



Politechnika Wroclawska

---

Zakład Kotłów, Spalania i Procesów Energetycznych

Instrukcja do ćwiczeń laboratoryjnych z Konwersji Energii

## **OGNIWO FOTOWOLTAICZNE**

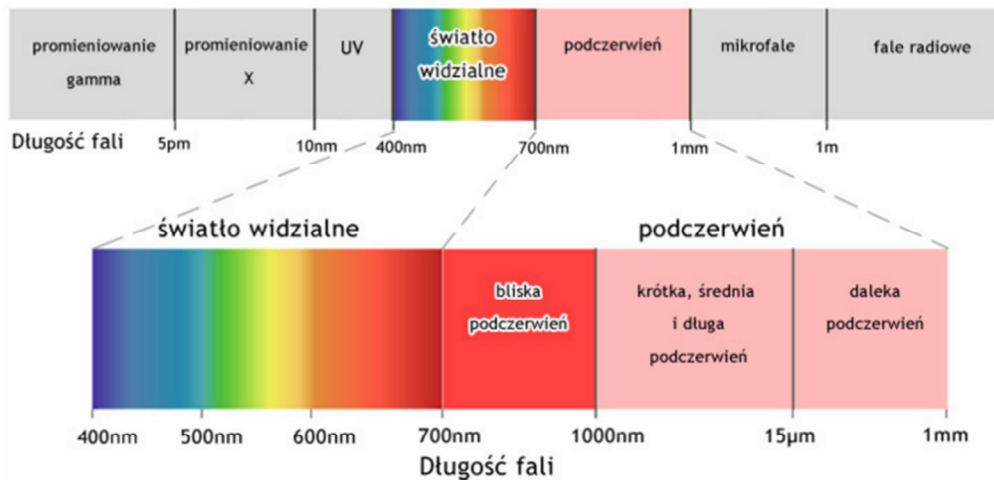
Opracował: **Krzysztof Krochmalny**

Wrocław 2017

## 1. Wstęp teoretyczny

**Ogniwo fotowoltaiczne** służy do zamiany energii promieniowania słonecznego w energię elektryczną (inaczej ogniwo fotoelektryczne lub fotoogniwo). Efekt fotowoltaiczny w elemencie półprzewodnikowym odkrył francuski fizyk Aleksander Becquerel w roku 1839.

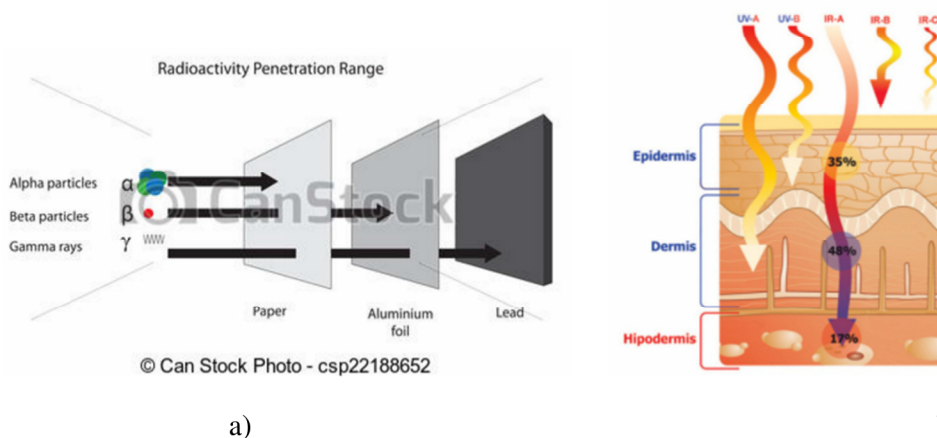
**Promieniowanie elektromagnetyczne** pochodzące ze słońca składa się z cząsteczek które posiadają różną energię. Im większe wzbudzenie cząstki (można to osiągnąć np. poprzez podwyższanie jej temperatury) tym większa częstotliwość jej drgań, a tym samym większa energia zawarta w jej ruchu. Cząsteczki o których mowa od tej pory nazywać będziemy fotonami.



Rys. 1 Wykres przedstawia pełny zakres promieniowania elektromagnetycznego

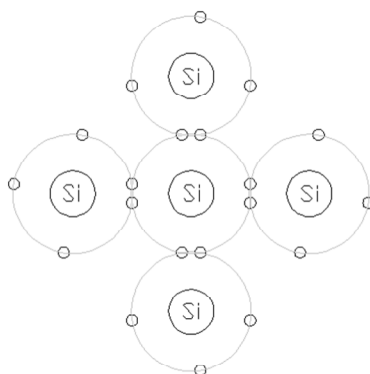
**Zderzenie fotonu z elektronem.** W momencie gdy foton uderzy w ogniwo fotowoltaiczne może nastąpić jego odbicie, absorpcja bądź transmisja przez materiał. Fotony które zostaną zaabsorbowane przyczyniają się do produkcji prądu. Energia zaabsorbowanego fotonu padającego na ogniwo jest przekazywana na skutek zderzenia elektronowi atomu z którego zbudowany jest półprzewodnik. Energia przekazana w ten sposób umożliwi elektronowi opuszczenie przestrzeni macierzystego atomu - przeskok na inne miejsce w sieci krystalicznej półprzewodnika. Wymuszony w ten sposób ruch elektronów wykorzystywany jest do generowania energii elektrycznej.

Poprzez energię cząsteczek (fal) rozumiemy ich zdolność do penetracji różnych materiałów (Rys. 2).



Rys. 2 Zdolność wybranych rodzajów promieniowania do penetracji różnych materiałów w zależności od energii promieniowania.

**Zasada działania ogniwa fotowoltaicznego** na przykładzie atomów krzemu, tłumaczona jest dzięki budowie materii na poziomie atomów. Elektrony krążące wokół jądra atomu mogą znajdować się na różnych orbitach (w różnych odległościach od jądra atomu) w zależności od stanu energetycznego. W dużym uproszczeniu te elektrony które zajmują miejsca na dalszych orbitach mają większą energię od tych które krążą bliżej jądra atomu. Elektrony znajdujące się najdalej od jądra atomu (elektrony walencyjne) wchodzi w interakcję z innymi elektronami sąsiadujących atomów. W przypadku krzemu rozmieszczenie elektronów na poszczególnych orbitach wygląda następująco:  $[\text{Ne}] 3s^2 3p^2$ , co w efekcie daje cztery elektrony walencyjne które służą do wiązania się z innymi atomami, w tym przypadku innymi atomami krzemu. Tworzy się w ten sposób trójwymiarowa sieć o dużym uporządkowaniu przestrzennym tj. sieć krystaliczna. Dzielenie się elektronami walencyjnymi między atomami krzemu odbywa się na zasadzie uwspólniania elektronów walencyjnych (wiązanie kowalencyjne). Podstawową jednostką która tworzy struktury krystaliczne jest pięć atomów krzemu które powiązane ze sobą kowalencyjnie dają oktet elektronowy ( $8 e^-$  na ostatniej powłoce) atomowi centralnemu (Rys 3).



*Rys. 3. Wiązanie kowalencyjne pomiędzy atomami krzemu*

Jeśli promieniowanie słoneczne padające na kryształy krzemu w postaci fotonów ma dostatecznie dużą energię, następuje uwolnienie elektronu (wybicie) z „konkretnie” przypisanego miejsca w sieci krystalicznej, który teraz ma dostatecznie dużą energię aby poruszać się w przestrzeni międzyatomowej nie krążąc wokół pierwotnego jądra z którego pochodził. Należy to rozumieć w ten sposób, że elektron o podwyższonej energii stale zmienia swoje położenie w sieci krystalicznej powodując tym samym pewne zaburzenie w równowadze elektronowej. Miejsce z którego został wybity nazywa się dziurą – występuje tam lokalny brak elektronu, a więc ładunek dodatni w obszarze "podstawowego rąbu" natomiast sam elektron z ładunkiem ujemnym o zwiększonej energii krążący nieustannie w sieci krystalicznej znajduje się teraz w tzw. paśmie przewodzenia. To znaczy, że ze względu na zwiększoną energię nieustannie przemierza przestrzeń międzyatomową sieci krystalicznej. To samo dzieje się z miejscem po elektronie - dziurą którą kolejno wypełniają elektrony walencyjne z sąsiednich atomów. Skutkuje to "wędrówką dziury" wewnątrz sieci.

Opisywany stan (zaburzenie) istnieje tak długo jak długo dostarczana jest elektronom walencyjnym energii. Rzeczą naturalną jest, że gdy w laboratorium wyłączymy źródło światła elektrony znajdujące się w paśmie przewodzenia w końcu znajdą w strukturze sieci krystalicznej dziurę i uzupełnią miejsce w którym brakowało elektronu, wyrównując tym samym różnicę potencjału.

**Opisywane zjawisko daje początek do rozmyślań na temat konwersji energii promieniowania słonecznego bezpośrednio do energii elektrycznej.**

**Ogniwa fotowoltaiczne** składają się z dwóch różnych półprzewodników które charakteryzują się wewnętrznym polem elektrycznym, które tworzy się samoistnie w momencie zetknięcia się półprzewodników. Wspomniane pole elektryczne powoduje przemieszczanie się ładunków dodatnich oraz ujemnych w przeciwnych kierunkach. Jeśli by połączyć półprzewodniki miedzianym drutem otrzymamy drogę którą w sposób uporządkowany przepływać będą elektrony znajdujące się w paśmie przewodnictwa.

Cała uwaga skupia się więc teraz na **sposobie stworzenia pola elektrycznego** w ogniwie fotowoltaicznym. Najprostszym sposobem jest modyfikacja krzemowej struktury krystalicznej zwana domieszkowaniem półprzewodnika. Pierwiastek domieszkowalny powinien posiadać o jeden mniej lub więcej elektron walencyjny niż krzem (np. bor lub fosfor).

**Atom fosforu** wykorzystywany jest do domieszkowania krzemu dzięki czemu powstaje półprzewodnik typu: n (litera n od "negative"). Nowo uformowana struktura krystaliczna posiada w stosunku do czystej struktury krzemowej z rysunku 3 nadmiar elektronów ponieważ fosfor ma pięć elektronów walencyjnych. Wprowadzony sztucznie w procesie domieszkowania fosfor zastępuje miejsce atomu krzemu, w ten sposób jeden elektron walencyjny pozostaje w nadmiarze (nie jest obecny w interakcji międzyatomowej zwanej wiązaniem). Jego zachowanie się w sieci krystalicznej przypomina zachowanie wzbudzonego światłem elektronu znajdującego się w paśmie przewodzenia. Z tą jednak różnicą, że nadmiarowy elektron nie potrzebuje energii z zewnątrz (nawet gdy energia nie jest dostarczana, elektron znajduje się w paśmie przewodzenia nieustannie krążąc w sieci nie będąc przy tym przypisanym żadnemu atomowi).

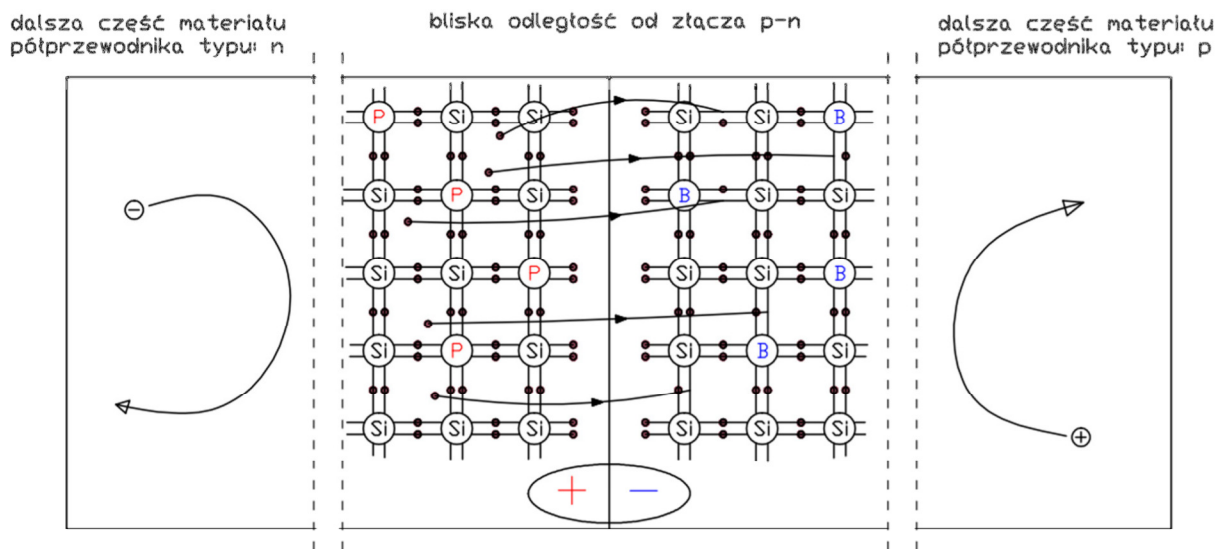
**Proces produkcji półprzewodnika typu n**, polega na pokryciu płytki krzemowej (tzw. wafla, jego rozmiar zwykle nie przekracza wymiarów 20 x 20 cm) gazem fosforowym w piecu w temperaturze powyżej 800 °C. Wysoka temperatura pozwala na dyfuzję atomów fosforu w głąb krzemowego wafla. W czasie ochładzania wafla dyfuzja fosforu maleje do zera ponieważ tworzy się sieć krystaliczna, a fosfor wraz z atomami krzemu staje się jej częścią.

**Półprzewodnik typu p** (litera p od "positive") uzyskuje się przez domieszkowanie boru który ma trzy elektrony walencyjne, a więc o jeden mniej w stosunku do krzemu (stąd znak dodatni). W sieci krystalicznej brakuje elektronu do stabilnego wiązania - jest więc wolne miejsce zwane dziurą, która jest ciągle zapełniana elektronem z sąsiednich atomów krzemu. Tak powstaje pozorny ruch dziur (tak naprawdę to poruszają się tylko elektrony) - zwanych dodatnimi nośnikami ładunku. W rzeczywistości jest to jednak sztucznie wytworzona sieć krystaliczna w której po prostu brakuje elektronów. Nie znaczy to jednak że nie występują w niej wolne elektrony. Oznacza to, że sumarycznie dziur jest znacznie więcej niż elektronów znajdujących się w paśmie przewodzenia.

**Porównując ze sobą półprzewodniki typu n i p** w tym pierwszym większościowym nośnikiem ładunku są elektrony natomiast dziury są nośnikiem mniejszościowym. Odwrotnie sytuacja wygląda dla półprzewodnika typu p. Należy jednak pamiętać, że oba typy półprzewodników są same w sobie elektrycznie obojętne to znaczy, że posiadają jednakową ilość protonów i elektronów w swojej strukturze. To dzięki sztucznie wytworzonym warunkom opisanym w procesie produkcji możliwe jest stworzenie wiązania, które chociaż na ostatniej powłoce nie ma ośmiu elektronów (rozmişczenie takie sprawia, że wiązanie jest stabilne a atom nie wchodzi w reakcje z innymi atomami) to po ochłodzeniu i stworzeniu struktury krystalicznej występuje w stałej i stabilnej formie. Jeśli połączymy ze sobą półprzewodniki typu n i p (proces technologiczny jest skomplikowany i wymaga utrzymania wysokiej czystości podczas produkcji) to okaże się, że ze względu na różne ładunki większościowe, na

styku półprzewodników (nazwanych złączem p-n) pojawi się pole elektryczne. Tak wykonana płytko o grubości około 0,2 mm nazywać się będzie odtąd ogniwem fotowoltaicznym.

**Pole elektryczne** powstaje ponieważ ładunki większościowe, w zależności od typu półprzewodnika, znajdują się w ciągłym ruchu. Gdy półprzewodniki zostaną ze sobą połączone ładunki większościowe na drodze dyfuzji wędrują z miejsc o większej koncentracji do miejsc gdzie występuje ich mniej. Co więcej, działają na nie również siły związane z przyciąganiem elektrycznym od sąsiednich ładunków większościowych półprzewodnika będącego w bezpośrednim sąsiedztwie. Tak więc nadmiarowy elektron z sieci fosfor-krzem przenika przez złącze p-n i wypełnia dziurę w sieci bor-krzem. Wraz z wędrowką elektronu następuje przeniesienie ładunku, a tym samym polaryzacja warstw półprzewodników (Rys. 4).



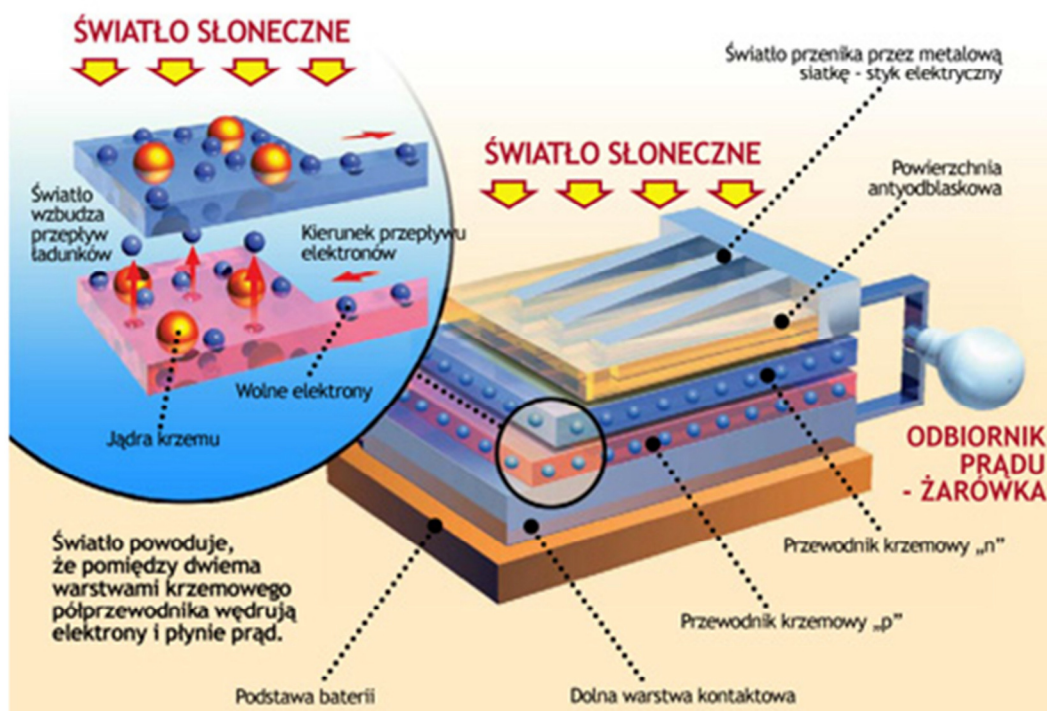
Rys. 4 Schemat obrazujący polaryzację złącza p-n.

Ruch nośników większościowych przez złącze p-n możliwy jest tylko w bliskich odległościach. Zdecydowana większość objętości domieszkowanego krzemu w zależności od typu, wypełniona jest ładunkami większościowymi odpowiednimi dla półprzewodnika. Siła wytworzonego pola elektrycznego zależy od ilości składnika domieszkowanego do sieci krystalicznej. Im jest go więcej tym uzyskuje się mocniejsze pole elektryczne.

**Budowa ogniwa fotowoltaicznego** w przekroju została zobrazowana na rysunku 5. Należy zwrócić uwagę na rozmieszczenie kolejnych warstw zaczynając od strony z której pada promieniowanie słoneczne są to: antyrefleksyjna powierzchni chroniąca ogniwo przed warunkami atmosferycznymi wraz z zatopionymi w niej stykami elektrycznymi, następnie warstwa półprzewodnika typu-n potem warstwa typu-p osadzona na dolnej warstwie kontaktowej. Całość znajduje się na warstwie nośnej (podstawie baterii).

Moc pojedynczego ogniwa jest niewielka, najczęściej wynosi 1-2 W, aby uzyskać większe wartości łączy się wiele ogniw w tak zwane moduły fotowoltaiczne.





Rys. 5 Budowa oraz zasada działania pojedynczego ogniwa fotowoltaicznego

Źródło: [www.energoforum.pl](http://www.energoforum.pl)

**Maksymalna moc ogniwa** jest decydującym parametrem podczas zakupu. Moc ogniwa zależy od bardzo wielu czynników dlatego podaje się ją dla warunków standardowych (STC – standard test conditions, nasłonecznienie  $1000 \text{ W/m}^2$ , temperatura ogniwa oświetlonego panelu  $25^\circ\text{C}$ , spektrum promieniowania dla gęstości atmosfery AM 1,5) bądź normalnych.

**Charakterystyka prądowo-napięciowa** określa najważniejsze parametry pracy ogniwa tj. prąd zwarcia  $I_z$  (Gdy kontakty przednie ogniwa zostaną zwarte z tylnymi, wartość prądu zwarcia zależy ściśle od konstrukcji ogniwa i materiału półprzewodnika) oraz napięcie obwodu otwartego  $V_0$  (Napięcie jakie tworzy się w ogniwie przy max oświetleniu i braku przepływu prądu pomiędzy kontaktami. Wartość należy odczytać z wykresu  $I(U)$  dla  $I=0$ ). Po sporządzeniu takiej charakterystyki można określić dalsze parametry pracy ogniwa czyli: sprawność, moc maksymalną oraz współczynnik wypełnienia. W przypadku idealnego ogniwa charakterystyka prądowo-napięciowa powinna mieć kształt prostokąta o bokach  $I_z$  i  $V_0$ . W rzeczywistości maksymalną moc ogniwa wyznacza się ze wzoru:  $P_{max} = I_{max} \cdot V_{max}$ , gdzie iloczyn  $I_{max} \cdot V_{max}$  to pole prostokąta pod wykresem które przyjmuje największą wartość.

**Współczynnik wypełnienia FF** (ang. fill factor) używany jest do określenia w jakim stopniu charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa jest zbliżona do idealnej (pola prostokąta). Współczynnik wyrażany jest w procentach jako stosunek pola powierzchni prostokąta o bokach  $I_{max}$  i  $V_{max}$  do pola prostokąta o bokach  $I_z$  i  $V_0$ . Współczynnik wypełnienia wyraża stosunek rzeczywistej mocy generowanej przez ogniwo do hipotetycznej maksymalnej mocy jaką może osiągnąć ogniwo. Współczynnik wypełnienia wykorzystywany jest do porównywania jakości ogniw (Tabela 1).

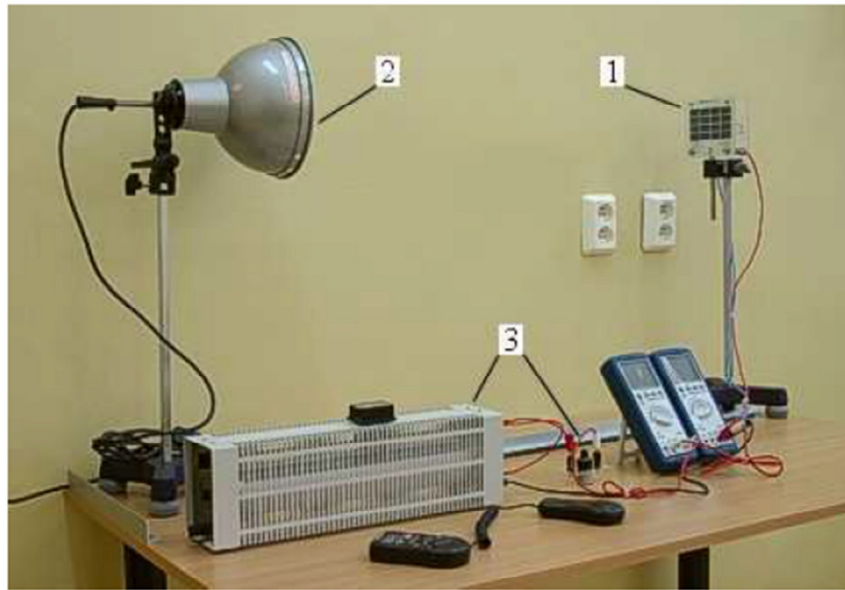
Tabela 1 Klasy ogniw w zależności od współczynnika wypełnienia

Klasa ogniwa:	Niska	Średnia	Wysoka
FF:	0,6 – 0,7	0,7 – 0,72	>0,75

**Sprawność modułu ogniwa fotowoltaicznego** określana jest jako stosunek maksymalnej mocy uzyskiwanej z ogniwa do mocy promieniowania padającego na ogniwo.

## 2. Opis stanowiska

Stanowisko pomiarowe składa się ze źródła światła o mocy 1700W, ogniwa fotowoltaicznego o powierzchni  $A = 0,18 \text{ m}^2$ , odbiornika energii elektrycznej w postaci opornika dekadowego i woltomierza.



Rys. 6 Stanowisko do badania ogniwa fotowoltaicznego

## 3. Wykonanie pomiarów oraz obliczeń

Pomiary należy wykonać dla co najmniej trzech odległości źródła światła od ogniwa. Żądane odległości należy wybrać samodzielnie z przedziału 1,4 do 0,6 m. Pomiedzy pomiarami należy wyłączyć światło i odczekać kilka minut tak aby uniknąć niepotrzebnego nagrzewania się ogniwa.

Po zmontowaniu układu wykonujemy serię pomiarów zmieniając obciążenie odbiornika co: 1, 2 .. 10, 20 .. 100, 200, 400, ... 1000, 2000, 4000 .. 10 000  $\Omega$ . Korzystając z prawa Ohma obliczamy wartość natężenia prądu płynącą przez odbiornik, a następnie wyznaczamy moc pobieraną przez ten odbiornik:

$P = \frac{U^2}{R}$ . W tabeli obliczeniowej należy zanotować maksymalną moc jaka jest osiągalna przez ogniwo ponieważ będzie potrzebna do obliczania sprawności.

Przyjmując gęstość promieniowania na poziomie  $\rho_{50} = 2000 \text{ W/m}^2$  dla odległości  $L_{50} = 50 \text{ cm}$  od źródła światła korzystamy ze wzoru:  $\rho_x = \rho_{50} \left( \frac{L_{50}}{L_x} \right)^2$  aby wyznaczyć gęstość promieniowania dla

wybranej odległości  $L_x$ . Sprawność ogniwa wyznacza się ze wzoru:  $\eta = \frac{P_{max}}{P_x} \cdot A \cdot 100\%$ , natomiast współczynnik wypełnienia:  $FF = \frac{P_{max}}{I_z \cdot U_0}$ .

### Zadania

- I. Wykonać schemat stanowiska uwzględniając wszystkie mierzalne wartości, wykonać przykładowe obliczenia, tabele pomiarowe i wynikowe, przedstawić wnioski.
- II. Sporządzić charakterystykę  $I(U)$  dla trzech odległości, wyniki przedstawić na jednym wykresie.
- III. Sporządzić wykres  $P(R)$ , wyniki przedstawić na jednym wykresie
- IV. Porównać maksymalne sprawności uzyskane dla różnych odległości.

### Bibliografia oraz Literatura uzupełniająca

- Z. Jastrzębski, Energia słoneczna, konwersja fotowoltaiczna, wyd. PWN, Warszawa 1993.
- P. Wuerfel, Physics of solar cells from principles to new concepts, Wiley-VCH Verlag GmbH&Co, KGaA, 2005
- M.A. Green, Solar cells operating principles, technology and system applications, ed. Prentice-Hall Inc., 1992
- Handbook of photovoltaic science and engineering, ed. A. Luq, S. Hegedus, John Wiley&Sons, 2003

### Przykładowe pytania kontrolne

- ✓ Opisz zasadę działania ogniwa fotowoltaicznego.
- ✓ Budowa fotoogniwa.
- ✓ Co to jest domieszkowanie?
- ✓ Porównaj budowę półprzewodnika typu n i p.
- ✓ Jak powstaje pole elektryczne w złączu p-n?
- ✓ Do czego potrzebna jest charakterystyka prądowo napięciowa?
- ✓ Co to jest współczynnik wypełnienia i jak wyrażana jest sprawność fotoogniwa?