

Ćwiczenie 134

Ogniwo słoneczne

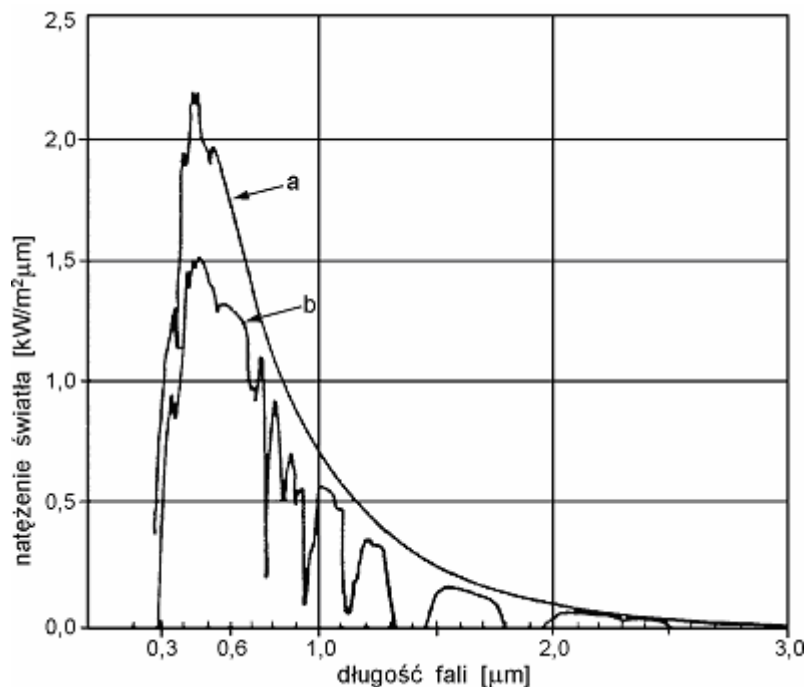
Cel ćwiczenia

Zapoznanie się z różnymi rodzajami półprzewodnikowych ogniw słonecznych. Wyznaczenie charakterystyki prądowo-napięciowej i sprawności przetwarzania energii świetlnej na elektryczną.

Wprowadzenie

Słońce jest podstawowym źródłem energii dla naszej planety. Widmo promieniowania Słońca (rys. 1) jest zbliżone do widma ciała doskonale czarnego o temperaturze 6000 K, pokrywając zakresy podczerwieni, światła widzialnego ($0,4 \div 0,7 \mu\text{m}$) i nadfioletu. Całkowite natężenie promieniowania ponad atmosferą wynosi $\phi = 1,35 \text{ kW/m}^2$. Do powierzchni Ziemi dociera podczas najlepszych warunków pogodowych do 1 kW/m^2 .

W kolektorach słonecznych promieniowanie słoneczne zamienia się na ciepło, np. przez podgrzewanie przepływającej przez kolektor wody. Ogniwem słonecznym lub fotoogniwem nazywamy urządzenie, które przetwarza energię światła słonecznego na prąd elektryczny.



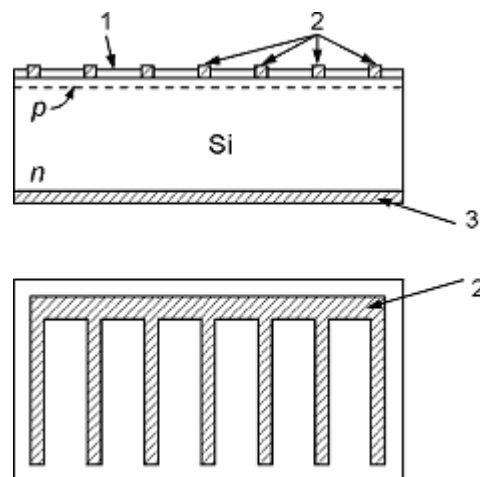
Rys. 1. Widmo promieniowania Słońca: *a* – ponad atmosferą, *b* – na poziomie morza (Słońce w zenicie)

W półprzewodnikowym ogniwie słonecznym konwersja ta zachodzi w obszarze złącza *p-n* o dużej powierzchni. Złącze *p-n* jest kontaktem dwu warstw półprzewodnika, jednej o przewodnictwie elektronowym (*n*), drugiej dziurowym (*p*). Po obu stronach styku materiału typu *n* i *p* powstaje *warstwa zubożona*, w której koncentracja tak dziur, jak i swobodnych

elektronów jest znikomo mała w porównaniu z przyległymi obszarami typu p i n . W warstwie zubożonej powstaje natomiast silne pole elektryczne, wytworzone przez nieskompensowane ładunki donorów i akceptorów (patrz opis złącza w ćwiczeniu 123).

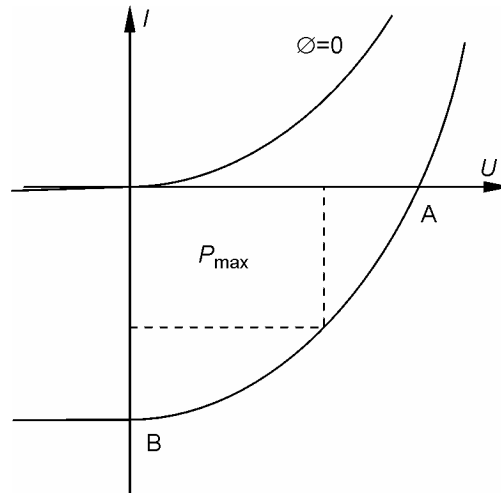
Proces zamiany światła na prąd elektryczny zachodzi właśnie w warstwie zubożonej. Foton światła o energii $h\nu$ przenosi elektron z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Staje się on tam elektronem swobodnym, natomiast niezapełniony stan elektronowy w paśmie walencyjnym tworzy dziurę. Proces generacji par elektron-dziura jest dozwolony przez prawo zachowania energii, gdyż energia fotonów światła widzialnego (od 1,6 eV do 3,2 eV) jest większa od szerokości przerwy energetycznej (1,1 eV dla Si). Wytworzone elektrony i dziury są przez pole elektryczne warstwy zubożonej „wymiatane” w przeciwnych kierunkach, tworząc prąd elektryczny, który może popłynąć do obwodu zewnętrznego.

Najczęściej stosowanym materiałem do produkcji ogniw słonecznych jest krzem. Najdoskonalsze ogniwa, wykorzystywane np. w pojazdach kosmicznych, budowane są z płytek krzemu monokrystalicznego. Tańsze technologie wykorzystują krzem polikrystaliczny oraz krzem amorficzny. W każdym z trzech rodzajów krzemu wykonać trzeba złącze $p-n$ bardzo blisko powierzchni, gdyż głębokość wnikania światła do krzemu jest rzędu 0,01 mm (rys. 2). Powierzchnia krzemu jest przykryta cienką warstwą (1) przewodzącą prąd i jednocześnie przezroczystą dla światła. (Stosuje się np. cienkie warstwy złota lub przewodzące prąd tlenki.) Z tej warstwy prąd jest zbierany przez względnie grube paski metalowe (2).



Rys. 2. Schematyczny przekrój przez monokrystaliczne ogniwo słoneczne:
1 – warstwa przewodząca, 2 – kontakt górny, 3 – kontakt dolny

Charakterystyki prądowo-napięciowe ogniwa słonecznego przedstawia rysunek 3. Przy braku oświetlenia jest taka sama jak zwykłej diody półprzewodnikowej i może być objaśniona (por. ćwic. 123) jako suma skierowanych przeciwnie prądów dyfuzji (w kierunku przewodzenia) i prądu dryfu (w kierunku zaporowym).



Rys. 3. Charakterystyki prądowo-napięciowe złącza p - n , ciemnego ($\phi = 0$) i oświetlonego światłem (z zaznaczonym prostokątem mocy maksymalnej)

Generacja par elektron–dziura przez fotony powiększa prąd dryfu diody (tj. prąd w kierunku zaporowym) o wartość proporcjonalną do natężenia światła ϕ . Zatem charakterystyka fotoogniwa*

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{eU}{mkT}\right) - 1 \right] - \text{const} \cdot \phi, \quad (1)$$

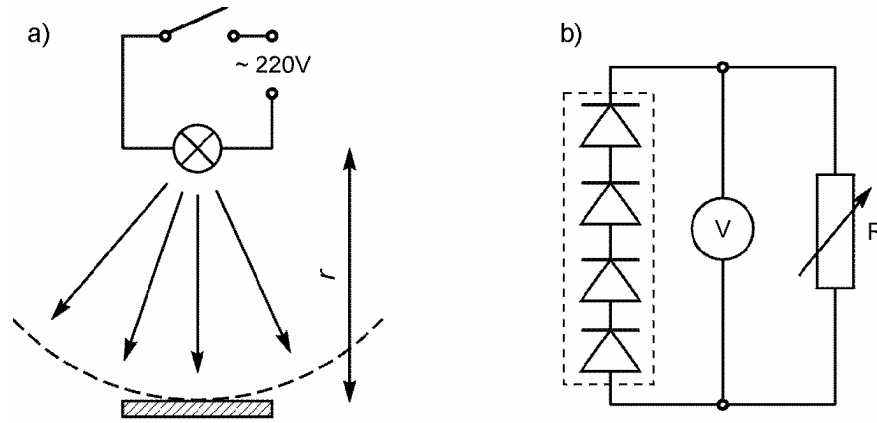
jest rezultatem przesunięcia w dół charakterystyki ogniwa nieoświetlonego o składnik $-\text{const} \cdot \phi$ (rys. 3). Znaczenie pozostałych symboli we wzorze (1) wyjaśnione jest w ćwiczeniu 123.

Analiza procesu konwersji światła słonecznego na energię elektryczną wskazuje, że maksymalna sprawność ogniwa krzemowego wynosi około 25%. Budowane obecnie ogniwa mają sprawność o połowę niższą. Warunkiem zastosowania fotoogniw do produkcji energii elektrycznej jest nie tyle problem sprawności, lecz relacja ceny fotoogniw i aktualnej ceny energii elektrycznej. Ogniwa słoneczne muszą jeszcze kilkakrotnie stanąć, by mogły być wykorzystane na skalę masową w krajach o dużej liczbie dni słonecznych w roku. Dość liczne są natomiast zastosowania ogniw na małą skalę (sondy kosmiczne, zasilanie niektórych kalkulatorów, źródło prądu dla obiektów położonych z dala od sieci itp.).

Pomiar charakterystyk i sprawności fotoogniwa

Prosty schemat układu pomiarowego pokazuje rysunek 4. Źródłem światła oświetlającego fotoogniwo jest lampa jarzeniowa zasilana z sieci 220 V.

* Charakterystyka fotoogniwa jest zasadniczo taka sama jak *fotodiody*. Elementy te są wykorzystywane jako detektory światła w ćwiczeniu 9 „Swobodne spadanie” i ćwiczeniu 71 „Dyfrakcja i interferencja światła”. Powierzchnia stosowanych tam fotodiod jest rzędu 1 mm^2 .



Rys. 4. Schemat układu eksperymentalnego: a) oświetlenie fotoogniwa lampą jarzeniową; b) układ elektryczny do badania charakterystyki prądowo-napięciowej

Natężenie światła padającego na fotoogniwo można oszacować, znając moc elektryczną lampy P_l oraz sprawność lampy η_l . Jak wynika z rysunku 4a, światło o mocy $P_l \eta_l$ oświetla powierzchnię sfery równą $4\pi r^2$. Zatem natężenie światła ϕ wynosi

$$\phi \approx \frac{P_l \eta_l}{4\pi r^2}. \quad (2)$$

Natężenie światła można też zmierzyć przy użyciu przyrządu nazywanego luksomierzem.

Obciążeniem ogniwa (rys. 4b) jest opornica dekadowa o znanym oporze R . Dzięki temu można zrezygnować z amperomierza: wartość prądu $I = U/R$, a generowana moc $P = UI = U^2/R$. Bez stosowania zewnętrznego źródła napięcia zmierzyć można część charakterystyki $U(I)$ (rys. 3) zawartą między punktami rozwarcia A i zwarcia B. Ponieważ używane ogniwa mają różną powierzchnię i różną liczbę n połączonych szeregowo sekcji, dla porównania charakterystyk prądowo-napięciowych wygodnie jest wykonać wykres znormalizowany. Gęstość prądu, czyli iloraz i/S , wykreślamy jako funkcję napięcia przypadającego na jedną sekcję, U/n .

Ogniwo rozwarne ($R = \infty$) generuje maksymalne napięcie, ale moc w obwodzie zewnętrznym jest równa zero, bo nie ma prądu. Maksymalny prąd wytwarza ogniwo zwarte ($R = 0$), teraz napięcie i moc są równe zero. Istnieje zatem wartość oporu obciążenia R , przy którym odbierana z ogniwa moc jest największa. Na wykresie (rys. 3) moc maksymalna P_{\max} jest reprezentowana przez prostokąt o maksymalnej powierzchni.

Sprawność energetyczną ogniwa można zdefiniować jako stosunek mocy maksymalnej generowanej przez ogniwo do mocy padającego światła będącego iloczynem natężenia światła ϕ , powierzchni S pojedynczej sekcji ogniwa i liczby sekcji n

$$\eta = \frac{P_{\max}}{\phi n S}. \quad (3)$$

Aparatura

– Fotoogniwa krzemowe: monokrystaliczne, polikrystaliczne i amorficzne.

Uwaga: Należy przyjrzeć się ich wyglądowi. Fotoogniwo monokrystaliczne zostało wykonane w płatku monokrystalicznego krzemu o grubości rzędu 0,3 mm, takim samym, jaki stosuje się do produkcji diod, tranzystorów i układów scalonych. W przypadku dwu pozostałych typów fotoogniw półprzewodnik jest osadzony na powierzchni szkła. Fotoogniwo polikrystaliczne wyróżnia się tym, że przy ukośnej obserwacji widać wyraźnie duże krystaliczne ziarna. Natomiast powierzchnia ogniwa z krzemu amorficznego jest jednolicie szara. We wszystkich trzech rodzajach ogniwa widać sieć metalowych pasków do zbierania prądu z powierzchni oświetlonej. Zastosowane w ćwiczeniu fotoogniwa polikrystaliczne i amorficzne składają się z szeregu pojedynczych elementów połączonych szeregowo, dlatego dają większe napięcie niż ogniwo monokrystaliczne.

– Żarówka jarzeniowa o charakterystyce widmowej zbliżonej do światła dziennego. Natężenie światła można regulować przez zmianę odległości lampy – fotoogniwo.

– Woltomierz cyfrowy i opornica dekadowa 10 kΩ.

Wykonanie ćwiczenia

A. Wyznaczanie własności ogniwa słonecznych przy użyciu sztucznego źródła światła.

1. Zestawić układ pomiarowy. Odległość lampy – ogniwo winna być rzędu 20 ÷ 30 cm.

2. Obejrzyć ogniwa. Dla każdego określić liczbę sekcji. Wartości powierzchni S jednej sekcji są podane.

3. Wykonać pomiar charakterystyk prądowo-napięciowych dla wszystkich trzech ogniwa przy ustalonym oświetleniu. Uwaga: uzyskać kilkanaście punktów pomiarowych pokrywających zakres napięcia od wartości maksymalnej do bliskiej zera. Podczas pomiaru na bieżąco obliczać generowaną moc $P = U^2/R$. Wykonać dodatkowe 2 ÷ 3 pomiary w pobliżu punktu, dla którego moc osiąga maksimum.

Opracowanie wyników

1. Wyniki pomiarów i obliczeń zestawić w poniższej tabeli.

R [Ω]	U [V]	$I = \frac{U}{R}$ [mA]	$P = \frac{U^2}{R}$ [mW]	$\frac{U}{n}$ [V]	$j = \frac{I}{S}$ [mA/cm ²]

2. Wykonać wspólny wykres znormalizowanych charakterystyk: $I/S = f(U/n)$. Które z ogniwa posiada największą gęstość prądu zwarcia, które daje największe napięcie przypadające na jedną sekcję?

3. Obliczyć sprawność badanych ogniw na podstawie wartości natężenia światła, powierzchni czynnej i uzyskanej mocy maksymalnej. Które ogniwo ma największą sprawność?

B. Inne eksperymenty z ogniwami słonecznymi.

1. Własności ogniwa oświetlonego naturalnym światłem słonecznym.

Ten wariant ćwiczenia warto wykonywać w przypadku ustabilizowanej pogody (przepływ chmur utrudnia wiarygodny pomiar charakterystyk). Natężenie światła słonecznego mierzyć luksomierzem. Wykonanie i opracowanie pomiaru jak w punkcie A.

2. Pomiar przy zmniejszonej i zwiększonej wartości natężenia światła.

Zmianę oświetlenia uzyskujemy przez zmianę odległości lampy od fotoogniwa. Dla wybranego fotoogniwa zmierzyć i wykreślić charakterystyki $U(I)$ dla różnych wartości ϕ . Jak zmienia się prąd zwarcia i napięcie rozwarcia ze zmianą natężenia światła?