

WPLYW TEMPERATURY MODUŁÓW FOTOWOLTAICZNYCH NA ICH SPRAWNOŚĆ

TEMPERATURE EFFECT ON PHOTOVOLTAIC MODULES EFFICIENCY

J. Bigorajski

Instytut techniki Ciepłej, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa,
Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska

STRESZCZENIE

W artykule szczegółowo przeanalizowano przyczyny spadku sprawności modułów fotowoltaicznych wraz ze wzrostem temperatury pracy. Opisana została specyfika półprzewodników. Opisano również mechanizm wewnętrznego efektu fotoelektrycznego. Krótko scharakteryzowano metody ograniczenia temperatury pracy modułów fotowoltaicznych.

ABSTRACT

This article analyzes in detail the reasons for the decrease in the efficiency of photovoltaic modules with the increase of their operating temperature. The specificity of semiconductors has been described. The mechanism of the internal photoelectric effect has been described. The possible methods for limiting the operating temperature of photovoltaic cells have been briefly characterized

ELEMENTY FIZYKI PÓLPRZEWODNIKÓW

Aby zrozumieć przyczyny spadku sprawności modułów fotowoltaicznych wraz ze wzrostem ich temperatury należy przeanalizować elementy fizyki półprzewodników. Podstawą jest teoria atomu Bohra, wg której atom składa się z jądra atomowego, w którym znajdują się protony i neutrony oraz z elektronów krążących po orbitach wokół jądra atomowego. Pasmowa teoria ciała stałego zakłada, że elektrony w strukturze krystalicznej ciała stałego mają ściśle określoną energię. W przypadku odizolowanego pojedynczego atomu elektrony znajdują się na ściśle określonych poziomach energetycznych. W ciałach stałych o strukturze krystalicznej na elektrony znajdujące się na powłokach elektronowych oddziałują nie tylko jądra danego atomu, ale również jądra sąsiednich atomów. Takie oddziaływanie powoduje rozszczepienie poziomów energetycznych na pasma poziomów blisko leżących (pasma energetyczne) (Luque, Hegedus 2003).

Poszczególne pasma energetyczne są oddzielone od siebie pasmami wzbronionymi (pasмами zabronionymi lub inaczej zwane przerwami energetycznymi). Żaden

elektron nie może posiadać energii z zakresu pasma zabronionego. Najwyższe pasmo energetyczne, które jest wypełnione elektronami całkowicie lub prawie całkowicie nazywane jest pasmem walencyjnym. Kolejne wyższe pasmo energetyczne nazywane jest pasmem przewodnictwa. Aby w danym materiale mógł zaistnieć przepływ prądu elektrycznego w paśmie przewodnictwa muszą znaleźć się elektrony. W niecałkowicie zapełnionym paśmie energetycznym pole elektryczne może spowodować przeniesienie elektronu do sąsiedniego pasma energetycznego (przepływ prądu). Jeśli pasmo energetyczne jest całkowicie zapełnione pole elektryczne nie może wywołać przeniesienia elektronu, ponieważ pole elektryczne nie może wtedy zmienić ani położenia elektronu ani jego pędu.

Ze względu na wzajemne położenie pasma walencyjnego oraz pasma przewodnictwa i stopień zapełnienia ich elektronami ciała stałe można podzielić na: metale (przewodniki metaliczne), półprzewodniki oraz dielektryki (izolatory).

Metale bardzo dobrze przewodzą prąd elektryczny ponieważ pasmo walencyjne jest albo niecałkowicie zapełnione elektronami (co umożliwia przenoszenie ich do pasma przewodnictwa pod wpływem dostarczonej energii) albo częściowo nakłada się z pasmem przewodnictwa (brak przerwy energetycznej). W przypadku półprzewodników oraz dielektryków w temperaturze zera bezwzględnego ($0\text{ K} = -273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) pasmo walencyjne jest całkowicie zapełnione elektronami i oddzielone od pasma przewodnictwa przerwą energetyczną. Wartość przerwy energetycznej określa ilość energii jaką należy dostarczyć, aby przenieść elektron z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. W przypadku dielektryków przerwa energetyczna jest tak duża, że dostarczenie energii równej przerwie energetycznej najczęściej oznacza fizyczne zniszczenie materiału.

W półprzewodnikach w temperaturze pokojowej część elektronów ma energię wystarczającą, aby przejść z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Elektron przechodząc z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa pozostawia po sobie nieobsadzony dozwolony poziom energetyczny umownie nazywany dziurą, która może być traktowana jak ładunek dodatni. Elektrony w paśmie walencyjnym mogą się przemieszczać zajmując miejsce

sąsiadujących dziur. Przez co można odnieść wrażenie, że dziury przemieszczają się. Liczba elektronów przechodzących z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa wzrasta wraz z temperaturą. Wraz ze wzrostem temperatury w półprzewodnikach rośnie więc przewodnictwo elektryczne (odwrotnie niż w przewodnikach).

Półprzewodniki, których przewodnictwo elektryczne zależy głównie od liczby przeniesionych wskutek wzbudzenia termicznego elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa i pozostawionych przez nie w paśmie walencyjnym dziur nazywa się półprzewodnikami samoistnymi. Idealny półprzewodnik samoistny charakteryzuje się doskonałą strukturą sieci krystalicznej, nie zawiera więc obcych atomów (zanieczyszczeń i domieszek) ani też innych defektów strukturalnych.

Półprzewodniki mają tę cechę, że ich właściwości elektryczne silnie zależą od domieszek. Dzięki tej właściwości półprzewodników istnieje możliwość zwiększenia ich przewodnictwa elektrycznego poprzez wprowadzenie do półprzewodnika domieszek. Powstaje wtedy tzw. półprzewodnik domieszkowany (lub inaczej półprzewodnik niesamoistny). Wprowadzenie domieszki do półprzewodnika oznacza wprowadzenie do jego struktury jonów (atomów naładowanych dodatnio lub ujemnie), które albo oddają elektron do pasma przewodnictwa (donor), albo wychwytyją elektron z pasma walencyjnego (akceptor) i pozostawiają w paśmie walencyjnym dziurę.

W przypadku, gdy do półprzewodnika zostaje wprowadzony jon substancji o wyższej wartościowości (domieszka donorowa) np. do półprzewodnika będącego pierwiastkiem grupy 14 (np. krzem) wprowadzony zostaje pierwiastek z grupy 15 (np. arsen lub antymon) to, wtedy nadmiarowe elektrony w strukturze krystalicznej tworzą nowy poziom energetyczny. Ten poziom energetyczny nazywany jest poziomem donorowym. Poziom ten znajduje się tuż poniżej pasma przewodnictwa, dzięki czemu elektrony z tego poziomu niewielkim kosztem energetycznym mogą zostać przeniesione do pasma przewodnictwa. Półprzewodnik, który jest domieszkowany donorem (pierwiastkiem o większej ilości elektronów w paśmie walencyjnym) nazywany jest półprzewodnikiem typu n. W półprzewodnikach typu n dominującymi nośnikami ładunku elektrycznego są elektrony (półprzewodniki typu n wykazują przewodnictwo elektronowe).

W przypadku, gdy do przewodnika zostaje wprowadzony jon substancji o niższej wartościowości (domieszka akceptorowa) np. do półprzewodnika będącego pierwiastkiem grupy 14 (np. krzem) wprowadzimy domieszkę pierwiastka grupy 13 (np. gal lub ind) to, wtedy tuż powyżej pasma walencyjnego pojawia się wówczas nieobsadzony poziom energetyczny zwany akceptorowym. Poziom ten zostaje zajęty poprzez spontaniczne przejście elektronów z poziomu walencyjnego, w którym po tych elektronach pozostają dziury. Półprzewodnik, który jest domieszkowany akceptorem (pierwiastkiem o niższej liczbie elektronów walencyjnych) nazywany

jest półprzewodnikiem typu p. W półprzewodnikach typu p dominującymi nośnikami ładunku elektrycznego są dziury (półprzewodniki typu p wykazują przewodnictwo dziurowe).

ZŁĄCZE P-N

Złączeniem p-n nazywane jest złącze dwóch półprzewodników domieszkowanych (niesamoistnych) o różnych typach przewodnictwa: p i n. W półprzewodniku typu n nośnikami większościowymi są elektrony (ładunek ujemny), a w półprzewodnikach typu p dziury (ładunek dodatni). Naturalnie w półprzewodnikach obu typów występują również nośniki mniejszościowe przeciwnego znaku niż większościowe. Jednak koncentracja nośników większościowych jest znacznie większa niż mniejszościowych (Kalogirou, 2009).

Po połączeniu półprzewodnika typu n z półprzewodnikiem typu p następuje przepływ nośników spowodowany różnicą koncentracji nośników (dyfuzja). Elektrony przemieszczają się z półprzewodnika typu n do p, zaś dziury przemieszczają się z półprzewodnika typu p do n. Ruch dziur z półprzewodnika typu p do półprzewodnika typu n neutralizuje swobodne elektrony w obszarze bliskim granicy materiałów. Analogicznie ruch elektronów z półprzewodnika typu n do półprzewodnika typu p neutralizuje swobodne dziury w obszarze bliskim granicy materiałów. Neutralizacja polega na połączeniu elektronu z dziurą (proces ten jest nazywany rekombinacją), co powoduje unieruchomienie tych dwóch nośników.

W efekcie przepływu nośników po obu stronach na granicy półprzewodników powstaje naładowana elektrycznie warstwa, w której znajdują się wyłącznie nieruchome aniony (jony ujemne) akceptora po stronie półprzewodnika typu p oraz nieruchome kationy (jony dodatnie) donora po stronie półprzewodnika typu n. Warstwa w której zachodzi opisane zjawisko nazywa się warstwą zubożoną lub warstwą zaporową. Jeżeli oba rodzaje półprzewodników są domieszkowane w równym stopniu to grubość warstwy zubożonej jest w obu półprzewodnikach jednakowa. Jeżeli jednak, któryś z półprzewodników byłby słabiej domieszkowany wtedy grubość warstwy zubożonej jest w takim przewodniku większa niż w przewodniku domieszkowanym w większym stopniu.

Powstałe na granicy półprzewodników pole elektryczne zawróci większość dziur, które będą próbowały przemieszczać się z półprzewodnika typu p do n. Tylko nieliczne dziury, które będą posiadały odpowiednio wysoką energię zdołają pokonać barierę potencjału i przemieszczą się z półprzewodnika typu p do n. Podobnie jest z elektronami. Powstałe pole elektryczne zawróci większość elektronów, które będą próbowały przemieszczać się z półprzewodnika n do p. Tylko nieliczne elektrony, które będą posiadały odpowiednio wysoką energię, która pozwoli na pokonanie bariery potencjału przedostaną się z półprzewodnika typu n do p.

Oprócz tych dwóch prądów w stanie równowagi w złączu p-n występuje jeszcze słaby prąd mniejszościowych dziur dyfundujących z obszaru półprzewodnika n do p oraz słaby prąd mniejszościowych elektronów dyfundujących z półprzewodnika typu p do półprzewodnika typu n.

W stanie równowagi w złączu p-n istnieją więc cztery prądy:

- słaby prąd większościowych dziur, które mimo bariery potencjału przedostają się z półprzewodnika typu p do półprzewodnika typu n,
- słaby prąd większościowych elektronów, które mimo bariery potencjału przedostają się z półprzewodnika typu n do półprzewodnika typu p,
- słaby prąd mniejszościowych dziur, które wspomagane polem elektrycznym dyfundują z półprzewodnika typu n do półprzewodnika typu p,
- słaby prąd mniejszościowych elektronów, które wspomagane polem elektrycznym dyfundują z półprzewodnika typu p do półprzewodnika typu n.

W stanie równowagi (gdy nie jest przyłożone napięcie zewnętrzne) w złączu p-n wypadkowy przepływ ładunków jest zerowy. Opisane prądy równoważą się.

ZJAWISKO FOTOELEKTRYCZNE

Wewnętrzne zjawisko fotoelektryczne polega na przejściu elektronów w ciele stałym z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa i jest wywołane absorpcją promieniowania świetlnego.

Warunkiem niezbędnym do powstania wewnętrznego zjawiska fotoelektrycznego jest obecność promieniowania. Promieniowanie słoneczne to wiązka fotonów o różnej energii. Energia pojedynczego fotonu jest uzależniona od częstotliwości fali (Duffie, Beckman 2013):

$$E_p = h\nu \quad (1)$$

gdzie:

h - stała Plancka = $6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$,
 ν - częstotliwość fali [s^{-1}].

Gdy foton dociera do powierzchni ogniwa fotowoltaicznego może zostać odbity, zaabsorbowany lub może przejść przez materiał ogniwa (Chwieduk, 2011). Gdy foton zostaje zaabsorbowany przez elektron walencyjny, to wtedy energia elektronu wzrasta o energię, którą dostarczył foton. Jeśli energia fotonu jest większa niż przerwa energetyczna, to wtedy dochodzi do zmiany położenia elektronu (przemieszczenie z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa) i wydzielania ciepła, które powoduje podwyższenie temperatury ogniwa. Dzięki istnieniu pola elektrycznego, które jest związane z obecnością złącza p-n, powstałe w ten sposób ładunki (elektron swobodny i dziura) zostają rozdzielone. Elektrody dołączone do powierzchni modułu fotowoltaicznego zbierają swobodne elektrony, które następnie przepływają przez zewnętrzny obwód tworząc prąd elektryczny. Elektrony przekazują energię

przepływając przez zewnętrzny obwód elektryczny i z taką samą energią jaką miały na początku wracają do materiału ogniwa rekombinując z dziurą.

Jeśli energia fotonu docierającego do materiału ogniwa fotowoltaicznego jest mniejsza niż wartość przerwy energetycznej, to wtedy elektron nie uzyskuje energii wystarczającej do pokonania przerwy energetycznej i nie przemieszcza się do pasma przewodnictwa. Energia uzyskana w takim przypadku przez elektron jest konwertowana w energię kinetyczną, a następnie na ciepło, co prowadzi do zwiększenia temperatury ogniwa fotowoltaicznego (Duffie, Beckman, 2013).

WPLYW TEMPERATURY MODUŁU FOTOWOLTAICZNEGO NA SPRAWNOŚĆ KONWERSJI ENERGII

W przypadku krzemowych ogniw fotowoltaicznych absorpcja promieniowania słonecznego powoduje znaczny wzrost temperatury ogniw w wyniku następujących procesów (Tripanagnostopoulos, 2013):

- nieaktywnej absorpcji fotonów (niegenerujących par elektron-dziura),
- rekombinacji nośników ładunku poza obszarem złącza p-n,
- ciepła Joule'a-Lenza, wydzielanego na rezystancji szeregowej połączonych ogniw.

Podobnie jak w przypadku wszystkich urządzeń półprzewodnikowych, parametry ogniw fotowoltaicznych uzależnione są od ich temperatury (Tiwari, Mishra, Solanki, 2011). Wraz ze wzrostem temperatury ogniw fotowoltaicznych spada wartość przerwy energetycznej E_g . Dzieje się tak dlatego, że przy mniejszej wartości przerwy energetycznej E_g więcej fotonów jest w stanie wniknąć w materiał i wygenerować nośniki ładunków, co bezpośrednio przekłada się na zwiększenie natężenia prądu zwarcia I_{sc} (Tripanagnostopoulos, 2015).

Zmniejszenie energii przerwy energetycznej powoduje, że coraz więcej elektronów jest w stanie pokonać barierę potencjału. Te dodatkowe elektrony w paśmie przewodnictwa i dziury w paśmie walencyjnym powodują wzrost ruchu ładunków mniejszościowych, skierowanego przeciwnie do prądu dyfuzyjnego. W konsekwencji powoduje to spadek wartości napięcia obwodu otwartego U_{oc} .

Moc maksymalną jaką może uzyskać ogniwo fotowoltaiczne można określić następująco (Duffie, Beckman 2013):

$$P_{max} = I_m U_m = (FF) I_{sc} U_{oc} \quad (2)$$

gdzie:

I_m – natężenie prądu w punkcie mocy maksymalnej, [A];

U_m – napięcie, odpowiadające położeniu punktu mocy maksymalnej (MPP), [V];

FF – współczynnik wypełnienia charakterystyki, [-];

I_{sc} – natężenie prądu zwarcia, [A];

U_{oc} – napięcie obwodu otwartego, [V].

Spadek napięcia rozwarcia U_{oc} wraz ze wzrostem temperatury jest znaczący. Natomiast wzrost natężenia prądu zwarcia I_{sc} wraz ze wzrostem temperatury nie odgrywa znaczącej roli, co zgodnie ze wzorem (2) powoduje spadek mocy ogniwa. Spadek wartości generowanej mocy elektrycznej oznacza spadek sprawności konwersji energii promieniowania słonecznego w energię elektryczną, co jest bardzo niekorzystne.

Wysoka temperatura pracy modułów fotowoltaicznych jest niekorzystna nie tylko dlatego, że powoduje spadek sprawności konwersji energii, ale również dlatego, że może powodować trwałe uszkodzenia modułów fotowoltaicznych.

METODY OGRANICZANIA TEMPERATURY PRACY MODUŁÓW FOTOWOLTAICZNYCH

Istnieją różne metody ograniczania temperatury pracy modułów fotowoltaicznych, m.in. (Chow 2010; Atkin, Farid 2015; Najafi, Woodbury 2013; Stropnik, 2016) :

- intensyfikacja wymiany ciepła po tylnej stronie modułów fotowoltaicznych poprzez zastosowanie ożebrowania,
- chłodzenie modułów fotowoltaicznych z wykorzystaniem efektu Peltiera,
- chłodzenie modułów fotowoltaicznych za pomocą materiałów PCM,
- stosowanie modułów fotowoltaicznych trójzłączowych,
- stosowanie modułów PV/T (ang. photovoltaic thermal).

Jedną z najciekawszych i najbardziej perspektywicznych metod ograniczenia temperatury pracy modułu fotowoltaicznego jest zastosowanie modułów PV/T (Tripanagnostopoulos, 2015). W module PV/T oprócz modułu fotowoltaicznego znajduje się część cieplna, przez którą przepływa czynnik odbierający ciepło od modułu fotowoltaicznego. Czynnikiem chłodzącym może być powietrze, woda lub roztwór wodny glikolu (podobnie jak w standardowych kolektorach słonecznych) (Zondag, 2008; Chen, Chen, Li, Ding, 2014).

Takie rozwiązanie pozwala na obniżenie temperatury pracy modułu fotowoltaicznego oraz zachowanie stosunkowo wysokiej sprawności konwersji energii promieniowania słonecznego w energię elektryczną. Dodatkowo uzyskuje się ciepło odpadowe, które można wykorzystać, podobnie jak ciepło uzyskane z tradycyjnych kolektorów słonecznych.

Dzięki zastosowaniu modułów PV/T z jednego urządzenia uzyskujemy zarówno energię elektryczną jak i ciepło, dlatego też tego typu rozwiązanie jest szczególnie polecane do obiektów, gdzie występuje znaczące zapotrzebowanie zarówno na energię elektryczną jak i na ciepło (Hasan, Sumathy, 2010).

LITERATURA

- Atkin P., Farid M. M. (2015). Improving the efficiency of photovoltaic cells using PCM infused graphite and aluminium fins. *Solar Energy*. t. 114. s. 217–228.
- Chen H., Chen X., Li S., Ding H. (2014). Comparative study on the performance improvement of photovoltaic panel with passive cooling under natural ventilation. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. s. 374–379.
- Chow T. T. (2010). A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied Energy*. t. 87. nr 2. s. 365–379.
- Chwieduk D. (2011). *Energetyka słoneczna budynku*. Warszawa. Wydawnictwo Arkady
- Duffie J. A., Beckman W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Hoboken: Wiley
- Hasan M. A., Sumathy K. (2010). Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. t. 14. nr 7. s. 1845–1859
- Kalogirou S.A. (2009). *Solar energy engineering process and systems*. Elsevier.
- Luque A., Hegedus S. (2003). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Chichester: Wiley.
- Najafi H., Woodbury K. A. (2013). Optimization of a cooling system based on Peltier effect for photovoltaic cells. *Solar Energy*. t. 91. s. 152–160.
- Stropnik R. (2016). Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM. t. 97. s. 671–679.
- Tiwari G. N., Mishra R. K., Solanki S. C. (2011). Photovoltaic modules and their applications: A review on thermal modelling. *Applied Energy*. t. 88. nr 7. s. 2287–2304.
- Tripanagnostopoulos Y. (2015). *Photovoltaic/thermal solar collectors*. W: R. Kuzmanović (red.), *Solar Energy in Serbia, Greece and the Republic of Srpska* (s. 116-160). Banja Luka: Academy of Sciences and Arts of the Republic of Srpska.
- Tripanagnostopoulos Y. (2012). *Photovoltaic/Thermal Solar Collectors*. W: A.A.M. Sayigh (red.), *Comprehensive Renewable Energy* (s. 255–300). Newnes.
- Zondag H. (2008). *Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. t. 12. nr 4. s. 891–959.