

В.В. Прокопів, Л.І. Никируй, О.М. Возняк, Б.С. Дзундза, І.В. Горічок,
Я.С. Яворський, О.М. Матківський, Т.М. Мазур

Сонячний термоелектричний генератор

*ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»,
вул. Шевченка, 57, Івано-Франківськ, 76000, Україна, e-mail: prkvv@i.ua*

Розроблено комплексну систему генерування електричної енергії «Термоелектричний генератор – сонячний колектор». У якості матеріалів вихідних термоелементів синтезовано легований стибієм PbTe (n-тип провідності) та потрійна сполука PbSnTe (p-тип).

Ключові слова: термоелектричний генератор, сонячний колектор, плумбум телурид.

Стаття поступила до редакції 23.08.2017; прийнята до друку 05.09.2017.

Вступ

Сонячна енергія відноситься до відновлюваних джерел енергії, які є безкоштовними та доступними протягом цілого року. Слід розрізняти енергію, яку можна отримати через сонячне випромінювання та сонячне тепло.

Щодо спектру сонячного випромінювання, то сьогодні ця енергія ефективно перетворюється у електричну через фотоелектричні панелі (монокристалічні, полікристалічні чи плівкові). Одним із варіантів пристроїв, які накопичують теплову сонячну енергію є сонячні колектори, які застосовують для опалення промислових і побутових приміщень, гарячого водопостачання виробничих процесів, побутових потреб.

Щодо застосування термоелектричного ефекту для генерування електроенергії (ефект Зеебека), то важливим є те, що він має місце як для відновлювальних джерел енергії, так і для невідновлювальних [1]. У першому випадку як джерело тепла можна використовувати, наприклад, пряме сонячне тепло. Концентрування сонячної енергії (використання спеціальних поверхонь, систем лінз, дзеркал) дозволяє суттєво підвищити ККД кінцевого генератора.

Термоелектричним ефектам присвячено багато публікацій. Основним питанням, яке наразі стоїть перед термоелектричним матеріалознавством, є покращення властивостей та зменшення вартості сучасних термоелектричних матеріалів. Щодо покращення властивостей, то тут можливі різні шляхи: створення багатокомпонентних чи композитних матеріалів [2-4] або перехід від

об'ємних матеріалів до наноструктурних [5, 6].

Авторами даної роботи запропоновано конструктивне рішення з метою використання сонячного колектора для нагрівання термоелектричного модуля та наступної генерації електроенергії. Така установка є порівняно невеликою, мобільною, та, що найбільш важливо, вона може працювати поза мережевими системами електропостачання для забезпечення електроенергією малих промислових або побутових потреб.

Слід зазначити, що вже сьогодні вартість 1 Вт виробленої термоелектричної енергії складає приблизно 1 USD, що співмірне із вартістю електроенергії, генерованої фотоелектричними панелями [7,8]. Хоча тут потрібно зауважити, що ця вартість враховує саме генерування термоелектричної енергії та її наступну передачу для навантаження (без використання акумуляторів). А якщо врахувати, що джерелом тепла для генерування термоелектрики є, в основному, відпрацьоване тепло, або тепло сонця чи земних надр, яке є безкоштовним для людей, то низький ККД промислових термоелементів (4-7%) не стає на заваді розвитку термоелектрики. Причому, у сучасних гібридних системах вдається досягнути досить високих ККД. Так, для комплексної системи «сонячний колектор – термоелектричний генератор», автори [7] повідомляють про ККД 23 %, а у [10] навіть сягає 40 %.



Рис. 1. Фотографія сонячного термоелектричного генератора.

I. Експериментальна установка

Фото конструкції сонячного термоелектричного генератора (СТЕГ) наведено на рис. 1. Він поєднує в собі вакуумний тепловий сонячний колектор з термоелектричним генератором (ТЕГ), а також сонячну панель.

Тестовий варіант сонячного колектора складається з чотирьох вакуумних трубок діаметром 58 мм і довжиною 500 мм (рис. 1). Зібране тепло через теплову трубку передається конденсатору до якого приєднана конструкція із привареною мідною пластиною для розміщення термоелектричного модуля. Для відведення тепла від “холодної” поверхні термоелектричного модуля використовується радіатор з вентилятором (рис. 2). Всі термоінтерфейси нанесені теплопровідною пастою КПТ-8.



Рис. 2. Фото розміщення термоелектричного модуля на конденсаторі вакуумного колектора.

II. Термоелектричні модулі

Конструктивно термоелектричний модуль виготовляють у вигляді матриці термоелементів р- і n-типу які з'єднані послідовно. Для забезпечення електричного контакту використано мідні пластини, які припаюють до термоелементів. З обох сторін модуль захищено теплопровідною керамікою.

Напівпровідникові елементи термоелектричних модулів отримували методом холодного пресування з наступним відпалом. Порошок для компактування розмелювали у кульовому млині із попередньо синтезованих полікристалічних злитків. Синтез проводили у вакуумованих кварцових ампулах до залишкового тиску 10^{-4} Па. Ампули піддавали детальної очистці, яка включає промивання у суміші $\text{HNO}_3:\text{HCl}$ та багаторазове почергове промивання дистильованою водою і спиртом, осушення в печі при $T = (420-470)$ К. Після цього ампули завантажували починаючи з найбільш легкого компоненту. Для синтезу використано речовини з вмістом основного компоненту 99,999%.

Для отримання віток n-типу використовувались матеріали на основі легованого сурмою плюмбум телуриду, а для віток р-типу – матеріали на основі твердих розчинів плюмбум-станум телуриду. Оптимальні розміри фракцій знаходились в діапазоні (50-500) мкм, тиски пресування – (1-2) ГПа, температури відпалу отриманих брикетів – (300-500)°С.

Один модуль містить 16 термоелементів діаметром 8 мм і висотою 5 мм поміщених у квадратну матрицю 4x4. Розміри модуля складають 45x45 мм. Товщина мідних комутаційних пластин 0.3 мм, товщина кераміки 1 мм.

III. Блок керування

Електричний блок керування сконструйований на основі мікроконтролера ATmega8A. Він забезпечує заряд вбудованого акумулятора від термоелектричних модулів і сонячних фотоелектричних панелей, роботу двох USB виходів (5 В, 2 А) для заряджання мобільних пристроїв чи іншого навантаження. На чотирирядковому рідкокристалічному дисплеї можуть бути виведені як генеровані так і споживані потужності, напруги, струм, а також температури “холодної” та “гарячої” поверхонь термоелектричних модулів.

Електрична принципова схема блоку керування наведена на рис. 3. Електричні напруги вимірюються за допомогою вбудованого в мікроконтролер 10-бітного аналого-цифрового перетворювача. Джерелом опорної напруги вибрана прецизійна мікросхема LM4040C30. Струми вимірювали інтегральними датчиками ACS712E. Температури вимірювали за допомогою двох термодатчиків та інтегрального датчика DS18B20. Генерована енергія від фотоелектричних панелей та чотирьох послідовно з'єднаних термоелектричних модулів через DC-DC перетворювач використовується для зарядження вбудованого акумулятора та роботи двох USB.

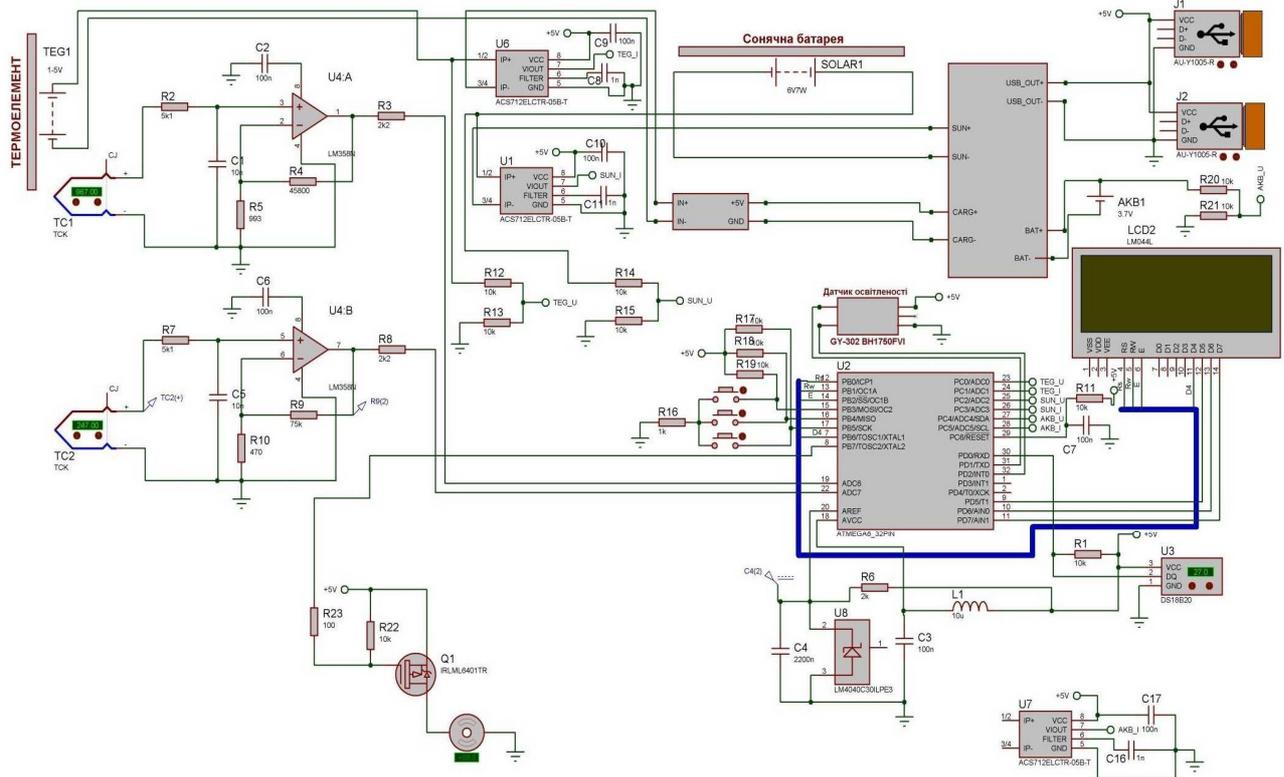


Рис. 3. Електрична принципова схема блоку керування.

виходів. При необхідності для підтримання сталого градієнта температури на термоелектричних модулях контролер може вмикати вентилятори для покращення відведення тепла від радіаторів на “холодних” поверхнях

IV. Експериментальні результати

У табл. 1 наведено термоелектричні характеристики компактованих термоелементів.

Модель фотоелектричної комірки можна зобразити у вигляді схеми, наведеної на рис. 4, а. Вона містить джерело струму, діод, опори R_p та R_s . Фотоелектрична комірка замикає коло через діод (якщо коло розімкнуте), і через зовнішнє навантаження (замкнуте коло). Величина опору резистора R_p є високим, а опір резистора R_s , навпаки, дуже низький.

Таблиця 1

Значення термоелектричних параметрів (коефіцієнт Зеебека S , питома електропровідність σ , коефіцієнт теплопровідності k , термоелектрична потужність ZT) отриманих термоелементів.

Матеріал	Тип про-сті	S , мкВ/К	σ , Ом ⁻¹ см ⁻¹	k , Вт/(см К)	ZT
PbTe(Sb)	n	250	250	0,01	0,8
PbSnTe	p	90	350	0,005	0,3

Максимальну потужність можна отримати, якщо опір підключеного навантаження дорівнює внутрішньому опору фотоелектричної комірки.

Модель електричної схеми термоелектричного модуля зображено на рис. 4, б. Ця модель схожа до моделі наведеної вище схеми електричної кола фотоелектричної панелі. Зростання електричного струму викликає ріст потужності, яка витрачається на внутрішньому опорі. Якщо між поверхнями термоелектричного модуля створюється різниця температур то електричний струм проходить через навантаження і фіксується певна електрична потужність [1].

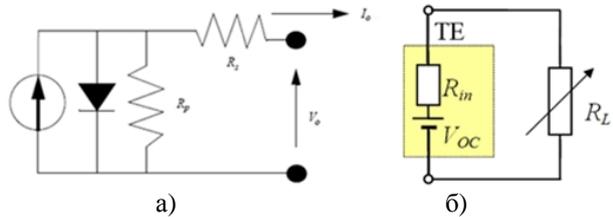


Рис. 4. Еквівалентна електрична схема фотоелектричної комірки (а) та термоелектричного модуля (б).

Напряга розімкнутого кола, яку фіксують на термоелектричному модулі, варіюється параболічно залежно від різниці температур між поверхнями ($\Delta T = T_H - T_C$). Максимальна потужність для термоелектричного модуля спостерігатиметься, коли опір під'єданого навантаження дорівнює внутрішньому опору термоелектричного модуля / генератора.

Експериментальні вимірювання виконувалися

при температурі навколишнього середовища 25°C. Густина потоку сонячного випромінювання складала 2 кВт/м². Максимальна потужність фотоелектричної панелі приблизно склала 6,3 Вт, при опорі навантаження 5 Ом, значення струму і вимірної напруги при цьому дорівнювали, відповідно, 1,1 А і 5,5 В.

Виміряна різниця температур на термоелектричних модулях дорівнювала $\Delta T = T_H - T_C = 115^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C} = 75^\circ\text{C}$.

Відповідно, зафіксована термоелектрична потужність термоелектричного генератора була 0,5 Вт.

Висновки

1. Розроблено конструкцію системи прямого перетворення сонячної теплової енергії (на основі сонячного колектора) в електричну енергію через використання термоелектричного генератора.

2. Отримано ефективні термоелектричні матеріали n- і p-типу провідності для використання в якості сонячного термоелектричного генератора.

3. Розроблено блок вимірювання вихідних параметрів та автоматизованого керування сонячним термоелектричним генератором.

Прокопів В.В. – кандидат фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри фізики і хімії твердого тіла;

Никируй Л.І. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, професор;

Возняк О.М. – кандидат фізико-математичних наук, доцент;

Дзундза Б.С. – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, доцент;

Горічок І.В. – кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник, докторант;

Яворський Я.С. – кандидат фізико-математичних наук, зав. лабораторіями кафедри фізики і хімії твердого тіла;

Матківський О.М. – аспірант кафедри фізики і хімії твердого тіла;

Мазур Т.М. – аспірант кафедри фізики і хімії твердого тіла.

- [1] X. Zhang, L.D. Zhao, Journal of Materiomics 1(2), 92 (2015).
- [2] X. Shi, J. Yang, J.R. Salvador, M. Chi, J.Y. Cho, H. Wang, S. Bai, J. Yang, W. Zhang, L.Chen, Journal of the American Chemical Society 133(20), 7837, (2011).
- [3] I. Horichok, R. Ahiska, D. Freik, L. Nykyruy, S. Mudry, O. Matkivskiy, and T. Semko, J. Electron. Mater. 45(3), 1576, (2016).
- [4] L.D. Zhao, S.H. Lo, Y. Zhang, H. Sun, G. Tan, C. Uher, C. Wolverton, V.P. Dravid, M.G. Kanatzidis, Nature, 508(7496), 373 (2014).
- [5] Z.G. Chen, G. Han, L. Yang, L. Cheng, J. Zou, Progress in Natural Science: Materials International 22(6), 535 (2012).
- [6] M. Ibáñez, Z. Luo, A. Genç, L. Piveteau, S. Ortega, D. Cadavid, O. Dobrozhan, Y. Liu, M. Nachtegaal, M. Zebarjadi, J. Arbiol, Nature communications, 7:doi: 10.1038/ncomms10766 (2016).
- [7] W.Zhu, Y. Deng, Y. Wang, S. Shen, & R. Gulfam, Energy 100, 91 (2016).
- [8] Y. Deng, W. Zhu, Y. Wang, & Y. Shi, Solar energy 88, 182 (2013).
- [9] O. Beerli, O. Rotem, E. Hazan, E.A. Katz, A. Braun, & Y. Gelbstein, Journal of Applied Physics 118(11), 115104 (2015).

V.V. Prokopiv, L.I. Nykyruy, O.M. Voznyzk, B.S. Dzundza, I.V. Horichok,
Y.S. Yavorskiy, O.M. Matkivskiy, T.M. Mazur

Solar Thermoelectric Henerator

Vasyl Stefanyk Prekarpathian University, Shevchenko Str., 57, Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine, e-mail: prkvv@i.ua

Developed a comprehensive system generating electricity “Thermoelectric generator – solar collector”. As of materials weekend thermoelements synthesized doped Sb PbTe (n-type the conduction) and triple compound PbSnTe (p-type).

Keywords: thermoelectric generation, solar collector, Lead telluride.