_m), \quad (8)$$

$$\kappa_c = \kappa_m v_m + \kappa_s (1 - v_m). \quad (9)$$

Індекси «s» та «m» стосуються ТЕМ та металу відповідно, v_m – об’ємна частка металу. ТермоЕРС композиту визначається так [3]:

$$\alpha_c = \frac{(\alpha_m/\kappa_m)v_m + (\alpha_s/\kappa_s)(1-v_m)}{\kappa_m^{-1}v_m + \kappa_s^{-1}(1-v_m)}. \quad (10)$$

Якщо ж явище перколяції істотне, то формули (8) та (9) відповідно набувають вигляду [3,4]:

$$\sigma_c = 0.25 \left\{ \sigma_s(2-3v_m) + \sigma_m(3v_m-1) + \sqrt{[\sigma_s(2-3v_m) + \sigma_m(3v_m-1)]^2 + 8\sigma_m\sigma_s} \right\}, \quad (11)$$

$$\kappa_c = 0.25 \left\{ \kappa_s(2-3v_m) + \kappa_m(3v_m-1) + \sqrt{[\kappa_s(2-3v_m) + \kappa_m(3v_m-1)]^2 + 8\kappa_m\kappa_s} \right\}, \quad (12)$$

а формула (10) залишається без змін.

Розглянемо відмінність між цими двома концепціями на прикладі, нехай гіпотетичного, композиту, який складається з телуриду вісмуту та нікелю. Графік електропровідності композиту в залежності від об’ємної частки металу $v_m \equiv v$ у відповідності з формулами (8) та (11) наведено на рис. 2. При цьому електропровідність нікелю прийнято рівною $1.3 \cdot 10^5 \text{ См/см}$.

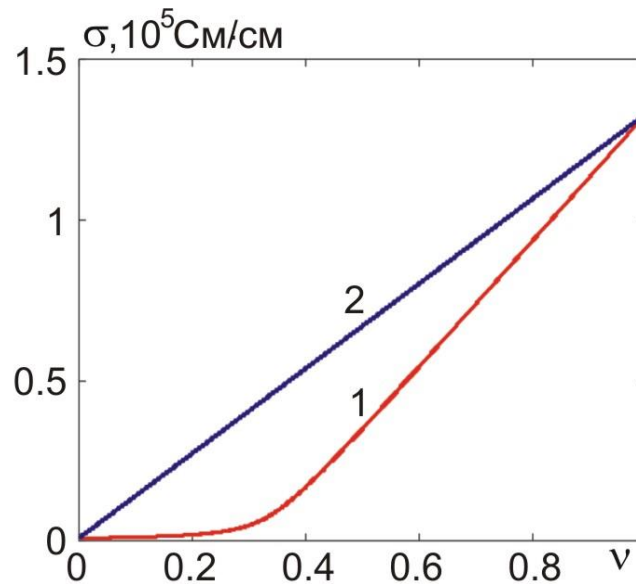


Рис. 2. Залежність електропровідності композиту
«телурид вісмуту – нікель»
від об’ємної частки нікелю: 1 – за наявності перколяції;
2 – за відсутності перколяції

З рисунка видно, за наявності перколяції у міру зростання вмісту часток нікелю у композиті електропровідність композиту зростає спочатку повільніше, а потім – швидше, ніж за її відсутності.

Розглянемо питання про те, якого розміру частки нікелю можна вважати макроскопічними. Якщо ми розглянемо, наприклад, кластер радіусом 35 нм, то враховуючи, що стала ґратки нікелю дорівнює 0.5 нм [5] і ця ґратка об'ємно-центрована, отримаємо, що в такому кластері вміщується приблизно $2.9 \cdot 10^6$ атомів, а це означає, що відносне відхилення макроскопічних параметрів кластера від їх середніх значень складає менше від 0.1%, тобто цей або більші кластери можна вважати макроскопічними і приписати їм провідність нікелю. Виходячи з провідності нікелю та концентрації електронів у ньому [5] можна знайти, що довжина вільного пробігу електронів у нікелі за 300 К складає 4.18 нм. Тоді за довільної температури T електропровідність металевого кластера наближено дорівнює:

$$\sigma_{cl} = \sigma_0 (T_0/T) \frac{r_c}{r_c + l_0 (T_0/T)}. \quad (13)$$

У цій формулі σ_0 – електропровідність масивного зразка нікелю за температури T_0 , r_0 – радіус кластера, l_0 – довжина вільного пробігу електрона у масивному зразку нікелю за 300 К.

На рис.3 зображено залежності термоелектричної ефективності композиту ТЕМ –кластери нікелю від його складу з урахуванням явища перколяції за температур 200 та 400 К.

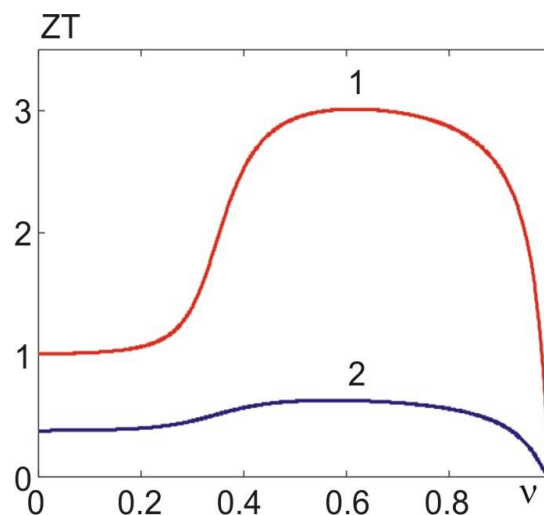


Рис. 3. Термоелектрична ефективність композиту з урахуванням явища перколяції за температур: 1 – 400 К, 2 – 200 К.

При цьому вважалось, що теплопровідність нікелю складає 90 Вт/(м·К) і у силу закону Відемана – Франца не залежить від температури. ТермоЕРС нікелю вважалась рівною – 23 мкВ/К і незалежною від температури.

З рисунка видно, що до вмісту нікелю майже 30 % за об'ємом, тобто в межах порогу перколяції термоелектрична ефективність композиту за 400 К зберігає значення, яке дорівнює 1, але після цього порогу стрімко зростає, досягаючи значення рівного майже 3 приблизно за 60 об.% нікелю, виходить на «плато», а потім стрімко спадає до значення, притаманного чистому нікелю.

На рис.4 зображено ті ж залежності, що на рис. 3, але без врахування явища перколяції.

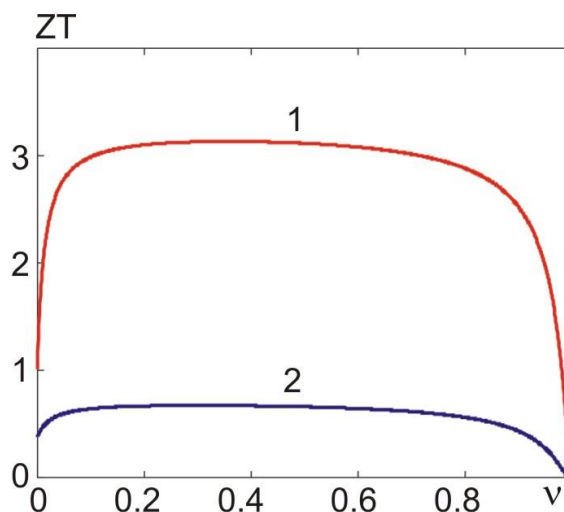


Рис. 4. Термоелектрична ефективність композиту без урахування явища перколяції за температур: 1 – 400 K, 2 – 200 K.:

З рисунка видно, що нехтування перколяцією мало впливає на максимальну термоелектричну ефективність композиту, хоча й істотно впливає на швидкість досягнення цього максимуму, протяжність «плато» та швидкість подальшого спаду до малого значення, притаманного чистому нікелю. Зауважимо, що рис.3 і 4 коректно відображають фізичну ситуацію, якщо температурна залежність ґраткової теплопровідності ТЕМ підлягає формулі Лейбфрида – Шлемана. Натомість наступні графіки на рис.5 та 6 побудовано для випадку, коли ця формула порушується таким чином, що ґраткова теплопровідність приблизно лінійно зростає з температурою [6].

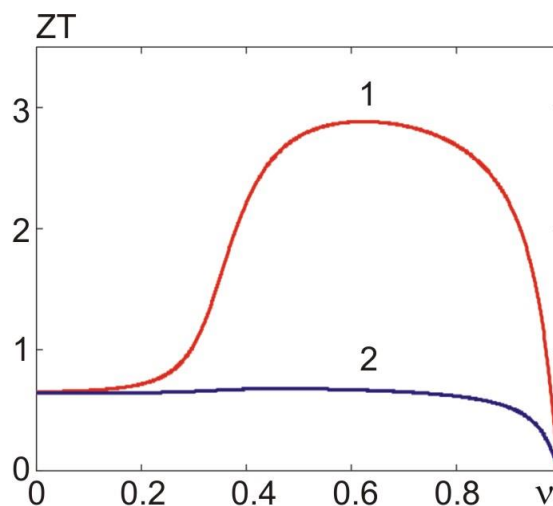


Рис. 5. Термоелектрична ефективність композиту з урахуванням явища перколяції та відхилення ґраткової теплопровідності ТЕМ від формули Лейбфрида – Шлемана за температур: 1 – 400 K, 2 – 200 K.

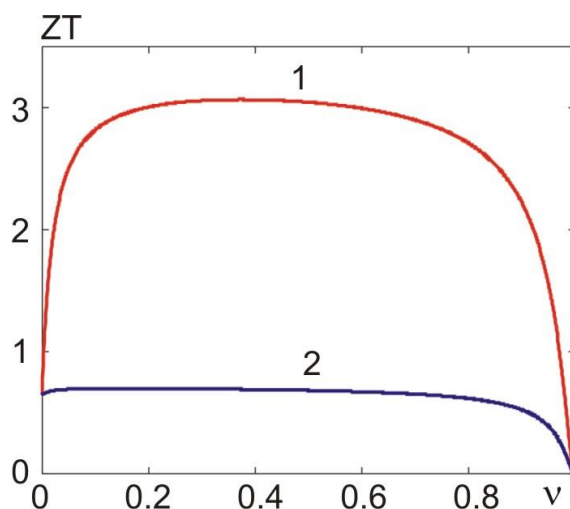


Рис. 6. Термоелектрична ефективність композиту без урахування явища перколяції але з врахуванням відхилення ґраткової теплопровідності ТЕМ від формули Лейбфрида – Шлемана за температур:
1 – 400 К, 2 – 200 К.

З рисунків видно, що навіть лінійне зростання ґраткової теплопровідності ТЕМ з температурою не впливає на максимальне значення термоелектричної ефективності композиту. Звідси приходимо до висновку, що така істотна перевага композитів над легованими матеріалами, принаймні в принципі, досяжна саме тому, що компоненти, з яких складаються композити, зберігають свої макроскопічні характеристики. Якщо ж цього не відбувається, то такої переваги отримано не буде. Отже ті матеріали, які мають порівняно низьку термоелектричну ефективність, слід вважати скоріше особливим чином легованими матеріалами, ніж композитами, попри те, що автори праць про них вважають їх композитами. Розглянемо з цієї точки зору, наприклад, результати праці [6]. Її автори повідомляють, що вони отримали для композиту графіт/ $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ підвищення термоелектричної ефективності до 1.05 або на 35 % у порівнянні з «чистим» ТЕМ за вмісту графіту, рівного 0.05 мол.%. А таке підвищення у композиті неможливе, якщо явище перколяції має місце (рис. 5), але можливе, якщо явище перколяції відсутнє (рис. 6). Однак, оскільки це явище має місце, а за даними [6] електропровідність матеріалу при доданні графіту в цілому знижується, хоч і неістотно, термоЕРС незначно зростає, а ґраткова теплопровідність знижується більш ніж у 1.5 рази, то слід вважати, що ми маємо справу не з композитом, а з особливим чином легованим матеріалом, основна роль графіту у якому полягає у такій перебудові фононного спектру ТЕМ та механізмів розсіювання фононів у ньому, яка веде до істотного зниження ґраткової теплопровідності і зміни характеру її температурної залежності.

Слід однак зазначити, що ми не розглядаємо у даній статті ні технологічних аспектів виготовлення композитних термоелектричних матеріалів з урахуванням зазначених вище вимог до них, ні їх міцнісних характеристик та ресурсної стійкості. А ці аспекти не менш, а то й більш важливі, ніж власне термоелектрична ефективність. Тому тренд розробок термоелектричних матеріалів та пристроїв, хоча й дуже повільно, але зміщується у бік розробки свого роду «компромісних» матеріалів та конструкцій, в яких би за даних споживчих характеристик

досягались, наприклад, мінімальні механічні напруги, і, отже, максимальна надійність, довговічність та ресурсна стійкість як матеріалів так і пристроїв.

Висновки

1. Показано, що безрозмірна термоелектрична ефективність матеріалів на основі телуриду вісмуту не може зрости більше, ніж на 1 %, якщо роль легуючої домішки полягає лише у зростанні концентрації носіїв заряду.
2. На відміну від легованих термоелектричних матеріалів композити, які містять високоелектропровідні, наприклад металеві, кластери діаметром 70 нм або більше, володіють істотно більшими термоелектричними можливостями, дозволяючи отримати за 400 К безрозмірну термоелектричну ефективність близько 3. На це значення не впливає ні наявність перколяції, ні можливе зростання граткової теплопровідності ТЕМ з температурою. Це можливо перш за все тому, що у композитах, на відміну від легованих матеріалів, їх компоненти зберігають ті термоелектричні характеристики, включно з їх температурними залежностями, які були притаманні цим компонентам до входження в композит. Ця особливість для композиту є принциповою. Якщо збереження характеристик компонентів не має місця, то ми маємо справу не з композитом, а з особливим чином легованим матеріалом, який таких істотних переваг мати не може.
3. З цієї точки зору має зміст легування ТЕМ перш за все такими домішками і в таких кількостях, які мало змінюють електропровідність та термоЕРС ТЕМ, але істотно зменшують граткову складову його теплопровідності, навіть якщо при цьому змінюється характер її температурної залежності.

Література

1. Гольцман Б.М. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3 / Б.М. Гольцман, И.А. Кудинов, И.А. Смирнов. – М.: Наука – 1972. – 322с.
2. Klemens P.D. Lattice thermal conductivity / P.D. Klemens – In book: Solid State Physics. Advances in Research and Applications. Vol.7, pp. 1-98. Academic Press. Inc. Publishers, New York – 1958, 526 p.
3. Снарский А.А. Термоэлектрическая добротность объемных наноструктурированных композитов с распределенными параметрами / А.А. Снарский, А.К. Сарычев, И.В. Безсуднов, В.Н. Лагарьков // ФТП. – 2012. – Т.46. – С. 677-683.
4. Горський П.В. Про температурні залежності термоелектричних характеристик перехідного шару термоелектричний матеріал-метал з урахуванням явища перколяції / Горський П.В., Мицканюк Н.В. // Термоелектрика. – 2019, №3 – С.5-22.
5. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. / Ч. Киттель. – М.: Наука. – 1978. – 792с.
6. Hu W. Preparation and thermoelectric properties of graphite/ $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te$ composites. / W. Hu, H. Zhou, X. Mu, et al. // Journal of electronic materials – 2017. – DOI: 10.1007/s11664-017-5908-8.

Надійшла до редакції 13.02.2020

Горский П.В.^{1,2}, док. физ.-мат. наук^{1,2}

¹Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина;
e - mail: anatysh@gmail.com;

²Черновицкий национальный университет
имени Юрия Федьковича, ул. Коцюбинського 2
Черновцы, 58012, Украина

О ПРИНЦИПИАЛЬНОМ ОТЛИЧИИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ ОТ ЛЕГИРОВАННЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И СЛЕДСТВИЯХ ИЗ НЕГО

Показано, что если влияние легирующих примесей на термоэлектрический материал сводится только к изменению концентрации свободных носителей заряда в нем, то, например, для материала на основе теллурида висмута даже при температуре 400 К невозможно получить значение безразмерной термоэлектрической эффективности, которое бы существенно превышало 1. С другой стороны безразмерная термоэлектрическая эффективность термоэлектрических композитов на основе полупроводниковых материалов с металлическими нанокластерами либо наночастицами может существенно превышать 1, если они действительно являются композитами, т.е. материалами, каждая составляющая которых, войдя в состав композита, сохраняет присущие ей макроскопические значения кинетических коэффициентов и их температурные зависимости. В этом случае повышение добротности такого термоэлектрического композита сводится к оптимизации его состава и решению вопроса о технологических возможностях изготовления именно этого композита. Однако следует иметь в виду, что ответ на вопрос о практическом применении таких композитов, если они даже будут созданы и их параметры будут стабильно воспроизводимыми, зависит от возможности создания с их применением устройств, которые должны иметь не только высокие потребительские характеристики, но и соответствующую стабильность, надежность, долговечность и ресурсную устойчивость. Библ. 6, рис. 6.

Ключевые слова: термоэлектрический материал, легирования, безразмерная термоэлектрическая эффективность, порог перколяции, композит, наночастицы, оптимальный состав композита.

Gorskyi P.V. dok. phys.-mat. sciences^{1,2}

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

ON THE PRINCIPAL DIFFERENCE OF THERMOELECTRIC COMPOSITES FROM ALLOY THERMOELECTRIC MATERIALS AND CONSEQUENCES FROM IT

It is shown that if the effect of doping impurities on a thermoelectric material is reduced only to a change in the concentration of free charge carriers in it, then, for example, for a material based on bismuth telluride even at a temperature of 400 K it is impossible to obtain a dimensionless thermoelectric efficiency on the other hand, the dimensionless thermoelectric efficiency of thermoelectric composites based on semiconductor materials with metal nanoclusters or nanoparticles can significantly exceed 1, if they are really composites, ie. materials, each component of which, entering the composition of the composite, retains its inherent macroscopic values of kinetic coefficients and their temperature dependences. In this case, increasing the quality factor of such a thermoelectric composite is reduced to optimizing its composition and solving the question of the technological possibilities of manufacturing this particular composite. However, it should be borne in mind that the answer to the question of the practical application of such composites, even if they are created and their parameters will be stably reproducible, depends on the possibility of creating devices using them, which must have not only high consumer characteristics but also appropriate stability. , reliability, durability and resource stability. Bibl. 6, Fig. 6.

Key words: thermoelectric material, alloying, dimensionless thermoelectric efficiency, percolation threshold, composite, nanoparticles, optimal composite composition.

References

1. Гольцман Б.М. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3 / Б.М. Гольцман, И.А. Кудинов, И.А. Смирнов. – М.: Наука – 1972. – 322с.
2. Klemens P.D. Lattice thermal conductivity / P.D. Klemens – In book: Solid State Physics. Advances in Research and Applications. Vol.7, pp. 1-98. Academic Press. Inc. Publishers, New York – 1958, 526 p.
3. Снарский А.А. Термоэлектрическая добротность объемных наноструктурированных композитов с распределенными параметрами / А.А. Снарский, А.К. Сарычев, И.В. Безсуднов, В.Н. Лагарьков // ФТП. – 2012. – Т.46. – С. 677-683.
4. Горський П.В. Про температурні залежності термоелектричних характеристик перехідного шару термоелектричний матеріал-метал з урахуванням явища перколяції / Горський П.В., Мицканюк Н.В.// Термоелектрика. – 2019, №3 – С.5-22.
5. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. / Ч. Киттель. – М.: Наука. – 1978. – 792с.
6. Hu W. Preparation and thermoelectric properties of graphite/ $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te$ composites. / W. Hu, H. Zhou, X. Mu, et al. // Journal of electronic materials – 2017. – DOI: 10.1007/s11664-017-5908-8.

Submitted 13.02.2020