

The use of materials based on Si_3N_4 in the composition of composites for the design of high-temperature thermoelectric generators

V.V. Tsygoda (ORCID 0000-0001-6997-6384), V.Ya. Petrovskiy (ORCID 0000-0002-5323-7824)

Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of National Academy of Science of Ukraine, 3, Krzhyzhanovsky St., Kyiv, 03142, Ukraine
Tel.: +380631362936
E-mail: tsygoda@gmail.com

Article info: received 05.03.2020, revised 10.03.2020, accepted 23.05.2020

Tsygoda, V.V., Petrovskiy, V.Ya. (2020) The use of materials based on Si_3N_4 in the composition of composites for the design of high-temperature thermoelectric generators 2(47), DOI: 10.26909/csl.2.2020.1

The possibility of reducing the thermal conductivity of silicon nitride as a basis of high-temperature electrical converters was investigated in the thesis. Also, the values of thermoelectric figure of merit and efficiency of thermoelectric current generator for the case of refractory oxygen-free composites were simulated. During the study, the dependence between the m coefficient, which determines the maximum possible efficiency of the thermoelectric generator and the ZT thermoelectric figure of merit, was determined. It was shown that the coefficient of thermal conductivity of the studied materials ranges from 1,2 to $4 \cdot 10^6$ m^2/s and is characterized by a negative temperature coefficient over the entire temperature range. It was found that the thermal conductivity of Si_3N_4 -based materials varies from 2,1 to 5,1 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ depending on the type of sintering activator. The use of Al_2O_3 as an activator makes it possible to obtain a 25 % lower thermal conductivity value comparing to materials with the addition of MgO . For the first time, it was proved that currently it is not possible to achieve an efficiency of 0,5 η_T in Si_3N_4 -based materials used as a composite basis for high-temperature thermoelectric generators development.

Key words: binder thermal conductivity of silicon nitride, high-temperature electrical converters.

Застосування матеріалів на основі Si_3N_4 у складі композитів для конструювання високотемпературних термоелектричних генераторів

В.В. Цигода, В.Я. Петровський

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича Національної академії наук України, Київ, Україна

У роботі досліджено можливість зниження теплопровідності нітриду кремнію, як основи високотемпературних електричних перетворювачів. Також проведено моделювання значень термоелектричної добротності та ККД термоелектричного генератора струму для випадку застосування тугоплавких безкисневих композитів. У ході дослідження виведено залежність коефіцієнту m , який визначає максимально можливе значення ККД термоелектричного генератора від термоелектричної добротності ZT . Показано, що коефіцієнт температуропровідності досліджуваних матеріалів становить від 1,2 до $4 \cdot 10^6$ $\text{м}^2/\text{с}$ і характеризується від'ємним температурним коефіцієнтом у всьому температурному діапазоні. Встановлено, що теплопровідність матеріалів на основі Si_3N_4 змінюється у межах від 2,1 до 5,1 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ у залежності від типу активатора спікання. Застосування Al_2O_3 у якості активатора дає можливість отримати менші значення теплопровідності на 25 % у порівнянні з матеріалами з добавкою MgO . Вперше доведено, що у матеріалах на основі Si_3N_4 як основи композитів для конструювання високотемпературних термоелектричних генераторів на даний момент не можливо досягнути значення ККД у 0,5 η_T .

Вступ

Ефективні та недорогі системи збору теплової енергії необхідні для вирішення проблеми світової енергетичної кризи [1, 2, 3]. Геотермальне генеру-

вання енергії [4], генератор потужності, працюючий на основі ефекту Зеебека [5], окислювально-відновлювальні термоелементи з холодними та гарячими контактами [6] можуть розглядатися як основні методи перетворення теплової енергії в електричну.

Термоелектричні функціональні пристрої при використанні одних і тих же фізичних засад за рахунок розробки певних технологічних аспектів можуть бути виконані у двох пристроях: генератори термоЕРС (при високому внутрішньому опорі та високому значенні коефіцієнту Зеєбека) – термоелектричні сенсори, та генератори струму (при оптимальній величині внутрішнього опору та помірно високій ТД) – термоелектричні генератори [7, 8].

На даний час широко відомі термоелектричні матеріали для роботи у діапазоні температур від кімнатної до 400 °С. Найбільш широко використовуються тверді розчини на основі Bi_2Te_3 . Ефективність термоелектричних перетворювачів у таких матеріалах досягає 7 - 8 %. Bi_2Te_3 є базовим матеріалом для використання у термоелектричних генераторах, що використовують відходи тепла промисловості, двигунів транспортних засобів, теплоту згорання органічних палив та інші.

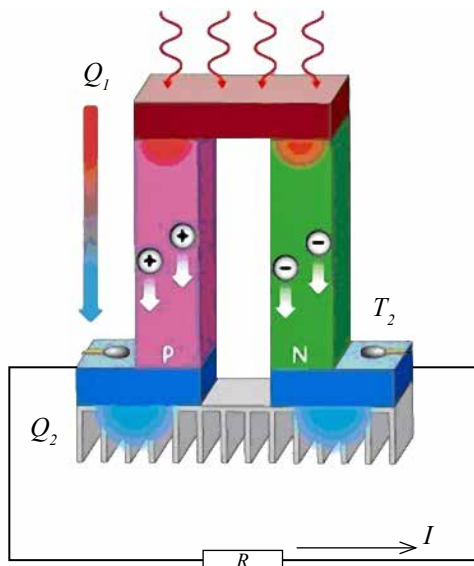


Рис. 1. Схема термогенеруючого функціонального елемента [9]

Для перспективи застосування термоелектричних генераторів у високотемпературних установках літальних та космічних апаратів цього не достатньо. У цій же галузі існує важлива проблема – контроль температури газового середовища термореактивних двигунів літальних апаратів. Термоелектричний сенсор повинен бути стійким до ерозійного винесення, витримувати температури до 1100 - 1300 °С і термічні перепади температур гаряча-холодна сторона до 850 °С [10]. Сьогодні контроль температури газового середовища літальних апаратів – проблема, що не має ефективного рішення.

Існують інші процеси з агресивним середовищем, що потребують контролю температури [11], а саме:

- підвищення ефективності нафтових і газових свердловин (технології закінчення свердловин);
- забезпечення безпечного робочого стану промислових індукційних плавильних печей;
- контроль температури при хімічних процесах.

Інтенсивний розвиток технологій мікрохвильового спікання, сушіння, плавлення потребує ефективних сенсорів інтенсивності мікрохвильового поля в робочій зоні для оперативного управління процесами фазоутворення, структуроутворення та інше [12, 13]. Сьогодні вкрай мало пропозицій таких сенсорів [14, 15], а оскільки частина таких процесів відбувається при високих температурах або в агресивному середовищі, то це ще поглиблює проблему.

Відомо, що ефективність застосування термоелектричного перетворення залежить від двох факторів: максимально можливого перепаду температур гарячої та холодної поверхонь та величини термоелектричної добротності матеріалів термоелектродів [16, 17]. Саме в цьому напрямку зосереджено дослідження та інновації в галузі термоелектричних матеріалів [18, 19, 20].

Ефективність перетворення термоелектричних матеріалів пов'язана із величиною термоелектричної добротності, що обчислюється за формулою [21]

$$ZT = S^2\sigma T/\lambda = (S^2T)/(\lambda\rho), \quad (1)$$

де S – коефіцієнт Зеєбека, В/К; σ – електропровідність, $\text{см}^2/\text{м}\cdot\text{К}$; λ – теплопровідність, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; ρ – питомий електричний опір, $\text{Ом}\cdot\text{м}$.

У роботі [22] показано, що максимальному ККД термоелектричного генератора відповідає відношення (2)

$$m_{max} = M = \sqrt{\frac{T_2}{T_1} + \frac{1}{2}ZT}. \quad (2)$$

Очевидно, що при $ZT \gg 1$, максимум ККД досягається при $m = M \gg 1$, що не відповідає максимальній потужності, і є невідповідним з точки зору питомих показників електрогенератора в цілому. З точки зору електротехніки, для всіх джерел струму, електрична потужність, що віддається зовнішньому навантаженню досягає максимуму при $m = 1$. При цьому зовнішнє навантаження використовує 50 % всієї потужності, що виробляється.

При значеннях m , що істотно відмінні від одиниці, по-перше, спадає електротехнічна ефективність, а по-друге спадає потужність. Із відношення (2) виходить, що при $ZT \gg 1$ і $m = M \gg 1$ ККД тер-

моелемента прагне до ККД циклу Карно η_T , при $ZT \gg 1$ і $m = 1$ він досягає тільки $0,5 \eta_T$. Ця обставина, можливо в майбутньому, буде представляти певну проблему використання термоелектричних генераторів. Для сьогоденнішніх термоелектричних матеріалів граничні значення $ZT \approx 2$, і відмінність M від одиниці невелика.

На рис. 2 показаний взаємозв'язок складових термоелектричної добротності від концентрації носіїв. Як видно, максимальна добротність параболічно залежить від концентрації носіїв. Збільшення концентрації носіїв приводить до зменшення величини термоелектрорушійної сили, росту електропровідності та теплопровідності, особливо електронної складової останньої.

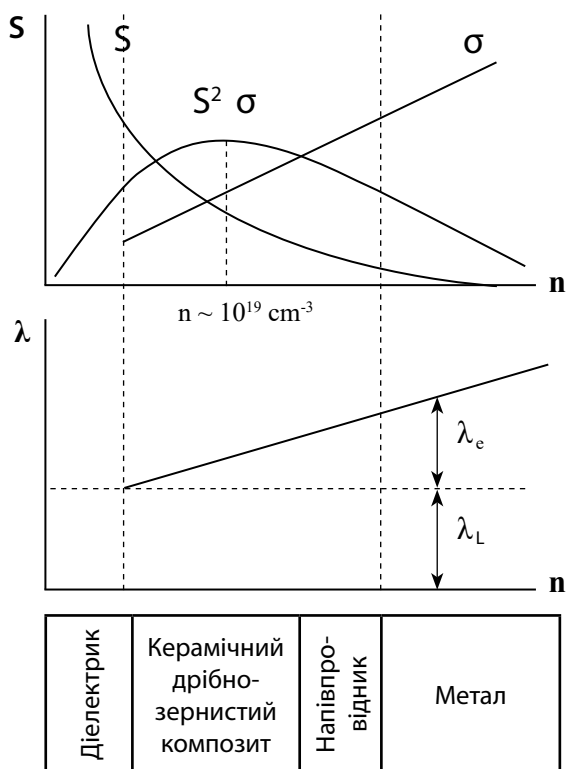


Рис. 2. Залежність складових термоелектричної добротності від концентрації носіїв заряду

Як видно з рис. 2, ефективність термоперетворювачів зникаюче мала для діелектриків і металів, але досягає максимального значення у напівпровідниковій області концентрації носіїв ($n = 10^{18} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$). Як показав Іоффе, ефективність термоперетворювачів прямо пропорційна масі і рухливості носіїв і обернено пропорційна теплопровідності матеріалу

$$Z = m^{3/2} u / \lambda, \quad (3)$$

де m – ефективна маса; u – рухливість носіїв.

Оптимальної концентрації можна досягнути, розробляючи дрібнозернисті кластерні (перколяційні) багатокомпонентні композити, які будуть мати помірну електропровідність (відносно високий питомий опір) зі слабкою температурною залежністю (позитивним ТКО) і низьким значенням теплопровідності за рахунок інтенсифікації розсіювання фононів на дрібнозернистій структурі [23], при цьому розсіювання основних носіїв заряду буде відносно слабким. Саме це є одним з найбільш перспективних напрямків, в якому сьогодні сконцентровані дослідження та інновації в області термоелектричних матеріалів.

Ефективними також можуть виявитись високотемпературні термоелектричні перетворювачі нового покоління на базі тугоплавких безкисневих композитів, про що ще в 1965 році зазначали відомі вітчизняні науковці Г.В. Самсонов та П.С. Кислий [24]. Однак, технічно ефективного вирішення тоді не було знайдено. Розвиток функціональних елементів шаруватого типу на основі матриці з нітриду кремнію та резистивного функціонального шару з дрібнозернистого композиту нітрид кремнію-нітрид титану [25, 26] привів до встановлення того факту, що при певних умовах високотемпературного ущільнення формується перколяційний кластер, здатний генерувати термоелектричну напругу, і викликати процеси руху зарядів під впливом локального градієнту температур, здатних утворювати явище позитивного ТКО резистивного шару.

Метою даної роботи є дослідження можливості зниження теплопровідності нітриду кремнію, моделювання значень термоелектричної добротності та ККД термоелектричного генератора струму на базі тугоплавких безкисневих композитів.

Матеріали та методи досліджень

Для виготовлення заготовок був використаний промисловий порошок нітриду кремнію $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ (Бакинського заводу порошкової металургії, Азербайджан), у якості активуючих ущільнювачів і спікання добавок використовувалися MgO та Al_2O_3 .

Гомогенізація і подрібнення шихти здійснювалися в планетарному млині типу Fritsch (барабан і кулі Si_3N_4) протягом 40 хв. в етиловому спирті. Сирі заготовки шарів після формувань мали щільність 54 - 74 % від теоретичної залежно від способу отримання стрічок. Схема складання заготовок показана на рис. 3.

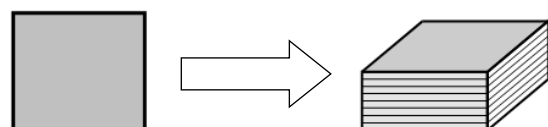


Рис. 3. Схема складання заготовок у виробі

Щільність повністю консолідованого матеріалу $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{MgO}$ та $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{Al}_2\text{O}_3$ становить відповідно $3,23 \text{ кг/м}^3$ та $3,26 \text{ кг/м}^3$. Пористість вимірюваних нами матеріалів становила відповідно $31,6 \%$ та $33,4 \%$.

Теплопровідність визначали через знаходження температуропровідності методом лазерного спалаху [27], який є одним із найбільш перспективних методів дослідження теплофізичних властивостей речовини [28, 29]. Використана нами експериментальна установка дозволяє виконувати дослідження температуропровідності металів та діелектриків як на повітрі, так і в іншому, оптично прозорому для лазерного випромінювання середовищі. До основних переваг даної установки слід віднести, в першу чергу, наявність високоякісного вимірювального електронного комплексу, який дозволяє проводити дослідження у діапазоні частот модуляції від одиниць до сотень герц з похибкою $1,5 \%$. По-друге, використання оптичного квантового генератора ОКГ (ЛГ-48) для створення модуляції температури зразка, завдяки чому процес вимірювання став інваріантним відносно того, знаходиться об'єкт у вакуумі чи в якому-небудь прозорому для випромінювання ОКГ середовищі. Функціональна схема установки показана на рис. 4, де позначені: СФОН – схема формування опорної (модулюючої) напруги, М – модулятор випромінювання ОКГ, З – зразок, Д – датчик, який перетворює тепловий сигнал в електричний, К – підсилювач з системою автоматичного регулювання підсилення (АРП), АСФ – система автоматичного слідування за фазою сигналу.

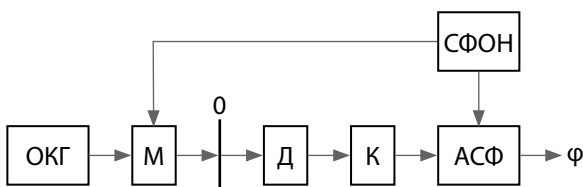


Рис. 4. Функціональна схема установки для вимірювання температуропровідності

Принцип роботи установки полягає у наступному. Модулююче випромінювання ОКГ впливає на одну із поверхонь зразка і утворює в ньому температурну хвилю. Коливання температури другої поверхні зразка перетворюються датчиком в електричний сигнал, який підсилюється до певної величини і оброблюється системою АСФ. Інформація про зсув фази коливань температури другої поверхні зразка φ по відношенню до фази модулюючого теплового потоку є основою для розрахунку температуропровідності. Завдяки наявності системи АРП і великому вхідному опору, вимірювальна апаратура може

працювати з будь-яким типом датчику. Зокрема, у даній серії експериментів були використані фотодіод та фотоопір, які працюють в інфрачервоній області оптичного спектру.

Модулятор був виконаний механічним. При низьких частотах модуляції таке рішення найбільш просте і надійне.

Повна функціональна і принципова схеми вимірювальної установки детально розглянуті у [30, 31].

Крім того, для дослідження представлених матеріалів була додатково розроблена конструкція комірки для зразка, який призначений для роботи у повітряній атмосфері. Схематична схема комірки наведена на рис. 5. Модулюючий потік випромінювання ОКГ впливає на зразок, закріплений у конічному отворі в основі, яка виготовлена із жаростійкої кераміки. При такій формі отвору, дотик зразку і керамічної основи проходить по лінії, а не по поверхні, завдяки чому теплообмін між зразком і основою стає незначним. До передньої поверхні зразка кріпиться термопара, яка визначає середню температуру. Зміна температури зразка суттєво здійснюється за допомогою дрютяного нагрівача Н. Друга поверхня досліджуваного зразка знаходиться у полі візування фотодатчика Д. Канал, по якому випромінювання зразка потрапляє у датчик, зроблений під кутом до оптичної осі ОКГ. Це необхідно для того, щоб у випадку прогорання зразка не відбувалося прямого засвічування фотодатчика потужним випромінюванням лазера.

Так в рамках методу плоских температурних хвиль коефіцієнт температуропровідності зразка a визначається за формулою

$$a = \frac{\omega L^2}{(1,414(\varphi + 2\pi(n-1)) - 1,11)^2}, \quad (4)$$

де ω – це кругова частота коливань температури зразка; L – товщина зразка; φ – вимірюваний зсув фази між коливаннями підведеної до зразка змінної потужності і температурою на протилежній поверхні зразка; n – кількість (ціле число) довжин температурних хвиль, що поміщаються на товщині зразка L .

Для отримання однозначних значень коефіцієнту температуропровідності необхідне знання чотирьох параметрів ω , L , φ і n .

При дослідженні речовин, температуропровідність яких приблизно відома шляхом вибору відповідної товщини зразка, легко отримати значення $n = 1$. При дослідженні речовин з невідомою температуропровідністю цього зробити практично неможливо. Таким чином, при вимірюваннях температуропровідності речовини при певній частоті модуляції температури ω можлива неоднозначність у визначенні зсуву фази на величину $2\pi n$. Однак, цю

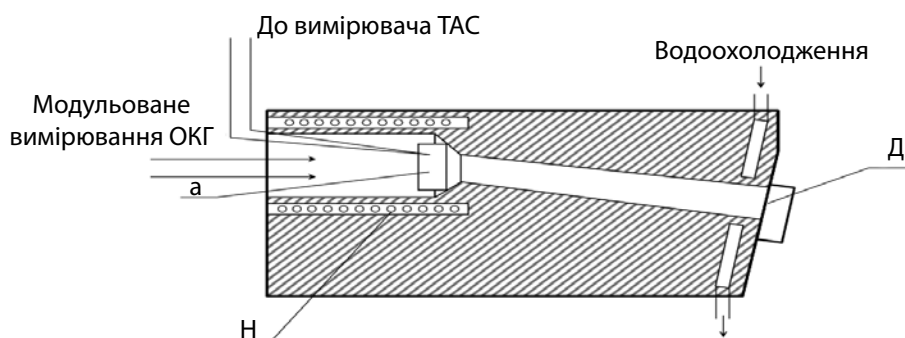


Рис. 5. Конструкція комірки для зразку

неоднозначність можна повністю усунути шляхом зміни коефіцієнту температуропровідності зразка на декількох частотах модуляції ω чи шляхом зміни коефіцієнту температуропровідності на зразках різної товщини, виготовлених із одного й того ж матеріалу, при постійній частоті модуляції ω .

Аналіз можливих похибок, які виникають при вимірюванні коефіцієнтів температуропровідності з допомогою описаної вище установки показав, що похибки вимірювання температуропровідності діелектриків не перевищують 7 - 10 %.

Вимірювання безпосередньо коефіцієнтів теплопровідності речовин при високих температурах є досить складною експериментальною задачею. Це пов'язано з тим, що при високих температурах дуже складно правильно врахувати усі теплові потоки, які пов'язані зі зразками. На сьогоднішній день прямі вимірювання коефіцієнтів теплопровідності при високих температурах виконуються з допомогою різноманітних стаціонарних методів вимірювання [32]. Ці методи потребують значних затрат часу (до декількох годин на 1 експериментальну точку), які спричинені з установкою у вимірювальній камері стаціонарних станів. Тому, такі стаціонарні методи не можуть використовуватися для визначення коефіцієнту теплопровідності речовин, властивості яких можуть змінюватися при тривалих витримках.

Існує інший спосіб визначення коефіцієнту теплопровідності речовин [33]. Як відомо, коефіцієнт теплопровідності λ можна визначити по формулі:

$$\lambda = a \cdot C_p \cdot \gamma, \quad (5)$$

де γ – густина речовини; C_p – питома теплоємність цієї речовини; a – коефіцієнт температуропровідності.

Необхідно експериментальним шляхом визначити a , C_p та γ , тоді підставивши значення у формулу (5) отримаємо значення λ .

Густину γ визначали пікнометричним методом, теплоємність – при кімнатній температурі – методом стаціонарних потоків на промисловій установці ІС-400. Результати відповідних вимірювань наведені у таблиці 1. Слід зазначити достатньо велику величину похибки вимірювання C_p , яка становить 10 - 15 % при підвищених температурах.

При розрахунку теплопровідності враховували, що густина твердих тіл слабо залежить від температури, тому для високих температур можна використовувати дані, які були отримали при кімнатній температурі. Експериментально не змогли виміряти значення теплоємності C_p матеріалів в усьому температурному діапазоні. У зв'язку з цим, температурні зміни теплоємностей ми оцінювали по експериментально встановленій температурній залежності відносної теплоємності [34] і теоретично по відомим довідниковим даним [35, 36] про залежність $C_p(T)$ для основної компоненти суміші з поправками на різноманітні добавки. Враховуючи той факт, що точний склад суміші нам не був відомий, подібний підхід до оцінки теплоємності міг внести суттєву похибку в кінцевий результат.

Таблиця 1.

Масова ізобарна теплоємність C_p і густина досліджуваних матеріалів при кімнатній температурі

Матеріал	$C_p \cdot 10^{-3}$, Дж/(кг·К)	$d \cdot 10^{-3}$, кг/м ³
Si ₃ N ₄ + 5 % об. MgO	0,58	2,21
Si ₃ N ₄ + 5 % об. Al ₂ O ₃	0,66	2,17

Результати та їх обговорення

На рис. 6 показані отримані нами результати досліджень коефіцієнтів температуропровідності a для матеріалів $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{MgO}$ та $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{Al}_2\text{O}_3$.

Усім дослідженим матеріалам присутня монотонна зміна коефіцієнтів температуропровідності, яка полягає у зменшенні значень a з підвищенням температури. Показано, що графіт із просоченням $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{MgO}$ і $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{Al}_2\text{O}_3$ мають малі значення коефіцієнту температуропровідності a . Як видно з рис. 6 для цих матеріалів величина температуропровідності не перевищує $4 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$. Досліджувані матеріали відзначаються високою стабільністю своїх властивостей і стійкістю при високих температурах у повітряній атмосфері.

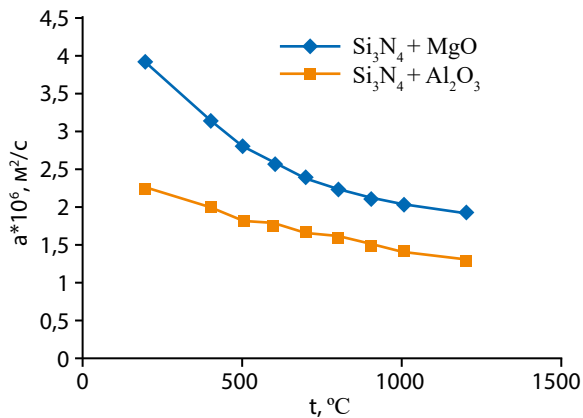


Рис. 6. Коефіцієнт температуропровідності досліджуваних матеріалів

Привертає увагу на той факт, що на отриманих нами кривих $a(T)$ у температурній області, що знаходиться близько $600 \text{ }^\circ\text{C}$, починає змінюватися температурний коефіцієнт $\frac{da}{dT}$. До цієї температури спостерігали, що матеріали характеризуються приблизно постійним температурним коефіцієнтом, а далі він, залишається від'ємним, починає зменшуватися по абсолютній величині. Можна припустити, що температурні криві $a(T)$ прямують до деякого насичення. Результати розрахунків теплопровідності наведено на рисунку 7.

Видно, що теплопровідність досліджуваних матеріалів коливається від 2,1 до 5 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$. При цьому як у випадку із коефіцієнтом температуропровідності, ми знову спостерігали нелінійний хід кривих з деяким зменшенням в області високих температур. Не виключено, однак, що нелінійна залежність $\lambda(T)$ у матеріалів пов'язана з неточною оцінкою температурної зміни теплоємності $C_p(T)$. При використанні активатора Al_2O_3 теплопровідність в $1,3 \div 1,59$ рази менша, ніж із використанням MgO .

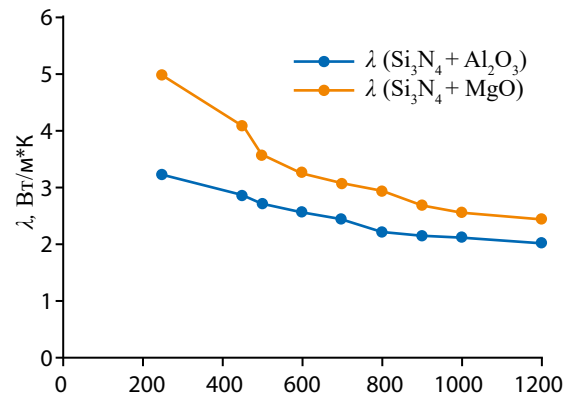


Рис. 7. Теплопровідність досліджуваних матеріалів

На рис. 8 показано моделювання коефіцієнту m від термоелектричної добротності для трьох різних значень температури гарячої поверхні. Значення m змінювалися від 1,84 до 2,31. Як видно з графіка $m > 1$, при чому зміна T_2 на $400 \text{ }^\circ\text{C}$ призводить до збільшення m у 1,16 раз.

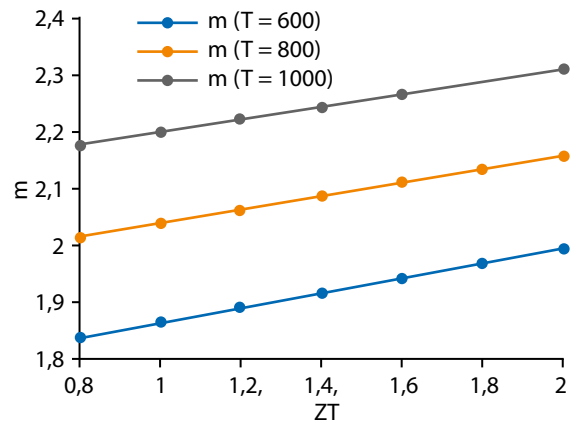


Рис. 8. Залежність коефіцієнту m від ZT при трьох різних значеннях T_2 ($600 \text{ }^\circ\text{C}$, $800 \text{ }^\circ\text{C}$, $1000 \text{ }^\circ\text{C}$)

Узагальнена залежність m від ZT виглядає наступним чином:

$$m = 0,1205 \cdot ZT + 1,915. \quad (6)$$

Із формули (6) випливає, що у матеріалах на основі Si_3N_4 як основи композитів для конструювання високотемпературних термоелектричних генераторів на даний момент не можливо досягнути значення ККД у $0,5\eta_r$. Тому подальші дослідження необхідно зосередити на пошуках методів зменшення теплопровідності тугоплавких безкисневих композитів.

Висновки

1. Коефіцієнт температуропровідності досліджуваних матеріалів становить від 1,2 до $4 \cdot 10^6$ м²/с і характеризується від'ємним температурним коефіцієнтом у всьому температурному діапазоні.

2. Теплопровідність досліджуваних матеріалів розраховувалася по встановленим даним про температуропровідність, теплоємність та густину. Отримані дані лежать у межах від 2,1 до 5,1 Вт/(м·К). Для досліджуваних матеріалів характерний нелінійний характер залежності коефіцієнту теплопровідності від температури, що можна пояснити похибкою вимірювань. Особливі методи для зменшення теплопровідності із метою підвищення термоелектричної добротності не виявлено.

3. Залежність коефіцієнту m від ZT можна описати лінійною функцією $m = 0,1205 \cdot ZT + 1,915$. Зміна температури гарячої сторони на 400 °С призводить до збільшення m у 1,16 раз. У матеріалах на основі Si_3N_4 як основи композитів для конструювання високотемпературних термоелектричних генераторів на даний момент не можливо досягнути значення ККД у 0,5 η_T . Подальші дослідження необхідно зосередити на пошуках методів зменшення теплопровідності тугоплавких безкисневих композитів.

References

1. X. Shi, K. Ueno, T. Oshikiri, Q. Sun, K. Sasaki and H. Misawa, Nat. Nanotechnol. – 2018. – №13. – P. 953 - 958.
2. F.K. Shaikh and S. Zeadally, Renewable Sustainable Energy Rev. – 2016. – №55. – P. 1041 - 1054.
3. A. Myers, R. Hodges and J.S. Jur, Energy Convers. Manage. – 2017. – №143. – P. 218 - 226.
4. N.A. Pambudi, Renewable Sustainable Energy Rev. – 2018. – №81. – P. 2893 - 2901.
5. M. Hamid Elsheikh, D.A. Shnawah, M.F. M. Sabri, S. B.M. Said, M. Haji Hassan, M.B. Ali Bashir and M. Mohamad, Renewable Sustainable Energy Rev. – 2014. – №30. – P. 337 - 355.
6. Y. Fukuzumi, K. Amaha, W. Kobayashi, H. Niwa and Y. Mortitomo, Energy Technol. – 2018. – №6. – P. 1865 - 1870.
7. Sweta Bhansali, Thermoelectric properties of oxides and related materials. Doctoral thesis in Physics (Materials Sciences), Universitat Autònoma de Barcelona. – 2016. – 113 p.
8. Petr Levinsky, Synthesis, Characterization and Optimization of New Thermoelectric Materials. Materials. Université de Lorraine; Czech Technical University in Prague. – 2018. – 176 p.
9. Li, J. F., et. al. High-performance nanostructured thermoelectric materials. Npg Asia Materials – 2010. – №2(4). – P. 152 - 158.
10. Полежаев, Ю.В., Фролов, Г.А. Тепловое разрушение материалов. – Киев: Из-во ИПМ НАНУ. – 2005. – 288 с. ISBN 966-96446-1-5.
11. Шелемба, И.С., Кузнецов, А.Г., Бабин, С.А. Оптоволоконные измерительные системы Ползуновский альманах. – №3, Т. 2. – 2009.
12. Clark, D.E., Folz, D.C., West, J.K. Processing materials with microwave energy / Materials Science and Engineerin. – A287 (2000). – P. 153 - 158.
13. Yasuoka, M., Shirai, T., Nisimura, Y., Nagaoka, T., Watari, K. Development of an Efficient of Microwave Sintering Process Advances in Science and Technology. – Vol. 45 (2006). – P. 602 - 609.
14. Анатычук, Л.И., Прибыла, А.В. Анизотропный термоэлемент в режиме генерации тока и ЭДС. Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – №5. – 2011. – С. 17 - 19.
15. Баранский, П.И., Гайдар, Г.П. Анизотропия термоэлектрических свойств многодолинных полупроводников кубической симметрии под влиянием внешних направленных воздействий. – Термоэлектричество №1. – 2014. – С. 14 - 27.
16. Wu, N. Development and Processing of p-type Oxide Thermoelectric Materials. Department of Energy Conversion and Storage, Technical University of Denmark. – 2014. – 129 p.
17. Martin-Gonzalez, M., O. Caballero-Calero and P. Diaz-Chao, Nanoengineering thermoelectrics for 21st century: Energy harvesting and other trends in the field. Renewable&Sustainable Energy Reviews. – 2013. – №24. – P. 288 - 305.
18. Tritt, T.M. Thermoelectric Phenomena, Materials, and Applications. Annual Review of Materials Research, Vol. 41. – 2011. – P. 433 - 448.
19. Shakouri, A. Recent Developments in Semiconductor Thermoelectric Physics and Materials. Annual Review of Materials Research. – Vol. 41. – 2011. – P. 399 - 431.
20. Dresselhaus, M.S., et. al. Low dimensional thermoelectrics. Proceeding Ict'97-Xvi International Conference on Thermoelectrics. – 1997. – P. 12 - 20.
21. A.J. Minnich, M.S. Dresselhaus, Z.F. Ren, G. Chen, Bulk nanostructured thermoelectric materials: current research and future prospects, Energy & Environmental Science 2 (2009). – P. 559 - 588.
22. Хвесьюк, В.И., Остапко, Д.А., Скрябин, А.С., Цыганков, П.А., Челмодеев, Р.И., Чирков, А.Ю. Предельная эффективность термоэлектрического преобразования теплоты в высокотемпературных энергоустановках. Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. – 2016. – №03. – С. 81 - 105.

23. Харламов, В.Ф. Термоэлектрическая добротность материалов, состоящих из частиц полупроводника или металла. ЖЭТФ. – 2013. – Т. 144, вып. 1(7). – С. 97 - 103.
24. Самсонов, Г.В., Кислий, П.С. Высокотемпературные неметаллические термопары и наконечники. – Наукова думка. – 1965. – 175 с.
25. Petrovsky, V.Ya., Rak, Z.S. Densification, microstructure and properties of electroconductive Si₃N₄ – TaN composites. Part I: Densification and microstructure J. Eur. Ceram. Soc. – 2001. – 21. – P. 219 - 235.
26. Petrovsky, V. Electrical properties of multi-component CMM in correlation with their microstructure. – Ceramics International 34 (2008). – P. 1165 - 1171.
27. Филиппов, Л.П. Измерение тепловых свойств твердых и жидких металлов при высоких температурах. – М.: МГУ. – 1967.
28. Филиппов, П.И. Приложение теории теплопроводности к теплофизическим измерениям. – Новосибирск: Наука СО. – 1973. – 62 с.
29. Зиновьев, В.Е., Коришунов, И.Г. Температуропроводность и теплопроводность переходных металлов при высоких температурах. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. – М., 1978. – №1. – 16 с.
30. Ивлиев, А.Д., Зиновьев, В.Е. ПТЭ. – 1973. – №1. – С. 101 - 104.
31. M.J. Laubitz, D.L. McElroy. Metrologia. – Vol 7, №1. – 1971. – P. 1 - 15.
32. Ивлиев, А.Д., Зиновьев, В.Е. Измерение температуропроводности и теплоемкости методом температурных волн с использованием ОКТ и следящего амплитудно-фазового приемника. – ТВТ, 1980, Т. 16. – С. 532 - 539.
33. Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. – М., Атомиздат. – 1968. – 484 с.
34. Таблицы физических величин. Справочник ред. И.К. Кикоин. – М., Атомиздат. – 1976. – 1005 с.