

Tadeusz RODZIEWICZ¹, Aleksander ZAREMBA² i Maria WACŁAWEK¹

WPLYW ROZKŁADU WIDMA PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO NA PARAMETRY MULTIKRYSTALICZNEGO OGNIWA KRZEMOWEGO

AN EFFECT OF SOLAR SPECTRUM DISTRIBUTION ON THE PERFORMANCE OF CRYSTALLINE SILICON PV MODULES

Abstrakt: W artykule opisano wyniki uzyskane z opracowanej aplikacji integrującej model rozkładu widma promieniowania słonecznego oraz model krzemowego monokrystalicznego ogniwa fotowoltaicznego. W ramach badań opracowano program - symulator widma promieniowania słonecznego wykorzystujący algorytmy i procedury numeryczne oparte na modelu SMARTS2. Ponadto, przygotowano aplikację pozwalającą na przeprowadzenie modelowania komputerowego zachowania się ogniw i analizę zmienności ich parametrów przy zastosowaniu różnych rozkładów spektralnych oświetlenia oraz różnych parametrów materiałowo-konstrukcyjnych ogniw PV. Z wykorzystaniem niniejszej aplikacji przeprowadzono szereg symulacji. Dokonano analizy zależności parametrów konstrukcyjnych ogniw od widma promieniowania słonecznego oraz porównania ich z wartościami zmierzonymi.

Słowa kluczowe: promieniowanie słoneczne, widmo promieniowania, przerwa energetyczna, ogniwo krzemowe

Wprowadzenie

Powszechnie wiadomo, że ilość energii wyprodukowanej przez moduły fotowoltaiczne zależy od dostępnej energii promieniowania słonecznego występującego w danej lokalizacji, jego rozkładu widmowego oraz innych czynników, takich jak np. nachylenia płaszczyzny modułów czy też częstości występowania zachmurzenia. Otrzymana w ten sposób wartość energii elektrycznej, nazywana dalej jako uzysk energetyczny, jest funkcją parametrów ogniwa - głównie sprawności oraz nasłonecznienia, które jest charakterystyczne dla danego obszaru geograficznego. Dla danej lokalizacji zwiększenia uzysku można dokonać poprzez zastosowanie ogniw o lepszych parametrach bądź poprzez dopasowanie ich charakterystyki widmowej do typowego rozkładu widma promieniowania słonecznego występującego w docelowym miejscu eksploatacji.

Modelowanie rozkładu widma promieniowania słonecznego z wykorzystaniem procedur modelu SMARTS2

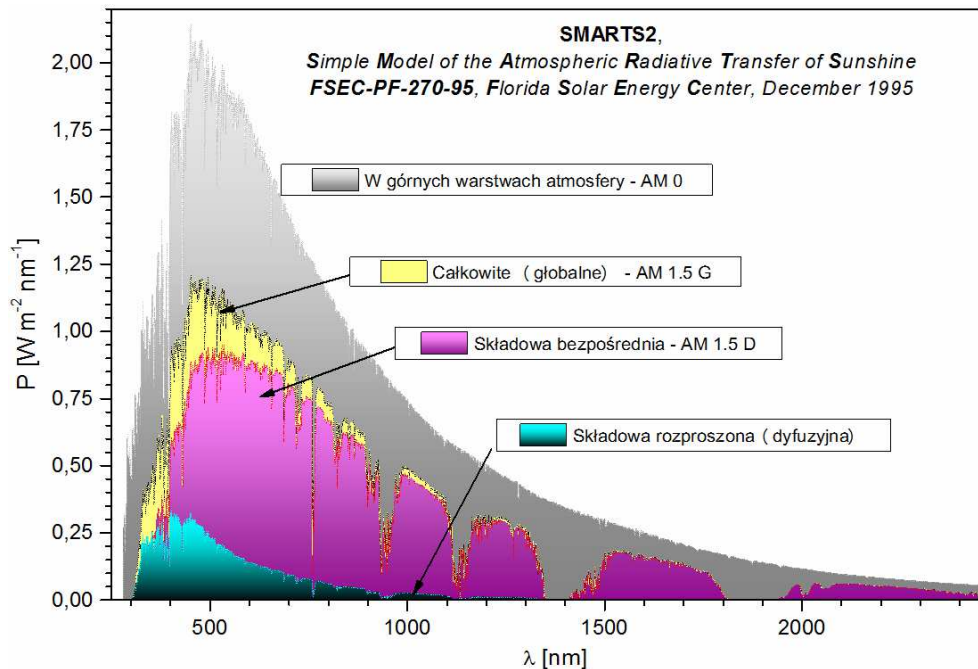
Na wstępie badań dokonano implementacji w środowisku C++ procedur numerycznych pochodzących z modelu SMARTS2 (*A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine*, stworzonego przez Christiana Gueymarda z Floryda Solar Energy Center). Otrzymany w ten sposób model symulatora widma pozwala na precyzyjną

¹ Zakład Badań Fizykochemicznych, Wydział Przyrodniczo-Techniczny, Uniwersytet Opolski, ul. kard. B. Kominka 6, 45-032 Opole, tel. 77 401 60 41, fax 77 401 60 51, email: maria.waclawek@o2.pl, trodziewicz@wp.pl

² Instytut Elektrotechniki Przemysłowej, Wydział Elektryczny, Politechnika Częstochowska, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, tel. 34 325 08 27, email: zaremba@el.pcz.czyst.pl

*Praca była prezentowana podczas konferencji ECOpole'14, Jarnołtówek, 15-17.10.2014

symulację rozkładu widmowego promieniowania słonecznego docierającego przez atmosferę na powierzchnię Ziemi [1, 2]. Jako widmo promieniowania słonecznego poza atmosferą ziemską (AM0) (rys. 1) wykorzystano widmo „syntetyczne”, tzn. złożone z danych pomiarowych zaczerpniętych z kilku publikacji naukowych, gdyż żadna z dostępnych publikacji nie oferowała stabelaryzowanego widma w dostatecznie dużej rozdzielczości w przedziale 280-4000 nm. Widmo wytwarzane jest z rozdzielczością 0,5 nm w przedziale 280-400 nm, 1 nm w przedziale od 400-1700 nm oraz 5 nm w przedziale 1700-4000 nm.



Rys. 1. Widma promieniowania słonecznego: w górnych warstwach atmosfery (AM 0) oraz na płaszczyźnie horyzontu: wynikowa (całkowita) o rozkładzie typu AM1.5G; składowa bezpośrednia AM 1.5D i rozproszona - wytworzone w zaimplementowanym w C++ programie z wykorzystaniem algorytmów generacji SMARTS2

Fig. 1. Spectrums of solar radiation: in the upper atmosphere (AM 0) and in the plane of the horizon: global (total) - distribution type AM1.5G; direct component - AM 1.5D and diffuse component - made in C++ application using SMARTS2 algorithm

Przyjęty w symulatorze algorytm modelowania rozkładu widma SMARTS2 uwzględnia zjawiska zachodzące podczas przejścia promieniowania słonecznego przez atmosferę ziemską, takie jak: rozpraszanie Rayleigha, absorpcję przez ozon, absorpcję przez cząsteczki ditlenku azotu, absorpcję na jednorodnych mieszaninach gazów, absorpcję przez cząsteczki pary wodnej oraz ekstynkcję na aerozolu. Przejście promieniowania o danej długości fali przez atmosferę ziemską modelowane jest jako iloczyn widma

odniesienia i poszczególnych funkcji transmitancji związanych z określonymi zjawiskami fizycznymi:

$$E_{bn\lambda} = E_{0n\lambda} T_{R\lambda} T_{o\lambda} T_{n\lambda} T_{g\lambda} T_{w\lambda} T_{a\lambda} \quad (1)$$

gdzie: $E_{bn\lambda}$ - natężenie promieniowania o danej długości fali po przejściu przez atmosferę, $E_{0n\lambda}$ - natężenie promieniowania o danej długości fali występujące w górnych warstwach atmosfery ziemskiej, skorygowane w zależności od odległości Ziemi względem Słońca, $T_{R\lambda}$ - transmitancja związana z rozpraszaniem Rayleigha, $T_{o\lambda}$ - transmitancja związana z absorpcją przez ozon, $T_{n\lambda}$ - transmitancja związana z absorpcją przez cząsteczki NO_2 , $T_{g\lambda}$ - transmitancja związana z absorpcją na mieszaninach gazów (głównie O_2 i CO_2), $T_{w\lambda}$ - transmitancja związana z absorpcją przez cząsteczki pary wodnej, $T_{a\lambda}$ - transmitancja związana z ekstynkcją na aerozoluach.

W opracowanym symulatorze uwzględniono 10 "atmosfer referencyjnych", tj. zestawów parametrów zawierających zdefiniowane pionowe profile temperatury, ciśnienia i koncentracji głównych gazów składowych atmosfery, uzależnionych od strefy klimatycznej oraz charakteru otoczenia (np. obszar niezagospodarowany/obszar miejski). Większość prostych modeli promieniowania używa pojedynczej masy optycznej (zwykle masy optycznej dla powietrza) w celu oszacowania całkowitej drogi, na której zachodzą wszystkie procesy ekstynkcji w atmosferze. Z uwagi jednak na to, iż każdy proces ekstynkcji odpowiada poszczególnym profilom koncentracji pionowej gazów, zastosowany model SMARTS2 wykorzystuje oddzielne masy optyczne odpowiadające poszczególnym zjawiskom. Podejście to pozwoliło zapewnić dużą dokładność modelu dla dużych kątów zenitalnych (powyżej 80 stopni). Masy optyczne ze względu na poszczególne zjawiska wyznaczone są z zależności:

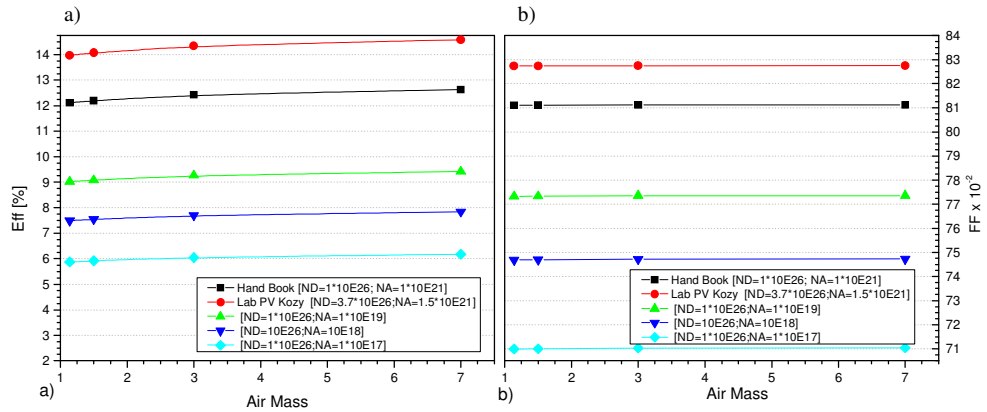
$$m_i = [\cos Z + a_{i1} Z^{a_{i2}} (a_{i3} - Z)^{a_{i4}}]^{-1} \quad (2)$$

gdzie m_i zastępuje się odpowiednio: m_R - (rozpraszanie Rayleigha), m_a - (aerozole), m_n - (NO_2), m_o - (ozon), m_g - (mieszanki gazów), m_w - (para wodna), Z - kąt zenitalny, a_{ij} - stała dopasowująca.

Dodatkowo, dużą dokładność wyznaczania wartości masy powietrza uzyskano poprzez użycie precyzyjnych algorytmów pozycjonowania Słońca (SPA - *Solar Position Algorithm*) [3, 4], pozwalających na obliczenie kąta wzniesienia oraz azymutu w wyniku podania danych wejściowych w postaci daty, czasu oraz położenia geograficznego miejsca obserwacji.

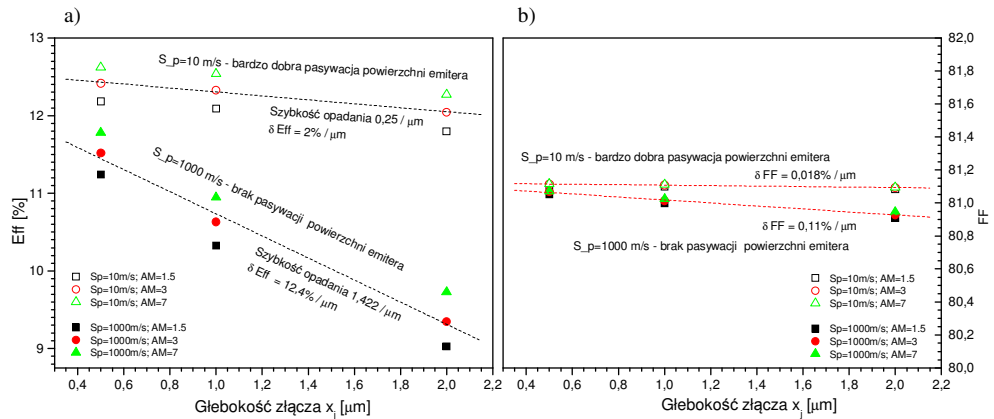
Wyniki badań

Do eksperymentu wzięto typowe wartości parametrów materiałowych multykryształicznego ogniwa krzemowego oraz opisujące je analityczne zależności opublikowane w [5, 6]. Następnie dokonano porównania ich z parametrami materiałowymi stosowanymi w Laboratorium Fotowoltaicznym w Kozach (rys. 2-5). Symulację przeprowadzono w środowisku C++, gdzie dokonano implementacji w aplikacji komputerowej *Solar Cells Parameters*.



Rys. 2. Sprawność ogniw o różnym stopniu domieszkowania (a) oraz uzyskiwane wartości FF w funkcji wartości masy powietrza (b)

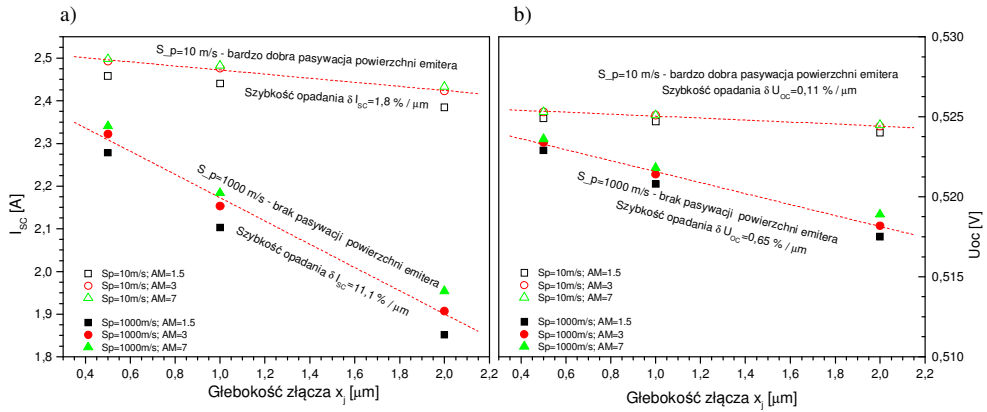
Fig. 2. The efficiency of the cells with different levels of doping (a); the obtained values of FF as a function of the air mass factor (b)



Rys. 3. Sprawność (a) oraz współczynnik wypełnienia (b) ogniw w funkcji głębokości wbudowania złącza dla różnych wartości szybkości rekombinacji powierzchniowej i różnych rozkładów widmowych

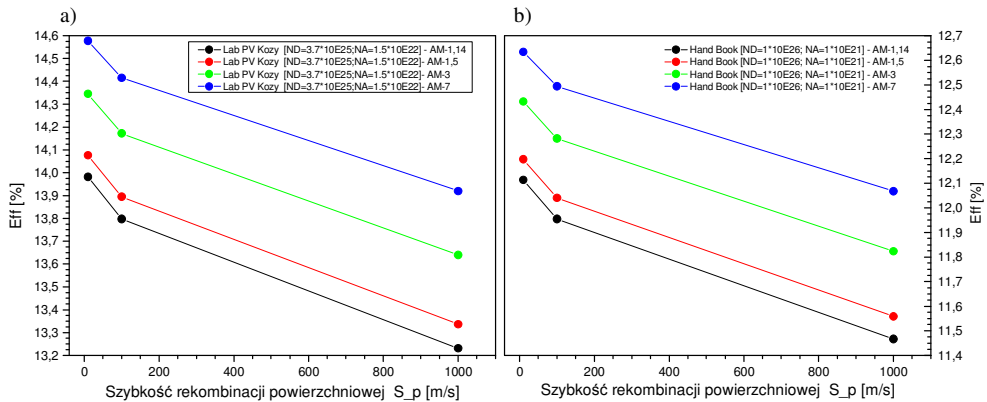
Fig. 3. The efficiency (a) and fill factor (b) as a function of cell's junction depth for various values of the surface recombination rate and the different distributions of solar spectrum

Na rysunkach 2 i 3 pokazano wpływ wartości masy powietrza AM (Air Mass) i głębokości złącza na sprawność ogniwa oraz współczynnik wypełnienia FF (Fill Factor). Parametry te są bardzo ważne, bo w znacznej mierze decydują o jakości ogniwa fotowoltaicznego. Na rysunku 4 przedstawiono wpływ głębokości złącza na prąd zwarcioowy i napięcie obwodu w stanie jałowym, natomiast na rysunku 5 pokazano zmiany sprawności ogniwa krzemowego w funkcji szybkości rekombinacji dla dwóch różnych zastosowanych koncentracji domieszki.



Rys. 4. Prąd zwarciovy (a) oraz napięcie w stanie jałowym (b) w funkcji głębokości wbudowania złącza dla różnych wartości szybkości rekombinacji powierzchniowej i różnych rozkładów widma światła słonecznego

Fig. 4. Short-circuit current (a) and open circuit voltage (b) as a function of cell's junction depth for various values of the surface recombination rate and the different distributions of solar spectrum



Rys. 5. Zmiany sprawności ogniwa krzemowego w funkcji szybkości rekombinacji dla dwóch różnych zastosowanych koncentracji domieszki: a) dla stosowanych koncentracji w Laboratorium PAN w Kozach oraz b) publikowanych w „Handbook of Photovoltaic Science and Engineering” [4]

Fig. 5. Changes of silicon cell efficiency as a function of the rate of recombination for two different dopant concentrations used: a) the concentration used in the Laboratory of Polish Academy of Sciences at Kozy and b) published in the „Handbook of Photovoltaic Science and Engineering” [4]

Wnioski

Uzyskane wyniki symulacji komputerowych pokazały, że:

1. Moc, sprawność oraz współczynnik FF ogniwa zależą od zastosowanego poziomu domieszkowania obszaru bazy ogniwa. Wraz ze spadkiem domieszkowania tego obszaru następuje niewielki wzrost wartości prądu zwarcia związanej ze wzrostem

- grubości warstwy zaporowej oraz stosunkowo duży spadek napięcia rozwarcia, co skutkuje znaczącym spadkiem mocy i sprawności ogniwa [6].
2. Bardzo duże znaczenie dla parametrów ogniwa fotowoltaicznego ma odpowiednie przygotowanie jego powierzchni. Zastosowanie warstwy antyodblaskowej znacząco zredukuje zjawiska odbicia promieniowania słonecznego od powierzchni ogniwa, rezultatem czego jest znaczący wzrost prądu zwarcia, a co za tym idzie mocy ogniwa, dochodzący do 40% [6]. Zastosowanie oprócz warstwy ARC także pasywacji powierzchni prowadzi do dalszej poprawy parametrów i wzrostu mocy na poziomie dalszych 5% [6].
 3. Lepsze wartości parametrów ogniwa uzyskiwane są dla wyższych wartości liczby AM. Tłumaczy to się tym, że wraz ze wzrostem AM maksimum widma ulega przesunięciu w kierunku fal o większej długości, a tym samym następuje dopasowanie do charakterystyki spektralnej ogniwa.
 4. Istotny wpływ na parametry ogniwa wywiera zjawisko rekombinacji powierzchniowej. Przy zastosowaniu dobrej pasywacji powierzchni emitera (mała szybkość rekombinacji powierzchniowej) mamy do czynienia z wyższymi wartościami sprawności ogniwa, przy czym różnica sprawności pomiędzy ogniwem pasywowanym a niepasywowanym jest tym większa, im większa jest głębokość wbudowania złącza. Oznacza to, że ogniwa niepasywowane wymagają pracy z bardzo płytkim emiterem, tak aby bardzo szybko następowało separowanie wygenerowanych nośników ładunku elektrycznego.
 5. Stosowane przez Laboratorium Fotowoltaiczne PAN w Kozach parametry materiałowe do produkcji ogniwa krystalicznych mają znacznie lepszą optymalizację ze względu na możliwość uzyskania sprawności w szerokim zakresie zmian wartości masy powietrza w stosunku do publikowanych w [5].

Podziękowania

Autorzy serdecznie dziękują kierownikowi Laboratorium Fotowoltaicznego PAN w Kozach - drowi Markowi Lipińskiemu za udostępnienie parametrów materiałowych autorskich ogniwa fotowoltaicznych.

Literatura

- [1] Gueymard C. SMARTS2. A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and Performance Assessment. Cocoa, Florida: Florida Solar Energy Center; 1995.
- [2] Rodziewicz T. Rozprawa doktorska. Warszawa: Wojsk Akad Techn; 2005.
- [3] Spencer JW. Fourier series representation of the position of the Sun. *Search*. 1971;2:172.
- [4] Reda I, Andreas A. Solar position algorithm for solar radiation applications. *Solar Energy*. 2004;76:577-589. DOI: 10.1016/j.solener.2003.12.003.
- [5] Luque A, Hegedus S, editors. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Chichester, England: John Wiley & Sons; 2003.
- [6] Ziemlicki K. Modelowanie i analiza rozkładu widma promieniowania słonecznego i jego wpływ na działanie ogniwa fotowoltaicznego (praca magisterska). Warszawa: Politechnika Warszawska; 2006.

AN EFFECT OF SOLAR SPECTRUM DISTRIBUTION ON THE PERFORMANCE OF CRYSTALLINE SILICON PV MODULES

¹ Division of Physicochemical Research, Opole University

² Institute of Industrial Electrotechnics, Faculty of Electrical Engineering, Czestochowa University of Technology

Abstract: In the paper an effect of solar spectrum on the performance of crystalline silicon solar cell efficiency is demonstrated. In a study, was developed the application - a simulator of the spectrum of solar radiation using algorithms and numerical procedures based on the SMARTS2 model. In addition, was prepared an application that enables the to carry out computer modelling of cells behaviour and analysis of the variability of their parameters using different spectral distributions of solar radiation and various material and structural parameters of PV cells. By using this application, a number of simulations were made. An analysis of design parameters of cells depending on spectrum of solar radiation and comparison those with the measured values were made.

Keywords: solar radiation, solar spectrum, semiconductor band gap, silicon solar cell

