

# **Т Е З И**

наукових доповідей  
на XVIII Міжнародному  
форумі з термоелектрики

**з напрямів:**

**теорія термоелектрики,  
метрологія в термоелектриці,  
термоелектричне матеріалознавство,  
термоелектричні прилади та пристрої**

26-30 жовтня 2020 року

Чернівці - 2020

УДК 621.382; 537.322

## **ОРГАНІЗАТОРИ**

Міжнародна термоелектрична академія

Інститут термоелектрики НАН та МОН України

Тези доповідей XVIII Міжнародного форуму з термоелектрики, присвяченого 140-річчю від дня народження акад. А.Ф.Йоффе, 26-30 жовтня 2020 року/  
Відп. за випуск Л.І.Анатичук. – Чернівці, 2020. – 49 с.

ISBN 978 - 966- 997 - 006 - 0

Ум. друк. арк. = 48/16

Обл. вид. арк. = 39.

ISBN 978 – 966 – 997- 006 - 0

© Інститут термоелектрики

## ЗМІСТ

<b>1. Теорія термоелектрики</b>	<b>7</b>
Граничні можливості зменшення контактного опору «термоелектричний матеріал-метал».....	7
<i>Л. І. Анатичук, Л. М. Вихор</i>	
Термоелектричні можливості надграток, описуваних моделлю Фіваза.....	7
<i>П. В. Горський</i>	
Багатомасштабне моделювання нестационарного нерівноважного рівняння переносу Больцмана.....	8
<i>Kunwar, Abhikeern</i>	
Теорія ефективного середовища для термоелектричних властивостей композитних матеріалів з різними порогами перуоляції.....	9
<i>А. О. Снарський, П. Юскевич</i>	
Новий підхід DT-FGTM (функціонально-градієнтного термоелектричного матеріалу з подвійним налаштуванням) у термоелектричному перетворенні енергії.....	9
<i>Krzysztof T. Wojciechowski</i>	
<b>2. Метрологія в термоелектриці</b>	<b>11</b>
Метрологія термоелектричних матеріалів.....	11
<i>В. В. Лисько</i>	
Проблеми вимірювання температури в процесі ротаційного зварювання тертям.....	12
<i>Silke Augustin, Thomas Fröhlich, Gunter Krapf, Jean-Pierre Bergmann, Michael Grätzel, Jan Ansgar Gerken, Kiril Schmidt</i>	
Термометрія: від термометри до термоелектричного смарт-сенсора високої достовірності.....	12
<i>Б. І. Стадник, С. П. Яцишин</i>	
Метрологічне забезпечення виробництва термоелектричних перетворювачів	13
<i>М. М. Микийчук</i>	
<b>3. Термоелектричне матеріалознавство</b>	<b>12</b>
Хімічний зв'язок і термоелектричні властивості матеріалів.....	14
<i>Yu. Grin</i>	
Відображення фазових меж для створення легуючих дефектів.....	15
<i>J. Snyder</i>	
Термоелектричні властивості тонких плівок вісмуту і твердого розчину вісмут-сурма.....	16
<i>В. Грабов, Е. Демидов, В. Комаров, А. Суслов, В. Гергега, Д. Ефимов</i>	

Наноточкові ефекти для термоелектрики: від теоретичних передбачень до спостережень.....	17
<i>X. Zianni</i>	
Останні розробки в термоелектричних сплавах Гейслера.....	17
<i>В. В. Ховайло</i>	
Полярні інтерметаліди і термоелектрика.....	18
<i>Franck Gascoin</i>	
Можливості підвищення ефективності проникними термоелементами .....	18
<i>Р. Г. Черкез</i>	
Вплив міжшарової взаємодії на властивості легованого телуриду вісмуту....	19
<i>Kamil Shamil ogly Gahramanov, H. M. Abdullayev</i>	
Багатошарові з'єднання телуриду вісмуту, леговані селеном, для термоелектричного застосування.....	19
<i>Sharma Yogeshchandra</i>	
Пряме вимірювання ефекту Пельтьє на варизонному кристалі системи $Vi_{100-x}Sb_x$ при протіканні струму вздовж його площини спайності в інтервалі значень складу $7,5 < x < 11,5$ ат%. .....	20
<i>В. И. Бочегов, Н. А. Мельников, Л. Н. Никифорова</i>	
Топологічні ізолятори і термоелектрика.....	22
<i>О. I. Рогачова</i>	
Термоелектричні і термодифузійні явища в колоїдних розчинах.....	23
<i>В. М. Грабов, А. В. Сидоров, А. Зайцев, Д. Кузнєцов</i>	
Комп'ютерне моделювання процесів зонного вирощування термоелектричних матеріалів.....	23
<i>О. В. Ніцович</i>	
Вплив термоелектрики на ККД перетворення сонячних елементів .....	24
<i>S. Ašmontas, J. Gradauskas, A. Sužiedėlis, A. Šilėnas, A. Čerškus, V. Vaičiškauskas, O. Masalskyi, O. Žalys</i>	
Розробка принципів термоелектричного вдосконалення і перспектив збору енергії IoT.....	25
<i>T. Mori</i>	
<b>4. Термоелектричні прилади та пристрої</b> .....	<b>27</b>
Узагальнення теорії проектування термоелектричних приладів та сонячні ТЕГ на Місяці.....	27
<i>А. В. Прибила</i>	
Система термічної дистиляції для польотів у далекий космос.....	28
<i>А. С. Соломаха</i>	

	5
Термоелектричні охолоджувачі і термоелектричні сенсори для космічних застосувань.....	28
<i>Л. І. Анатичук, В. В. Разіньков</i>	
Про деякі актуальні напрями застосування термоелектрики у медицині.....	29
<i>Р. Р. Кобилянський</i>	
Термоелектричні джерела живлення в екстремальних умовах роботи.....	29
<i>Л. І. Анатичук, П. Д. Микитюк</i>	
Методи оптимізації параметрів ТЕГ і перспективи їх застосувань на енергетичному ринку.....	30
<i>Ю. М. Лобунець</i>	
Термоелектричний генератор сонячної параболічної тарілки-колектора: експериментальні дослідження.....	30
<i>А. Hakan Yavuz</i>	
Термоелектричний охолоджувач рідини.....	31
<i>R. Ahiska</i>	
Імпедансна спектроскопія для оцінки термоелектричних модулів і генераторів.....	31
<i>Braulio, Beltrán-Pitarch</i>	
<b>5. Стендові доповіді</b>	<b>33</b>
Метод безконтактного визначення добротності анізотропного термоелектричного матеріалу .....	33
<i>А. А. Ащеулов, І. С. Романюк</i>	
Електронні, оптичні та термоелектричні властивості наноматеріалів кордериїдного типу.....	33
<i>О. В. Бокотей, О. О. Бокотей, А. Г. Слівка</i>	
Електрооптичний ефект в $Hg_3Se_2F_2$ .....	34
<i>О. В. Бокотей</i>	
Тонкоплівкові термоелектричні структури на основі матеріалів $PbTe$ і $Bi_2Te_3$ .....	34
<i>І. С. Вірт</i>	
Термоелектричні охолоджувачі детекторів рентгенівського випромінювання...	35
<i>О. В. Вербовський</i>	
Вплив гетероконтактів на основі надграток, описуваних моделлю Фіваза, на роботу термопарного термоелемента в режимі охолодження.....	36
<i>П. В. Горський, О. В. Коваль</i>	
Гіротропні термоелементи в однорідному та неоднорідному магнітних полях.....	36
<i>Н. А. Годованець, І. А. Константинович, А. В. Константинович, С. Д. Шугані</i>	

Z-вимірювання окремих термоелементів.....	37
<i>Г. Г. Громов</i>	
Методи та обладнання для точного визначення параметрів термоелектричних генераторних модулів.....	38
<i>М. В. Гаврилюк</i>	
Перспективи використання термоелектрики у бджільництві .....	38
<i>В. М. Катеринчук</i>	
Індивідуальний кондиціонер для людини.....	39
<i>А. М. Кібак</i>	
Термоелектричні передпускові нагрівачі для транспортних засобів.....	40
<i>В. В. Лисько</i>	
Потрійні системи антимонідів кадмію і цинку.....	41
<i>О. М. Маник, Т. О. Маник, В. Р. Білинський-Слотило</i>	
Теплоємність твердих розчинів $Bi_2(Te_{1-x}Se_x)_3$ .....	42
<i>К. В. Мартинова, О. І. Рогачова, Т. І. Храмова</i>	
Термоелектричні перетворювачі змінного струму.....	42
<i>П. Д. Микитюк</i>	
Вплив відхилення від стехіометрії на теплопровідність полікристалів $Bi_2Se_3$	43
<i>С. І. Меньшикова, О. І. Рогачова</i>	
Теплопровідність твердих розчинів $Pb_{1-x}Sn_xTe$ в області інверсії зон.....	44
<i>Г. О. Ніколаєнко, О. І. Рогачова</i>	
Термоелектричні кондиціонери для бронетанкової техніки.....	45
<i>А. В. Прибила</i>	
Термоелектричні теплові насоси для спеціальних застосувань.....	46
<i>А. В. Прибила, Ю. Ю. Розвер</i>	
Класичний розмірний ефект у плівках $bi_2(te_{0.9}se_{0.1})_3$ .....	47
<i>О. І. Рогачова, К. В. Новак, Г. М. Дорошенко, С. О. Саєнко, О. Ю. Сипатов, Ю. В. Меньшов</i>	
Побутовий термоелектричний холодильник у квазістаціонарному режимі....	47
<i>І. Ф. Романюк</i>	
Експериментальні дослідження швидкодії термоелектричних охолоджувачів напоїв з мокрим контактом.....	48
<i>С. Filin, B.Zakrzewski</i>	
Комп'ютерне моделювання процесу кріодеструкції шкіри людини при термоелектричному охолодженні.....	48
<i>Р. В. Федорів</i>	

# 1. ТЕОРІЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИКИ

## ГРАНИЧНІ МОЖЛИВОСТІ ЗМЕНШЕННЯ КОНТАКТНОГО ОПОРУ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ МАТЕРІАЛ – МЕТАЛ

Л. І. Анатичук, Л. М. Вихор

*(Інститут термоелектрики НАН і МОН України, Україна,  
[anatykh@gmail.com](mailto:anatykh@gmail.com))*

Розглянуто теоретичні аспекти оцінювання величини електричного опору контакту термоелектричний матеріал – метал. Запропоновано фізичну модель такого контакту і методи розрахунку основних складових контактного опору, а саме опору перехідного приконтактного шару та опору, зумовленого переходом носіїв заряду через потенціальний бар'єр на границі між термоелектричним матеріалом і металом. Розраховані температурні залежності контактного опору для термоелектричних віток з матеріалів на основі  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  з нанесеними антидифузійними шарами нікелю. Встановлено, що контактний опір в таких термоелементах досягає величини від  $0.25 \cdot 10^{-6}$  до  $2.5 \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup> і залежить від температури та товщини приконтактного перехідного шару. Величина складової контактного опору, зумовленої потенціальним бар'єром, змінюється з температурою від  $0.5 \cdot 10^{-7}$  до  $2.5 \cdot 10^{-7}$  Ом·см<sup>2</sup>. Зменшити цю складову можна шляхом підвищення концентрації носіїв заряду в ультратонкому приконтактному з нікелем шарі термоелектричного матеріалу за рахунок легування. Встановлено, що підвищення концентрації легуючих домішок в приконтактній зоні на один порядок відносно її оптимального значення призводить до зменшення електричного опору, зумовленого потенціальним бар'єром, на два порядки. За цих умов величина опору наближається до мінімально можливого значення, і становить  $10^{-9}$  Ом·см<sup>2</sup>. Показано, що отримані дані добре узгоджуються з відомими експериментальними значеннями контактного опору.

## ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ МОЖЛИВОСТІ НАДГРАТОК, ОПИСУВАНИХ МОДЕЛЛЮ ФІВАЗА

П. В. Горський

*(Інститут термоелектрики НАН та МОН України, Україна, [gena.grim@gmail.com](mailto:gena.grim@gmail.com))*

Шаруваті напівпровідникові матеріали, у тому числі термоелектричні, схильні до утворення надграток. Найбільш простою, однак розповсюдженою і ефективною моделлю для опису зонного спектру таких надграток є модель Фіваза. У рамках цієї моделі рух носіїв заряду у площині шарів описується методом ефективної маси, а перпендикулярно до шарів – методом сильного зв'язку. Термоелектричні можливості таких надграток виявляються коли вектори градієнту температури та густини електричного струму лежать у площині шарів. Вони можуть бути ефективно використані, якщо енергія Фермі двовимірного газу носіїв заряду з квадратичним законом дисперсії у них за абсолютного нуля температури більша або порівняна з шириною вузької мінізони, яка описує рух носіїв заряду у напрямку, перпендикулярному до шарів. Відповідне відношення можна вважати

ступенем непараболічності зонного спектру У цьому випадку за певних параметрів матеріалу, а саме, наприклад, ефективної маси у електрона у площині шарів  $m^*=m_0$ , концентрації носіїв  $n_0=3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , ширини вузької міні зони  $\delta=2.16 \cdot 10^{-4} \text{ eV}$ , віддалі між шарами  $a=30 \text{ нм}$  в інтервалі температур 300-500 К можна досягти ККД генератора 37.5%, що дуже близько до ККД циклу Карно. На даний час матеріалу з такими параметрами не створено, хоча не існує фундаментального фізичного закону або принципу, який би забороняв його створення. В той же час, зі збільшенням віддалі між шарами або збільшенням ширини мінізони термоелектрична ефективність такого матеріалу стрімко спадає. Саме внаслідок цих факторів навіть телурид вісмуту також можна розглядати як надгратковий, але з малим ступенем непараболічності, і, отже, порівняно невеликою термоелектричною ефективністю внаслідок значної ширини дозволеної зони.

Іншим важливим напрямком використання надграток у термоелектриці є створення на їх основі гетероконтактних структур, які дозволяють досягти при створенні термоелектричних перетворювачів енергії низьких значень контактних опорів, що дуже важливо для мініатюризації термоелектричних пристроїв. Це досягається за рахунок того, що внаслідок ефективного блокування розсіювання носіїв заряду у напрямку, перпендикулярному до шарів, питомий електричний опір матеріалу різко знижується, наближаючись за високих ступенів непараболічності зонного спектру матеріалу до питомого опору металу. Наші розрахунки, а також експерименти інших авторів показують, що таким шляхом можна знизити питомий електричний контактний опір «термоелектричний матеріал-метал» аж до  $10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ , тобто до так званої «межі детектування».

Наостанок у надграткових термоелектричних матеріалах за високого ступеня їх непараболічності можна досягти різниці коефіцієнтів термоЕРС у площині шарів і перпендикулярно до них аж до 300 мкВ/К. А це важливо для створення анізотропних термоелементів та інших термоелектричних пристроїв, які використовують анізотропію термоЕРС, зокрема вихрових термоелементів. Важливою перевагою анізотропних термоелектричних пристроїв у порівнянні з термопарними є те, що вони не потребують складної системи комутації термоелементів.

## **БАГАТОМАСШТАБНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО НЕРІВНОВАЖНОГО РІВНЯННЯ ПЕРЕНОСУ БОЛЬЦМАНА**

Kunwar, Abhikeern

(Indian Institute of Technology, Bombay, Індія, [184106014@iitb.ac.in](mailto:184106014@iitb.ac.in))

Термоелектричні матеріали можуть доповнювати витягування відновлюваної енергії з таких джерел, як енергія сонця, і можуть виступати в якості альтернативи теплових двигунів, що збирають напрацьоване тепло від електронних пристроїв і котлів. Добротність ZT, що відповідає за термічний ККД ТЕ, може бути збільшена за рахунок зменшення граткової теплопровідності, яка посилюється в наноструктурних зернах з невеликими розорієнтаціями. Крім того, наноккомпозити, такі як оптимально легований  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  і його твердий розчин з порошком діоксиду кремнію, можуть додатково покращити ZT. Ці зерна і нано-включення варіюються від нано- до мікрометрового масштабу, для



яких розрахунки з перших принципів і розрахунки на основі молекулярної динаміки (МД) вимагають дорогих обчислень, однак рішення рівняння переносу Больцмана обіцяє вирішити проблему. Багатомасштабне моделювання рівняння переносу Больцмана допоможе зрозуміти теплове та електричне перенесення через ці дефекти і композити в декількох масштабах довжини і часу. Ми прагнемо розробити багатомасштабну структуру, в якій інформація про фонони і електрони, що надходить з моделювання МД/теорії функціонала щільності, буде об'єднана з методами кінцевих елементів для вирішення рівняння переносу Больцмана. Це дасть певні переваги, такі як побудова чітко визначеної межі складної геометрії для вивчення перенесення тепла через межі зерен або фазових і міжфазних меж для нановключень. Це буде перехресно перевірено експериментами з нанокомпозитами  $\text{Bi}_x\text{Sb}_{2-x}\text{Te}_3$ .

### **ТЕОРІЯ ЕФЕКТИВНОГО СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ З РІЗНИМИ ПОРОГАМИ ПЕРКОЛЯЦІЇ**

А. О. Снарський, П. Юскевич

(Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна, [asnarskii@gmail.com](mailto:asnarskii@gmail.com))

Побудована модифікована теорія ефективного середовища для розрахунку ефективних властивостей термоелектричних композитів з різними значеннями порогів перколяції. Показано, що навіть при концентраціях, що перевищують критичну область, порогове значення є істотним для визначення ефективних властивостей. Розглянуто два принципово різних випадку сукупності локальних властивостей композиту. В одному з цих випадків провідність і теплопровідність однієї з фаз одночасно більша, ніж провідність і теплопровідність іншої фази. Другий, аномальний випадок, коли електропровідність першої фази більша, ніж у другій, але теплопровідність першої фази менша, ніж у другій, демонструє незвичайну концентраційну поведінку ефективної провідності, тобто, зі збільшенням в добре провідній фазі, ефективна провідність демонструє зниження (а не зростання, як в стандартному випадку), яке переходить в зростання.

### **НОВИЙ ПІДХІД DT-FGTM (ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДИЄНТНОГО ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО МАТЕРІАЛУ З ПОДВІЙНИМ НАЛАШТУВАННЯМ) У ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОМУ ПЕРЕТВОРЕННІ ЕНЕРГІЇ**

Krzysztof T. Wojciechowski

(AGH University of Science and Technology, Польща, [wojciech@agh.edu.pl](mailto:wojciech@agh.edu.pl))

Типові промислові модулі створюються з використанням однорідних напівпровідників з концентрацією носіїв, оптимізованою для передбачуваних температур тепловідведення  $T_c$  і джерела тепла  $T_h$ . Для підвищення ефективності термоелектричного

перетворення використовуються концепції сегментованих (тобто складаються з різних матеріалів) або функціонально градієнтних термоелектричних матеріалів (ФГТМ) з концентрацією носіїв, відрегульованою у відповідності з температурним градієнтом. Пропонується нова розширена концепція функціонально-градієнтного термоелектричного матеріалу з подвійним налаштуванням (DT-FGTM). Цей підхід передбачає одночасне налаштування двох електронних параметрів, тобто ширини забороненої зони  $E_g$  і рівня Фермі  $E_F$ , для отримання високої середньої добротності  $ZT$  у всьому робочому діапазоні температур. Крім того, використовується резонансний ефект в  $PbTe$  і регулювання  $E_F$  з вибраними донорними і акцепторними домішками. Було показано, що в рамках розробленого підходу DT-FGTM може бути досягнутий високий ККД перетворення енергії не менше 15%. Спільне легування  $PbTe$  резонансними елементами ( $In$  і  $Tl$ ) значно покращує однорідність розподілу коефіцієнта Зеєбека уздовж термоелектричної гілки за рахунок стабілізації положення  $E_F$ . Більш того, для конкретного випадку  $In$  шкідливий процес дифузії  $In$  в матрицю  $PbTe$  можна зменшити, що може значно продовжити термін служби ТЕ генератора.

## 2. МЕТРОЛОГІЯ В ТЕРМОЕЛЕКТРИЦІ

### МЕТРОЛОГІЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

В. В. Лисько

*(Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, Україна,  
v.lysko@gmail.com)*

Відомо, що за останні десятиліття істотних покращень якості термоелектричних матеріалів не досягнуто. Кращими матеріалами, які використовуються в термоелектричних перетворювачах енергії для генераторної і холодильної техніки, залишаються з'єднання вісмуту Bi - Te, Pb - Te, Ge - Si та, іноді, інші.

Для пошуку нових матеріалів і поліпшення відомих використовують різні методи. Міняють хімічний склад, вводять різні домішки, використовують матеріали різної структури – неоднорідні, наноструктури, порошкові та інші структури. Вплив цих факторів на матеріал визначається експериментально шляхом вимірювання електропровідності  $\sigma$ , термоЕРС  $\alpha$ , теплопровідності  $\kappa$  і добротності  $Z$ .

Аналіз відомих методів і обладнання для вимірювань властивостей термоелектричних матеріалів показав, що похибки при вимірюваннях можуть бути реальною причиною відсутності прогресу у зростанні термоелектричної добротності  $Z$ . Найбільші значення похибок виникають при визначенні добротності шляхом вимірювань електропровідності, термоЕРС і теплопровідності на різних зразках. Так, похибки при визначенні коефіцієнта термоЕРС знаходяться на рівні 2-5% (стаціонарний метод, метод гарячого зонда), електропровідності – 2-3% (двохзондовий метод, чотирьохзондовий метод), теплопровідності – 3-7% (відносний метод, метод Ангстрема, метод лазерного спалаху). Таким чином, загальна похибка у визначенні добротності може досягати 20%. Крім того, оскільки матеріал практично завжди дещо неоднорідний, то це призводить до додаткової похибки, яка в середньому дорівнює 3-5%. Загальна похибка у визначенні  $Z$  при цьому може досягати 23-25%. Такі похибки стають перепорою при вирішенні завдань підвищення добротності матеріалу, оскільки точність вимірювань може виявитися нижчою, ніж покращення властивостей матеріалу при зміні впливаючих на нього факторів.

Найбільш надійні результати можна отримати при використанні абсолютного методу і методу Хармана. Цикл досліджень, проведених в Інституті термоелектрики, показав, що похибки при визначенні добротності методом Хармана можуть знаходитись на рівні 5-6% тільки в ряді випадків – коли відомо безліч додаткових параметрів, таких як: випромінювальні властивості зразка і термостата, теплопровідність струмопідводів і термопар тощо.

Більш ефективним є абсолютний метод, що дозволяє інструментально мінімізувати більшість джерел похибок. Він широко використовується при створенні еталонів і володіє важливими перевагами: вимірювання  $\sigma$ ,  $\alpha$ ,  $\kappa$ ,  $Z$  виконуються одночасно на одному зразку, що знижує похибки; для вимірювання можуть бути використані зразки невеликих розмірів; термоелектричні параметри знаходяться з класичних формул без застосування поправок.

У роботі наведено результати досліджень впливу різних факторів на точність вимірювання термоелектричних властивостей матеріалів абсолютним методом. Розроблено нові методи мінімізації похибок – градієнтні радіаційні екрани з кільцевими насічками, відбивач на термостаті, теплові ключі, металеві контактні структури для надійного з'єднання торцевих поверхонь зразка з струмовими і тепловими контактами. Досягнуті значення похибок при вимірюваннях: теплопровідності – 2.4%, електропровідності – 0.7, термоЕРС – 0.8, добротності – 4.7%.

З використанням нових методів зниження похибок виготовлена автоматизована вимірювальна установка для визначення параметрів термоелектричних матеріалів в інтервалі температур 30 – 500 °С. Сукупність наведених заходів дозволяє знизити похибки при визначенні добротності у 3-5 разів. Для дослідження високотемпературних матеріалів була створена модифікація вимірювального блоку, що дозволяє проводити вимірювання в інтервалі температур від 30 до 900 °С. Розроблено також методи істотного, до 5 разів, підвищення швидкодії вимірювань.

## **ПРОБЛЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В ПРОЦЕСІ РОТАЦІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ**

Silke Augustin, Thomas Fröhlich, Gunter Krapf, Jean-Pierre Bergmann, Michael Grätzel,  
Jan Ansgar Gerken, Kiril Schmidt

*(Technical University, Ilmenau, Німеччина, [silke.augustin@tu-ilmenau.de](mailto:silke.augustin@tu-ilmenau.de))*

Точне визначення температури зони процесу набуває все більш важливої ролі в процесі контролю і моніторингу ротаційного зварювання тертям. У даний час вимірювання температури здійснюється за допомогою вбудованого в інструмент датчика температури (зазвичай термопари). Оскільки їх не можна прикріпити безпосередньо до області з'єднання, розсіювання тепла всередині інструменту і в навколишнє середовище викликає відхилення в вимірах, а також затримку вимірювання температури в часі. У статті описаний процес і пов'язані з ним проблеми, як пряме вимірювання температури в ході процесу може бути досягнуто за рахунок використання термоелектричного ефекту між інструментом і робочою деталлю, без заміни інструменту шляхом введення додаткових датчиків температури.

## **ТЕРМОМЕТРИЯ: ВІД ТЕРМОПАРИ ДО ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО СМАРТ-СЕНСОРА ВИСОКОЇ ДОСТОВІРНОСТІ**

Б. І. Стадник, С. П. Яцишин

*(Національний університет "Львівська політехніка", Україна, [slav.yat@gmail.com](mailto:slav.yat@gmail.com))*

В роботі проведено аналіз джерел нестабільності метрологічних та експлуатаційних характеристик термододатчиків, який показав, що в напружених термоелектродах густина потоків тепла та електричного струму залежить не лише від градієнта температури і електричного потенціалу, а й від градієнта механічних напружень. Це спричиняє залежність

термометричних параметрів як термоелектричних матеріалів від значення та характеру механічних напружень, що виникають в них в процесі експлуатації. Показано можливість і доцільність за рахунок залучення смарт-технологій та за рахунок використання нанорозмірності елементів, у яких відсутні пластичні компоненти деформації, досягнути високої метрологічної достовірності сучасних термоелектричних сенсорів.

## **МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИРОБНИЦТВА ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

М. М. Микийчук

*(Національний університет "Львівська політехніка", інститут комп'ютерних технологій, автоматики та метрології, Україна, [mykolamm@ukr.net](mailto:mykolamm@ukr.net))*

Залежно від місця застосування у процесі вимірювання методи підвищення точності вимірювань розділяють на 2 групи. Вони є методами підвищення точності засобу вимірювання та методами підвищення точності результатів вимірювань. Принципова різниця між ними полягає в наступному. Об'єктом 1-ї групи є стабілізація функції перетворення. Об'єктом 2-ї групи методів є стабілізація вихідного сигналу засобу. Звідси два типи впливу на функцію перетворення ЗВ (термоелектричного перетворювача): 1-а група методів передбачає внутрішній вплив на функцію перетворення, тобто корекцію. Тоді як друга група включає вплив на показники ЗВ шляхом внесення поправки.

### 3. ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНЕ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

#### ХІМІЧНИЙ З'ЯЗОК І ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ

Yuri Grin

*(Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe, Німеччина, [grin@cpfs.mpg.de](mailto:grin@cpfs.mpg.de))*

Істотними джерелами інформації для розробки матеріалів є взаємозв'язки і діаграми склад-кристалічна структура-властивості. Для термоелектричних матеріалів така діаграма багатовимірна зі складною взаємодією її компонентів. В цілому, явище термоелектрики вважається добре вивченим з фізичної точки зору. Різні хімічні аспекти термоелектричного поведінки, такі як неподіленого пари, зв'язку Ван-дер-Ваальса, збіжність валентних зон і т.д., все ще розглядаються [1-5]. Хімічний зв'язок, що розуміється як система фізичних сил всередині хімічного об'єкта, створює природний міст між хімічними та фізичними властивостями матеріалів. Недавні систематичні квантово-хімічні дослідження показують, що атомні взаємодії грають ключову роль в хімічній і структурній організації термоелектричних матеріалів. З одного боку, зв'язування становить основу загального електронного балансу в матеріалі, що регулює концентрацію і перенесення електронів (електронна інженерія). З іншого боку, атомні взаємодії також впливають на перенос тепла в матеріалах (фононний інженерія). Просторовий розподіл областей з різними типами хімічного зв'язку - неоднорідністю зв'язку і анізотропією - впливає, особливо, на перенесення тепла більше, ніж інші тільки кристалографічні особливості [6]. Квантово-хімічні індикатори зв'язку в реальному просторі допомагають знайти електронні відліки, необхідні для стабілізації структурної моделі з зонною структурою з (псевдо) щільною і сильним градієнтом щільності станів на рівні Фермі [7-9], і в той же час зрозуміти принцип причини появи в реальної конструкції особливостей, що визначають, наприклад, механічні властивості термоелектричних матеріалів [10].

- [1] E. J. Scoug, D. Morelli. Phys. Rev. Lett. [107 \(2011\) 235901](#).
- [2] H. Zhang et al. Inorg. Chem. [50 \(2011\) 1250](#).
- [3] A. Ormeci, Yu. Grin. J. Thermoelectricity 6 (2015) 16.
- [4] J. Zhang et al. Nature Comm. 9 (2018) 4716.
- [5] G. Tan et al. ACS Energy Lett. 3 (2018) 705.
- [6] Yu. Grin. J. Solid State Chem. 274 (2019) 329.
- [7] F. R. Wagner et al. Inorg. Chem. [57 \(2018\) 12908](#).
- [8] A. Amon et al. Angew. Chem. 58 (2019) 2.
- [9] F. Kaiser et al. Chem. Materials [32 \(2020\) 2025](#).
- [10] X. Shi et al. Nature Materials, 5 (2018) 421; 7 (2019) 652.

## ВІДОБРАЖЕННЯ ФАЗОВИХ МЕЖ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЛЕГУЮЧИХ ДЕФЕКТІВ

Jeffrey G. Snyder

(Northwestern University, [CША, jeff.snyder@northwestern.edu](mailto:jeff.snyder@northwestern.edu))

Ми часто розуміємо фізичні властивості фаз Цінтля, розглядаючи ідеальний кристалічний матеріал, який вільний від дефектів. Проте, цей ідеальний стехіометричний (валентно збалансований) кристал являє собою власний напівпровідник з рівною кількістю електронів і дірок. Щоб отримати напівпровідник n-або p-типу, ми зазвичай використовуємо точкові дефекти, щоб внести невеликий валентний дисбаланс, який призводить до надмірних електронів або дірок. Часто власні дефекти, такі як вакансії, міжфазні або антиструктурні дефекти, забезпечують необхідні носії, щоб зробити матеріал хорошим термоелектриком (наприклад,  $Zn_4Sb_3$ ,  $Bi_2Te_3-Sb_2Te_3$ ,  $Yb_xCoSb_3$  і т. д.). Однак більшість матеріалів вимагає, щоб зовнішні легуючі добавки були хорошими термоелектричними елементами, а власні дефекти тільки ускладнюють завдання. Іноді власні дефекти настільки поширені, що вони є дефектами-вбивцями, які не дозволяють будь-якій присадці отримати матеріал n-або p-типу. Розуміючи, що атомні хімічні потенціали впливають на енергію дефектів, а також визначають області на фазових діаграмах, ми можемо використовувати відображення фазових меж, щоб дослідити всі можливі термодинамічні дефектні стани матеріалу, щоб уникнути дефектів-вбивць. Найбільш яскравою демонстрацією цього є відкриття  $Mg_3Sb_2$  n-типу з високим  $zT$ , який зустрічається тільки в  $Mg_3Sb_2$  з високим вмістом магнію, де Mg-вакансії пригнічені. Точкові дефекти також можуть вносити поступові, але глибокі зміни в зонну структуру в порівнянні з бездефектним з'єднанням. Розуміючи, що атомні хімічні потенціали впливають на енергію дефектів, а також визначають області на фазових діаграмах, ми можемо використовувати відображення фазових меж, щоб дослідити всі можливі термодинамічні дефектні стани матеріалу, щоб уникнути дефектів-вбивць. Найбільш яскравою демонстрацією цього є відкриття  $Mg_3Sb_2$  n-типу з високим  $zT$ , який зустрічається тільки в  $Mg_3Sb_2$  з високим вмістом магнію, де Mg-вакансії пригнічені.

Точкові дефекти також можуть вносити поступові, але глибокі зміни в зонну структуру, в порівнянні з бездефектним з'єднанням. Це включає в себе збільшення ширини забороненої зони для більш високих температур, зменшення маси провідності для більшої рухливості або збіжність зон для різкого збільшення щільності станів (Pb (Se, Te),  $Mg_2$  (Si, Sn),  $Bi_2Te_3-Sb_2Te_3$ ). В принципі, всі ці дефекти можна краще контролювати шляхом створення хімічних потенціалів через міжфазні межі. Навіть вміст Ni в полугейслерових термоелектриках  $MNiSn$  ( $M = Ti, Zr, Hf$ ) може бути змінено в достатній мірі, щоб істотно змінити електронні властивості. Надлишок Ni створює домішкові стани в забороненій зоні, що змінює ефективну заборонену зону і призводить до додаткового розсіювання електронів і фононів.

### Література

[1] Ohno, Snyder et al, *Joule* 1, 141 (2018)

[2] Gregory S. Pomrehn, Alex Zevalkink, W. G. Zeier, A. van de Walle and G. J. Snyder "Defect controlled electronic properties in  $AZn_2Sb_2$  Zintl phases ( $A=Ca, Sr, Eu, Yb$ )", *Angewandte Chemistry*, 126, 3490 (2014)

[3] Yinglu Tang, S-W Chen, G. J Snyder “Temperature Dependent Solubility of Yb in Yb-CoSb<sub>3</sub> Skutterudite and its Effect on Preparation, Optimization and Lifetime of Thermoelectrics“ Journal of Materiomics 1, 75 (2015)

[4] Alex Zevalkink, Gregory S. Pomrehn, Samantha Johnson, Jessica Swallow, Zachary M. Gibbs, and G. Jeffrey Snyder “Influence of the triel elements (M = Al, Ga, In) on the transport properties of Ca<sub>5</sub>M<sub>2</sub>Sb<sub>6</sub> Zintl compounds” Chem. Mater 24, 2091 (2012)

[5] Gregory S. Pomrehn, Alex Zevalkink, Wolfgang G. Zeier, Axel van de Walle and G. Jeffrey Snyder “Defect controlled electronic properties in AZn<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub> Zintl phases (A=Ca, Sr, Eu, Yb)”, Angewandte Chemistry, 126, 3490 (2014)

## **ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТОНКИХ ПЛІВОК ВІСМУТУ І ТВЕРДОГО РОЗЧИНУ ВІСМУТ-СУРЬМА**

В. М. Грабов, Е. В. Демидов, В. А. Комаров, А. В. Суслов, В. А. Гергега, Д. Д. Ефимов

(РГПУ ім. А. І. Герцена, Росія, [demidov\\_evg@mail.ru](mailto:demidov_evg@mail.ru))

Твердий розчин вісмут-сурма відомий як найбільш ефективний низькотемпературний (температури нижче 200 К) термоелектричний матеріал. При цьому роботи останніх років показують можливість використання квантових і класичних розмірних ефектів в електронних явищах, а також внутрішніх деформацій для збільшення термоелектричної ефективності матеріалів. В рамках даної роботи експериментально досліджуються можливості збільшення термоелектричної ефективності тонких плівок вісмуту і твердого розчину вісмут-сурма з допомогою вищевказаних підходів.

Досліджено плівки вісмуту товщиною від 10 нм до 1 мкм і плівки вісмут-сурма з концентрацією сурми від 3 до 15 ат. % Sb. В якості підкладок використовувалася пластини монокристалічної слюди (мусковіт) і поліамідна плівка. Коефіцієнт теплового лінійного розширення (КТР) цих матеріалів дорівнює  $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  і  $45 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  відповідно. КТР вісмуту в тригональній площині дорівнює  $10,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Таким чином, підкладки зі слюди викликають деформацію площинного розтягування, а підкладки з полііміду - деформацію площинного стиснення плівки при температурах нижче температури формування плівки. За допомогою розроблених декількох оригінальних методик отримання тонких плівок варіювалася якість їх структури: від дрібнокристалічної, з розмірами блоків порядку товщини плівки до монокристалічної структури. Контроль структури плівок проводився атомно-силовою та електронною мікроскопією та рентгеноструктурним аналізом.

Методом, що виключає виникнення деформації в системі плівка-підкладка, були досліджені температурні залежності питомого опору і термоЕРС, розраховано фактор термоелектричної потужності в інтервалі температур 77-300К. Встановлено, що для плівок системи вісмут-сурма з метою отримання максимальної термоЕРС критично важливим є співвідношення розміру кристалітів і товщини плівки, що обумовлено різним обмеженням електронів і дірок поверхнею і межами кристалітів. Для плівок вісмуту на слюді, товщиною менше 30 нм при зменшенні товщини відбувається зростання абсолютних значень термоЕРС при низьких температурах, що обумовлено, мабуть, зміною електронного енергетичного спектра внаслідок квантового розмірного ефекту. Для плівок вісмут-сурма даний ефект нами не виявлено, мабуть, внаслідок меншої



ефективності відпалу, для тонких плівок твердого розчину вісмут-сурма і внаслідок цього менших значень довжини когерентності носіїв заряду в порівнянні з плівками чистого вісмуту, великі значення якої є критично важливим для спостереження когерентних явищ. Встановлено, що використання плівок на підкладках з великим температурним розширенням призводить до зменшення термоЕРС, особливо в низькотемпературній області. Максимальне значення термоЕРС і фактора потужності відповідає товстим блоковим плівкам  $\text{Bi}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$  на слюді. В даних плівках отримано максимальне значення фактора потужності  $4 \text{ мВт/К}^2\text{м}$  при температурах 200-250 К. Перспективним для досягнення високих значень термоелектричної потужності видається дослідження ультратонких монокристалічних плівок вісмут-сурма з мінімальною дефектністю і великою досконалістю поверхні, що забезпечує велику довжину когерентності носіїв заряду при переваженні дзеркального відображення від поверхонь плівки. Однак у даний момент технологія створення таких плівок у світі не відпрацьована.

## **НАНОТОЧКОВІ ЕФЕКТИ ДЛЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИКИ: ВІД ТЕОРЕТИЧНИХ ПЕРЕДБАЧЕНЬ ДО СПОСТЕРЕЖЕНЬ**

Xanthippi Zianni

*(National and kapodistrian university of athens, Греція, [xzianni@uoa.gr](mailto:xzianni@uoa.gr))*

Наномасштабні ефекти багато в чому сприяють термоелектричній (ТЕ) ефективності. Вони максимізовані в наноточкових структурах, де квантове обмеження є граничним, а розсіювання покращено. Таким чином, появляються можливості оптимізації електронного та фононного перенесення. Розробка наноструктур з оптимізованими ТЕ властивостями виявилася надзвичайно складним завданням. Дослідження підтримуються безперервним розвитком технології виготовлення і вимірювання. Ми розповімо про досягнення останніх років у спостереженні і моделюванні термоелектричних ефектів у наноточкових наноструктурах, які ми раніше передбачали теоретично, а тепер вони викликають зростаючий інтерес в галузі термоелектрики і наномасштабного управління теплом.

## **ОСТАННІ РОЗРОБКИ В ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ СПЛАВАХ ГЕЙСЛЕРА**

В. В. Ховайло

*(Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", Росія, [khovaylo@misis.ru](mailto:khovaylo@misis.ru))*

Напівпровідникові сплави Гейслера були вперше спечені в 1970 році [1], але перші дослідження електронної зонної структури і транспортних властивостей були виконані 20 років по тому [2]. До теперішнього часу найбільш інтенсивно вивчаються напівпровідниковими сплавами Гейслера сполуки на основі  $\text{MNiSn}$  n-типу ( $\text{M} = \text{Ti}, \text{Zr}, \text{Hf}$ ) зі структурою  $\text{C1b}$  (так звані полугейслерові сплави), які розглядалися як перспективні

термоелектричні матеріали для застосувань при температурах  $T \geq 700 \text{ K}$ , завдяки високій термоелектричній добротності  $ZT > 1$ .

Недавні дослідження з'єднань на основі  $\text{FeRSb}$  ( $R = \text{V, Nb}$ ) показали, що величина коефіцієнта Зеебека в цих з'єднаннях дуже чутлива до легування [3]. Це дозволило досягти рекорду для полугейслерових термоелектричних матеріалів р-типу з  $ZT$  вище 1 в матеріалах на основі  $\text{FeNbSb}$  [4,5].

- 1) W. Jeitschko, Metall. Trans. 1 3159 (1970).
- 2) F.G. Aliev, et al., Z. Phys. B 75 167 (1989).
- 3) D.P. Young, P. Khalifah, R.J. Cava, A.P. Ramirez, J. Appl. Phys. 87 317 (2000).
- 4) G. Joshi, et al., Energy Environ. Sci. 7 4070 (2014).
- 5) C. Fu, T. Zhu, Y. Liu, H. Xie, X. Zhao, Energy Environ. Sci. 8 216 (2015).

## **ПОЛЯРНІ ІНТЕРМЕТАЛІДИ І ТЕРМОЕЛЕКТРИКА**

Franck Gascoin

*(University of Caen Normandy /CRISMAT Laboratory, Франція, franck.gascoin@ensicaen.fr)*

У даній лекції йтиметься про появу полярних інтерметалідів (часто званих фазами Цінтля) в області термоелектрики.

Від знаменитого 14-1-11 до більш неясного, але дуже поширеного типу структури 1-2-2, від діагностичних досліджень до технологічних розробок, фази Цінтля тепер розглядаються з великою увагою. Це багате сімейство сполук, що постійно розширюється, відрізняється різноманітністю типів структур у поєднанні з захоплюючими фізичними властивостями. Це історія.

## **МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОНИКНИМИ ТЕРМОЕЛЕМЕНТАМИ**

Р. Г. Черкез

*(Інститут термоелектрики НАН та МОН України, Україна, radionch@gmail.com)*

Представлені результати досліджень перспективних застосувань проникних термоелементів. Наведено результати комп'ютерного моделювання різних варіантів проникних термоелементів (пористих, площинних, сегментних і ін.) В режимах генерації електричної енергії і термоелектричного охолодження. Методами математичної теорії оптимального управління та комп'ютерного проектування, вирішені багатофакторні оптимізаційні завдання і визначені конструкційні та теплофізичні параметри, що доставляють максимальні значення ефективності перетворення енергії.

Результати комп'ютерних розрахунків, вказують на можливість підвищення холодильного коефіцієнта на 20-50% в порівнянні з традиційним термоелектричним охолодженням. В режимі генерації електричної енергії, використання проникних термоелементів дає можливість отримати в 1.1-1.5 разів більшу енергетичну ефективність у порівнянні з традиційними термоелементами.

Отримані зразки проникних площинних термоелектричних батарей з матеріалів на основі Bi-Te-Se-Sb. Експериментальні дані підтверджують основні положення теорії і вказують на можливості більш широкого практичного застосування термоелектрики.

## **ВПЛИВ МІЖШАРОВОЇ ВЗАЄМОДІЇ НА ВЛАСТИВОСТІ ЛЕГІРОВАНОГО ТЕЛУРИДУ ВІСМУТУ**

Kamil Shamil oglu Gahramanov, H. M. Abdullayev

*(Physics Institute of NAS Azerbaijan, Азербайджан, [kamil.gahramanov@yahoo.com](mailto:kamil.gahramanov@yahoo.com))*

Аномалії в температурній залежності параметрів кристалічної решітки і кінетичних параметрів телуриду вісмуту, легованого міддю і індієм  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  <In, Cu> пояснюються змінами в хімічному зв'язку і впливом дефектних центрів.

Перерозподіл електронної щільності між металом і центральним шаром халькогена в п'ятишаровому пакеті каркаса кристала, при певному температурному діапазоні, призводить до негативної величини термічного коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР). На полярність ковалентного зв'язку і зменшення міжатомних відстаней Bi-Ti (2) безпосередньо впливає величина міжшарової взаємодії. Енергія теплового руху при наближенні до величини енергії міжшарової взаємодії призводить до девіації зв'язків і до флуктуацій розподілу електронної щільності в обсязі кристала.

## **БАГАТОШАРОВІ З'ЄДНАННЯ ТЕЛУРИДУ ВІСМУТУ, ЛЕГОВАНІ СЕЛЕНОМ, ДЛЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ**

Sharma Yogeshchandra

*(Vivekananda global university Jaipur, Індія, [yc.sharma.vit@gmail.com](mailto:yc.sharma.vit@gmail.com))*

Технологічний прогрес вимагає розробки режимів і методів збору відходів тепла за допомогою термоелектричних пристроїв. З'єднання телуриду є дуже хорошими матеріалами, що генерують термоелектрику. Вони показали відмінні термоелектричні властивості в діапазоні температур від  $50^\circ\text{C}$  до  $200^\circ\text{C}$ . Недавні роботи показують, що їх багатошарові конструкції будуть мати кращі термоелектричні властивості. У даній роботі розглянуті і представлені результати одержання і характеристики альтернативних багатошарових тонких плівок телуриду вісмуту ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) і телуриду вісмуту, легованого селеном ( $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ ). Результати показують хорошу якість вирощених багатошарових плівок.

**ПРЯМЕ ВИМІРЮВАННЯ ЕФЕКТУ ПЕЛЬТЬЄ НА ВАРІЗОННОМУ КРИСТАЛІ СИСТЕМИ  $\text{Bi}_{100-x}\text{Sb}_x$  ПРИ ПРОТІКАННІ СТРУМУ УЗДОВЖ ЙОГО ПЛОЩИНИ СПАЙНОСТІ В ІНТЕРВАЛІ ЗНАЧЕНЬ СКЛАДУ  $7,5 < x < 11,5$  ат.**

В. И. Бочегов, Н. А. Мельников, Л. Н. Никифорова

*(Курганский государственный университет, РФ, [max\\_vib@mail.ru](mailto:max_vib@mail.ru))*

Раніше одним з авторів даної роботи експериментально було виявлено та теоретично обгрунтовано явище полярності ряду кінетичних властивостей на варізонних кристалах системи Bi-Sb в поперечному магнітному полі [1-4]. В роботі [5] авторами було представлено експериментально виявлене і теоретично обгрунтоване явище залежності теплопровідності від взаємного напрямку градієнта ширини забороненої зони і градієнта температури в досліджуваному кристалічному образі даного твердого розчину, в тому числі і поза магнітним полем. Суть цього, раніше невідомого явища, в тому, що питома теплопровідність істотно змінюється за величиною при зміні напрямку градієнта температури по відношенню до напрямку градієнту ширини забороненої зони напівпровідникового зразка (неоднорідність складу і температури спрямовані уздовж довжини зразка або сонаправлено, або направлено проти).

У даній роботі ми представляємо експериментальний результат, отриманий на Пельтьє парі, в якій n-гілкою є кристал твердого розчину системи Bi-Sb у вигляді прямокутного паралелепіпеда з довжиною  $a = 8$  мм, з шириною  $b = 2,6$  мм і товщиною  $z = 1, 3$  мм, площина спайності паралельна напрямками довжини і товщини. Струм має напрямок уздовж довжини n-гілки. Градієнт складу (монотонна зміна концентрації сурми) так само спрямований по довжині кристала n-гілки. Наведено графік зміни концентрації сурми уздовж монокристалічного злитка твердого розчину Bi-Sb, де точками відзначені значення її концентрації, отримані методом рентгено-люмінісцентного аналізу, лінія графіка отримана методом сплайн інтерполяції по вимірних точках. Зразок вирізаний з ділянки цього злитка від значення поздовжньої координати по його довжині рівного 18 мм до значення координати 26 мм, довжина зразка направлена уздовж зливка і площини спайності кристал. Монокристалічний злиток отриманий шляхом комбінації зонної і нормальної кристалізації від затравки. Таким чином на одному торці n-гілки ми маємо концентрацію сурми приблизно  $C1 \approx 7,5$  ат%, а на протилежному торці приблизно  $C2 \approx 11,5$  ат%. Відповідно до даних [5] при температурах проведення вимірювання (температура термостата, на який монтується Пельтьє пара має значення  $T \approx 100\text{K}$ ). Ширина забороненої зони на першому торці  $\Delta E1 = 0$  (є слабе перекриття валентної зони і зони провідності), а на другому торці  $\Delta E2 \approx 15$  меВ, тобто ширина забороненої зони монотонно зростає при русі від першого до другого торця зразка (в лінійному наближенні руху зон). Ця обставина означає, що зразок (n-гілка) є варізонним напівпровідниковим кристалом.

В якості p-гілки термоелемента Пельтьє використовується тонка мідна пластина з геометрією близькою до оптимальної по відношенню до описаної вище n-гілки. Вимірювання температури термостата, на якому змонтована Пельтьє пара, і температури охолоджуваного контакту досліджуваного термоелемента Пельтьє, здійснювалося за допомогою мідь-константанових термопар. Термостат, оснащений автоматичною

термостабілізацією, разом із закріпленим на ньому досліджуваним термоелементом знаходиться в герметичній вакуумованій камері, зануреній у киплячий азот.

На завершення слід відзначити, що використана в експерименті кристалографічна орієнтація кристалу Bi-Sb не сама оптимальна з точки зору ефективності Пельтьє охолодження, як за параметром термоЕРС, так і за параметром теплопровідності. Суттєво більш ефективним є орієнтація, коли напрямок струму і градієнту температури у ветці з кристалів Bi-Sb паралельні їх тригональній вісі, але нам поки-що не удавалося виростити монотонно неоднорідний кристал з напрямом градієнта складу паралельним тригональній вісі (перпендикулярно площині спайності).

Важно також відмітити, що до цього моменту ефект полярності в варізонних (градієнтно-неоднорідних) кристалах системи Bi-Sb був автором даної роботи передбачений і експериментально підтверджений для всіх кінетичних параметрів важливих для термоелектрики за винятком явища Пельтьє. Дана робота є деяким дослідницьким підсумком важливим для практичного використання ефекту полярності при Пельтьє охолодженні.

#### Список літератури

1. Бочегов В.И., Грабов В.М. Влияние гальваномагнитного стационарного вихревого тока на магнито-термоэлектрическую добротность градиентно-неоднородных сплавов висмут-сурьма. // ПЖТФ. — 2014. — Т. 40. — Вып. 20. — С. 29-38. Переводная версия: Bochegov V.I., Grabov V.M. The influence of a galvanomagnetic stationary vortex current on the magnetothermoelectric figure of merit of graded inhomogeneous bismuth-antimony alloys. // Technical Physics Letters. June 2014, Volume 40, Issue 10, pp. 897-900.
2. Бочегов В.И., Грабов В.М., Куликов В.А., Нечаев И.А. Влияние градиентной неоднородности на термомагнитные свойства сплавов висмут-сурьма. // ПЖТФ. — 2015. — Т. 41. — Вып. 12. — С. 64-73. Переводная версия: Bochegov V.I., Grabov V.M., Kulikov V.A., Nechaev I.A. The influence of graded inhomogeneity on the thermomagnetic properties of bismuth-antimony alloys. // Technical Physics Letters. June 2015, V. 41, Issue 6, pp. 595-598.
3. Бочегов В.И., Грабов В.М. Теплопроводность градиентно-неоднородных ветвей термоэлементов при рабочем перепаде температур. // ФТП. — 2017. — т. 51. — вып. 7. — С. 912-913. Переводная версия: Bochegov V.I., Grabov V.M. On the thermal conductivity of the gradient-inhomogeneous branches of thermoelements at a difference in the operating temperature. // Semiconductors. July 2017, Volume 51, Issue 7, pp 874–875.
4. Бочегов В.И., Дензанова Т.В., Нечаев И.А. Влияние продольной градиентной неоднородности в полупроводниках на явления переноса в поперечном магнитном поле. / В.И. Бочегов, Т.В. Дензанова, И.А. Нечаев. // Термоэлектрики и их применения: Доклады XII Межгосударственного семинара (ноябрь 2010 г). — Санкт-Петербург : УРАН ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН : Изд. ПИЯФ РАН. — 2010.— С. 190–193.
5. Бочегов В.И., Мельников Н.А. The thermal conductivity of the variband crystals of the Bi<sub>x</sub>Sb<sub>1-x</sub> system in the semiconductor region of the composition at the temperature of about 100K. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 544 (2019) 012033

## ТОПОЛОГІЧНІ ІЗОЛЯТОРИ І ТЕРМОЕЛЕКТРИКА

О. І. Рогачова

*(Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Україна,  
[rogachova.olena@gmail.com](mailto:rogachova.olena@gmail.com))*

Топологічні ізолятори (ТІ) являють собою відносно недавно відкритий новий клас об'єктів фізики твердого тіла [1]. ТІ - ізолятори з металевою провідністю в поверхневому шарі через сильний спіно-орбітальної взаємодії; електронні стани характеризуються законом дисперсії Дірака і топологічно захищені від зворотного розсіювання на немагнітних домішок і дефектах. Захист топологічних поверхневих станів широко вивчається, і їх існування вже підтверджено. Однак до сих пір є значно менше експериментальних даних про особливості транспортних властивостей ТІ, обумовлених їх особливою зонною структурою. Виявилось, що більшість ТІ належить до кращих термоелектричних (ТЕ) матеріалів ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  і ін.), і останнім часом з'явився ряд робіт, в яких автори пояснюють цей факт з різних точок зору. Розуміння цього явища могло б дозволити використовувати наявність поверхневого шару Дірака для збільшення ТЕ добротності  $Z$ , тобто розробити принципово нові методи збільшення  $Z$  за рахунок використання топологічних властивостей. Найбільш перспективним у цьому відношенні є використання тонких плівок, в яких роль поверхневого шару в провідності зростає в порівнянні з об'ємними кристалами, оскільки зі зменшенням товщини плівки зростає відносний внесок поверхневих станів в кінетичні коефіцієнти.

З'явився ряд робіт, присвячених можливому впливу топологічних поверхневих станів на ТЕ властивості кристалів і тонких плівок  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . Все це привертає увагу до вивчення поведінки ТЕ властивостей, пов'язаних з наявністю поверхневого шару Дірака. У доповіді представлений огляд наших досліджень ТЕ властивостей тонких плівок  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  і  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  n- and p-типу різної товщини, отриманих термічним випаровуванням у вакуумі. У цих тонких плівках ми вперше спостерігали товщинні осциляції кінетичних коефіцієнтів, і характер їх прояву мав певну специфіку в порівнянні зі звичайними напівпровідниками [2-4]. Можна було очікувати, що структура поверхневих станів конуса Дірака впливатиме на характер залежних від товщини квантових коливань. Значна амплітуда коливань і їх практично незатухаючий характер дозволили припустити, що спостережувані особливості властивостей цих квантово-розмірних ефектів пов'язані зі специфічними властивостями поверхневих шарів, властивими ТІ з топологічно захищеними поверхневими станами. Отримані в цих роботах результати є непрямим підтвердженням специфічних властивостей топологічних поверхневих станів і демонструють вплив поверхневих шарів в тонких плівках ТІ на квантові процеси в обсязі плівки. Ці результати важливі як для розвитку уявлень про фізику твердого тіла, так і для практичного застосування топологічних ізоляторів в термоелектриці.

## ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ І ТЕРМОДИФУЗІЙНІ ЯВИЩА В КОЛОЇДНИХ РОЗЧИНАХ

А. В. Сидоров, В. М. Грабов, А. Зайцев, Д. Кузнецов.

*(Государственный университет им. И.А. Бунина, Росія, [dirnusir@mail.ru](mailto:dirnusir@mail.ru).)*

Зацікавленість термоелектричними властивостями колоїдних розчинів у даній час обумовлена рядом причин. Перш за все, системи є перспективними засобами для термоелектрохімічних генераторів – пристроїв, призначених для прямого перетворення низькопотенційної теплової енергії різних промислових, транспортних, побутових установок в електричну енергію. Окрім цього, як показують недавні дослідження, термоелектричні явища мають суттєвий вплив на перенесення колоїдних частинок в неоднорідному температурному полі, тобто вивчення термоелектричних явищ в колоїдних розчинах і закономірностей в них також представляють фундаментальну зацікавленість.

Особливу зацікавленість представляють дослідження впливу наявності неорганічних іонів в колоїдних розчинах на величину термоЕРС колоїдних розчинів, які досліджуються в даній роботі.

У даній роботі наведені експериментальні вимірювання коефіцієнта термоЕРС чистих колоїдних розчинів технічних титанів, крохмалю і каніфолі соснової і їх сумішей з розчинами іонних електролітів.

## КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗОННОГО ВИРОЩУВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

О. В. Ніцович

*(Институт термоелектрики НАН та МОН України, Україна, [o.nitsovich@chnu.edu.ua](mailto:o.nitsovich@chnu.edu.ua))*

Зонне плавлення є одним із найбільш використовуваних методів виробництва напівпровідникових матеріалів, зокрема термоелектричних. Однак, отримання термоелектричних матеріалів (ТЕМ) з необхідними властивостями можливе лише в умовах контрольованого процесу кристалізації, оскільки великий вплив на стійкість зростання та однорідність монокристала має кривизна фронту кристалізації, температурний градієнт на межі розділу твердої та рідкої фаз, геометрія зони розплаву, швидкість переміщення зони та інше [1, 2].

Комп'ютерне моделювання процесів вирощування ТЕМ дає можливість визначити умови росту та пояснити можливі труднощі, що можуть виникати в результаті зміни цих умов. Воно не може замінити, але передбачає та доповнює експеримент, надаючи інформацію, яка експериментально може бути отримана лише опосередковано. Тому, актуальним є удосконалення та розвиток технології вирощування термоелектричних матеріалів шляхом багатопараметричної комп'ютерної оптимізації керованих параметрів процесу.

У роботі представлений підхід до побудови комп'ютерної моделі процесу вирощування термоелектричних матеріалів методом вертикальної зонної плавки. Розроблена модель дає можливість визначати оптимальні теплові умови вирощування монокристалів на основі  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , досліджувати зміну форми фронту кристалізації залежно

від зміни теплових умов та швидкості вирощування, а також дозволяє врахувати ефект Пельтьє, що виникає на межі розділу твердої та рідкої фаз вирощуваного матеріалу при пропусканні через злиток електричного струму.

## **ВПЛИВ ТЕРМОЕЛЕКТРИКИ НА ККД ПЕРЕТВОРЕННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

Steponas Ašmontas, Jonas Gradauskas, Algirdas Sužiedėlis, Aldis Šilėnas, Aurimas Čerškus, Viktoras Vaičiškauskas, Oleksandr Masalskyi, Ovidijus Žalys

*(Center for Physical Sciences and Technology, Лумба, [steponas.asmontas@ftmc.lt](mailto:steponas.asmontas@ftmc.lt))*

ККД одноперехідного сонячного елемента обмежений теорією Шоклі-Квайссера, яка припускає, що ефективно використовуються лише фотони, що мають енергію, близьку до забороненої зони напівпровідника. Фотони більш високої енергії створюють електронно-діркові пари, а надлишкова енергія перетворює фотогенеровані носії в гарячі носії з температурою нерівноважного розподілу вище, ніж у решітці. Сонячний елемент губить біля 30% падаючої сонячної енергії, коли гарячі носії термалізуються, тобто розсіюють збиткову енергію на решітці. Росс і Нозик запропонували ідею перетворювача сонячної енергії з гарячими носіями, в якому фотогенеровані гарячі носії добуваються у вузькому діапазоні енергій з швидкістю, більшою, ніж вони розсіюють енергію в решітці. Теоретично ефективність перетворення такого пристрою може досягати 66%. Виконано велику кількість теоретичних і експериментальних робіт, присвячених розробці сонячних елементів на гарячих носіях. Однак до цього часу не створено ніяких сонячних батарей з гарячим носієм, придатних для практичних застосувань.

Гарячі носії обумовлюють утворення термоелектрорушійної сили на р-n переході. Полярність термоелектрорушійної сили гарячих носіїв заряду протилежна класичній фотоЕРС. Крім того, термалізація гарячих носіїв призводить до нагрівання кристалічної решітки. Термоелектрорушійна сила, викликана нагріванням решітки, також має полярність, протилежну класичній. Таким чином, носії і нагрів решітки знижують ККД сонячного елемента.

У нашій презентації ми демонструємо, що фотоЕРС, індукована лазерним імпульсом 1,06 мікрон на р-n-переході GaAs, складається з трьох компонентів, що виникають в результаті нагрівання гарячих носіїв і решітки, а також явища генерації електронно-діркових пар. Перша дуже швидка і показує полярність термоелектрорушійної сили гарячих носіїв. Друга, що виникає через термалізацію гарячих носіїв, має ту ж полярність і працює повільніше. Третя, відповідно, це класична фотоЕРС, що виникає через поглинання двох фотонів з полярністю, протилежною полярності перших двох. Нагрівання решітки і термоелектрорушійна сила гарячих носіїв можуть бути причиною експериментально недосяжної межі Шоклі-Квайссера.



## РОЗРОБКА ПРИНЦИПІВ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ВДОСКОНАЛЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВ ЗБОРУ ЕНЕРГІЇ ІоТ

Takao Mori

*(International Center for Materials Nanoarchitectonics (WPI-MANA), National Institute for Materials Science (NIMS), Graduate School of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba, Японія, [MORI.Takao@nims.go.jp](mailto:MORI.Takao@nims.go.jp))*

Існує життєва необхідність у розробці технологій для динамічного отримання енергії з навколишнього середовища для живлення застосувань ІоТ [1]. Термоелектрика є перспективною, оскільки вона дозволяє широко використовувати теплову енергію, таку як тепло тіла. Що стосується термоелектричних застосувань для побутових потреб, тут вартість матеріалів, здається, не є критичним фактором (за рахунок продуктивності матеріалу), а скоріше такими факторами є відповідні методи обробки та виготовлення ефективних модулів. Термоелектричні характеристики залишаються критичною вимогою, і на додаток до різних стратегій для модулів, таких як використання напівпровідникових процесів та нових гібридів [2], ми намагаємось розробити принципи термоелектричного підсилення.

В якості одного з таких напрямків ми спробували використати магнетизм і виявили, що посилення термоелектричних властивостей може бути здійснено за допомогою магнітної взаємодії шляхом: а) легування магнітними іонами [3], а також втілення в магнітних напівпровідниках [4], і б) коливання спіна [5]. Перший був продемонстрований у магнітних халькогенідах перехідних металів, таких як  $\text{CuFeS}_2$ ,  $\text{CuCr}_2\text{S}_4$ ,  $\text{Cr}_2\text{Se}$ , легованих магнітними іонами  $\text{CuGaTe}_2$  та  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  тощо, а другий втілений у сплавах Хейслера, таких як  $\text{Fe}_2\text{VAI: Si}$ . Магнітні напівпровідникові термоелектричні матеріали також можуть бути сумісні в майбутньому з магнітними та спінтронічними датчиками та пристроями. Ми також застосували наноструктуровані матеріали з високим значенням  $ZT$  з температурою, наближеною до кімнатної, такі як нанопористий рідкісноземельний скутерудит із  $ZT \sim 1 @ 200^\circ\text{C}$  [6] та наноксидний композит  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  із  $ZT \sim 1.5 @ 70^\circ\text{C}$  [7]. Нещодавно наші співробітники синтезували тонкі плівки Хейслера з вражаюче високим значенням  $ZT$  [8]. Дефектна та інтерфейсна інженерія також дали покращені показники роботи, наприклад  $\text{GeTe}$ , [9].

### Бібліографія

1. Sci. Tech. Adv. Mater., 19, 836 (2018), MRS Bulletin, 43, 176 (2018), Nano Energy, 78, 105186 (2020), etc.
2. Sci. Tech. Adv. Mater., 19, 517 (2018), MRS Advances, 5, 481-487, (2020).
3. Small, 13, 1702013 (2017), Angew. Chem. Int. Ed. 54, 12909 (2015), Chem. Mater. 29, 2988 (2017), Inorg. Chem. 57, 5258 (2018), J. Materiom. 4, 221 (2018), J. Mater. Chem. C 7, 8269 (2019), 8, 1811 (2020), ACS Appl. Energy Mater. 3, 2096 (2020).
4. J. Mater. Chem. A 5, 7545 (2017), J. Mater. Chem. C 6, 6489 (2018), Science Advances 5, eaat5935 (2019), Materials Today Phys. 9, 100090 (2019).
5. Science Advances, 5, eaat5935 (2019).
6. Nano Energy 31, 152-159 (2017).
7. J. Mater. Chem. A 6, 21341 (2018).
8. Nature 576, 85-90 (2019).

9. Small, 16, 1906921 (2020), Z. Liu, N. Sato, et al., “Shaping the Role of Germanium Vacancies in Germanium Telluride: Stabilization of The Metastable Cubic Structure, Band Structure Modification, and Stable N-type Conduction”, NPG Asia Mater. in press.

## 4. ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ПРИЛАДИ ТА ПРИСТРОЇ

### УЗАГАЛЬНЕННЯ ТЕОРІЇ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПРИЛАДІВ ТА СОНЯЧНІ ТЕГ НА МІСЯЦІ

А. В. Прибила

*(Інститут термоелектрики НАН та МОН України, Україна, anatysh@gmail.com)*

Термоелектрика стрімко розширює напрямки свого практичного використання: від приладів для військових – починаючи від надійних кондиціонерів до сенсорів для високоточної зброї; в медицині – для діагностики, профілактики і лікування багатьох хвороб; в космосі для охолодження високоточних пристроїв орієнтації по зірках і довговічні генератори електричної енергії; в промисловості – пристрої рекуперації відпрацьованої теплової енергії; до приладів побутового призначення – для забезпечення комфортних температурних умов перебування людини, зберігання продовольчих товарів, тощо. Зрозуміло, що таке різноманіття практичних застосувань термоелектричної апаратури вимагає точних і доступних методів для їх проектування і оптимізації, особливо це актуально розуміючи постійну конкуренцію з боку теплових машин, компресійних холодильників, тощо. Проте діяльність, направлена на покращення ефективності термоелектричної апаратури, в першу чергу зосереджена на самих термоелектричних перетворювачах енергії і зводиться до підвищення добротності термоелектричних матеріалів для таких перетворювачів. Однак не меншою мірою вона залежить і від теплообмінних приладів. З другого боку, оптимізація теплообмінних систем без врахування кінцевої мети їх використання також не дає бажаного результату. В даній роботі використано комплексний підхід до проектування термоелектричної апаратури, заснований на дослідженні найбільш повних (узагальнених) фізичних моделей термоелектричних приладів, що враховують наявність термоелектричних перетворювачів та систем, що забезпечують підведення та відведення теплових потоків. Реальні термоелектричні пристрої для забезпечення необхідного теплообміну містять цілу систему теплообмінників (рідинних, повітряних, а також комбінованих), а також пристрої інтенсифікації теплообміну – рідинні насоси та повітряні вентилятори, що споживають електричну енергію, знижуючи при цьому загальну ефективність. Потужність живлення таких пристроїв є також параметром оптимізації, що можлива лише у випадку комплексної оптимізації термоелектричного приладу. Аналітичний розв'язок таких задач з пошуку багатопараметричних оптимумів є майже неможливим, що призводить до необхідності використання комп'ютерних методів оптимізації і проектування таких пристроїв. В цілому, використання такого підходу дозволяє підвищити енергетичні характеристики термоелектричних приладів на 10-20%. Наводяться приклади використання зазначених підходів для проектування конкретних термоелектричних приладів – рекуператорів теплової енергії (термоелектричні генератори для цементних і сталеварних печей, газоперекачувальних агрегатів, автомобільних двигунів), теплових насосів для приладу очистки води космічного призначення, кондиціонерів повітря (для автотранспорту, зокрема військового), індивідуальних кондиціонерів для людини, охолоджувачів різноманітних детекторів випромінювання, медичної апаратури, тощо...

## СИСТЕМА ТЕРМІЧНОЇ ДИСТИЛЯЦІЇ ДЛЯ ПОЛЬОТІВ У ДАЛЕКИЙ КОСМОС

А. С. Соломаха

*(Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Україна, [a.solomakha@kpi.ua](mailto:a.solomakha@kpi.ua))*

Наведено результати нових випробувань відцентрового багатоступінчастого дистильатора (ЦМЕД) з 3 і 5 ступенями з термоелектричним тепловим насосом, показані переваги конструкції в порівнянні з аналогами. Обґрунтовано кращі можливості використання ЦМЕД для польотів в дальній космос за рахунок більшої ефективності, надійності і хорошої масштабованості системи. У статті представлена нова докладна інформація і дані про продуктивність ЦМЕД. Показана можливість досягнення рекуперації до 93%, хорошої масштабованості системи (продуктивність від 1,5 до 7 літрів на годину) і хорошої якості одержуваного дистильату.

## ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ОХОЛОДЖУВАЧІ І ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ СЕНСОРИ ДЛЯ КОСМІЧНИХ ЗАСТОСУВАНЬ

Л. І. Анатичук, В. В. Разіньков

*(Інститут термоелектрики НАН та МОН України, Україна, [anatykh@gmail.com](mailto:anatykh@gmail.com))*

У доповіді наведено конкретні застосування термоелектричних охолоджувачів:

- на космічних орбітальних станціях для проведення наукових експериментів і функціонування систем життєзабезпечення екіпажів;
- на орбітальних телекомунікаційних та наукових космічних апаратах і між планетних космічних станціях для охолодження і стабілізації робочої температури датчиків камер астроорієнтації, детекторів космічних телескопів.

Неможливість заміни або ремонту технічних пристроїв в космічних апаратах висуває високі вимоги до ресурсу термоелектричних охолоджувачів (надійність 120-150 FIT, довговічність 18-20 років). В Інституті термоелектрики виконуються дослідження, спрямовані на забезпечення необхідної надійності і довговічності термоелектричних охолоджувачів. У доповіді розглянуто вплив деградації на ресурсні властивості термоелектричних матеріалів, проведено аналіз сучасного стану і перспектив фізичних і комп'ютерних моделей деградації термоелектричних матеріалів і приконттактних структур. Розроблено методи істотного підвищення надійності термоелектричних охолоджувачів при послідовно-паралельному з'єднанні гілок, а також пасивному резервуванні гілок.

Для підвищення надійності приконттактних структур розроблено новий тип комутації, що дозволяє не тільки покращити довговічність і стійкість до впливу підвищених температур і циклів вкл/викл, але й також підвищити стійкість до впливу механічних ударів. На основі отриманих результатів в Інституті термоелектрики були розроблені конструкції і технологія виготовлення особливо надійних термоелектричних охолоджувачів космічного призначення. Для тестування охолоджувачів космічного призначення в вакуумі відповідно до MIL-STD 883 і Telcordia GR-468 CORE розроблено і виготовлено спеціалізоване обладнання.

## **ПРО ДЕЯКІ АКТУАЛЬНІ НАПРЯМИ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИКИ У МЕДИЦИНІ**

Р. Р. Кобилянський

*(Інститут термоелектрики НАН і МОН України, Україна, [anatysh@gmail.com](mailto:anatysh@gmail.com))*

У роботі представлено результати досліджень сучасного стану застосування термоелектрики в різних галузях медицини. Визначено три основних пріоритетних напрямки – використання термоелектричного охолодження (нагріву) у медицині, генерація електричної енергії від тепла тіла людини та медична діагностика з використанням термоелектричних сенсорів теплового потоку.

Для цих напрямків побудовано відповідні фізичні, математичні та комп'ютерні моделі біологічної тканини з врахуванням теплофізичних процесів, кровообігу, теплообміну, процесів метаболізму та фазового переходу. Зроблено комп'ютерне моделювання та визначено розподіли температур і теплових потоків у біологічній тканині в різних режимах роботи. На основі отриманих результатів комп'ютерного моделювання розроблено та виготовлено термоелектричну медичну апаратуру для лікування та діагностики різноманітних захворювань організму людини.

У роботі наведено конструкцію, принцип роботи та технічні характеристики розроблених термоелектричних медичних приладів. Представлено результати клінічних випробувань таких приладів. Встановлено, що результати проведених випробувань свідчать про високу перспективність використання такої термоелектричної медичної апаратури у медичній практиці.

## **ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ РОБОТИ**

Л. І. Анатичук, П. Д. Микитюк

*(Інститут термоелектрики НАН та МОН України, Україна, [anatysh@gmail.com](mailto:anatysh@gmail.com))*

У технічних засобах, що використовуються в екстремальних умовах, зокрема – в системах автономного управління на об'єктах спеціального призначення, актуальним є питання їх забезпечення відповідними джерелами електричної енергії. Такі джерела живлення повинні володіти оптимальним співвідношенням масо-габаритних і енергетичних характеристик, бути стійкими до впливу ударних навантажень до  $500\text{g}$ , мати великий (на менше 30-40 років) термін зберігання без обслуговування, високу надійність і т. ін.

Проведений у роботі порівняльний аналіз показав, що найпоширеніші в даний час хімічні джерела живлення (ХДЖ) через природній саморозряд, а отже і малий термін зберігання, не розв'язують такі завдання.

Альтернативним варіантом забезпечення електричним живленням пристроїв одноразової дії є використання термоелектричних перетворювачів теплової енергії в електричну – так званих термоелектричних генераторів з піротехнічними джерелами тепла, значний досвід створення яких має Інститут термоелектрики ще із 80-х років минулого століття.

У даній роботі наведено результати досліджень і розроблення джерела живлення такого типу. Встановлено, що класичні термопарні батареї для розв'язання таких задач не завжди прийнятні, тому з використанням підходів узагальненої теорії термоелектричного перетворення енергії були винайдені спеціальні функціонально-градієнтні спіральні термоелементи, відмінні від термопар, розроблена технологія їх виготовлення з врахуванням вимог до серійної продукції.

Такі джерела відповідають вимогам забезпечення живлення систем ураження для точної зброї, систем імпульсного керування в космічних апаратах, забезпечення автоматичного запобігання небезпечних умов роботи на атомних електростанціях та інше.

## **МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ТЕГ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ НА ЕНЕРГЕТИЧНОМУ РИНКУ**

Ю. М. Лобунець

*(Інститут газу НАН України, Україна, [yurilobunets@yahoo.co.uk](mailto:yurilobunets@yahoo.co.uk))*

Доповідь присвячено питанням підвищення ефективності ТЕГ шляхом оптимізації їх параметрів на основі математичних моделей, які відображають умови передачі тепла та електроенергії в системі, що включає джерело теплоти, термоелектричний перетворювач, систему охолодження та корисне навантаження. Представлено узагальнені результати попередніх досліджень, які можуть принести користь розробникам термоелектричних генераторів. Наведено оцінки можливих техніко-економічних показників ТЕГ та сформульовано умови, за яких ця технологія може забезпечити конкурентоспроможність на сучасному енергетичному ринку.

## **ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ГЕНЕРАТОР СОНЯЧНОЇ ПАРАБОЛІЧНОЇ ТАРІЛКИ-КОЛЕКТОРА: ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.**

Hakan Yavuz

*(Tokat Gaziosmanpasa University, Туреччина, [hakan.yavuz@gop.edu.tr](mailto:hakan.yavuz@gop.edu.tr))*

Сонячна енергія - один з найважливіших поновлюваних джерел енергії. Виробництво електроенергії за допомогою фотоелектричних панелей керованих сонячним випромінюванням досить широко поширене. Термоелектричні генератори - це пристрої, які перетворюють сонячну теплову енергію безпосередньо в електричну. Потужність виходить пропорційна квадрату різниці температур між поверхнями. У цьому дослідженні тепловий ефект сонця був збільшений за рахунок використання параболічної тарілки-колектора. Модулі ТЕГ затиснуті між мідним тепловідводом і алюмінієвим тепловідводом в центральній точці на відстані 60 см один від одного. Випробування проводилися в університеті Tokat Gaziosmanpasa в Туреччині. Температура гарячої поверхні досягла 181 градуса, а температура холодної поверхні склала 80 градусів. Розрахунковий ККД системи склав 3,1%. Виміряна потужність - 5,1 Вт. Був зроблений висновок, що ТЕГ можна ефективно використовувати в поєднанні з концентрованою сонячною енергією.

## ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ОХОЛОДЖУВАЧ РІДИНИ

Rasit Ahiska

(*Testthermoelectric.com, Тупеччина, [rasitahiska@gmail.com](mailto:rasitahiska@gmail.com)*)

Винахід являє собою портативний, компактний, гнучкий, новий «охолоджувач рідини для термоелектричного транспортного засобу» з системою циркуляції або тепловими трубками. За короткий проміжок часу, наприклад, кілька хвилин, він охолоджує і нагріває воду або водоподібну рідину, перетворюючи електричну енергію від автомобільного акумулятора (лінії електропередач) в тепло або холод без проміжного матеріалу за допомогою гнучкого термоелектричного блоку, що складається з напівпровідників N і P типу.

Щоб охолодити або нагріти напій на одну людину протягом 5-10 хвилин за допомогою сконструйованого пристрою, спочатку 0,5 літра води в пластиковій пляшці поміщають в морозильну частину (охолоджуючу частину) пристрою, і пристрій підключається до акумулятора або живиться від мережевої напруги. При цьому вода або схожа на воду рідина в пластиковій пляшці ємністю 0,5 л при температурі навколишнього середовища (35 ° C - 45 ° C) охолоджується до 5-10 ° C або нагрівається до 30 ° C, якщо вона холодна, зі швидкістю нагрівання (охолодження) 3-5 ° C в хвилину, протягом 5-10 хвилин, і рідина буде готова до використання. Гнучкий термоелектричний блок у формі пляшки в пристрої охолоджує або нагріває рідину в пляшці безпосередньо і локально або за допомогою спеціально розроблених, щонайменше, двох термоелектричних модулів на твердій основі, або за допомогою спеціально розроблених 42 гнучких термоелементів на гнучкій основі. Акумулятор автомобіля або спеціальне джерело живлення SMPS використовується для живлення термоелектричного охолоджувача рідини автомобіля. Щоб звести до мінімуму енергоспоживання пристрою і змусити його працювати як охолоджувач або обігрівач, використовується спеціальна схема контролю потужності постійного струму і температури. Пристрій робиться «розумним» за рахунок завантаження спеціально написаного програмного забезпечення з комп'ютера в схему управління. Щоб підтримувати температуру назріваної сторони гнучкого термоелектричного блоку на рівні температури навколишнього середовища, використовується система теплопередачі із замкнутим циркуляційним водяним охолодженням з радіаторним вентилятором або алюмінієвим вентилятором, або спеціально розроблені теплові трубки.

## ІМПЕДАНСНА СПЕКТРОСКОПІЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ ТА ГЕНЕРАТОРІВ

Braulio, Beltrán-Pitarch

(*Universitat Jaume I, Іспанія, [beltranb@uji.es](mailto:beltranb@uji.es)*)

У цій роботі ми представляємо останні розробки методу імпедансної спектроскопії в застосуванні до (i) термоелектричних пристроїв, що працюють в реальних умовах генерування енергії (невелика різниця температур), і (ii) оцінці теплових контактних опорів всередині термоелектричних пристроїв (в основному на переході термоелемент/

металевий електрод) шляхом вимірювання модуля в підвішеному стані. Дослідження показують для першого випадку, що опір теплового контакту між термоелектричним модулем і джерелом /стоком тепла грає вирішальну роль в характеристиці імпедансу [1]. Фактично, ми показуємо, як метод імпедансної спектроскопії може бути використаний для кількісної оцінки цих теплових контактів. Для другого випадку ми представляємо нову теоретичну модель, яка охоплює теплове контактний опір між термоелектричними гілками і металевими електродами, вплив цих металевих смужок, теплове контактний опір між металевими смужками і керамічними шарами, а також новий розширює-звужує імпедансний елемент, який розширює можливості використання методу [2]. Ця нова еквівалентна схема може використовуватися для оцінки термоелектричних модулів і відкриває можливість використання методу імпедансу як інструмент контролю якості для виявлення слабких місць в термоелектричних модулях.



## 5. СТЕНДОВІ ДОПОВІДІ

### МЕТОД БЕЗКОНТАКТНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АНІЗОТРОПНИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

А. А. Ащеулов<sup>1</sup>, І. С. Романюк<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Інститут термоелектрики НАН та МОН України, <sup>2</sup>Завод «Кварц» ТДВ, Україна, ashcheulovaa@rambler.ru)

Можливості сучасних методів визначення ефективності термоелектричних матеріалів, а також зменшення похибки їх вимірювання в основному визначаються використовуваними електричними контактами [1,2].

Особливості термоелектричних явищ в анізотропних середовищах дозволяють вирішити це питання вихрострумовим безконтактним методом [3].

Даний метод заснований на безпосередньому безконтактному визначенні величин поздовжньої і поперечної складових тензорів адіабатичних і ізотермічних значень

$\sigma_{\parallel}^{\alpha}$ ,  $\sigma_{\perp}^{\alpha}$  і  $\sigma_{\parallel}^u$ ,  $\sigma_{\perp}^u$  електропровідностей, далі використовуваних для обчислення величин ефективностей  $Z_{11}$  і  $Z_{22}$  в необхідних кристалографічних напрямках. При цьому:

$$Z_{11} = \left(1 - \frac{\sigma_{11}^i - \sigma_{22}^i}{\sigma_{11}^{\alpha} + \sigma_{22}^{\alpha}}\right) \cdot T^{-1}; \quad Z_{22} = \left(1 - \frac{\sigma_{11}^i - \sigma_{22}^i}{\sigma_{11}^{\alpha} - \sigma_{22}^{\alpha}}\right) \cdot T^{-1}$$

Запропонований метод дозволяє автоматизувати процес вимірювання параметрів і контролювати термоелектричні злитки, заготовки та деталі, а так само здійснює підбір в р - n пари.

### ЕЛЕКТРОННІ, ОПТИЧНІ ТА ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАНОМАТЕРІАЛІВ

О. В. Бокотей, О. О. Бокотей, А. Г. Слівка

(Ужгородський національний університет, Україна, bokotey\_ov@ukr.net)

Помітний прогрес був досягнутий у дослідженні фізико-хімічних властивостей кристалів  $Hg_3X_2Y_2$  ( $X = S, Se, Te$ ;  $Y = F, Cl, Br, I$ ). Їх електронні та оптичні властивості, такі як високий показник заломлення, фотопровідність, електрооптичний ефект, оптична активність, оптична нелінійність тощо, роблять їх перспективними наноматеріалами для нелінійного застосування. Електронні, оптичні та термоелектричні властивості в достатній мірі залежать від умов синтезу, структурних дефектів та морфологічних характеристик. Зі структурної точки зору досліджувані кристали є добре впорядкованими і спостерігається, що основною структурною одиницею в титульному кристалі є піраміда  $[XHg_3]$ . Конструкція складається з двох наборів восьмигранних спіралей з різними радіусами та напрямками скручування. Ці кристали мають чудову прозорість в середині ІЧ-спектрального діапазону. Завдяки цим особливостям кристали типу кордероїту у формі наночастинок мають широкий спектр застосування в нанофізиці. Отримані дані свідчать про те, що фізичні властивості кристалів  $Hg_3X_2Y_2$  слід враховувати в дослідженнях щодо вдосконалення термоелектричних приладів. У той же час завдяки прозорості сполук сімейства кордероїтів у широкій області видимості та ІЧ-діапазоні (від 0,3 до 40 мкм)

створюються нові можливості для проектування матеріалів. Вони мають великий потенціал для широкого спектру можливих застосувань у: термоелектричних приладах, перетворювачах енергії (модулях), елементах для динамічної голографії, запису та зберігання інформації, модуляторах, дефлекторах та інших пристроях, заснованих на явищі взаємодії світлових променів.

## ЕЛЕКТРООПТИЧНИЙ ЕФЕКТ В $\text{Hg}_3\text{Se}_2\text{F}_2$

О. В. Бокотей

(*Ужгородський національний університет, Україна, [bokotey\\_ov@ukr.net](mailto:bokotey_ov@ukr.net)*)

Кристал  $\text{Hg}_3\text{Se}_2\text{F}_2$  представляє великий інтерес як для дослідників, так і для інженерів завдяки фізичним властивостям та великому потенціалу для розвитку електронних, термоелектричних та оптоелектронних приладів. Головною структурною особливістю халькогенід-галогенідів ртуті є тенденція до утворення різних поліморфних модифікацій завдяки великій конформаційній здатності ртутно-халькогенного компонента. Очікується, що наноматеріали на їх основі сприятимуть розвитку нанофізики.

У цій роботі представлений електрооптичний ефект у кристалі  $\text{Hg}_3\text{Se}_2\text{F}_2$ . Для кращого розуміння індукованої в кристалі поляризації другого порядку та виникнення електрооптичного ефекту проведено детальний теоретичний аналіз. Поле просторового заряду змінює показник заломлення завдяки електрооптичному ефекту. Розраховано електрооптичний тензор для кристала  $\text{Hg}_3\text{Se}_2\text{F}_2$ . Міркування щодо симетрії дозволяють спростити загальний вигляд для цього тензора. Ненульові коефіцієнти електрооптичного тензора 3-го рангу складають  $r_{41} = r_{52} = r_{63}$ . Ці дані надають фундаментальну інформацію та досвід для подальших досліджень.

## ТОНКОПЛІВКОВІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ СТРУКТУРИ НА ОСНОВІ МАТЕРІАЛІВ $\text{PbTe}$ і $\text{Bi}_2\text{Te}_3$

І. С. Вірт<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>*Дрогобицький державний педагогічний університет, Україна,*  
<sup>2</sup>*University of Rzeszow, Польща, [isvirt@email.ua](mailto:isvirt@email.ua)*)

Наведено результати досліджень структурних і термоелектричних властивостей тонких композитних плівок на основі  $\text{PbTe}$ . Плівки різної товщини (10-150 нм) на підкладках зі скла,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і кремнію отримували імпульсним лазерним напиленням  $1 \times 10^{-4}$  Па, і при різних температурах підкладки (30 оС, 200 оС). Були визначені умови зростання, які призводять до появи плівок з різними властивостями, якими можна було керувати в можливо широкому діапазоні. Параметри кристалічної структури тонких плівок визначені методами рентгенівської дифрактометрії та дифракції високоенергетичних електронів. Морфологія поверхні тонких композитних плівок  $\text{PbTe}$  (початкові стадії росту) досліджувалася за допомогою скануючого растрового електронного мікроскопа. При дослідженні морфології поверхні плівки було добре видно,

що контракти з основною поверхнею (матрицею) плівки розрізняються. Це свідчить про досить значне відхилення від стехіометрії в процесі нанесення плівок методом імпульсного лазерного напилення. Досліджено температурні залежності електропровідності, коефіцієнта Зеебека і теплової потужності тонких композитних плівок на основі PbTe з включеннями. З підвищенням температури коефіцієнт Зеебека для плівки PbTe Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> збільшується за абсолютною величиною від 1 мВ / К до значень 11 мВ / К, а електропровідність зменшується з 0.5 (Ом • см<sup>-1</sup>) до 0.08 (Ом • см<sup>-1</sup>). Для інших плівок, температурні характеристики аналогічних параметрів носять протилежний характер. Оцінка значення термоелектричних параметрів проведена з урахуванням розмірних ефектів в процесах перенесення носіїв заряду, і відзначено явище збільшення коефіцієнта Зеебека при утриманні Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>.

## **ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ОХОЛОДЖУВАЧІ ДЕТЕКТОРІВ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

О.В. Вербовський

*(Інститут термоелектрики НАН і МОН України, Україна, anatysh@gmail.com)*

Рентгенівські методи широко використовуються для неруйнівних мікроаналітичних досліджень структури і складу матеріалів з високою просторовою роздільною здатністю. Сучасний стан методів ядерного мікроаналізу з використанням сфокусованих пучків іонів МеВ-них енергій з високою моноенергетичністю ( $\Delta E/E=10^{-5}$ ) дозволяє досягнути просторової роздільної здатності по поверхні до 100 нанометрів і до 10 нанометрів по товщині зразків. Подальше підвищення роздільної здатності суттєво залежить від покращення аналітичних характеристик напівпровідникових детекторів, а також від застосування широко-апертурних позиційно чутливих детекторів випромінювання нових типів.

Для підвищення роздільної здатності рентгенівських детекторів важливо вирішити задачу забезпечення оптимальної температури їх роботи.

Вона вирішується шляхом використання напівпровідникових термоелектричних модулів охолодження (ТМО), що дозволяють забезпечити необхідну глибину охолодження в мінімальному робочому об'ємі детектора. Так однокаскадні термоелектричні модулі застосовуються для неглибокого охолодження (до 250 К), для охолодження сенсорів до робочої температури 230 К використовуються двокаскадні ТЕО, до температури 210 К – трикаскадні, до температури нижче 190 К – чотири і п'ятикаскадні ТМО.

Мета роботи – аналіз можливостей термоелектрики для охолодження рентгенівських детекторів та розробка конструкції багатокаскадного термоелектричного охолоджувача рентгенівських детекторів.

Із використанням комп'ютерних підходів розраховано конструкцію та характеристики термоелектричного охолоджувача у складі детектора рентгенівського випромінювання. ТМО містить 4 каскади з термоелектричного матеріалу на основі Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> габаритними розмірами – 12 x 16 x 12 мм при забезпеченні площі охолоджуваної площадки 4 x 8 мм.

Визначено електричну потужність термоелектричного перетворювача  $W = 2.85$  Вт, що при холодильному коефіцієнті  $\varepsilon = 0.02$  забезпечує температуру основи детектора  $T = -70$  °С і перепад температур  $\Delta T = 90$  К.

## **ВПЛИВ ГЕТЕРОКОНТАКТІВ НА ОСНОВІ НАДГРАТОК, ОПИСУВАНИХ МОДЕЛЛЮ ФІВАЗА, НА РОБОТУ ТЕРМОПАРНОГО ТЕРМОЕЛЕМЕНТА В РЕЖИМІ ОХОЛОДЖЕННЯ**

П. В. Горський П.В., О. В. Коваль

*(Інститут термоелектрики НАН та МОН України, Україна, [gena.grim@gmail.com](mailto:gena.grim@gmail.com))*

В роботі розраховано температурні залежності електричного опору гетероконтактів телурид вісмуту-нікель на основі надграток, описуваних моделлю Фіваза. При цьому вважалось, що дифузія нікелю у термоелектричний матеріал є нестационарною. Розрахунки проводились як без врахування, так і з урахуванням явища перколяції, пов'язаного з утворенням кластерів. Показано, що за високих ступенів відкритості поверхні Фермі термоелектричного матеріалу у приконтактній області, а, отже, непараболічності його зонного спектру описуваного моделлю Фіваза електричний контактний опір перехідного шару термоелектричний матеріал-метал в інтервалі температур від 200 до 400 К і товщини перехідного шару від 20 до 150 мкм слабо залежить від особливостей розподілу атомів чи кластерів нікелю у термоелектричному матеріалі і змінюється у межах від  $8 \cdot 10^{-9}$  до  $4.5 \cdot 10^{-7}$  Ом·см<sup>2</sup>. Таке явище має місце тому, що питомий електричний опір термоелектричного матеріалу із зонним спектром, описуваним моделлю Фіваза за високого ступеня відкритості поверхні Фермі, і, отже, непараболічності зонного спектру термоелектричного матеріалу у приконтактній області різко знижується і наближається до питомого опору металу. Це дозволяє, на противагу традиційним контактним структурам, досягти в інтервалі температур від 225 до 300 К практично граничних значень вихідних параметрів охолоджувача. При цьому граничне значення перепаду температур досягає 74 К, а за перепаду 65 К холодопродуктивність складає 0.5 Вт. Зазначимо також, що у випадку гетероконтактів перепад 72 К досягається за струму 5 А, а у випадку традиційних контактів – перепад близько 70 К за струму 6 А.

## **ГІРОТРОПНІ ТЕРМОЕЛЕМЕНТИ В ОДНОРІДНОМУ ТА НЕОДНОРІДНОМУ МАГНІТНИХ ПОЛЯХ**

Н.А. Годованець, І.А. Константинович, А.В. Константинович, С.Д. Шугані

*(Інститут термоелектрики НАН та МОН України, Україна, [dj\\_kneo@ukr.net](mailto:dj_kneo@ukr.net))*

Нині одним з перспективних напрямків розвитку термоелектрики є створення нових типів термоелементів в тому числі гіротропних та більш детальне дослідження вже відомих термоелементів. Останніми роками опубліковано низку робіт про гіротропні термоелементи в постійних магнітних полях [1-3], також розглянуті їх параметрів в неоднорідних магнітних полях [4]. Але ці можливості мало використані, тому їх розробка дозволить збільшити

елементну базу термоелектрики, покращити конкурентну спроможність термоелектричних перетворювачів та гіротропних термоелементів в тому числі, створити більш досконалу термоелектричну продукцію на їх основі, та підвищити її якість і надійність.

Для дослідження параметрів гіротропних термоелементів необхідно розв'язати наступне рівняння теплопровідності з відповідними крайовими умовами:

$$\kappa \Delta T + \rho_0 j^2 + 2\alpha_{\perp} \left( j_y \frac{\partial T}{\partial x} - j_x \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0,$$

де  $T$  – температура;  $\kappa$  – коефіцієнт теплопровідності гіротропного середовища;  $\rho_0$  – питомий електричний опір;  $x, y$  – координати;  $j, j_x, j_y$  – модуль та проекції вектора густини електричного струму;  $\alpha_{\perp} = Q^{\perp} B$  – асиметрична частина тензора термоЕРС;  $Q^{\perp}$  – коефіцієнт Нернста-Етtingсгаузена;  $B$  – індукція магнітного поля.

За допомогою комп'ютерного моделювання визначено розподіли температур у робочому тілі гіротропних термоелементів прямокутної, спіральної та оптимальної форм для різних термоелектричних матеріалів в однорідному та неоднорідному магнітних полях. Визначено температурні залежності ККД гіротропних термоелементів в однорідному та неоднорідному магнітних полях. Встановлено, що ККД генераторних гіротропних термоелементів більше в неоднорідному магнітному полі ніж в однорідному полі. А також отримано більш глибоке охолодження для випадку неоднорідного магнітного поля.

## Z-ВИМІРИ ОКРЕМИХ ТЕРМОЕЛЕМЕНТІВ

Г. Г. Громов

(PL Engineering Ptd, Росія, [gennadi.gromov@promln.com](mailto:gennadi.gromov@promln.com))

Метод Z-вимірювання широко використовується як при виробництві термоелектричних модулів, так і в експериментальних дослідженнях. По суті, це експрес-контроль параметрів готових термоелектричних модулів: генераторів, охолоджувачів. Дозволяє охарактеризувати холодопродуктивність і деякі інші параметри. Однак в практичному виробництві та в експерименті важливо прогнозувати на початкових етапах ці вихідні параметри виробів на основі властивостей термоелектричного матеріалу, які їх визначають. Для цього недостатньо методів управління параметрами вихідних термоелектричних матеріалів. Таке випробування зазвичай обмежується визначенням електропровідності і коефіцієнта Зеєбека матеріалу, чого недостатньо.

У даній статті представлені результати розробки методу Z-вимірювання окремих термоелементів.

Теоретичні розрахунки і експериментальні дослідження показали, що на одиничних термоелементах практичної номенклатури (робочі розміри для термоелектричних модулів) параметри якості можуть бути виміряні з високою точністю, а значить, і передбачувані параметри термоелектричних модулів з цих термоелементів. Результати експериментів добре підтверджують дані розрахунку. Такі Z-виміри при дотриманні методичних рекомендацій дають результати, дуже вірогідно відображають очікувані параметри готових модулів. Метод можна рекомендувати для практичного застосування.

## **МЕТОДИ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ТОЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРНИХ МОДУЛІВ**

М. В. Гаврилюк

*(Інститут термоелектрики НАН та МОН України, Україна, [anatykh@gmail.com](mailto:anatykh@gmail.com))*

Підвищення якості термоелектричних генераторних модулів, зниження їх собівартості вимагає застосування в їх розробці та виготовленні передових технологічних прийомів та високоефективних матеріалів. Підвищення точності у визначенні теплових та електричних параметрів модулів дає можливість більш прогнозовано корегувати технологію виробництва модулів, а також оптимальніше підходити до безпосереднього створення кінцевих пристроїв, основою яких є генераторні модулі.

Аналіз літературних джерел, публікацій та повідомлень в електронних засобах інформації дає можливість зробити висновки, що в напрямку метрології генераторних модулів та засобів контролю їх якості зроблено досить мало, або така інформація є закритою і недоступною для некорпоративних спеціалістів. Існуючі установки та стенди є достатньо складними і є скоріше науковими ніж прикладними. Вони дозволяють, звичайно, проводити визначення параметрів модулів, але застосовувати їх при навіть дрібносерійному виробництві генераторних модулів неефективно.

В роботі описана конструкція установки для вимірювання властивостей термоелектричних генераторних модулів. Наведено метод калібровки тепломіра і результати оцінки його похибок при визначенні коефіцієнта корисної дії генераторних модулів.

Установка, розроблена в Інституті термоелектрики є універсальною - з широким діапазоном типорозмірів модулів, що можуть вимірюватись, широким температурним діапазоном і діапазоном потужностей модулів на регульованому навантаженні. Установка проста у використанні, недорога, дозволяє передавати результати вимірювань на комп'ютер та обробляти їх за допомогою неспеціалізованого програмного забезпечення, що робить її привабливою і доступною для широкого загалу користувачів, які мають справу з термоелектричними генераторними модулями.

На основі аналізу теплових потоків було оцінено точність та основні похибки у визначенні параметрів генераторних модулів. Властивості термоелектричного генераторного модуля можуть бути виміряні за час, не більший за 30 хвилин, з точністю до 1% для електричних параметрів і до 5% для теплових параметрів.

## **ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИКИ У БДЖІЛЬНИЦТВІ**

В. М. Катеринчук

*(Інститут термоелектрики НАН та МОН України, Україна, [valerkater@gmail.com](mailto:valerkater@gmail.com))*

Глобальне потепління, поширення хвороб у бджіл, необхідність підвищення рентабельності пасік, з одного боку, і розвиток сонячної енергетики, термоелектричних пристроїв, комп'ютерних технологій, з другого, - створюють основу для побудови нових вуликів з можливостями оптимального річного утримання бджіл. Доведено практикою,

що бджолині сім'ї влітку, розміщені в затінених місцях, менше рояться, краще розвиваються і збирають більше нектару в порівнянні з сім'ями, розташованими на відкритих площадках. З цього випливає, що питання кондиціонування повітря у вулику є актуальним завданням для бджільництва.

Зазвичай, в природних умовах бджолина сім'я регулює температуру і вологість повітря у вулику за допомогою:

- а) примусової вентиляції бджолами вулика;
- б) викучуванням з вулика частини бджіл;
- в) зменшенням кількості бджіл на стільнику.

При цих обставинах розвиток сімей гальмується, а збір нектару зменшується.

В даній роботі розглянуто перспективу використання досягнень новітніх технологій для створення сучасних термоелектричних вуликів з можливостями цілорічної регуляції температури і вологості. Застосування термоелектричних модулів у поєднанні з вентиляторами дозволяє змінювати температурний режим вулика в потрібному напрямку: або його обігрівати, або охолоджувати.

На відміну від резисторних нагрівачів термоелектричні модулі мають подвійну функцію. Це твердотільні пристрої, які перетворюють електричну енергію в температурний градієнт, відомий як «ефект Пельтьє». Вони безшумні, надійні і довговічні. За допомогою вентилятора охолоджене або нагріте повітря можна примусово направити на деяку відстань всередині вулика, що потрібно для зміни мікроклімату у вулику. Для автономного живлення модулів передбачається використання сонячних батарей в поєднанні з акумулятором.

Важливим аспектом використання термоелектричних модулів є їх екологічність в боротьбі з вароатозом і іншими хворобами бджіл. Наприклад, за допомогою недовготривалого підвищення у вулику температури, можна ефективно боротися з кліщом Варроа Якобсоні.

## **ІНДИВІДУАЛЬНИЙ КОНДИЦІОНЕР ДЛЯ ЛЮДИНИ**

А.М. Кібак

*(Інститут термоелектрики НАН і МОН України, Україна, anatysh@gmail.com)*

Проведено аналіз наявної науково-технічної інформації про стан справ у використанні індивідуальних кондиціонерів для людини. Показані можливості їх широкого практичного використання для забезпечення комфортних умов перебування людини у різних температурних умовах та при зміні тепловіддачі тіла в залежності від механічних навантажень організму (біг, важка праця) та видів її діяльності (спортивна, військова, медична і т. п.). На відміну від традиційного підходу до кондиціонування усього повітря в приміщенні, де перебуває людина, її локальне кондиціонування дає можливість у десятки і сотні разів зменшити енергетичні затрати на його забезпечення. При цьому такі кондиціонери є компактними, безшумними та надійними у використанні.

Наведене вказує на актуальність досліджень, направлених на розробку індивідуальних кондиціонерів для людини, які, по великому рахунку, можуть вплинути на умови і стиль життя людства, що буде зумовлено переходом від «пасивного» одягу, який

до цього часу виконує в основному функцію теплової ізоляції людського організму, до використання «активного» одягу, який реагує на зміни температурних умов діяльності людини.

У роботі проведено аналіз та класифікацію фізичних моделей індивідуальних кондиціонерів для людини та визначено їх найбільш раціональні варіанти, що потребують подальшого дослідження та оптимізації з урахуванням специфічних умов їх експлуатації.

## **ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕДПУСКОВІ НАГРІВАЧІ ДЛЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

В. В. Лисько

*( Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, Україна, v.lysko@gmail.com )*

Для подолання труднощів, пов'язаних із експлуатацією автомобілів при понижених температурах, все ширше використовуються різноманітні засоби теплової передпускової підготовки двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ). Найефективнішими серед таких засобів є передпускові нагрівники – полум'яні джерела тепла, що працюють від палива автомобілів та здійснюють розігрів охолоджуючої рідини двигунів. Крім надійного запуску ДВЗ використання передпускових нагрівників створює умови для економії в середньому біля 90-150 л палива за сезон, зменшує до 5 разів токсичність вихлопних газів під час розігріву двигуна та дозволяє збільшити моторесурс двигуна на 200-300 км за один пуск при розігріві від температури  $(-20 \div -30) \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Визначальним фактором, що обмежує можливість масового використання передпускових нагрівників є розряд акумуляторної батареї під час роботи передпускового обладнання.

Одним із перспективних методів вирішення проблеми розрядки акумуляторів під час теплової підготовки двигунів транспортних засобів до запуску є використання термоелектричних генераторів в якості джерел електричної енергії для передпускових нагрівників. Ця ідея покладена в основу досліджень, що проводились в Інституті термоелектрики, спрямованих на створення термоелектричних передпускових джерел тепла для двигунів легкового автотранспорту. В результаті проведених досліджень розроблено експериментальний зразок термоелектричного передпускового нагрівника на дизельному паливі тепловою потужністю 3 кВт для попереднього розігріву двигунів внутрішнього згорання об'ємом до 4 л. Нагрівник містить термоелектричний генератор електричною потужністю 80 – 100 Вт, який працює від тепла передпускового нагрівника та забезпечує живлення його компонент.

Для використання таких джерел тепла та електрики з метою покращення експлуатаційних можливостей техніки великої потужності необхідною є електрична потужність термогенератора близько 300-500 Вт. Такі термоелектричні пристрої повинні мати високий ресурс роботи, бути надійними та стійкими до механічних навантажень.

Проведений аналіз можливих фізичних моделей системи «термоелектричний генератор-передпусковий нагрівник» показав, що найбільш привабливою з точки зору значення ККД та зручності у експлуатації є система, в якій передпусковий нагрівник і генератор об'єднані одним гідравлічним контуром. Такий нагрівник може бути



встановлений окремо, у доступному місці транспортного засобу, що робить простішим його впровадження.

Термоелектричний генератор у такій системі працює наступним чином. Теплова енергія, отримана внаслідок згоряння палива нагріває гарячий теплообмінник, проходить через термоелектричну батарею і відводиться через рідинні теплообмінники, у яких циркулює теплоносій до загального з передпусковим нагрівником гідравлічного контуру. Внаслідок різниці температур між гарячою і холодною сторонами термобатареї генерується електричний струм, що використовується для живлення передпускового нагрівника, а також і всіх електричних елементів самого генератора.

Проведено оцінку енергетичних характеристик термоелектричних генераторів для автономних систем передпускового розігріву техніки великої потужності при використанні серійних нагрівників тепловою потужністю понад 15кВт. Встановлено, що ККД системи «термоелектричний генератор – передпусковий нагрівник» для більшості варіантів нагрівників знаходиться на рівні 75-80%. При цьому, з врахуванням теплової потужності, що виробляється термогенератором, більш потужні модифікації нагрівників можуть бути замінені автономною системою, яка складається з менш потужного нагрівника та термоелектричного генератора, що забезпечує всю систему електричною енергією

## **ПОТРІЙНІ СИСТЕМИ АНТИМОНІДІВ КАДМІЮ І ЦИНКУ**

О. М. Маник<sup>1</sup>, Т. О. Маник<sup>2</sup>, В. Р. Білинський-Слотило

*(<sup>1</sup>Інститут термоелектрики НАН і МОН України, Україна, <sup>2</sup>Військово-технічна академія імені Ярослава Домбровського, Польща, anatych@gmail.com)*

Розроблено комплексний підхід для розрахунків параметрів електронної будови гібридних орбіталей нееквівалентних хімічних зв'язків. Наведено результати теоретичних розрахунків концентраційних залежностей міжатомних відстаней в кристалічних структурах  $Zn_xCd_{1-x}Sb$ , а особливості термодинамічних функцій досліджувалися шляхом побудови ізотермічних зрізів потрійних систем антимонідів різного складу: In-Cd-Sb, In-Zn-Sb, Ga-Cd-Sb, Ga-Zn-Sb, In-Ga-Sb. Проведено розрахунки ефективних зарядів, ефективних радіусів і енергії дисоціації відповідних хімічних зв'язків. Отримані результати узгоджуються з розрахунками параметрів хімічного зв'язку методами мікроскопічної теорії, результатами досліджень термічного перегрупування атомів в розплавах і можуть бути використані при розробці технологічних режимів синтезу нових матеріалів на основі  $Zn_xCd_{1-x}Sb$ .

## ТЕПЛОЄМНІСТЬ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ $\text{Bi}_2(\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x)_3$

К. В. Мартинова, О. І. Рогачова, Т. І. Храмова

(Національний технічний університет “Харківський Політехнічний Інститут”, Україна, [rina.martynova@kpi.kharkov.ua](mailto:rina.martynova@kpi.kharkov.ua))

Тверді розчини (ТР) системи  $\text{Bi}_2(\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x)_3$  широко використовують для термоелектричного (ТЕ) охолодження у пристроях, які оперують поблизу кімнатної температури [1].  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  та  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  кристалізуються у ромбоєдричну решітку і утворюють між собою ряд безперервних ТР. У попередніх роботах [2] ми спостерігали концентраційні аномалії механічних і ТЕ властивостей у цій системі поблизу  $x \sim 0.01$ , які пов'язували із реалізацією фазового переходу (ФП) перколяційного типу від розведеного до концентрованого ТР. Визначення виду залежності теплоємності  $C_p$  температури (або, як у цьому випадку, складу ТР) можна вважати прямим методом виявлення ФП II роду. У зв'язку з цим для з'ясування природи аномалій властивостей у ТР  $\text{Bi}_2(\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x)_3$  цікаво дослідити залежність  $C_p$  від складу в області малого вмісту домішки.

Метою даної роботи було вивчення залежності  $C_p$  від складу ТР  $\text{Bi}_2(\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x)_3$  в діапазоні ( $0 < x < 0.06$ ) за кімнатної температури. Зразками для дослідження  $C_p$  були холоднопресовані таблетки, які виготовлялись із литих полікристалів  $\text{Bi}_2(\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x)_3$  шляхом їх подрібнення, пресування порошку під тиском  $P = 7 \text{ т/см}^2$  протягом 1 хв. і наступного відпалювання за  $T = 575 \text{ К}$  протягом 200 год. Теплоємність вимірювали методом динамічного калориметра на установці ІТ-С-400 в інтервалі температур  $T = 150 - 625 \text{ К}$ .

Показано, що концентраційні залежності  $C_p$  мають немонотонний характер, так само, як і концентраційні залежності ТЕ властивостей [2]. В інтервалі складів  $x = 0.0075 - 0.025$  виявлено аномальний пік  $C_p$  із максимумом  $C_p$  за  $x = 0.02$ , існування якого пов'язується із реалізацією ФП перколяційного типу від розведених до концентрованих ТР. Спостережуваний пік можна припустимо інтерпретувати саме як  $\lambda$ -пік, аналогічний такому, що супроводжує ФП II роду. Результати досліджень додатково підтверджують припущення про критичний характер зміни властивостей у ТР  $\text{Bi}_2(\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x)_3$  за малого вмісту домішки.

## ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЗМІННОГО СТРУМУ

П. Д. Микитюк

(Інститут термоелектрики НАН та МОН України, Україна, [anatysh@gmail.com](mailto:anatysh@gmail.com))

Під термоелектричним перетворювачем (ТП) змінного струму розуміють пристрій, в основу роботи якого покладено принцип, що полягає в перетворенні електричної енергії вимірювальних величин в теплову енергію, котра виділяється в резистивному нагрівнику, із послідуочим перетворенням її в термоЕРС термопари. [1].

У роботі показано, що наукові дослідження та ТП змінного струму є традиційним напрямком досліджень Інституту термоелектрики ще з 70-х років минулого століття. Застосування в цих розробках вискоефективних, оптимізованих для ТП термоелектричних матеріалів, відкрило перспективи для розробки вимірювальної

апаратури нового покоління, характеристики якої перевищують відомі аналоги. Для наочності, в роботі наведено інформацію про порівняльні параметри і характеристики створених в Інституті ТП.

На основі створеної в Інституті термоелектрики теорії напівпровідникових ТП було розроблено та впроваджено у виробництво ряд робочих засобів змінного струму для вимірювальної апаратури змінного струму – цифрових вольтметрів, амперметрів, ватметрів, приладів для вимірювання енергії електромагнітного поля, імпульсів струму та ін. Однак, цим можливості практичного застосування ТП не вичерпуються. Дослідження та розробка ТП для вимірювальної техніки з використанням напівпровідникових термопар тільки розпочинається, що підтверджує пріоритет Інституту термоелектрики з цього напрямку.

Широке запровадження енергозберігаючих технологій в усіх галузях народного господарства вимагає все якіснішого контролю енергетичних величин змінного струму різної частоти і форми сигналу. Незважаючи на бурхливий розвиток засобів вимірювань, заснованих на інших принципах, прилади на основі термоперетворювачів посідають чільне місце і провідні метрологічні центри різних країн проводять роботи, направлені на розробку та вдосконалення ТП для державних еталонів та зразкових засобів вимірювання сили струму, напруги, потужності та коефіцієнта потужності. Яскравим підтвердженням можливості практичного застосування ТП стало створення ТП для військового вторинного еталону ВВТУ 48-07-01-09 одиниці електричної напруги в діапазоні частот від 10Гц до 30 МГц. Такий еталон згідно з наказом Міністра оборони України від 18.10.2010 р №529 прийнятий на озброєння для забезпечення Збройних сил України новими сучасними технічними засобами для забезпечення єдності та точності вимірювання.

Відсутність в Україні первинного державного еталону електричної напруги у діапазоні частот від 1 МГц до 30 МГц зумовлює необхідність користуватися еталонами інших країн (Росії) для метрологічного забезпечення одиниці електричної напруги у цьому діапазоні частот. Значна частина військової техніки Збройних сил України працює в зазначеному діапазоні частот і відсутність первинного еталону негативно впливає на якість роботи такої техніки. У даний час в Інституті створено ТП змінного струму підвищеної точності для первинного державного еталону змінної напруги в радіочастотному діапазоні.

Вищезазначеними напрямками можливості практичних застосувань не обмежуються, що підтверджується переліками наведених у роботі пріоритетних областей застосування ТП та їх потенційних споживачів.

## **ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ ВІД СТЕХІОМЕТРІЇ НА ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ПОЛІКРИСТАЛІВ $\text{Bi}_2\text{Se}_3$**

С. І. Меньшикова, О. І. Рогачова

*(Національний технічний університет “Харківський Політехнічний Інститут”, Україна,  
[olhovskaya.sveta@gmail.com](mailto:olhovskaya.sveta@gmail.com); [rogachova.olena@gmail.com](mailto:rogachova.olena@gmail.com))*

$\text{Bi}_2\text{Se}_3$  - добре відомий термоелектричний (ТЕ) матеріал n-типу для охолоджувальних пристроїв. Він належить до групи вузькозонних напівпровідників і

демонструє унікальні властивості топологічного ізолятора (матеріали, які є діелектричними в обсязі з провідним шаром на поверхні). Ефективність перетворювача TE залежить від значення добротності  $Z$  ( $Z = S^2 \cdot \sigma / \lambda$ , де  $\sigma$  і  $\lambda$  - електрична і повна теплопровідність, відповідно,  $S$  - коефіцієнт Зеєбека TE матеріалу). Відомо, що відхилення від стехіометрії в хімічному складі призводить до зміни концентрації власних дефектів, які багато в чому визначають властивості матеріалу. Тому важливо вивчити вплив відхилення від стехіометрії на властивості кристалів  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . Наскільки нам відомо, досліджень термічних властивостей полікристалів  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  при відхиленні від стехіометрії поки не проводилося.

Метою роботи є вивчення впливу відхилення від стехіометрії на теплопровідність полікристалів  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ .

Зразки були синтезовані сплавом Bi і Se високої чистоти в вакуумованих кварцових ампулах при 980 K з подальшим відпалом при 820 K протягом 200 годин і охолодженням до кімнатної температури в виключеною печі. Таким способом були отримані полікристали  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  з концентрацією в діапазоні (59.9 - 60.0) ат. % Se. Пресовані зразки були отримані методом холодного пресування (навантаження 400 МПа протягом 60 с) з подальшим відпалом в вакуумованих кварцових ампулах при 670 K протягом 250 ч. Теплопровідність  $\lambda$  вимірювалася методом динамічного  $\lambda$ -калориметр в режимі монотонного нагріву на експериментальній установці IT- $\lambda$ -400. Похибки вимірювання  $\lambda$  не перевищували 5%.

Встановлено, що залежність  $\lambda$  полікристалів  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  при відхиленні від стехіометрії в сторону, збагачену Bi, має немонотонний характер. Спостережуваний результат пояснюється зміною дефектної структури і фазового складу при відхиленні від стехіометрії.

## **ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ В ОБЛАСТІ ІНВЕРСІЇ ЗОН**

Г. О. Ніколаєнко, О. І. Рогачова

*(Національний технічний університет “Харківський Політехнічний Інститут”, Україна,  
[ann.nikolaenko.mail@gmail.com](mailto:ann.nikolaenko.mail@gmail.com))*

Вузькозонні напівпровідникові тверді розчини (ТР)  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  добре відомі як матеріали, що застосовуються при виробництві р-гілок термоелектричних перетворювачів [1]. Особливістю структури енергетичних зон ТР  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  є інверсія зон і реалізація безщільного стану при певних значеннях  $x$ , що приводить до появи топологічної нетривіальної фази, захищеної просторовою зеркальною симетрією кристалу [2]. Раніше нами на залежностях мікротвердості та теплоємності від складу в інтервалі  $x = 0.59 - 0.68$  за кімнатної температури при  $x \sim 0.62$  спостерігалися екстремуми, наявність яких пов'язувалось нами із переходом у безщільний стан [3]. Тому представляло інтерес з'ясувати, чи буде проявлятися виявлений у [3] ефект на теплопровідності ( $\lambda$ ).

Полікристали  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  ( $x = 0.59 - 0.68$ ) отримували методом прямого сплавлення вихідних компонентів у вакуумованих кварцових ампулах. Зразки для вимірювання  $\lambda$  виготовляли методом гарячого пресування порошків. Теплопровідність виміряли в інтервалі температур 150-600 K за допомогою пристрою IT- $\lambda$ -400 методом динамічного

калориметра у режимі монотонного нагріву. Розкид отриманих значень  $\lambda$  для кожного зразка не перевищував 5%.

У результаті проведених вимірювань  $\lambda$  було показано, що при загальній тенденції до зростання  $\lambda$  зі збільшенням вмісту Sn на залежності  $\lambda(x)$  спостерігається пік в інтервалі складів  $x = 0.6125 - 0.6275$ . Таким чином, інверсія зон і реалізація безщільного стану в  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  проявляється через появу екстремумів на властивостях, обумовлених змінами не тільки в електронному, але і у фононному спектрах.

## **ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ КОНДИЦІОНЕРИ ДЛЯ БРОНЕТАНКОВОЇ ТЕХНІКИ**

А. В. Прибила

*(Інститут термоелектрики НАН і МОН України, Україна, anatysh@gmail.com)*

У сучасній бронетехніці, зокрема танках провідних країн світу, активно використовується кондиціонування повітря для забезпечення робочих умов перебування екіпажу. Особливо актуальним є використання таких кондиціонерів при підвищених температурах оточуючого середовища. Аналіз літературних джерел свідчить, що перебування людей в умовах підвищених температур оточуючого середовища протягом тривалого часу значно знижує ефективність їх роботи, а при значному збільшенні температури, виникає навіть ризик втрати свідомості. Це ставить під загрозу можливість виконання поставлених бойових завдань. З другого боку, при різкому зниженні температури повітря всередині танку виникає ризик гострих респіраторних захворювань (ГРЗ), що також знижує ефективність роботи екіпажу танку.

У літературі наведено дані про кондиціонування повітря у транспортних засобах, зокрема бронетанковій техніці, різними методами. Особливу увагу звернено на використання компресійних кондиціонерів. Це зумовлено їх відносно високою ефективністю. Проте вони мають і низку недоліків, зокрема наявність екологічно небезпечних холодоагентів, невисока надійність, чутливість до механічних перевантажень і орієнтації у просторі, що значно знижує привабливість використання компресійних кондиціонерів. Така ситуація є особливо актуальною при використанні зазначених кондиціонерів у військовій техніці, що зумовлено наявністю підвищених вимог до їх надійності. Вказані недоліки усуваються шляхом використання термоелектричних кондиціонерів (ТЕК).

Аналіз літератури свідчить, що найбільшого поширення ТЕК набули в Російській Федерації. Всі серійні моделі російських танків (в тому числі і експортні моделі), починаючи з Т-90М «Прорыв-3» (на озброєнні з 2018 року), обладнані ТЕК виробництва АО «НПК «Уралвагонзавод». Крім того, ЗАО "Кондиционер" здійснює серійне виробництво ТЕК для танків Т-14 «Армата».

Активні дослідження з кондиціонування танків в умовах підвищених температурних умов ведуться в Індії. ТЕК був інтегрований у головний індійський бойовий танк Арджун (на озброєнні з 2006 року) і успішно продемонстрований у Головній дослідницькій лабораторії в Аваді (CVRDE) та на Махаджанському польовому стрільбищі в Раджастані (Індо-Пакистанська границя) у червні 2005.

Розробка ТЕК для військової техніки (зокрема танків) ведеться також у компаніях провідних країнах світу, зокрема у компаніях EIC Solutions Inc. (США), TECA Corporation (США), Marlow Industries, Inc. (США), Global Thermoelectric, Inc. (Канада).

У даній роботі наведено результати розрахунків граничних можливостей ТЕК для бронетехніки із використанням реальних вимог до їх експлуатації. Порівняння отриманих результатів із параметрами відомих ТЕК для танків свідчить про можливість їх покращення по енергетичній ефективності на  $\sim 30\%$ , що відкриває можливості для подальших покращень таких кондиціонерів.

## ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ТЕПЛОВІ НАСОСИ ДЛЯ СПЕЦІАЛЬНИХ ЗАСТОСУВАНЬ

А. В. Прибила, Ю. Ю. Розвер

*(Інститут термоелектрики НАН і МОН України, Україна, anatyach@gmail.com)*

Приведені результати досліджень й розробки термоелектричних теплових насосів, призначених для спеціальних застосувань. Термоелектричні пристрої володіють важливими для цієї мети якостями: висока точність регулювання температурного режиму, відсутність небезпеки зараження парами рідкого холодоагенту, висока стійкість до механічних впливів, невелика маса і займаний об'єм, практична відсутність акустичного шуму, високий ресурс роботи.

Методами комп'ютерного моделювання визначено оптимальні параметри термоелектричних модулів, теплообмінних систем для підведення і відведення тепла від теплового насоса в заданому робочому діапазоні температур, режими електричного живлення модулів; показана ефективність конструктивного поділу теплового насоса на секції, що працюють в конкретному інтервалі температур для досягнення максимальної ефективності теплового насоса.

Особливу увагу при розробці конструкції теплового насоса було приділено зниженню масо-габаритних характеристик теплового насоса. Представлені результати дослідження термоелектричних теплових насосів, розроблених для оборонної техніки: підводних човнів, радіолокаційних станцій типу «Кольчуга» а також для використання в умовах космічного польоту.

Для секційних термоелектричних теплових насосів, розроблені однокаскадні модулі з матеріалів на основі  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , оптимізовані на рівень температур гарячої сторони 50 - 100 °С. Показано, що при використанні в секціях оптимального режиму електроживлення однокаскадних модулів ефективність секційного теплового насоса в 1.2 рази більша в порівнянні з тепловими насосами, створеними за традиційною односекційною схемою.

Описано конструкції теплових насосів різних спецзастосувань, наведені результати досліджень їх параметрів і характеристик.

## КЛАСИЧНИЙ РОЗМІРНИЙ ЕФФЕКТ У ПЛІВКАХ $\text{Bi}_2(\text{Te}_{0.9}\text{Se}_{0.1})_3$

О. І. Рогачова, К. В. Новак, Г. М. Дорошенко, С. О. Саєнко, О. Ю. Сипатов,  
Ю. В. Меньшов

(Національний технічний університет “Харківський Політехнічний Інститут”,  
Україна, [rogachova.olena@gmail.com](mailto:rogachova.olena@gmail.com))

Тверді розчини  $(\text{Bi}_{1-x}\text{Se}_x)_2\text{Te}_3$  добре відомі як найкращі матеріали для  $n$ -гілок термоелементів, що працюють при температурах 300 - 450 К [1]. Зростаючий інтерес до дослідження наноструктур у термоелектриці і все більш широке застосування тонкоплівкових термоелементів привертають увагу до дослідження цих матеріалів у 2D-стані. Це в свою чергу стимулює дослідження розмірних ефектів, наявність яких приводить до модифікації властивостей, в результаті чого розмір системи стає параметром, що дозволяє керувати її властивостями.

Мета роботи – дослідження класичного розмірного ефекту у тонких плівках твердого розчину  $\text{Bi}_2(\text{Te}_{0.9}\text{Se}_{0.1})_3$  шляхом вимірювання коефіцієнта Зеебека. Об’єкти дослідження – тонкі плівки з товщинами  $d \sim 16 - 178$  нм, які були вирощені методом термічного випаровування у вакуумі полікрystalа  $\text{Bi}_2(\text{Te}_{0.9}\text{Se}_{0.1})_3$  з подальшою конденсацією на скляні підкладки. Вимірювання коефіцієнта Зеебека  $S$  за кімнатної температури для плівок та полікрystalа проводили диференціальним методом при градієнті температури  $\Delta T = 2$  К.

Встановлено, що у плівках, одержаних із кристалу  $p$ - $\text{Bi}_2(\text{Te}_{0.9}\text{Se}_{0.1})_3$ , тип провідності змінюється з діркового на електронний. Такий «донорний» ефект, який спостерігається також у пресованих масивних кристалах [2], може пояснюватися напругами, що виникають у плівці при вирощуванні та (або) зміною умов рівноваги при переході від кристала до плівки внаслідок того, що значний вклад в плівці у вільну енергію починає вносити поверхнева енергія.

При збільшенні товщини плівки від 16 до 110 нм спостерігається зростання  $S$  майже у чотири рази, після чого залежність  $S(d)$  виходить на насичення, тобто має місце класичний розмірний ефект. Використання рівняння Майєра дозволяє одержати добре узгодження результатів теоретичного розрахунку та експериментальних даних і розрахувати значення середньої довжини вільного пробігу електронів та параметра дзеркальності.

## ПОБУТОВИЙ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ХОЛОДИЛЬНИК У КВАЗІСТАЦІОНАРНОМУ РЕЖИМІ

І.Ф. Романюк

(Інститут термоелектрики НАН і МОН України, Україна, [anatysh@gmail.com](mailto:anatysh@gmail.com))

У роботі розглядається теоретичний метод оцінки енергетичної ефективності термоелектричного холодильника в квазістаціонарному режимі. Розроблено фізичну модель термоелектричного холодильника в квазістаціонарному режимі і проведено її

математичний опис. Сформульовані основні наближення, які допускаються при використанні моделі.

Проведено оцінки величини енергоспоживання термоелектричного холодильника з об'ємом камери 67 літрів для досягнення робочої температури в камері 5 °С. Показано, що використання квазістаціонарного режиму охолодження є обґрунтованим для роботи термоелектричних побутових холодильників внаслідок їх високої теплоємності. Як висновок отримано, що при використанні квазістаціонарного режиму енергоспоживання зменшується приблизно на 17 % порівняно із застосуванням режиму постійного струму живлення для досягнення заданої робочої температури в камері холодильника.

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОДІЇ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ОХОЛОДЖУВАЧІВ НАПОЇВ З МОКРИМ КОНТАКТОМ**

S. O. Filin, B. Zakrzewski

*(West Pomeranian University of Technology, Szczecin, Польща, [filin@zut.edu.pl](mailto:filin@zut.edu.pl))*

У статті представлена конструкція нового настільного термоелектричного охолоджувача з мокрим контактом, тобто з заповненою водою щілиною між ємністю з напоєм і камерою охолоджувача. Описані експериментальний стенд, методика випробувань і їх результати. Показані технічні переваги нового охолоджувача, зокрема підвищення його швидкодії, яка склала від 15 до 65%. Виявлено та описано ефект прискорення охолодження напою при досягненні температури 4°С пов'язаною з включенням другого механізму теплообміну – природною конвекцією.

## **КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КРІОДЕСТРУКЦІЇ ШКІРИ ЛЮДИНИ ПРИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОМУ ОХОЛОДЖЕННІ**

Р. В. Федорів

*(Інститут термоелектрики НАН і МОН України, Україна, [anatysh@gmail.com](mailto:anatysh@gmail.com))*

У роботі наведено результати комп'ютерного моделювання процесу кріодеструкції шкіри людини з врахуванням теплофізичних процесів, кровообігу, теплообміну, процесів метаболізму та фазового переходу. Побудовано фізичну, математичну та комп'ютерну моделі шкіри людини, на поверхні якої знаходиться охолоджуючий елемент при температурі -50°С. Визначено розподіли температури і теплових потоків у шкірі людини в режимі охолодження. Отримані результати дають можливість прогнозувати глибину промерзання шкіри і, відповідно, біологічної тканини при заданому температурному впливі.