

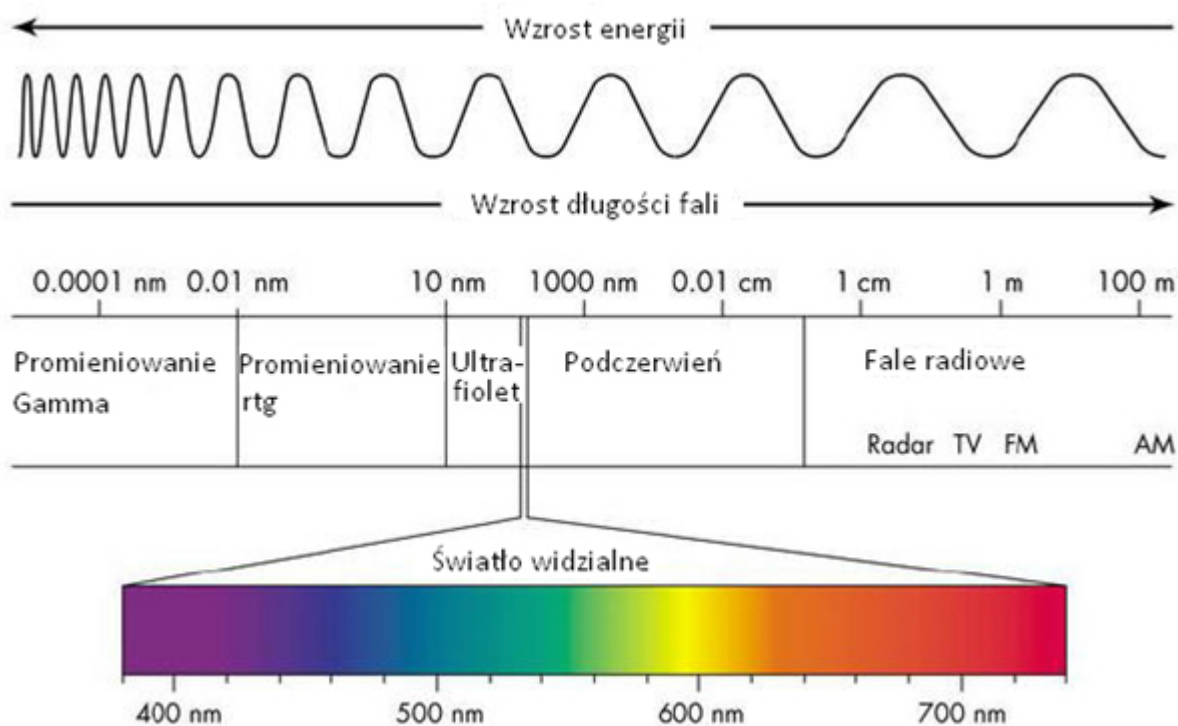
Ogniwo słoneczne – energia pochodząca ze Słońca

Efekt fotowoltaiczny został zaobserwowany po raz pierwszy przez francuskiego fizyka E. Becquerela w roku 1839, który w wieku dziewiętnastu lat zwrócił uwagę na generację nośników prądu w dwóch oświetlonych elektrodach, zanurzonych w elektrolicie [1]. Kolejnymi naukowcami związanymi z początkami fotowoltaiki byli W. Smith, odkrywca pierwszego materiału fotorezystywnego, A. Einstein, który opublikował pierwszą teoretyczną pracę opisującą efekt fotowoltaiczny oraz Polak – J. Czochralski – twórca metody otrzymywania czystych monokryształów krzemu, najbardziej popularnego materiału stosowanego w fotowoltaice, zwaną powszechnie metodą Czochralskiego.

Przyjmuje się, że pierwsze ogniwo fotowoltaiczne powstało w 1883 roku, wykonane było z selenu, pokrytego cienką warstwą złota. Niestety jakość tego ogniwa nie była zadowalająca, mimo wszystko ten eksperymentalny przyrząd można uznać jako pionierski w rozwoju fotowoltaiki. Sprawność urządzenia wynosiła zaledwie 1%. W roku 1954 zostało wytworzone pierwsze ogniwo półprzewodnikowe, monokrystaliczne o sprawności 6% [1]. Od tego momentu koszty produkcji ogniw spadają wraz ze wzrostem ich wydajności. Rok 1973 był przełomowy dla rozwoju energetyki odnawialnej, w trakcie kryzysu energetycznego zaczęto zastanawiać się nad zastosowaniem alternatywnych źródeł energii, prowadzących do zmniejszenia kosztów produkcji energii elektrycznej [2]. W owym okresie rozpoczęły się intensywne badania dotyczące krzemu polikrystalicznego oraz amorficznego, a także półprzewodnikowych związków mających na celu obniżenie kosztów produkcji ogniw słonecznych oraz podniesienia ich sprawności [2]. Obecnie coraz popularniejsze stają się tanie w produkcji ogniwa polimerowe, jednak ich parametry optyczne oraz elektryczne są jeszcze w sferze ulepszania

1. Czym jest energia słoneczna?

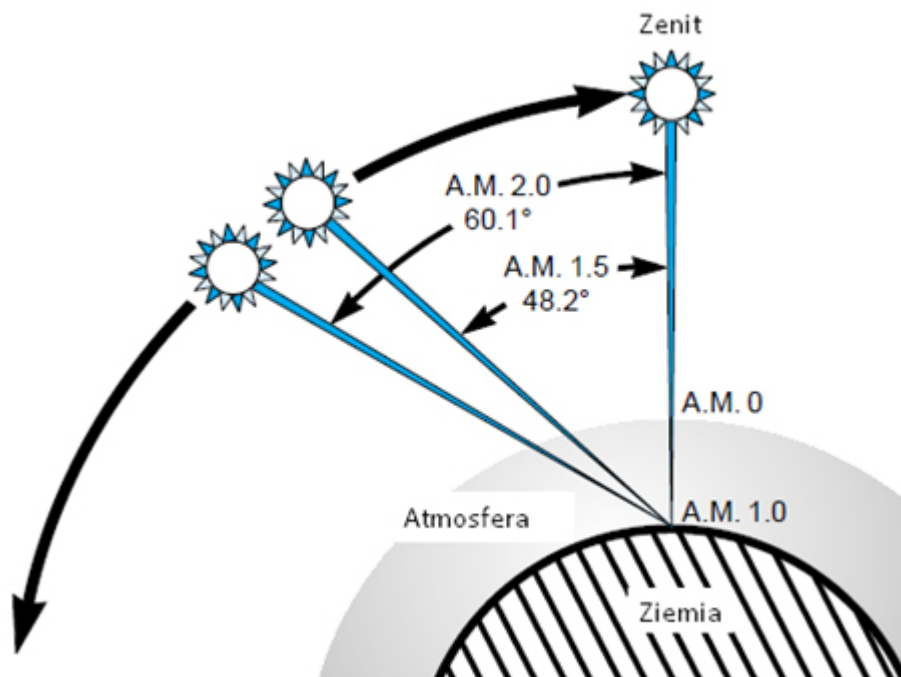
Słońce jest centralną gwiazdą Układu Słonecznego, oddaloną od Ziemi o około 150 mln km. Jego budowę możemy scharakteryzować jako kulę zjonizowanego gazu, o masie $1,991 \cdot 10^{30}$ kg, składającą się głównie z wodoru (ok. 74%), helu (25%) oraz pierwiastków ciężkich [3]. To główne źródło energii docierającej do naszej planety. Jej większość powstaje w jądrze Słońca (95%), pozostałe 5% w sąsiednich warstwach, znajdujących się bardzo blisko centrum gwiazdy, gdzie temperatura wynosi około kilkunastu milionów K. Dzięki reakcjom fuzji codziennie w przestrzeń kosmiczną zostaje wypromieniowana energia o wartości $8 \cdot 10^{24}$ kWh, z czego około 1,4 kWh/dzień energii słonecznej przypada na jeden metr kwadratowy powierzchni Ziemi w obrębie naszej szerokości geograficznej [4]. Spektrum promieniowania słonecznego, przedstawione na Rys. 1, zawiera się w przedziale od około 100 – 4000 nm, odpowiadające głębokiemu ultrafioletowi, poprzez światło widzialne (380-780nm do środkowej podczerwieni [4].



Rys. 1, Widmo promieniowania elektromagnetycznego[4]

Około 40% promieniowania słonecznego jest odbijane przez atmosferę, 20% jest przez nią pochłaniane, a tylko pozostałe 40% dociera do powierzchni Ziemi [5]. Energia docierająca do powierzchni naszej planety zależy od wielu czynników, między innymi szerokości geograficznej, pory dnia i roku, zachmurzenia oraz zanieczyszczenia wszelkimi pyłami i gazami przemysłowymi. Znaczący wpływ na wartość promieniowania słonecznego ma także współczynnik AM (Air Mass), mówiący nam o warunkach oświetlenia powierzchni Ziemi w zależności od kąta padania promieniowania. Można go wyznaczyć, korzystając z poniższego wzoru (1.1), gdzie θ oznaczona jest jako kąt między położeniem Słońca a zenitem:

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} \quad (1.1)$$

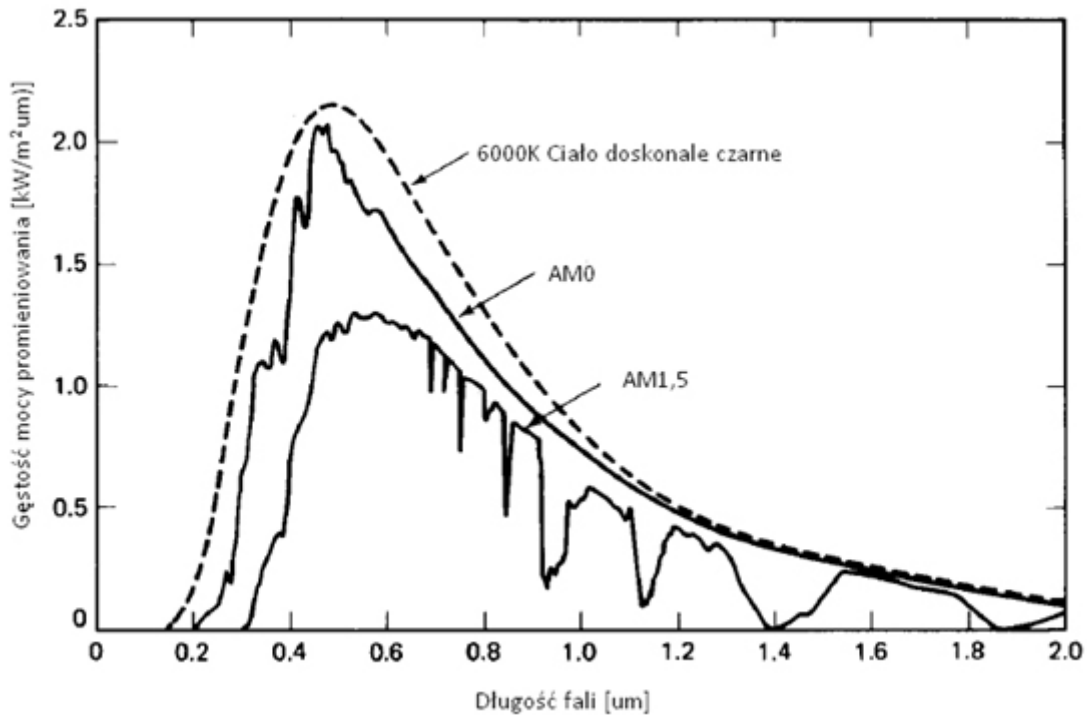


Rys. 2, Wpływ współczynnika AM w zależności od położenia Słońca [6]

Wraz ze wzrostem kąta padania promieniowania słonecznego wzrasta również współczynnik AM, natomiast gęstość mocy promieniowania maleje. Na Rys. 3 możemy zaobserwować porównanie gęstości mocy promieniowania dla dwóch współczynników AM oraz dla ciała doskonale czarnego, pochłaniającego całkowicie padające na nie promieniowanie elektromagnetyczne, niezależnie od kąta padania oraz jego widma. Zgodnie z prawem Wiena natężenie promieniowania jest odwrotnie proporcjonalne do temperatury, zgodnie ze wzorem (1.2), dla promieniowania powierzchni Słońca (6000 K) maksimum natężenia przypada dla długości fali 480 nm. Wraz ze wzrostem temperatury widmo promieniowania ciała doskonale czarnego przesuwa się w kierunku fal krótszych.

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (1.2)$$

Gdzie λ_{max} – długość fali przy maksymalnej mocy promieniowania [m], T – temperatura ciała doskonale czarnego [K], b – stała Wiena, równa $2,898 \cdot 10^{-3} \pm 10^{-9} \text{m} \cdot \text{K}$.

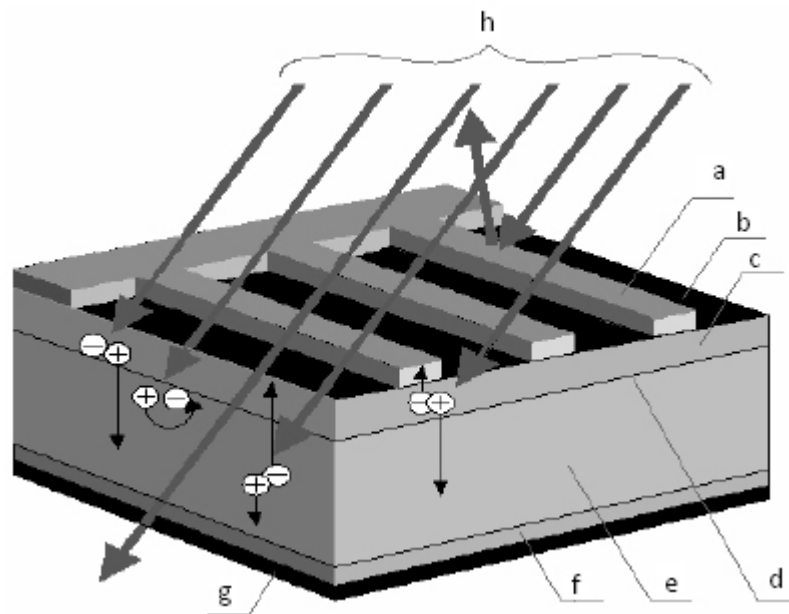


Rys. 3, Wpływ warunków AM na wartość promieniowania słonecznego [7]

Najczęściej pomiary właściwości ogniw słonecznych prowadzone są dla wartości AM1,5, która to odpowiada 48,2° szerokości geograficznej. W większości przypadków stosowane symulatory słoneczne projektowane są w taki sposób, by mogły one jak najlepiej odwzorować widmo promieniowania elektromagnetycznego w warunkach AM1,5.

2. Co to jest ogniwo słoneczne?

Ogniwo słoneczne jest elementem półprzewodnikowym, w którym zachodzi konwersja fotowoltaiczna, czyli bezpośrednia zamiana energii promieniowania słonecznego w energię elektryczną. W oświetlonej strukturze półprzewodnikowej, na skutek absorpcji promieniowania elektromagnetycznego o energii większej od przerwy zabronionej materiału, następuje generacja par dziura – elektron. Uproszczona budowa ogniwa słonecznego została przedstawiona na Rys. 4, na przykładzie ogniwa homozłączonego, opartego o złącze p-n.



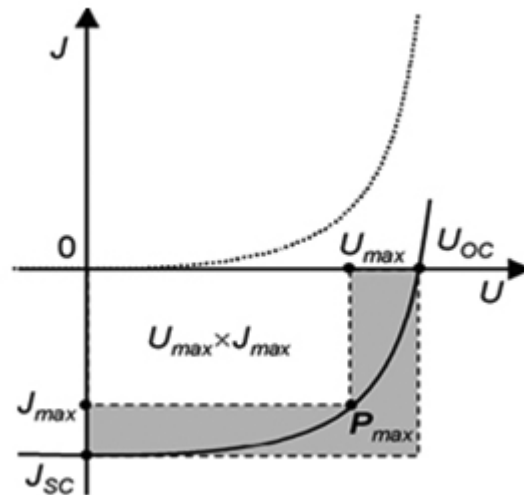
Rys. 4, Konstrukcja ogniwa słonecznego [8] Oznaczenia: a – kontakty przednie, b – teksturowana powierzchnia, c – obszar emitera typu n, d – złącze p-n, e – baza typu p, f – obszar BSF (p+), g – kontakt tylny, h – padające promieniowanie elektromagnetyczne.

Powyżej przedstawione ogniwo jest zbudowane z bazowego półprzewodnika typu p, złącza p - n oraz emitera – półprzewodnika typu n. Charakterystycznym elementem ogniwa są tzw. „palce emiterowe”, będące przednią elektrodą urządzenia. Ich zadaniem jest jak najlepsze odprowadzanie ładunków elektrycznych przy jednocześnie jak najmniejszym zaciemieniu promieniowania słonecznego padającego na ogniwo. Pod kontaktem przednim znajduje się specjalnie teksturowana powierzchnia, mająca za zadanie zniwelowanie zjawiska odbicia światła od górnej warstwy ogniwa. Kontakt tylny, pokrywający całą powierzchnię tylną ogniwa, poprzedza dodatkowo pole elektryczne BSF (Back Side Field). Obszar BSF, oznaczony na Rys. 4 jako f, ma na celu odpychanie nośników mniejszościowych od kontaktu w kierunku złącza p – n, co powoduje poprawę sprawności ogniwa poprzez zwiększenie czasu życia nośników.

Istnieje wiele kryteriów podziału ogniw słonecznych na poszczególne podtypy. Wyznacznikiem może być zarówno zastosowany w produkcji rodzaj materiału półprzewodnikowego (zbudowane z pierwiastków elementarnych – Si, Ge oraz związków półprzewodnikowych – CdTe, CdS), struktura półprzewodnika (ogniwa monokrystaliczne, polikrystaliczne oraz amorficzne), jak i typ złącza (ogniwa homozłączone, heterozłączone oraz oparte na złączach metal-półprzewodnik lub p-i-n), a także grubość samego ogniwa (cienkowarstwowe – poniżej 20µm oraz grubowarstwowe). Najczęściej stosowanym materiałem do produkcji ogniw słonecznych jest krzem, tani i ogólnodostępny surowiec. Ogniwa wykonane z tego pierwiastka charakteryzują się dobrą sprawnością, w przypadku Si monokrystalicznego w warunkach laboratoryjnych powyżej 25 %, natomiast w produkcji masowej 17%. Gorszymi parametrami charakteryzują się ogniwa wykonane z Si polikrystalicznego, około 15 %, jednak technologia ich wytwarzania jest znacznie tańsza i łatwiejsza, co powoduje ich znaczną produkcję oraz duże zainteresowanie wśród producentów oraz konsumentów.

3. Najważniejsze parametry ogniw słonecznych

Na podstawie charakterystyki prądowo – napięciowej ogniwa słonecznego, przedstawionej na Rys. 5, możemy wyznaczyć podstawowe parametry przyrządu. Linia kropkowaną zaznaczono krzywą dla ogniwa nieoświetlonego, natomiast linią ciągłą – ogniwa oświetlonego.



Rys. 5, Charakterystyka I-U ogniwa słonecznego [9]

Krzywa ogniwa nieoświetlonego odpowiada charakterystyce prądowo – napięciowej diody półprzewodnikowej, opisanej równaniem (3.1)

$$I = I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.1)$$

, gdzie: I_d – prąd ciemny; I_0 – prąd nasycenia diody; q – ładunek elementarny, równy $1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$; V – przyłożone napięcie; k – stała Boltzmana, równa $1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$; T – temperatura bezwzględna.

Charakterystyka ogniwa oświetlonego, zgodna ze wzorem (3.2), jest przesunięta względem krzywej ogniwa nieoświetlonego o wartość prądu I_{ph} , czyli prądu płynącego w ogniwie oświetlonym.

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.2)$$

Na podstawie charakterystyki I-U, przedstawionej na Rys. 5, możliwe jest wyznaczenie podstawowych parametrów ogniwa. Kształt charakterystyki dla idealnego ogniwa słonecznego powinien przyjąć formę prostokąta, ograniczonego bokami J_{SC} oraz U_{OC} . Niestety ogniwa idealne nie istnieją w praktyce, dlatego też moc maksymalna ogniwa rzeczywistego, wyznaczana ze wzoru (3.3), jest zawsze mniejsza od mocy ogniwa idealnego.

$$P_{max} = I_{max} \cdot U_{max} \quad (3.3)$$

, gdzie I_{max} oraz U_{max} są odpowiednio prądem oraz napięciem ogniwa, dla których pole prostokąta, którego jeden z wierzchołków leży na charakterystyce prądowo – napięciowej (punkt P_{max}), jest największe.

Kolejnym parametrem opisującym jakość ogniwa słonecznego jest współczynnik wypełnienia FF (Fill Factor), który możemy wyznaczyć ze wzoru (3.4).

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{id}} = \frac{I_{max} \cdot U_{max}}{I_{SC} \cdot U_{OC}} \quad (3.4)$$

Wartość tego współczynnika jest tym większa im kształt rzeczywistej charakterystyki prądowo – napięciowej ogniwa zbliżony jest do prostokąta [10]. Dla ogniwa słonecznego posiadającego idealną charakterystykę FF równy jest jedności.

Najistotniejszym parametrem określającym jakość ogniwa słonecznego jest jego sprawność, zwana również wydajnością konwersji. Definiuje się ją, zgodnie ze wzorem (3.5), jako stosunek mocy maksymalnej ogniwa P_{max} do mocy światła padającego na obszar czynny ogniwa P_0 [10].

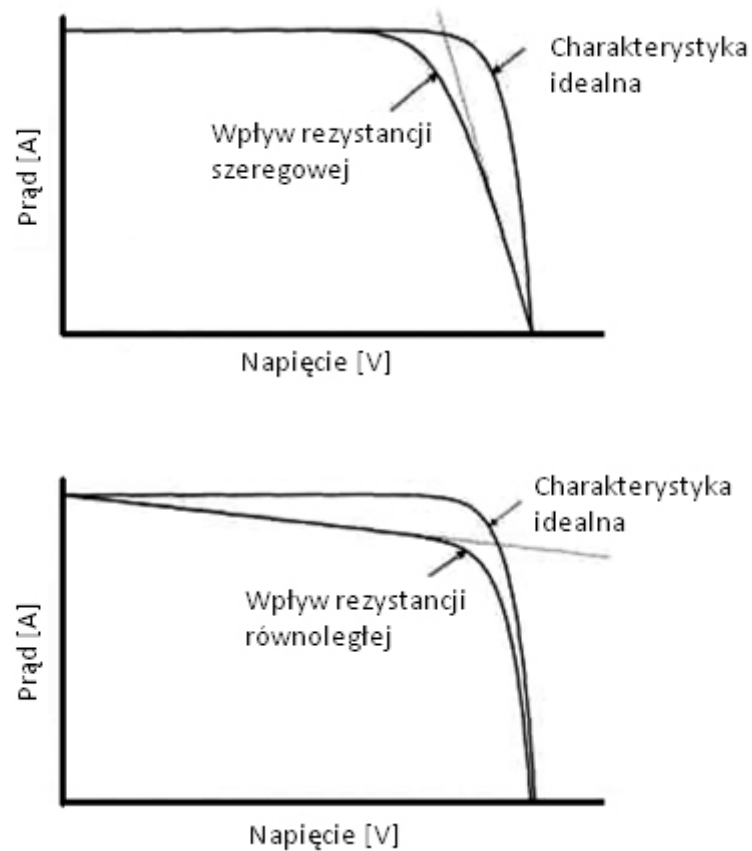
$$\eta = \frac{P_{max}}{P_0} \cdot 100\% = \frac{I_{max} \cdot U_{max}}{P_0} \cdot 100\% \quad (3.5)$$

W rzeczywistości sprawność ogniwa uzależniona jest od trzech czynników wydajności konwersji ogniwa słonecznego: czynnika spektralnego η_1 , czynnika napięciowy η_2 oraz czynnika wypełnienia η_3 . Zależność ta widoczna jest we wzorze (3.6).

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \quad (3.6)$$

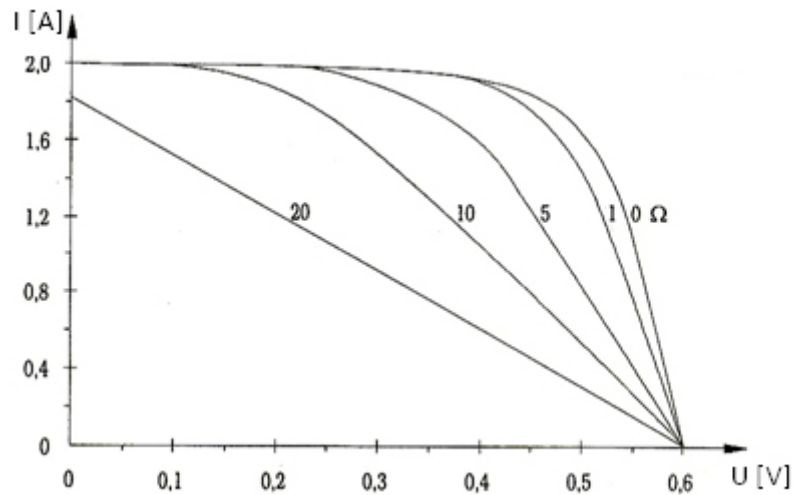
Czynnik spektralny η_1 określa nam część energii słonecznej, padającej na górną warstwę ogniwa słonecznego, wykorzystywaną do generacji par dziura – elektron. Czynnik napięciowy η_2 uwzględnia stratę wynikającą z tego, iż maksymalne napięcie możliwe do otrzymania w ogniwie jest równe U_{OC} , jest ono jednak mniejsze od wartości przerwy zabronionej E_g . Ostatni czynnik η_3 jest równy współczynnikowi FF. Wszystkie powyższe czynniki są zależne od szerokości przerwy zabronionej E_g . Czynnik spektralny wzrasta wraz ze wzrostem szerokości przerwy energetycznej, jednak jedynie do wartości 0,9 eV, w której osiąga swoje maksimum, a następnie maleje. Czynniki η_2 oraz η_3 mają niewielkie wartości dla materiałów o przerwach energetycznych poniżej 1eV, jednak wraz ze wzrostem wartości E_g ich wartości także rosną, dlatego też trakcie projektowania ogniw słonecznych należy dążyć do kompromisu materiałowego, tak by wartość E_g była jak najbardziej optymalna, czyli najlepiej zawierająca się w przedziale od 1,3 eV do 1,5 eV. Dodatkowo, istotnym czynnikiem jest również wyznaczenie właściwego punktu pracy ogniwa. W

rzeczywistych ogniwach słonecznych występują również straty spowodowane rezystancją szeregową R_s oraz równoległą R_p ogniwa, których wpływ widoczny jest na Rys. 6.



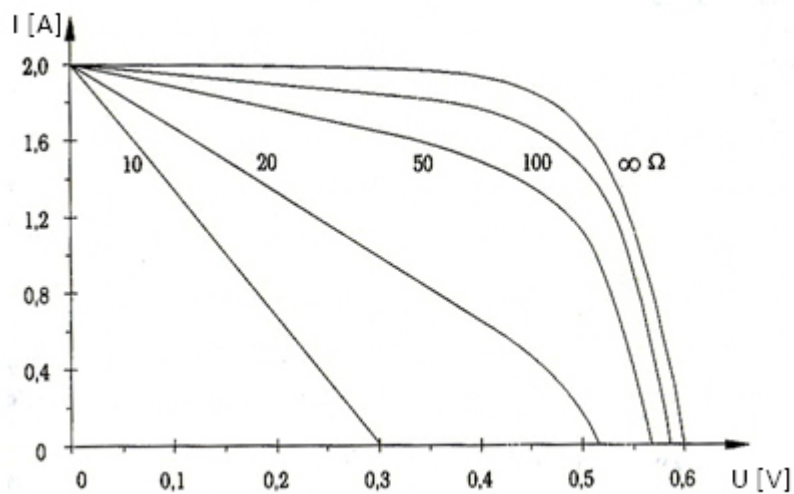
Rys. 6, Wpływ rezystancji szeregowej i równoległej na charakterystykę I-U ogniwa [10]

Na podstawie Rys.6 możemy zauważyć, że otrzymanie charakterystyki ogniwa zbliżonej do idealnej konieczne jest zminimalizowanie rezystancji szeregowej oraz zwiększenie rezystancji wewnętrznej ogniwa, tak by dążyła ona do nieskończoności. Duża wartość rezystancji szeregowej spowoduje zmniejszenie prądu zwarcia ISC, natomiast wraz z niewielkim spadkiem rezystancji wewnętrznej ogniwa napięcie UOC również zmaleje [11]. Możemy to dokładniej zaobserwować na Rys. 7 i Rys. 8.



Rys. 7, Wpływ wartości rezystancji szeregowej na charakterystykę I-U [11]

Na podstawie Rys. 7 możemy zauważyć, że dopiero duża rezystancja szeregowa powoduje spadek wartości prądu, natomiast niewielkie wartości rezystancji wpływają tylko na zmniejszenie się współczynnika wypełnienia FF.



Rys. 8, Wpływ wartości rezystancji równoległej na charakterystykę I-U[11]

W oparciu o powyższe charakterystyki można zauważyć, że już niewielkie zmniejszenie rezystancji równoległej wpływa na znaczny spadek napięcia ogniwa. Spadek R_p wpływa również negatywnie na parametr FF.

4. Zastosowanie ogniw słonecznych

Ogniwa fotowoltaiczne są najczęściej stosowane w trzech podstawowych obszarach: elektronice powszechnego użytku, systemach wolnostojących oraz systemach dołączonych do sieci elektroenergetycznej. Jako przykładowe zastosowania ogniw słonecznych, zawierających się w

pierwszym obszarze, możemy wymienić kalkulatory, zegarki, przenośne zabawki – Rys. 9, zasilane małymi ogniwami, wykonanymi najczęściej z cienkich warstw krzemu amorficznego.



Rys. 9, Zabawka – Samochód napędzany Słońcem [12]

Jednak najbardziej rozpowszechnionym zastosowaniem fotowoltaiki są systemy wolnostojące średniej skali, produkujące od kilku do kilku tysięcy watów mocy. Montowane są najczęściej w okolicach, w których nie ma dostępu do sieci elektroenergetycznej oraz nie ma możliwości wygenerowania energii z innych źródeł. Systemy wolnostojące używane są często do zasilania automatycznych urządzeń, takich jak oświetlenie oraz telefony awaryjne na autostradach, boje nawigacyjne, latarnie morskie – Rys. 10, przekaźnikowe stacje telekomunikacyjne i stacje meteorologiczne. Ogniwa fotowoltaiczne są również stosowane w przestrzeni kosmicznej, gdzie każdy inny rodzaj wytwarzania energii wymagałby transportu paliw, natomiast energia słoneczna jest stale dostępna. Ważnymi zaletami wolnostojących systemów fotowoltaicznych jest ich duża niezawodność, niska cena oraz bezobsługowość.



Rys. 10, Latarnia morska w Nowej Zelandii, Cieśnina Foveaux [13]

W ostatnich latach duży nacisk kładziony jest również na rozwój systemów fotowoltaicznych zintegrowanych z architekturą (BIPV - Building Integrated Photovoltaics) podłączonych do sieci elektroenergetycznej, gdyż zapewniają one najwyższy potencjał na długofalową redukcję zużycia paliw kopalnych i zmniejszenie emisji dwutlenku węgla [14]. Należy nadmienić, iż zastosowanie ogniw słonecznych jest również ściśle powiązane z ochroną środowiska. Dzięki ogniom słonecznym możemy ograniczyć emisje zanieczyszczeń do środowiska naturalnego. Także utylizacja oraz przerób wtórny modułów ma w tej dziedzinie ogromne znaczenie.

Krajem przodującym w Europie pod względem wykorzystania energii słonecznej są Niemcy. W ostatnich latach oddano do użytku szereg instalacji które można już określić mianem elektrowni słonecznych. Jedną z największych jest ferma solarna zlokalizowana w miejscowości Pocking w Bawarii, oddana do użytku w 2006 roku – Rys. 11. Cały system składa się z około 60 000 modułów, osiąga moc 10MWp, zajmując przy tym 32 ha powierzchni. Martin Bucher, projektant systemu, twierdzi, że dzięki temu przedsięwzięciu oszczędzi on środowisku 10 000 ton zanieczyszczeń każdego roku jednocześnie zaopatrując w energię ponad 3 000 gospodarstw domowych.



Rys. 11, Ferma solarna, Pocking, Niemcy [15]

Polska, mimo porównywalnych warunków meteorologicznych z Niemcami, niestety nie może pochwalić się takimi osiągnięciami jak nasi zachodni sąsiedzi. W Gryźlinach w powiecie olsztyńskim ma powstać największa w Polsce elektrownia słoneczna. Ma mieć moc 1 MW i znajdować się na obszarze 1ha. Planowany termin oddania do użytku to 2013 rok. Miejmy nadzieję, że takich inwestycji będzie coraz więcej.

Podziękowania

Publikacja powstała w ramach projektu "Bioenergia dla Regionu - Zintegrowany Program Rozwoju Doktorantów", współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego.

Literatura:

[1] M. Bellis, "History: Photovoltaics Timeline", The New York Times Company, New York, 1997

- [2] Z.M. Jarzębski, „Energia Słoneczna: Konwersja fotowoltaiczna” PWN, Warszawa, 1990
- [3] „Układ słoneczny”, Encyklopedia PWN, Warszawa, 2007
- [4] J. Irvine, ”What are the uses and hazards of waves that form the Electromagnetic Spectrum?”, Antonine Education, United Kingdom, 2007
- [5] <http://www.fizyka.net.pl>
- [6] <http://www.thermo.com>, Oriel Instruments, Air Mass filters
- [7] ”Solar Cells”, Open Course Ware, Delft University of Technology, <http://ocw.tudelft.nl/>
- [8] “Konfiguracja modułu fotowoltaicznego”, Laboratorium Optoelektroniki, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych Politechniki Łódzkiej
- [9] „Efekt fotowoltaiczny. Wyznaczanie parametrów baterii słonecznej” , Laboratorium Fizyki Ciała Stałego, Katedra Fizyki Molekularnej Politechniki Łódzkiej
- [10] T. Markvart, L. Castaner, “Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation”, Elsevier Ltd., UK, 2005
- [11] T. Rodacki, A. Kandyba, „Przetwarzanie energii w elektrowniach słonecznych” , Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000
- [12] <http://ekowolt.pl/>
- [13] <http://www.teara.govt.nz/en/wind-and-solar-power/3/5>
- [14] <http://www.pv.pl/>
- [15] <http://www.martin-bucher.de/mb/43-1-pictures.html>