	<p>Badanie charakterystyk prądowo-napięciowych modułu ogniw fotowoltaicznych i sprawność konwersji energii padającego promieniowania</p>	<p>E12</p>
---	---	-------------------

Przyrządy:

Listwa pomiarowa (1 m), źródło światła, zasilacz źródła światła, woltomierz, miliamperomierz (dwa multimetry uniwersalne), opornik o zmiennym oporze, fotoogniwo.

Cel:

Celem ćwiczenia jest zbadanie charakterystyk prądowo - napięciowych modułu ogniw fotowoltaicznych i sprawności konwersji energii padającego promieniowania.

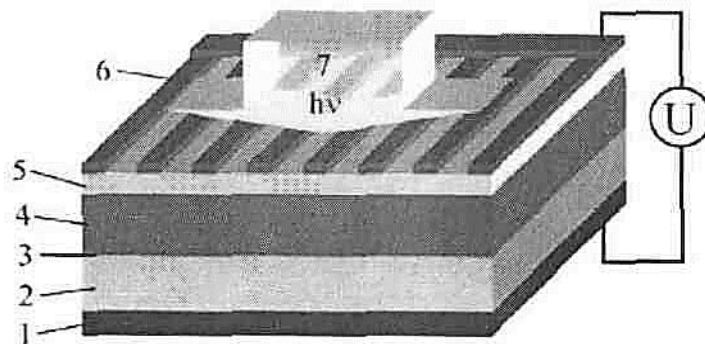
Wstęp teoretyczny:

W fotoogniwie energia promieniowania słonecznego zmieniana jest na energię elektryczną. Elektrony w materiałach półprzewodnikowych ze złącem p-n z których wykonana jest bateria na skutek absorpcji promieniowania słonecznego przenoszone są z pasma podstawowego do pasma przewodzenia. W półprzewodniku pasmo walencyjne i pasmo przewodzenia oddzielone są pasmem zabronionym E_g (przerwą energetyczną). Szerokość tej przerwy określona jest energią wiązania elektronów walencyjnych. Wartość E_g określa minimalną częstotliwość ν_g światła, które może przenieść elektrony z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Warunkiem uwolnienia elektronu jest, aby energia fotonu $E_f = h\nu_f$ była większa od E_g .

$$h\nu_f \geq E_g = h\nu_g$$

h - stała Plancka.

Na przykład w selenie szerokość przerwy energetycznej wynosi 2 eV, czyli maksymalna długość fali świetlnej, która jest zdolna do uwolnienia elektronu walencyjnego w tym półprzewodniku, wynosi około 620 nm (światło pomarańczowe). Tą wartość można obliczyć z zależności: $\lambda_{\max} = c/\nu_g$. Jeżeli elektron napotka dziurę w półprzewodniku wówczas wypełni wolne miejsce w wiązaniu i obydwa nośniki prądu znikają, proces ten jest zwany rekombinacją. Liczba rekombinacji w jednostce czasu jest zależna od liczby nośników prądu i gdy nośników przybywa to wzrasta również liczba rekombinacji. Po pewnym czasie ustala się równowaga, w której dodatkowa liczba nośników zależy od liczby generowanych par elektron - dziura w jednostce czasu, czyli od natężenia oświetlenia. Światło dociera tylko do warstw przypowierzchniowych półprzewodnika i aby w większym stopniu wykorzystać materiał z którego produkuje się ogniwa słoneczne należy stosować jak najmniejszą grubość tego materiału i jak największą powierzchnię. Ogniwa słoneczne działają dzięki występowaniu efektu fotowoltaicznego. Polega on na tym, że oświetlona warstwa podwójna np. złącze p-n staje się źródłem prądu elektrycznego. Schemat ogniwa słonecznego przedstawia rys. 1.

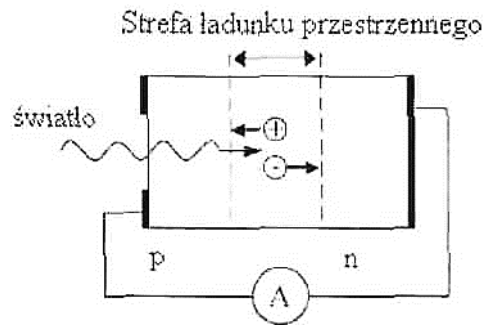


Rysunek 1

Schemat ogniwa słonecznego: 1- nieoświetlona elektroda, 2 - półprzewodnik typu n, 3 - złącze p-n, 4 -półprzewodnik typu p, 5 - warstwa przeciwodblasiwająca, 6 - oświetlona elektroda, 7 - fotony padające na ogniwo.

W wyniku dyfuzji elektronów z obszaru n do obszaru p i dziur z obszaru p do obszaru n powstaje ładunek przestrzenny, który wytwarza wewnętrzne pole elektryczne w obszarze złącza. Jeżeli złącze zostanie oświetlone, fotony generują pary nośników ładunku: dziury i

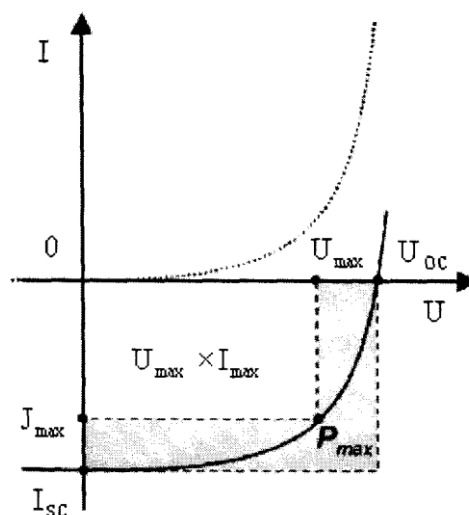
elektrony. Dziury unoszone w wewnętrznym polu elektrycznym podążą w kierunku półprzewodnika typu p, a elektrony w kierunku półprzewodnika typu n. Schemat działania baterii słonecznej przedstawiono na rys. 2.



Rysunek 2

Schemat działania fotoogniwa.

Gdy elektrody nie są ze sobą połączone, to w wyniku oświetlenia w półprzewodniku typu n gromadzą się ładunki ujemne, a w typu p dodatnie. Taki rozkład ładunku wytwarza różnicę potencjału nazywaną napięciem obwodu otwartego U_{oc} . Gdy elektrody ogniwa są zwarte przez amperomierz, tak jak na rys. 2, wówczas napięcie jest równe zeru ($U = 0V$) i przez ogniwo przepływa prąd zwarcia I_{sc} generowany światłem. Określenie podstawowych parametrów ogniwa słonecznego uzyskuje się przez badanie charakterystyki prądowo-napięciowej którą przedstawia wyk.1.



Wykres 1

Charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa nieoświetlonego (linia kropkowana) i oświetlonego (linia ciągła).

O właściwościach fotowoltaicznych ogniwa decyduje kształt charakterystyki prądowo-napięciowej I(U). Charakterystyka prądowo-napięciowa dla idealnego fotoogniwa powinna mieć kształt prostokąta o bokach I_{SC} i U_{OC} . W praktyce nie spotykamy idealnych fotoogniw. Maksymalna moc rzeczywistego ogniwa jest zawsze mniejsza od mocy idealnego ogniwa

$$P_{id} = I_{SC} * U_{OC}$$

Moc maksymalną wyznacza się ze wzoru:

$$P_{max} = I_{max} * U_{max}$$

Typowe ogniwo fotowoltaiczne to płytka półprzewodnikowa ze złączem p-n, wykonana np. z krzemu krystalicznego lub polikrystalicznego. Grubość płytek zawiera się w granicach 200-400 mikrometrów. Metaliczne kontakty naniesione są na przednią i tylną stronę płytki i pozwalają na podłączenie do obwodu elektrycznego.

Strumień świetlny ϕ jest to moc energii promienistej oceniona na podstawie wywołanego przez nią wrażenia świetlnego. Strumień świetlny $\Delta\phi$ wysyłany w kąt bryłowy $\Delta\Omega$ przedstawia wzór:

$$\Delta\phi = I\Delta\Omega$$

I - natężenie źródła punktowego.

Jednostką strumienia świetlnego jest lumen (lm), jest to strumień promieniowany przez izotropowe źródło punktowe o natężeniu I kandel do kąta bryłowego równego 1 steradianowi:

Iloczyn strumienia świetlnego i czasu jego trwania nazywa się ilością światła, I lm monochromatycznego strumienia świetlnego którego długość fali jest równa 555 nm jest równy strumieniowi promieniowania o mocy 1,47 mW.

Oświetlenie jest to strumień świetlny padający na jednostkę powierzchni

$$E = \frac{d\phi}{dA}$$

Jeśli strumień świetlny pada prostopadle to

$$E = \frac{\phi}{A}$$

Oświetlenie jest to ilość energii padająca na jednostkę powierzchni w jednostce czasu. Jednostką oświetlenia jest luks (lx). Jeden lx to oświetlenie takiej powierzchni prostopadłej do promieni świetlnych na której na jeden metr kwadratowy tej powierzchni pada strumień świetlny równy jednemu lumenowi

Wartości „E” w zależności od odległości od źródła światła wykorzystanego w tym ćwiczeniu przedstawia tabela.

Tabela I. Natężenie promieniowania i strumień świetlny w zależności od odległości od źródła światła.

Tabela 1

r [m]	strumień świetlny ϕ [mW]	strumień świetlny ϕ [W]	natężenie promieniowania E [W/m ²]
0,1	82,5	0,0825	86,546
0,11	66,5	0,0665	69,761
0,12	58,8	0,0588	61,684
0,13	52,5	0,0525	55,075
0,14	47,5	0,0475	49,830
0,15	41,4	0,0414	43,430
0,16	36,2	0,0362	37,975
0,17	31,9	0,0319	33,464
0,18	29,7	0,0297	31,157
0,19	26,9	0,0269	28,219

Uniwersytet Jana Długosza w Częstochowie

r [m]	strumień świetlny ϕ [mW]	strumień świetlny ϕ [W]	natężenie promieniowania E [W/m ²]
0,2	24,1	0,0241	25,282
0,21	22,6	0,0226	23,708
0,22	20,7	0,0207	21,715
0,23	19	0,019	19,932
0,24	17,5	0,0175	18,358
0,25	16,5	0,0165	17,309
0,26	14,9	0,0149	15,631
0,27	13,7	0,0137	14,372
0,28	12,6	0,0126	13,218
0,29	11,8	0,0118	12,379
0,3	11,1	0,0111	11,644
0,31	10,5	0,0105	11,015
0,32	10	0,01	10,490
0,33	9,4	0,0094	9,861
0,34	8,7	0,0087	9,127
0,35	8,29	0,00829	8,697
0,36	7,85	0,00785	8,235
0,37	7,59	0,00759	7,962
0,38	7,21	0,00721	7,564
0,39	6,89	0,00689	7,228
0,4	6,53	0,00653	6,850
0,41	6,24	0,00624	6,546
0,42	5,89	0,00589	6,179
0,43	5,61	0,00561	5,885
0,44	5,38	0,00538	5,644
0,45	5,19	0,00519	5,445
0,46	4,98	0,00498	5,224
0,47	4,78	0,00478	5,014
0,48	4,6	0,0046	4,826
0,49	4,43	0,00443	4,647
0,5	4,29	0,00429	4,500

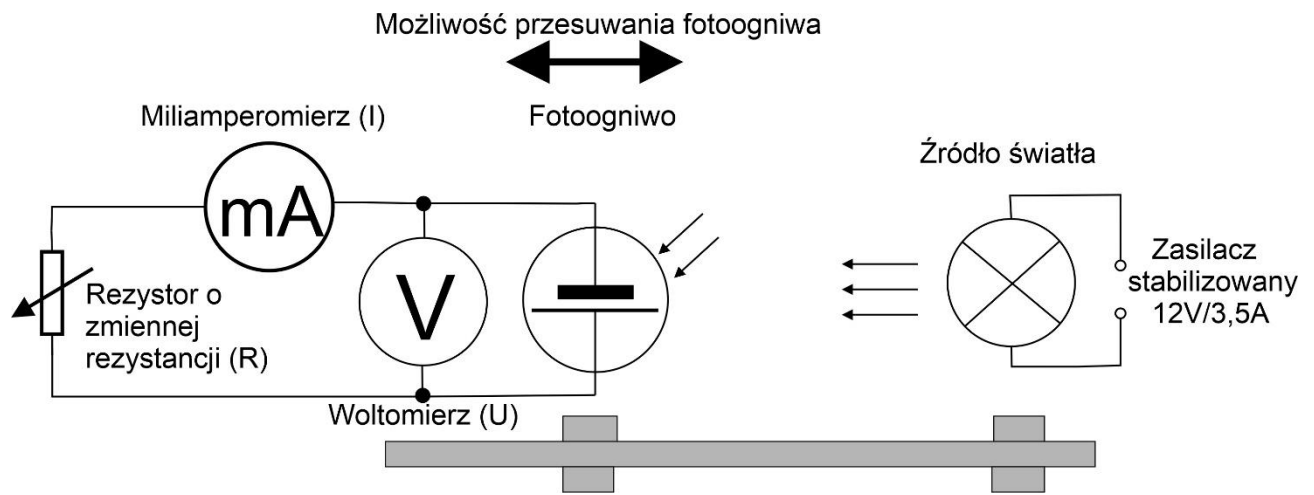
Uniwersytet Jana Długosza w Częstochowie

r [m]	strumień świetlny ϕ [mW]	strumień świetlny ϕ [W]	natężenie promieniowania E [W/m ²]
0,51	4,12	0,00412	4,322
0,52	3,95	0,00395	4,144
0,53	3,85	0,00385	4,039
0,54	3,71	0,00371	3,892
0,55	3,58	0,00358	3,756
0,56	3,49	0,00349	3,661
0,57	3,37	0,00337	3,535
0,58	3,24	0,00324	3,399
0,59	3,09	0,00309	3,242
0,6	3,05	0,00305	3,200
0,61	2,94	0,00294	3,084
0,62	2,9	0,0029	3,042
0,63	2,84	0,00284	2,979
0,64	2,78	0,00278	2,916
0,65	2,71	0,00271	2,843
0,66	2,65	0,00265	2,780
0,67	2,58	0,00258	2,707
0,68	2,52	0,00252	2,644
0,69	2,49	0,00249	2,612
0,7	2,42	0,00242	2,539
0,71	2,38	0,00238	2,497
0,72	2,33	0,00233	2,444
0,73	2,28	0,00228	2,392
0,74	2,23	0,00223	2,339
0,75	2,18	0,00218	2,287
0,76	2,13	0,00213	2,234
0,77	2,09	0,00209	2,192
0,78	2,04	0,00204	2,140
0,79	1,99	0,00199	2,088
0,8	1,95	0,00195	2,046
0,81	1,91	0,00191	2,004

r [m]	strumień świetlny ϕ [mW]	strumień świetlny ϕ [W]	natężenie promieniowania E [W/m ²]
0,82	1,84	0,00184	1,930
0,83	1,79	0,00179	1,878
0,84	1,71	0,00171	1,794

Układ pomiarowy:

Charakterystykę I-U można wyznaczyć w układzie, który przedstawia rys.3.



Rysunek 3

Układ elektryczny do pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych modułu ogniw fotowoltaicznych.

Układ ten składa się z:

- modułu ogniw fotowoltaicznych o powierzchni 0,000953 m²,
- potencjometru o regulowanym oporze od 4 Ω, do 1 kΩ, niepewności 5% i dopuszczalnej mocy 2W,
- woltomierza
- miliamperomierza

Przebieg ćwiczenia:

UWAGA: Na stronie internetowej I Pracowni Fizycznej i w samej Pracowni jest dostępna skrócona instrukcja obsługi multimetru (miernika uniwersalnego).

UWAGA: Główny wyłącznik zasilacza napięcia stałego znajduje się w górnej części ścianki tylnej zasilacza. Ustawianie napięcia wykonujemy pokrętkiem na ścianie przedniej, uprzednio wciskając przycisk „V” (wartość napięcia na zasilaczu miga). Ustawianie prądu maksymalnego (jeśli jest taka potrzeba) ustawiamy tym samym pokrętkiem, ale po wciśnięciu przycisku „I”. Aby zasilacz wysłał napięcie zasilające źródło światła należy po ustawieniu napięcia wcisnąć przycisk „Output”.

Napięcie zasilające źródło światła wynosi 12V.

Maksymalny prąd dostarczany przez zasilacz musi być ustawiony na wartość 3,5A.

1. Umieszczamy źródło światła i panel fotowoltaiczny na ławie optycznej. Łączymy układ według schematu z rys.3.
2. Dla co najmniej pięciu różnych odległości panelu fotowoltaicznego od źródła światła zmieniając opór „R” na regulowanym potencjometrze od „R_{min}” do „R_{max}” (opór zmieniamy tak aby „I” zmieniało się średnio o 0,2 mA) mierzymy „I” oraz „U” przy każdej wartości „R”, wyniki notujemy w poniższej tabeli. Przyrządy pomiarowe (amperomierz i woltomierz) ustawiamy na pomiar prądu/napięcia stałego DC, lub „-”.

Wyniki pomiarów.

Tabela 2

r [m]		r [m]		r [m]		r [m]		r [m]	
I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	I [A]	U [V]

3. Dla każdej z co najmniej pięciu wybranych przez nas odległości panelu fotowoltaicznego od źródła światła przy rozwartym obwodzie obciążenia (w takiej sytuacji opór „R” jest maksymalny a I = 0) zmierzyć napięcie otwartego obwodu „U_{oc}” (aby uzyskać otwarty obwód obciążenia należy rozłączyć jeden z przewodów podłączonych do potencjometru).

4. Dla każdej z co najmniej pięciu wybranych przez nas odległości panelu fotowoltaicznego od źródła światła zmierzyć prąd zwarcia „I_{sc}” (prąd zwarcia mierzymy w sytuacji gdy do panelu fotowoltaicznego podłączony jest jedynie amperomierz „plusem” do „plusa”, „minusem” do „minusa”, dla takiego podłączenia R=0 i U=0).
5. Dla każdej z co najmniej pięciu wybranych przez nas odległości panelu fotowoltaicznego od źródła światła sporządzić wykres I(U) (poszczególne krzywe przedstawić w jednym układzie współrzędnych), znaleźć punkty mocy maksymalnej P_M = U_MI_M.
6. Dla każdej z co najmniej pięciu wybranych przez nas odległości panelu fotowoltaicznego od źródła światła wyznaczyć maksymalną sprawność ogniw korzystając ze wzoru:

$$a. \eta = \frac{U_M I_M}{E * S} 100\%$$

S - powierzchnia panelu fotowoltaicznego.

7. Na podstawie pomiarów „I” i „U” przedstawionych w tabeli, obliczyć moc „P” i rezystancję obciążenia „R”, korzystając ze wzorów:

$$P = I * U, \quad R = \frac{U}{I}$$

8. Uzyskane wyniki przedstawić w tabeli i na wspólnym wykresie w postaci krzywej P(R).

Wymagania:

1. Światło (strumień świetlny, natężenie promieniowania świetlnego, jednostki świetlne)
2. Charakterystyka promieniowania słonecznego (widmo słoneczne)
3. Pasmowa teoria ciała stałego (rozszczepienie poziomów energetycznych w ciele stałym, model pasmowy przewodnika, półprzewodnika i izolatora)
4. Złącze p-n
5. Zjawisko fotowoltaiczne
6. Efekt Dembera
7. Budowa i zasada działania baterii słonecznych (charakterystyka prądowo-napięciowa baterii, punkt mocy maksymalnej, prąd zwarcia, napięcie otwartego obwodu)

Literatura:

- [1]. Witold M. Lewandowski - Proekologiczne odnawialne źródła energii - Wydanie trzecie zmienione - WNT - Warszawa 2001, 2006
- [2]. Egbert Boeker, Rienk van Grondelle - Fizyka środowiska - PWN - Warszawa 2002
- [3] Joseph J. Loferski - Zjawisko fotowoltaiczne i szerokie wykorzystanie energii

słonecznej - Postępy Fizyki - Tom 26 - Zeszyt 5 - 1975

[4] Henryk Rzewuski - Baterie słoneczne - Postępy Fizyki - Tom 32 - Zeszyt 5-1981

[5] P. S. Kiriejew - Fizyka półprzewodników - PWN - Warszawa

[6] J. Chabłowski, W. Skulimowski - Elektronika w pytaniach i odpowiedziach - WNT –
Warszawa 1978