УДК 536.532

Кожемякін Г.М.,[1] Скіпідаров С.Я.,[2] Крутов Ю.М.,[1] Паращенко А.М.,[1] Іванов О.М.,[3] Соклакова О.Н.[3]

[1]Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, кв. Молодіжний, 20 А, Луганськ, 91034, Україна;
[2]ЗАТ СКТБ «НОРД», компанії Ferrotec Corp., Піщаний кар'єр, 3, Москва, 109383, Російська Федерація;
[3]Бєлгородський державний університет, Бєлгород, 308034, Російська Федерація

НАНОСТРУКТУРОВАНІ ТЕЛУРИДИ ВІСМУТУ ТА СУРМИ ДЛЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА

Досліджено мікроструктуру твердих розчинів телуридів вісмуту та сурми p- і n-типу, отриманих методом гарячої екструзії. Показано, що злитки екструдованих термоелектричних матеріалів складалися з нанокристалів розміром від 8 до 30 нм. Виміряно термоелектричні параметри екструдованих наноматеріалів і розглянуто вплив на їхню величину мікроструктури. З даних наноматеріалів було отримано вітки p- і n-типу для виготовлення термоелектричних модулів. Досліджено ефективність термоелектричних модулів, що працюють як термоелектричні теплові насоси в області температур від +10 до +45 ºС. Для вимірювання коефіцієнта перетворення термоелектричних модулів було розроблено два методи. Максимальне значення коефіцієнта перетворення досягало 6.8 – 8.2 для передачі тепла термоелектричним модулем за споживання електричної енергії потужністю 0.75 Вт. Збільшення електричної потужності до 40 Вт приводило до зменшення коефіцієнта перетворення термоелектричних модулів до 1.8.

Ключові слова: термоелектрика, телуриди вісмуту та сурми, нанокристали, тепловий насос, коефіцієнт перетворення; передача тепла.

Thermoelectric devices based on nanocrystalline p- and n-type pellets bismuth-antimony-tellurides and bismuth-selen-tellutides solid solutions were studied. The pellets were prepared by hot extrusion method and had nanocrystals with sizes from 8 to 30 nm. The efficiency of these devices as a thermoelectric heat pump in the +17 to +45 ºc temperature range was investigated. Two measuring methods of a coefficient of performance for thermoelectric devices were developed. The maximum coefficient of performance was reached 6.8-8.2 for heat transfer by the thermoelectric module with 0.75 W electric power. The increase to 40 W electric power of the thermoelectric devices decreased the coefficient of performance to 1.8.

Key words: thermoelectricity, bismuth antimony tellurides, nanostructure, heat pump, coefficient of performance, heat transfer.

Вступ

Відомо, що теплові насоси ефективніші, ніж електронагрівальні елементи для нагрівання в області температур від +10 °С до +40°С [1]. Теплові насоси (ТН) повинні мати високу ефективність для обігріву приміщень за цих температур. Типові повітряні ТН мають коефіцієнт перетворення 3 – 4 у випадку використання для обігріву приміщень за м'якого клімату. Однак зі зниженням температури навколишнього середовища до –18°С ефективність ТН зменшується до 1.0. Випаровувальні компресійні рефрижераторні пристрої можуть використовуватися для ТН

геотермальних систем. Такі ТН мають частини, що рухаються, обмежений термін служби та створюють шуми. Крім того, для їхньої роботи застосовують холодоагенти, що завдають шкоди навколишньому середовищу.

Термоелектричні теплові насоси (ТТН) також можуть мати високий коефіцієнт перетворення (КП) у спеціальних умовах, але без вищевказаних недоліків [2–5]. КП ТТН має бути більшим 5 в області кімнатних температур для комерційного застосування як нагрівача. Ефективність перетворення енергії залежить від величини термоелектричної (ТЕ) добротності $ZT = S^2\sigma T/k$, де Z – добротність, S – термоЕРС, σ – електропровідність, T – абсолютна температура та k – коефіцієнт теплопровідності. Останні результати досліджень [6–8] наноструктурованих кристалічних зливків $Bi_xSb_{2-x}Te_3$ p-типу показали, що завдяки зменшенню теплопровідності значення ZT збільшилося від 1.0 до 1.2 за кімнатної температури. З іншого боку, ZT для n-типу $Bi_2Te_{3-x}Se_x$ має невисоке значення близько 0.85, яке зменшує ефективність приладу. Результати цих досліджень показали перспективний шлях збільшення добротності ZT ТЕ матеріалів і ефективність ТЕ приладів. Слід зазначити, що неповна інформація в науковій літературі про ТТН недостатньо чітко визначає перспективність застосування їх для опалювальних систем.

Мета даної роботи – вивчення структурної досконалості екструдованих зразків твердих розчинів халькогенідів вісмуту та сурми, вплив структури на термоелектричні властивості та коефіцієнт перетворення в області кімнатних температур. У цій статті ми подаємо нові результати дослідження мікроструктури, термоелектричних властивостей і КП термоелектричних модулів, створених на основі наноструктурованих віток p- і n-типу, які можуть застосовуватися як нагрівач в області температур від +17 до +45 ºС.

Методика експерименту

Для виготовлення віток термоелементів застосовували метод екструзії. Вісмут, сурма, телур і селен чистоти (99.99%) попередньо розплавили та закристалізували перед екструзією у формі злитків p-типу $(Bi_2Te_3)_x$–$(Sb_2Te_3)_{1-x}$ (x ≈ 0,26 мол.%) і n-типу $(Bi_2Se_3)_x$–$(Bi_2Te_3)_{1-x}$ (x ≈0,06 мол.%). Методом гарячої екструзії були отримані зливки цих твердих розчинів діаметром 30 мм за технологією СКТБ «Норд». Зі зливків були відрізані зразки у вигляді дисків товщиною 2 мм перпендикулярно напрямку осі злитка для вивчення їх мікроструктури. Поверхні дисків шліфували та полірували абразивом Al_2O_3 із зернистістю від 200 мкм до 40 мкм відповідно. Після промивання в дистильованій воді зразки травили в 50% HNO_3 за температури близько 50 °С упродовж 10-15 хв.

Мікрокристали типові для полікристалів не були виявлені під оптичним мікроскопом на підготовленій поверхні зразків p- і n-типу екструдованих ТЕ матеріалів. Тому морфологію мікроструктури зразків вивчали під скануючим електронним мікроскопом (SEM “Quanta–600 H”). Зразки для вимірювання термоЕРС, питомого електроопору, коефіцієнта теплопровідності та концентрації носіїв заряду вирізали зі зливків у формі паралелепіпедів розмірами 3×4×23 мм^3 з орієнтацією паралельно і перпендикулярно їх більшій грані до осі зливка. На більшій їхній бічній грані в поглибленнях діаметром 0.3 мм і глибиною 0.4 мм кріпили залізо-константанові термопари, діаметр дротів яких становив близько 100 мкм.

Екструдовані зливки p- і n-типу діаметром 30 мм були розрізані на вітки термоелементів розмірами 1.6×1.6×1.6 мм^3, з яких виготовили в СКТБ «Норд» термоелектричні модулі (ТМ) серії ТМ-127-1.4-6.0 з габаритними розмірами 40×40×3.8 мм^3.

Досліджено ефективність передачі тепла цими ТМ. КП виміряний двома методами в умовах, близьких до адіабатичних. Схематичне зображення вимірювання першим методом з використанням

двох мідних пластин презентовано на рис. 1. Тепло надходило та передавалося через холодний і гарячий теплопереходи розмірами 40×40×0.7 мм^3, що є контактними поверхнями ТМ. Тепловий потік, що проходить через модуль, був виміряний за допомогою двох мідних пластин розмірами 40×40×10 мм^3.

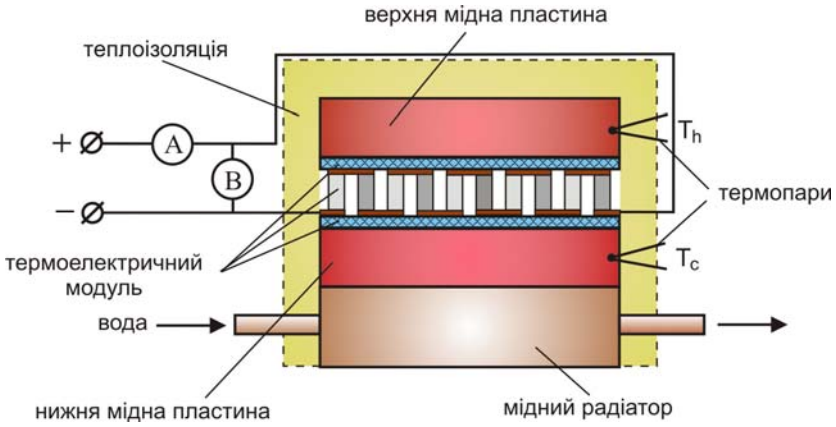

Рис. 1. Схематичне зображення пристрою для вимірювання КП методом із двома мідними пластинами.

Дві поверхні кожної мідної пластини попередньо механічно відполірували абразивом Al_2O_3 розміром 40 мкм. Для надійного теплового контакту між керамічними теплопереходами ТМ і поверхнями мідних пластин наносили пасту *BeO*. Температуру мідних пластин вимірювали хромель-алюмелевими термопарами з діаметром дроту 0.5 мм, які закріплювали в отворах діаметром 1.0 мм і глибиною 1.5 мм на їхніх бічних поверхнях. Мідний радіатор із проточною холодною водою закріплювали під нижньою поверхнею охолоджуваної мідної пластини. Температура гарячої верхньої мідної пластини підтримувалася постійною упродовж експерименту завдяки охолоджуваному мідному радіатору. ТМ і мідні пластини теплоізолювали мінеральною ватою. Така конструкція пристрою забезпечувала вимірювання максимального перепаду температури на ТМ зі споживаною електричною потужністю до 45 Вт.

У другому методі вимірювання КП визначали передачу тепла ТМ від електричного нагрівача до мідної пластини. Для другого методу було розроблено пристрій, показник на рис. 2. ТМ фіксували на електричному нагрівачі площею 40×40 мм^2 і 2 мм товщиною. Нижня поверхня електричного нагрівача опиралася на п'єдестал, виготовлений з матеріалу з низьким коефіцієнтом теплопровідності. Для вимірювання теплового потоку використовували одну мідну пластину розміром 40×40×10 мм^3 і масою 174 г. Ця мідна пластина була зафіксована на верхньому теплопереході ТМ як поглинач тепла переданого ТМ. Надійний тепловий контакт між верхнім теплопереходом ТМ і мідною пластиною здійснювали за допомогою пасти *BeO*. Температуру мідної пластини вимірювали мідь-константановою термопарою з діаметром дротів 0.1 мм, розміщеною в отворі, діаметром 0.3 мм і глибиною 1 мм на бічній поверхні цієї пластини. Повітряний простір між мідною пластиною, ТМ, електричним нагрівачем і металевим корпусом було заповнено мінеральною ватою для теплоізоляції. Теплові потоки від п'яти поверхонь мідної пластини і ТМ компенсувалися двома зовнішніми нагрівачами (бічним і верхнім). Рівність температури між поверхнями мідної пластини та стінками металевого корпуса контролювали мідь-константановими диференціальними термопарами. КП вимірювали через 15-20 секунд після ввімкнення ТМ.

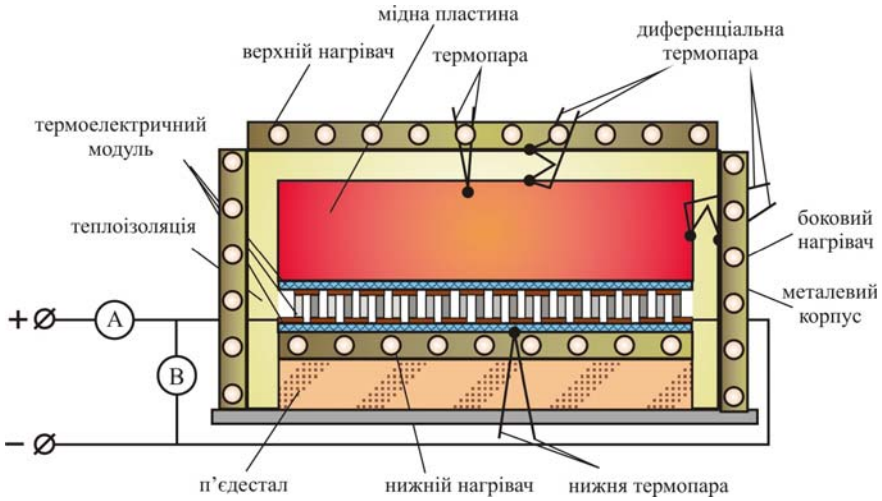

Рис. 2. Схема пристрою вимірювання КП для методу із застосуванням мідної пластини та нагрівача.

Структура матеріалів і їх термоелектричні властивості

На рис. 3 показано фотографії морфології структури *p*-типу зразків, отримані за допомогою скануючого електронного мікроскопа.

У зразках *p*-типу з невеликим збільшенням 40000× спостерігалися рівномірно розподілені кристаліти та пори, що мають розміри 20-260 нм і 60-260 нм відповідно (рис.3,а). Середній розмір кристалітів становив 150 нм, пор – 130 нм. Форма кристалітів і пор була близька до сферичної. За більшого збільшення в 100000× і 200000× морфологія структури мала подібний вигляд (рис. 3, б, в). Однак спостерігалися більш дрібні нанокристали розміром близько 10 нм. Дрібні нанокристали групувалися в більші з розмірами 50-80 нм, 100-130 нм і 300 нм. Найбільші пори мали розмір близько 1 мкм (рис. 3, г).

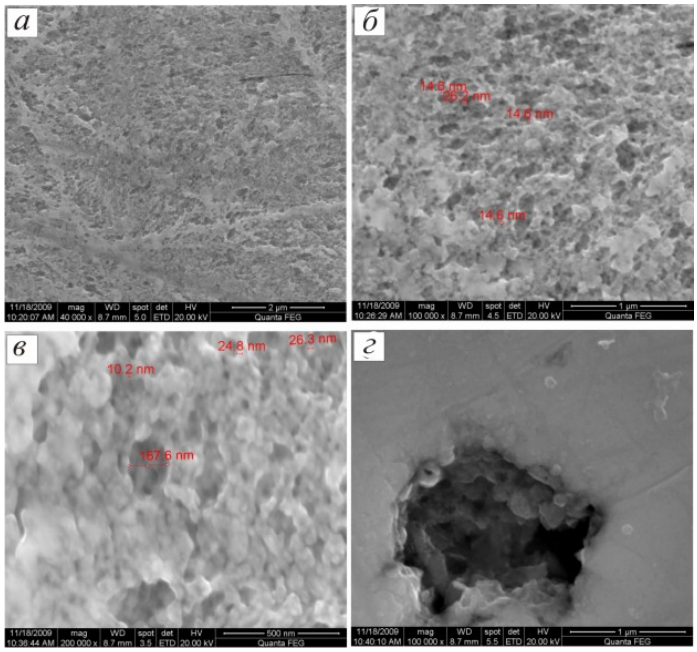

Рис. 3. Фотографії морфології мікроструктури термоелектричного матеріалу p-типу $(Bi_2Te_3)_x$–$(Sb_2Te_3)_{1-x}$ (x ≈ 0,26 mol.%, отримані за допомогою скануючого електронного мікроскопа.

У зразках *n*-типу спостерігалася інша картина (рис. 4). Мікроструктура являла собою джгути волокон, які орієнтувалися один відносно одного під різними кутами (рис. 4, *а*). Джгути волокон звивалися під кутами 120°-180° і в місцях їх вигину спостерігалися порожнечі розміром від 1 до 5 мкм. Поперечні розміри волокон були близькі до 40 мкм (рис. 4, б).

Тонкі волокна поєднувалися в більші волокна товщиною в декілька мкм і довжиною кілька десятків мкм. Із більшим збільшенням видно, що волокна складаються із дрібних нанокристалів з розмірами 8–30 нм (рис. 4, в, г). Нанокристали, крім волокон, формували більші кристали із середніми розмірами 60 нм, 120 нм і 300 нм. Однак пори в зразках *n*-типу мали більші розміри, ніж у зразках *p*-типу.

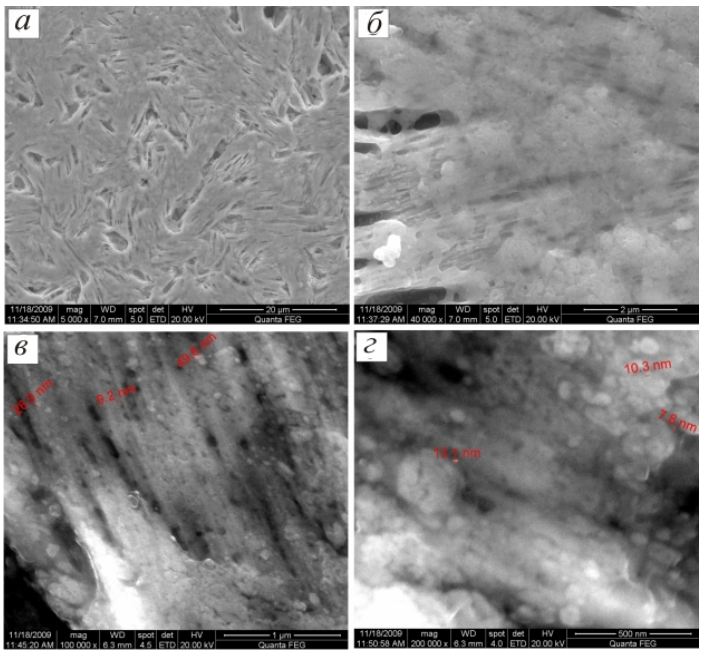

Рис. 4. Фотографії морфології мікроструктури термоелектричного матеріалу n-типу $(Bi_2Se_3)_x$–$(Bi_2Te_3)_{1-x}$ (x ≈0,06 mol.%), отримані за допомогою скануючого електронного мікроскопа.

Термоелектричну ефективність наноструктурованих термоелектричних матеріалів визначали методом роздільного вимірювання термоЕРС, питомого електроопору та теплопровідності. Питомий електроопір вимірювали в ізотермічних умовах, а термоЕРС за градієнта температури уздовж зразка близько 1 К/см.

Таблиця 1

Термоелектричні властивості екструдованих матеріалів

Параметри	$(Bi_2Te_3)_x$–$(Sb_2Te_3)_{1-x}$ *p*-типу	$(Bi_2Se_3)_x$–$(Bi_2Te_3)_{1-x}$ *n*-типу
ТермоЕРС, α, мкВ/К	224	225
Питомий електроопір, $\sigma\times10^{-5}$, Ом·м	0.95	1.06
Коефіцієнт теплопровідності k , Вт/(м·К)	1.6	1.7
Термоелектрична ефективність $Z\times10^{-3}$, $К^{-1}$	3.3	2.8
Рухливість носіїв заряду, $\mu_n \times10^4$, $см^2/В\cdot с$	2.7	1.5
Концентрація носіїв заряду $n \times10^{18}$, $см^{-3}$	2.2	4.0

Орієнтація зразків щодо осі зливка не впливала на величину вимірюваних параметрів. Слід зазначити той факт, що термоелектрична ефективність наноструктурованого матеріалу *n*-типу менша ефективності матеріалу *p*-типу. Крім того, більш низька рухливість і більша концентрація носіїв заряду сприяють підвищенню питомого електроопору та теплопровідності, хоча й незначного, але такого, що знижує ТЕ ефективність цього твердого розчину на 15%. Порівнюючи картини мікроструктур досліджених матеріалів, можна відзначити, що на зниження ТЕ ефективності та рухливості носіїв заряду в *n*-типі наноструктурованого матеріалу, імовірно, впливають волокниста структура, хаотично орієнтована в просторі, і наявність більших пор з розмірами до 5 мкм.

Вимірювання коефіцієнта перетворення

Метод із двома мідними пластинами

Коефіцієнт перетворення ТМ методом із двома мідними пластинами розраховували з урахуванням експериментальних даних у такий спосіб. Для цього застосовували рівняння, що описують ТЕ процеси в ТМ. За теплової рівноваги тепло ефекту Пельтьє та половина тепла Джоуля ТМ дорівнюють тепловому потоку від гарячої до холодної поверхні приладу [10]. Ця теплова рівновага відповідає постійному потоку тепла за максимальної різниці температур (T_h – T_c) і може бути описана як

$$\alpha_m \cdot T_h \cdot I + 0.5 \cdot R_m \cdot I^2 - k_m \cdot (T_h - T_c) = 0\,, \tag{1}$$

де α_m – термоЕРС ТМ; T_h – температура гарячої поверхні ТМ; T_c – температура холодної поверхні ТМ; I – електричний струм, що протікає через ТМ; R_m – електричний опір ТМ; k_m – коефіцієнт теплопровідності ТМ.

Напруга U на ТМ може бути розрахована з рівності [9]

$$U = \alpha_m \cdot (T_h - T_c) + I \cdot R_m\,, \tag{2}$$

де α_m, k_m, R_m є температурно-залежними від T_h і T_c. Ці залежності можна описати рівняннями

$$\alpha_m = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot T + \alpha_3 \cdot T^2 \qquad T_h - T_c = 0\,; \tag{3}$$

$$\alpha_m = (\alpha_m(T_h) - \alpha_m(T_c))/(T_h - T_c) \qquad T_h - T_c \neq 0\,; \tag{4}$$

$$R_m = R_1 + R_2 \cdot T + R_3 \cdot T^2 \qquad T_h - T_c = 0\,; \tag{5}$$

$$R_m = (R_m(T_h) - R_m(T_c)) / (T_h - T_c) \qquad T_h - T_c \neq 0\,; \tag{6}$$

$$k_m = k_1 + k_2 \cdot T + k_3 \cdot T^2 \qquad T_h - T_c = 0\,; \tag{7}$$

$$k_m = (k_m(T_h) - k_m(T_c)) / (T_h - T_c) \qquad T_h - T_c \neq 0\,. \tag{8}$$

Розв'язок рівнянь (1) і (2) разом з рівняннями (3-8) дає можливість визначити α_m, R_m, та k_m із проведеної серії експериментів. У кожному експерименті вимірювали $\Delta T_{\max}$ за постійного T_h і

зміною напруги та струму. Отримані значення дали можливість визначити α_m, R_m, і k_m з похибкою менше 3%.

Тепло N_h, передане ТМ, розраховували за рівнянням (1) у рівноважних умовах. КП ТМ η визначали як [2,11]

$$\eta = \frac{N_h}{U \cdot I}. \tag{9}$$

Значення КП за температур холодної поверхні T_c=273 К і T_c=323 К в першому експерименті показано на рисунках 5 і 6.

Спостерігалося зменшення КП зі збільшенням потужності та перепаду температури при даних значень T_c. Для T_c = 323 К КП зростав за перепадом температури до 10 К. Максимальне значення КП η = 9.3 було за витраченої електричній потужності N_e = 2 Вт і ΔT = 0. Мінімальне значення КП становило 1.8 при N_e = 40 Вт і ΔT = 30º.

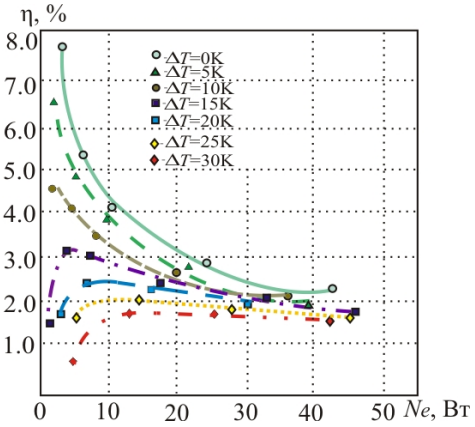

Рис. 5. Залежність КП η від електричної потужності N_e за температури T_c = 273 К.

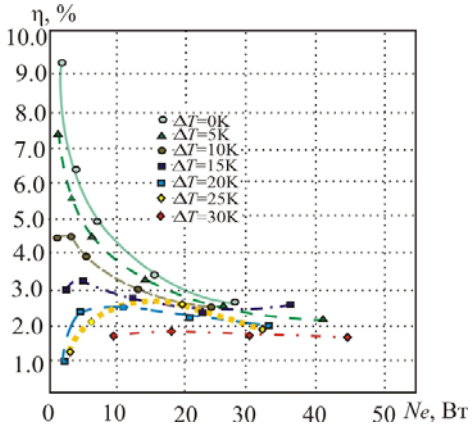

Рис. 6. Залежність коефіцієнта перетворення η від електричної потужності N_e за температури T_c = 323 К.

Метод з однією мідною пластиною та нагрівачем

У даному методі, тепло передане ТМ мідній пластині, визначали з підвищенням її температури упродовж 10 с. Цей період часу зміни температури набагато перевищував час поширення тепла в мідній пластині (t<<1 с). Кількість тепла, переданого мідній пластині N_h, розраховували за співвідношенням [12]:

$$N_h = \frac{cm(T_2 - T_1)}{t}, \tag{10}$$

де c – теплоємність міді; m – маса мідної пластини; T_1 і T_2 – температури мідної пластини в першу і десяту секунди вимірювання. КП у другому методі розраховували згідно з рівнянням (9).

У другому експерименті КП вимірювали для трьох значень електричної потужності ТМ. Передану енергію мідній пластині вимірювали та розраховували згідно з рівністю (10) і використовували для розрахунків КП по рівності (9). Результати вимірів для області температур від +17 °С до +45°С подано на рис. 7. Мінімальна й максимальна теплова потужність зменшувалася від 5 Вт до 4.8 Вт і від 21.6 Вт до 14.1 Вт за витраченої електричній потужності від N_e= 0.75 Вт до N_e=7.6 Вт відповідно. Перепад температури ΔT між гарячою та холодною поверхнями ТМ змінювався від 4 до 18 градусів. КП цього термомодуля досягав 8. Слід зазначити досить добрий збіг результатів вимірювань КП термомодуля двома методами.

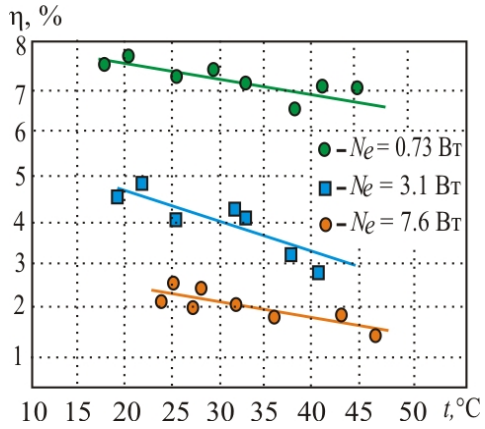

Рис. 7. Залежність коефіцієнта перетворення від температури T_h трьох значень електричної потужності N_e.

Однак ТЕ матеріали, застосовувані для виготовлення ТМ, мали ТЕ добротність $ZT \approx 1$ за кімнатної температури. У даних експериментах ми використовували ТЕ наноматеріали з розмірами нанокристалів 8–30 нм. Наноструктуровані тверді розчини $(Bi_2Te_3)_x$–$(Sb_2Te_3)_{1-x}$ *p*-типу мають більш високу термоелектричну ефективність порівнянно з матеріалом *n*-типу. Тому одним зі шляхів підвищення ефективності роботи ТМ є підвищення термоелектричної добротності твердих розчинів *n*-типу $(Bi_2Se_3)_x$–$(Bi_2Te_3)_{1-x}$. Результати проведених досліджень вказують наступні можливості підвищення ефективності наноструктурованних ТМ.

По-перше, крім відомого способу зниження коефіцієнта теплопровідності за рахунок зменшення розмірів нанокристалів до одиниць нанометрів [7,13,14], перспективною є розробка технологічних умов методу екструзії з метою підвищення структурної досконалості матеріалів. Зменшення розмірів пор і структурована в певному напрямку орієнтація волокон в матеріалі *n*-типу, на наш погляд, можуть забезпечити підвищення добротності. По-друге, легування твердих розчинів з метою підвищення термоелектричних властивостей і впливу на структурну досконаліть наноструктурованих матеріалів.

Висновки

Вивчено морфологію мікроструктури екструдованих злитків *p*- і *n*-типу ТЕ матеріалів на основі твердих розчинів халькогенідів вісмуту та сурми. Екструдовані ТЕ матеріали мали нанокристалічну структуру. Нанокристали в зразках *p*-типу мали сферичну форму з розмірами від 8 до 30 нм, які поєднувалися в кластери розмірами від 60 до 300 нм. Між кристалітами спостерігалися пори розміром до 1 мкм. Нанокристали в зразках *n*-типу також мали подібну сферичну форму та розміри, але формували волокна товщиною 30–60 нм. Волокна поєднувалися в джгути довжиною до декількох десятків мкм, маючи різну орієнтацію та звиваючись на 120–180, де спостерігалися пори розмірами 1–5 мкм. Нанокристали, крім волокон, формували більші кристаліти із середніми розмірами 60 нм, 120 нм і 300 нм.

Установлено за допомогою методу роздільного вимірювання термоЕРС, питомого електроопору та теплопровідності, що термоелектрична добротність екструдованих нанокристалічних матеріалів *p*-типу становить $Z = 3.3\times10^{-3}$ K^{-1}, а *n*-типу – $Z = 2.8\times10^{-3}$ K^{-1}.
Менша величина добротності матеріалу *n*-типу може бути обумовлена більш низькою рухливістю та високою концентрацією носіїв заряду, ніж у матеріалі *p*-типу.

Виміряно КП ТМ, виготовлених з екструдованих твердих розчинів телуридів. Для цього було розроблено два методи вимірювань. У першому методі рівняння, що описують ТЕ процеси в термомодулях, використані для розрахунків ТЕ та електричних параметрів: термоЕРС, коефіцієнта теплопровідності, а також електричного струму, електричного опору та напруги на ТМ. У другому методі КП вимірювали в умовах роботи ТМ у якості ТН. Ці методи показали високу ефективність ТМ для передачі тепла в температурній області від +17 до +45 ºС. Максимальний КП досягав 6.8–8.2 для передачі тепла за електричної потужності 0.75–2 Вт і перепаді температури 4–5 градусів. Однак збільшення електричної потужності до 40 Вт і перепаду температур до 30° зменшувало КП до 1.8.

Ці результати продемонстрували можливість застосування ТМ для нагрівання, а також необхідність збільшення добротності ТЕ матеріалів. ТЕ ефективність ТМ може бути значно підвищена за рахунок зменшення розмірів нанокристалів до одиниць нанометрів, поліпшення досконалості структури та легування екструдованих нанотермоелектричних матеріалів. Компактність, безшумність і висока ефективність із урахуванням застосування нових нанотехнологій будуть сприяти більш широкому застосуванню ТЕ перетворювачів енергії в нових нагрівальних системах.

Подяка. Автори дякують докторові А. Чурілову за корисну дискусію.

Література

1. Angrist S.W. Direct energy conversion, 3d ed., Boston, Allyn and Bacon Inc., 1976. – 518 p.
2. Rowe D. M. CRC handbook of thermoelectrics, Boca Raton, CRC Press, 2010, 701.
3. Mortlock A. J. Simplified Experiment Demonstrating Interstitial Diffusion in Alpha Iron, Am. J. Phys., 33, 1965, P.1033–1035.
4. Riffat Simplifiedx. Thermoelectrics: a review of present and potential applications, Appl. Therm. Experiment. – 2003. – P. 913-935.
5. Chen L., Li J., Sun F. J. Heat transfer effect on optimal performance of two-stage thermoelectric heat pumps // Journal of Mechanical Engineering Science. – 2007, 221. – P.1635-1641.
6. Sales B.C. Smaller Is Cooler // Science. – 2002, 295. P. 1248–1249.
7. Majumdar A. Thermoelectricity in Semiconductor Nanostructures, Science, 303, 2004, 777–778.
8. Zhang Q., Zhanga Q., Chen S., Liu W., Lukas K., Yan X., Wang X., Wang Demonstrating Chen G., Ren Z. Suppression of grain growth by additive in nanostructured *p*-type bismuth antimony tellurides // Nano Energy. – 2012, 1. – P. 183–189.
9. Анізотропія термоелектричних властивостей наноструктурованого материала *p*-типу на основі (Bi, $Sb)_2Te_3$ / І.А. Драбкін, В.Б. Освенський, Ю.Н. Пархоменко [и др.] // Термоелектрика, № 3, 2013, С. 36-48.
10. Thermoelectric Technical Reference – Mathematical Modeling of TEC Modules. *Ferrotec*.: http://www.ferrotec.com (2009).
11. Interstitialemiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling, London, Infosearch, 1957, 188.
12. Тофимова Т.І. Курс фізики, / Т.І. Тофимова // Москва, В. школа, 1990, 478.
13. Dresselhaus M.S., Chen G., Tang M.Y., Yang R., Lee H., Wang D., Ren Z., Fleurial J.P.,Gogna P. New Directions for Low-Dimensional Thermoelectric Materials // Adv. Mater.. – 2007 19. – P. 1043-1053.
14. Булат Л.П. Вплив фононної теплопровідності на термоелектричну добротність об'ємних наноструктурних матеріалів з тунельними контактами / Л.П. Булат, Д. Коссаковський, Д.А. Пшенай – Северін. // Термоелектрика. – 2013, № 2. С. 31-43

Надійшла до редакції 09.04.2013