

Jarosław TATARCZAK<sup>1</sup>  
Jarosław SIKORA<sup>2</sup>

## KONWERSJA ENERGII SŁONECZNEJ W ELEKTRYCZNĄ Z WYKORZYSTANIEM FOTONOWO WZMOCNIONEJ TERMOEMISJI ELEKTRONOWEJ

W pracy przedstawiono sposób generacji energii elektrycznej w oparciu o fotonowo wzmocnioną termoemisję elektronową (ang. *photon-enhanced thermionic emission* - PETE), w której do przetwarzania energii promieniowania słonecznego w elektryczną wykorzystuje się zjawiska fotowoltaiczne i termoemisji elektronowej. Zaletą rozwiązania jest relatywnie wysoka sprawność energetyczna względem klasycznych metod wytwarzania energii elektrycznej, w tym, konwersji fotowoltaicznej (PV). W pracy przedstawiono podstawy działania PETE, obecny stan badań oraz dokonano analizy porównawczej konwersji PV i PETE.

**Słowa kluczowe:** przetwornik fotowoltaiczny, termoemisja elektronowa, PETE, energetyka słoneczna

### 1. Wprowadzenie

Dominującym źródłem do wytwarzania energii elektrycznej na świecie jest energia pozyskiwana z surowców kopalnych, między innymi węgla, materiałów rozszczepialnych. Proces realizacji konwersji energii cieplnej w elektryczną wymaga stosowania szeregu urządzeń, między innymi, pomp wodnych, turbin parowych, prądnic a w przypadku elektrowni jądrowych – reaktorów oraz zaawansowanych układowo i technologicznie systemów zabezpieczeń. Wraz ze wzrostem liczby podzespołów obniżają się sprawność systemu oraz jego niezawodność z powodu np. zużycia podzespołów ruchomych. Rozwiązaniem tych problemów mogą być metody wytwarzania energii elektrycznej, w których nie stosuje się podzespołów ruchomych np. konwertery fotowoltaiczne lub termoe-misyjne. Ogniwo fotowoltaiczne (ang. *photovoltaic* - PV), stanowiące złącze p-n,

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Jarosław Tatarczak, Politechnika Lubelska, Katedra Automatyki i Metrologii, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin; jaroslaw.tatarczak@gmail.com

<sup>2</sup> Jarosław Sikora, Politechnika Lubelska, Katedra Automatyki i Metrologii, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin

generuje napięcie pod wpływem strumienia fotonów, których energia jest większa od przerwy energetycznej półprzewodnika. W przypadku dołączenia zewnętrznego obciążenia do zacisków obszarów p i n, następuje przepływ prądu elektrycznego, którego maksymalną gęstość natężenia,  $J_{max}$ , można opisać poniższą zależnością [1]:

$$J_{max} = qN_f \quad (1)$$

gdzie:  $q$  – ładunek elementarny,  $N_f$  – liczba fotonów o energii większej niż przerwa energetyczna półprzewodnika, padających na jednostkową powierzchnię czynną w jednostkowym czasie.

Wraz ze wzrostem temperatury ogniwa maleje napięcie wyjściowe i sprawność konwersji. Jest to istotna wada, zwłaszcza w sezonie letnim, który jest najbardziej nasłonecznioną porą roku na półkuli północnej Ziemi.

Termoemisyjne konwertery energii (ang. TEC - *Thermionic energy converters*), mogą być wykorzystane do przekształcenia energii cieplnej w elektryczną. Prosty konwerter składa się z gorącej katody i zimnej anody umieszczonych w środowisku próżni. Jeżeli elektron w obszarze katody, posiada energię większą niż praca wyjścia materiału katody, nastąpi jego emisja w kierunku anody. W przypadku połączenia zacisków katody i anody w obwodzie popłynie prąd elektryczny. Gęstość prądu nasycenia zależy od pracy wyjścia materiału katody oraz jej temperatury i jest opisana równaniem Richardsona-Dushmana [2]:

$$J = A \cdot T_K^2 e^{-\phi_K / kT_K} \quad (2)$$

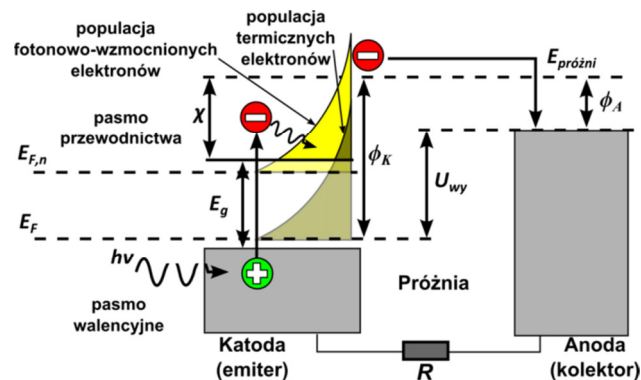
gdzie:  $A$  – stała Richardsona,  $T_K$  – temperatura katody,  $\phi_K$  – praca wyjścia katody,  $k$  – stała Boltzmana.

Termoemisyjne konwertery energii znalazły zastosowanie w programach kosmicznych, jednak nie zostały upowszechnione w zastosowaniach cywilnych.

Rozwiązaniem problemu nagrzewania i spadku sprawności ogniwa PV może być zastosowanie konwertera PETE [2], który wykorzystuje zarówno efekt fotoelektryczny wewnętrzny jak i zjawisko termoemisji elektronowej. W tej sytuacji wzrost temperatury ogniwa jest potencjalnie korzystny, ponieważ zwiększa udział termoemisji elektronowej w bilansie energetycznym. Konwerter PETE został opatentowany w 2010 roku [3]. Samo zjawisko termoemisji elektronowej było już wzmiankowane w 1873 roku przez brytyjskiego naukowca Fredericka Guthrie'a, dopiero jednak w 1923 roku prace nad tym zjawiskiem zostały wyróżnione nagrodą Nobla dla Owen Richardsona, również brytyjskiego naukowca. Źródła elektronów z gorącą katodą, wykorzystujące termoemisję elektronową, są stosowane w wielu urządzeniach technicznych [4,5]

## 2. Fotonowo wzmacniona termoemisja elektronowa

Konwerter (ogniwo) PETE w swoim działaniu wykorzystuje zjawiska fotowoltaiczne wewnętrzne i termoemisji elektronowej. Zbudowany jest z półprzewodnikowej katody i metalowej anody, oddzielonych od siebie próżnią lub gazem (np. pary cezu). Na Rys. 1 przedstawiono schemat pasm energetycznych konwertera.



Rys. 1. Schemat pasm energetycznych konwertera PETE (Schwede i inni, 2010) (J.Schwede, Melosh i Shen, 2010),  $h\nu$  – kwant światła,  $E_g$  – przerwa energetyczna,  $E_F$  – poziom Fermiego,  $E_{F,n}$  – quasi poziom Fermiego,  $\chi$  – powinowactwo elektronowe,  $\phi_K$  – praca wyjścia katody,  $\phi_A$  – praca wyjścia anody,  $U_{wy}$  – napięcie wyjściowe, odłożone na obciążeniu  $R$ . Na podstawie [2,3]

Fig. 1. Band diagram of PETE converter,  $h\nu$  - a quantum of light,  $E_g$  - energy bandgap,  $E_F$  - Fermi level,  $E_{F,n}$  - quasi Fermi level,  $\chi$  - electron affinity,  $\phi_K$  - cathode work function,  $\phi_A$  - anode work output,  $U_{wy}$  - voltage that can be set aside for the receiver  $R$ . Figure based on: [2,3]

Elektrony w paśmie walencyjnym, pod wpływem zaabsorbowanych fotonów o energii  $h\nu$  większej od przerwy energetycznej  $E_g$ , są wzbudzone do pasma przewodnictwa, dzięki czemu znacząco wzrastają ich koncentracja i poziom quasi-Fermiego, którego wartość można opisać następującą zależnością [6]:

$$E_{F,n} = E_F + kT_K \ln \frac{n}{n_{ref}} \quad (3)$$

gdzie:  $E_{F,n}$  – poziom quasi – Fermiego,  $E_F$  – poziom Fermiego (Rys. 1),  $n$  - koncentracja elektronów w paśmie przewodzenia po iluminacji półprzewodnika,  $n_{ref}$  – koncentracja elektronów bez iluminacji, w stanie równowagi termodynamicznej.

W celu uproszczenia opisu, w rozważaniach pomija się wpływ ładunku przestrzennego, co jest uzasadnione dla małych odległości międzyelektrodowych oraz wpływ temperatury na szerokość przerwy energetycznej półprzewodnika.

Nadwyżka energii fotonów, w stosunku do przerwy energetycznej  $E_g$ , jest przekazywana sieci krystalicznej w procesie termalizacji, w formie energii cieplnej.

Elektrony, których energia jest większa od energii powinowactwa elektronowego  $\chi$  materiału katody są emitowane do próżni i odbierane na anodzie. Napięcie wyjściowe, zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 1, jest równe:

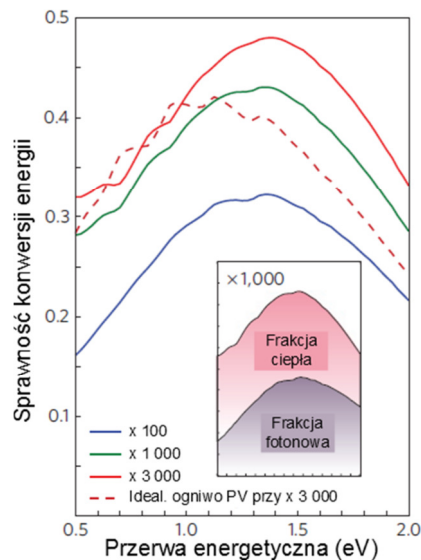
$$U_{wy} = \phi_K - \phi_A \quad (4)$$

Gęstość natężenia prądu nasycenia, przy założeniu, że gęstość natężenia prądu anody jest pomijalnie mała,  $J_A \ll J_K$ , można opisać zależnością:

$$J_K = AT_K^2 \exp\left(\frac{-(\phi - (E_{F,n} - E_F))}{kT_K}\right) \quad (5)$$

Jak widać wzrost wartości poziomu quasi – Fermiego, wskutek wzrostu koncentracji fotoelektronów w paśmie przewodnictwa (wzór (3)), zwiększa gęstość natężenia prądu termoemisji elektronowej. Dla ogniwa PETE wskazane jest by praca wyjścia  $\phi_K$  katody wynosiła 1,4 eV, podobnie jak w przypadku ogniwa PV [1,3,7], natomiast praca wyjścia anody  $\phi_A$  powinna być jak najmniejsza aby uzyskać maksymalne napięcie wyjściowe.

Na Rys. 2 są przedstawione zależności sprawności ogniwa PETE w funkcji wartości przerwy energetycznej materiału katody oraz sprawność ogniwa PV.

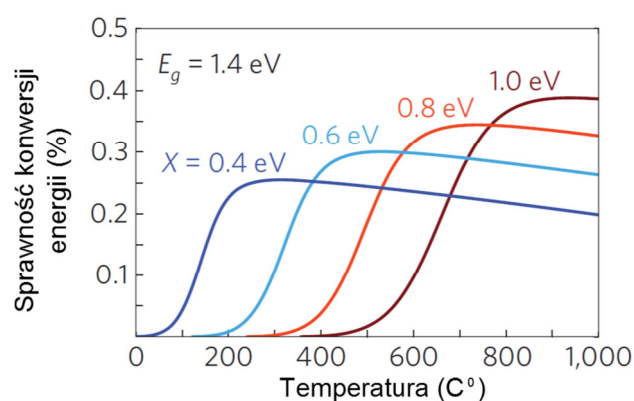


Rys. 2. Zależność sprawności ogniwa PETE (GaN) w funkcji przerwy energetycznej,  $E_g$ , dla zadanych koncentracji światła: x100, x1 000, x3 000 oraz idealnego ogniwa PV. Na podstawie [2]

Fig. 2. Dependence of the efficiency of the PETE (GaN) cell of the energy bandgap  $E_g$  including the appropriate concentration of the light: x100, x1 000, x3 000 and comparison to an ideal PV cells at its x3 000 concentration. Figure based on [2]

Na podstawie przedstawionych wykresów można ocenić, iż optymalny zakres wartości przerwy energetycznej, dla którego sprawność jest największa wynosi od 1,1eV do 1,7eV, dla przyjętej temperatury anody  $T_A = 450\text{K}$ .

Konwersja PETE może być realizowany w niższych temperaturach, niż w konwerterach typu TEC. Dobierając odpowiednie energie powinowactwa elektronowego materiału katody, można określić punkt pracy konwertera, dla którego sprawność przyjmuje wartości maksymalne. Zależność sprawności konwersji PETE w funkcji temperatury, dla zadanych wartości energii powinowactwa elektronowego,  $\chi$ , jest przedstawiona na Rys. 3.



Rys. 3. Zależności sprawności konwersji PETE w funkcji temperatury, dla zadanych wartości powinowactwa elektronowego  $\chi$  i koncentracji światła  $\times 1000$ . Na podstawie [2]

Fig. 3. The dependence of the efficiency of the PETE cell of the cathode including electron affinity  $\chi$  energy. Figure based on [2]

Wraz ze spadkiem energii powinowactwa elektronowego zmniejsza się temperatura pracy konwertera, przyporządkowana maksymalnej sprawności konwersji. Jako warstwy emisyjne katody wykorzystywane są, między innymi, bor i cez.

W tabeli 1 przedstawiono, w sposób syntetyczny, porównanie wybranych właściwości ogniw PETE i PV.

Obecnie w literaturze (od 2010 roku) można dostrzec trzy istotne kierunki badań:

- modelowanie i optymalizacja procesu PETE [7,8,9,10,11],
- dobór materiałów elektrod konwertera [12,13,14,15],
- poszukiwanie metod ograniczenia wpływu ładunku przestrzennego na pracę konwertera [16,17,18,19].

Tabela 1. Porównanie właściwości ogniw PETE i PV

Table 1. Comparison of PETE and PV cells

PETE	PV
Katoda–półprzewodnik, anoda–metal	Katoda–półprzewodnik, anoda–półprzewodnik
Przestrzeń międzyelektrodowa–próżnia lub np. pary cezu	Brak przestrzeni separującej–złącze p–n
Wysoka temperatura pracy	Relatywnie niska temperatura pracy
Wzrost temperatury–wzrost sprawności	Wzrost temperatury–spadek sprawności
Wymaga silnej koncentracji światła (nawet x1000)	Nie jest konieczna koncentracja światła
Wymaga systemu śledzenia pozycji Słońca	Nie wymaga systemu śledzenia pozycji słońca
Praca w układzie hybrydowym np. z silnikiem Stirlinga	Praca w układzie hybrydowym np. system grzewczy

### 3. Podsumowanie

Fotonowo wzmocniona termoemisja elektronowa jest procesem, który łączy, w aspekcie przyczynowo skutkowym, zjawiska fotowoltaiczne i termoemisji elektronowej. Emisja elektronu w obszar próżni a następnie do anody odbywa się kosztem części energii fotonu potrzebnej do wzbudzenia elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa oraz części energii fotonu, w formie energii termicznej, niezbędnej do pokonania przez elektron bariery energetycznej, określonej energią powinowactwa elektronowego materiału katody. W ten sposób, przy wykorzystaniu zjawiska termoemisji elektronowej, energię kwantów światła wykorzystuje się w znacząco wyższym stopniu w porównaniu z przetwarzaniem fotowoltaicznym [20]. Opracowanie metody eliminacji wpływu ładunku przestrzennego na pracę konwertera oraz wdrożenie technologii fotonowo wzmocnionej termoemisji elektronowej umożliwi produkcję wysoko-sprawnych solarnych systemów generacji energii elektrycznej.

### Literatura

- [1] Olchowik J. M.: Cienkie warstwy w strukturach baterii słonecznych, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006.
- [2] Schwede J. W., Bargatin I., Riley D. C., Hardin B. E., Rosenthal S. J., Sun Y., Schmitt F., Pianetta P., Howe R. T., Shen Z., Melosh N. A.: Photon-enhanced thermionic emission for solar concentrator systems, *Nature Materials*, 2010, pp. 762-767.
- [3] Schwede J. W., Melosh, N. A., Shen Z.: Photon enhanced thermionic emission. USA Patent US 20100139771 A1, 2010.
- [4] Sikora J.: Dekorelacja natężenia wiązki jonizującej i energii elektronów w źródłach jonów z gorącą katodą, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2004, pp. 1-77.

- [5] Sikora J., Hałas S.: A novel circuit for independent control of electron energy and emission current of a hot cathode electron source, *Rapid. Commun. Mass Spectrom.*, nr 25, 2011, pp. 689-692.
- [6] Wurfel P.: *Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts*, Wiley-VCH, Weinheim 2009.
- [7] Segev G., Rosenwaks Y., Kribus A.: Limit of efficiency for photon-enhanced thermionic emission vs. photovoltaic and thermal conversion, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, nr 140, 2015, pp. 464-476.
- [8] Reck K., Hansen O.: Thermodynamics of photon-enhanced thermionic emission solar cells, *Applied Physics Letters*, nr 104, 2014.
- [9] Yang Y., Yang W., Sun C.: Diffusion emission model for solid-state photon-enhanced thermionic emission solar energy converters, *Materials Science in Semiconductor Processing*, nr 35, 2015, pp. 120-126.
- [10] Varpula A., M. Prunnila: Diffusion-emission theory of photon enhanced thermionic emission solar energy harvesters, *Journal Of Applied Physics*, nr 112, 2012.
- [11] Wang Y., Su S., Liu T., Su J. C. G.: Performance evaluation and parametric optimum design of an updated thermionic-thermoelectric generator hybrid system, *Energy*, nr 90, 2015, pp. 1575-1583.
- [12] Tang W., Yang W., Yang Y., Sun C.: GaAs film for photon-enhanced thermionic emission, *Materials Science in Semiconductor Processing*, nr 25, 2013, pp. 143-147.
- [13] Segev G., Rosenwaks Y., Kribus A.: Loss mechanisms and back surface field effect in photon enhanced thermionic emission converters, *Journal Of Applied Physics*, nr 114, 2013.
- [14] Su S., Wang Y., Wang J., Xu Z., Chen J.: Material optimum choices and parametric design strategies of a photon-enhanced solar cell hybrid system, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, nr 128, 2014, pp. 112-118.
- [15] Zhuravlev A. G., Romanov A. S., Alperovich V. L.: Photon-enhanced thermionic emission from p-GaAs with nonequilibrium Cs overlayers, *Applied Physics Letters*, nr 105, 2014.
- [16] Ito T., Cappelli M. A.: Optically pumped cesium plasma neutralization of space charge in photon-enhanced thermionic energy converters, *Applied Physics Letters*, nr 101, 2012.
- [17] Meir S., Stephanos C., Geballe T. H., Mannhart J.: Highly-efficient thermoelectronic conversion of solar energy and heat into electric power, *Journal Of Renewable And Sustainable Energy*, nr 5, 2013.
- [18] Su S., Wang Y., Liu T., Su G., Chen J.: Space charge effects on the maximum efficiency and parametric design of a photon-enhanced thermionic solar cell, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, nr 121, 2013, pp. 137-143.
- [19] Green M. A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E. D.: „Solar cell efficiency tables (version 46), *Progress In Photovoltaics: Research And Applications*, nr 23, 2015, pp. 805-812.
- [20] Sikora J.: Układ stabilizacji natężenia prądu termoemisji elektronowej i napięcia przyspieszającego elektrony zwłaszcza dla wysokich energii elektronów, Patent PL 219991, 2015.

## **CONVERSION OF SOLAR ENERGY INTO ELECTRICITY USING PHOTON ENHANCED THERMIONIC EMISSION**

### **S u m m a r y**

The article presents new method generation of electricity by the use conversion of solar radiation. This method is the Photon-enhanced Thermionic emission - PETE, which converts solar energy into heat energy and then into electricity. The advantage of this solution is to avoid losses in relation to photovoltaic conversion (PV), resulting from the excessive heating energy converter. Presents the basics of PETE and the current state of research on this phenomenon in the world. In addition, a comparative analysis of PV conversion and PETE.

**Keywords:** PETE, thermionic emission, solar energy, heat converter

DOI:10.7862/rb.2016.232

*Przesłano do redakcji: 24.05.2016 r.*

*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*