

INSTYTUT FIZYKI

**WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI
I TECHNOLOGII MATERIAŁÓW
POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA**



**PRACOWNIA
ELEKTRYCZNOŚCI I MAGNETYZMU**



ĆWICZENIE NR E-19

**WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYKI
PRĄDOWO-NAPIĘCIOWEJ,
MOCY MAKSYMALNEJ I SPRAWNOŚCI
MODUŁU OGNIWA SŁONECZNEGO**

I. Zagadnienia do przestudiowania

1. Półprzewodniki. Energetyczny model pasmowy półprzewodnika.
2. Efekt fotowoltaiczny w złączu p – n, ogniwo słoneczne.
3. Charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa słonecznego.
4. Moc i sprawność ogniwa słonecznego, współczynnik wypełnienia FF.

II. Wprowadzenie teoretyczne

1. Półprzewodnik typu p i typu n. Energetyczny model pasmowy półprzewodnika.

W ogniwach słonecznych wykorzystuje się tzw. *zjawisko fotowoltaiczne*, polegające na bezpośredniej przemianie energii fotonów promieniowania elektromagnetycznego w energię elektryczną. Materiałami, z których wykonuje się ogniwa słoneczne są półprzewodniki krystaliczne, polikrystaliczne lub amorficzne. Często stosuje się krzem (Si). Dzięki regularnej lub quasi-regularnej budowie sieci krystalicznej (półprzewodniki krystaliczne i polikrystaliczne), mamy do czynienia z pasmową strukturą energetyczną. Z punktu widzenia własności fotoelektrycznych, spośród dozwolonych pasm energii elektronu, istotną rolę odgrywają pasma walencyjne i przewodnictwa, oddzielone przerwą energetyczną o szerokości E_g . W przypadku krzemu $E_g = 1,12$ eV. Rozmieszczenie elektronów na poszczególnych poziomach energetycznych określone jest przez funkcję Fermiego- Diraca:

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{k_B T} + 1}} \quad (1)$$

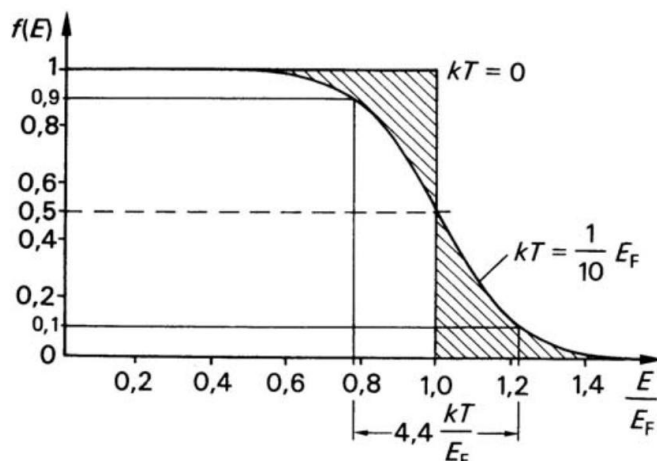
gdzie: $f(E)$ jest prawdopodobieństwem obsadzenia stanu o energii E , T – temperaturą bezwzględną, k_B - stałą Boltzmana. Poziom E_F jest tzw. *Poziomem Fermiego*, dla którego $f(E_F) = 1/2$.

W temperaturze $T = 0$ wszystkie stany energetyczne pasma walencyjnego o energii $E < E_F$ są zajęte; dla wszystkich stanów wyższych niż E_F otrzymamy $f = 0$, a więc wszystkie stany pasma przewodnictwa są wolne. W temperaturze pokojowej $k_B T \approx 0,025$ eV co oznacza, że istnieje niezerowe prawdopodobieństwo zajęcia przez elektrony poziomów energetycznych w paśmie przewodnictwa – rys. 1. Ponieważ energie w paśmie przewodnictwa spełniają zależność $E - E_F \gg k_B T$, rozkład (1) redukuje się do postaci

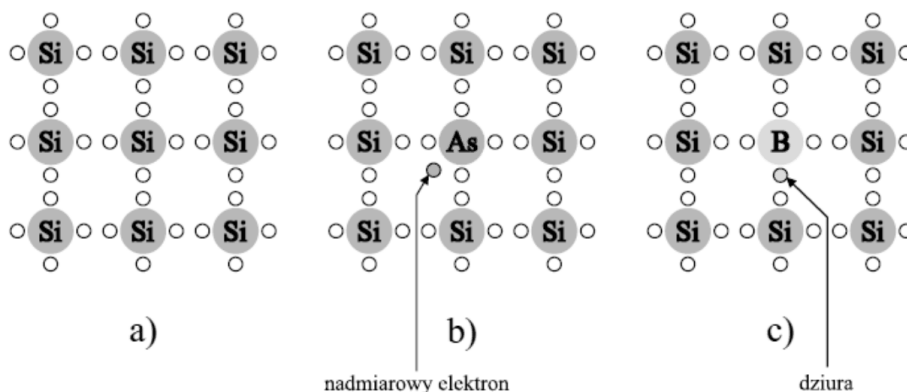
$$f(E) \approx e^{-\frac{E-E_F}{k_B T}} \quad (2)$$

Ćwiczenie E-19: Wyznaczanie charakterystyki prądowo-napięciowej, mocy maksymalnej i sprawności modułu ogniwa słonecznego

analogicznej do rozkładu Boltzmanna. Wskutek ruchów termicznych niektóre elektrony zyskują energię wystarczającą do pokonania przerwy energetycznej i stają się swobodne. Każdy ze swobodnych elektronów pozostawia po sobie w paśmie walencyjnym *dziurę*, która może zostać zajęta przez inny elektron walencyjny, a jego miejsce – jeszcze inny. Dziura porusza się więc swobodnie, zachowując się jak elektron o ładunku dodatnim. Mamy zatem do czynienia z *parami* elektron - dziura, przy czym ich koncentracja jest rzędu 10^{12} razy mniejsza niż elektronów walencyjnych – jest więc bardzo mała.



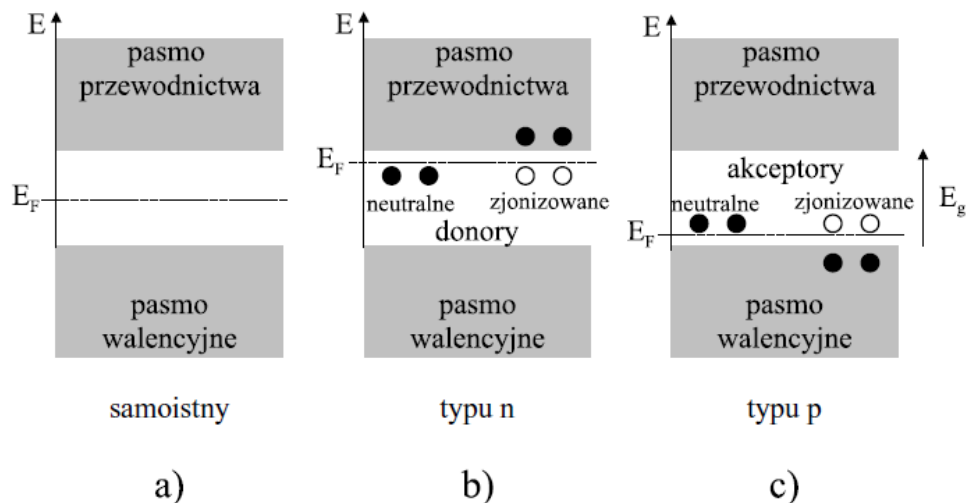
Rysunek 1. Funkcja rozkładu Fermiego - Diraca dla temperatury $T = 0K$ i temperatury $T > 0K$. Zakreskowano przedział energii, w którym prawdopodobieństwo obsadzenia stanów obniża się z 0.9 do 0.1



Rysunek 2. Dwuwymiarowa struktura kryształu krzemu: (a) bez domieszek, (b) z atomem donorowym, (c) z atomem akceptorowym

W widocznym na rysunku 2(a) szkicu fragmentu kryształu Si (zwanego półprzewodnikiem *samoistnym*) widzimy cztery elektrony walencyjne każdego atomu, tworzącymi kowalencyjne wiązania z pozostałymi atomami (w trzech wymiarach kryształ ma strukturę tetraedryczną – każdy atom znajduje się w tej samej odległości od atomów sąsiednich). Na rysunku 2(b) zamiast jednego atomu Si w strukturze umieszczony jest atom o pięciu elektronach walencyjnych (np. antymon Sb, fosfor P czy arsen As). W rezultacie powstał jeden nadmiarowy elektron.

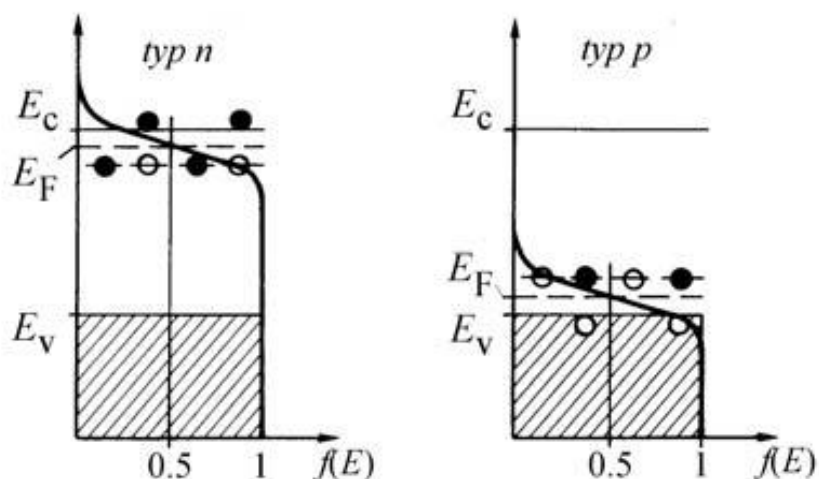
Ćwiczenie E-19: Wyznaczanie charakterystyki prądowo-napięciowej, mocy maksymalnej i sprawności modułu ogniwa słonecznego



Rysunek 3. Rozmieszczenie poziomów Fermiego w różnych typach półprzewodników. Energia mierzona jest od wierzchołka pasma walencyjnego

Nadmiarowy elektron jest bardzo słabo związany (jego energia wiązania wynosi ok. 0,05 eV), więc może poruszać się prawie swobodnie w objętości kryształu – atom z pięcioma elektronami walencyjnymi nazywa się *donorem*.

Jeżeli atom krzemu zastąpić atomem z trzema elektronami walencyjnymi (np. boru B, glinu Al, galu Ga), powstanie struktura z niedoborem jednego elektronu – rys. 2(c). Z kolei dziurę może wypełnić dowolny elektron walencyjny, co prowadzi do pozornego, swobodnego jej ruchu (atom z trzema elektronami walencyjnymi nazywa się *akceptorem*). Krzem można domieszkować donorem bądź akceptorem, uzyskując półprzewodnik *typu n* lub półprzewodnik *typu p*. Przewodnictwo w półprzewodniku *typu n* jest więc elektronowe, w półprzewodniku *typu p* – dziurowe (dominujące nośniki ładunku nazywamy nośnikami *większościowymi*). Wskutek wzbudzenia termicznego w półprzewodnikach obu typów występują również małe koncentracje nośniki o przeciwnych znakach, zwanych *mniejszościowymi*. W rezultacie domieszkowania następują przesunięcia poziomu Fermiego. W półprzewodniku samoistnym leży on w środku przerwy energetycznej. W półprzewodniku *typu n* poziom Fermiego znajduje się poniżej poziomu donorowego, w półprzewodniku *typu p* – powyżej poziomu akceptorowego (rys. 3(a) - (c)). W półprzewodnikach domieszkowanych w temperaturze zera bezwzględnej wszystkie donory oraz akceptory są neutralne. Opór właściwy półprzewodników – podobnie jak półprzewodnika samoistnego – jest wówczas nieskończenie wielki. Wraz ze wzrostem temperatury następuje ich jonizacja, co powoduje gwałtowny wzrost gęstości nośników przewodnictwa. Gęstości te są – jak w przypadku półprzewodnika samoistnego – opisane funkcją rozkładu Fermiego - Diraca (rys. 4).



Rysunek 4. Rozkłady Fermiego - Diraca w półprzewodnikach typu n i p w niskich temperaturach

2. Efekt fotowoltaiczny w złączu p-n, ogniwo słoneczne.

Ogniwo fotowoltaiczne jest to przyrząd półprzewodnikowy, którego zasada działania jest oparta na wykorzystaniu złącza p-n.

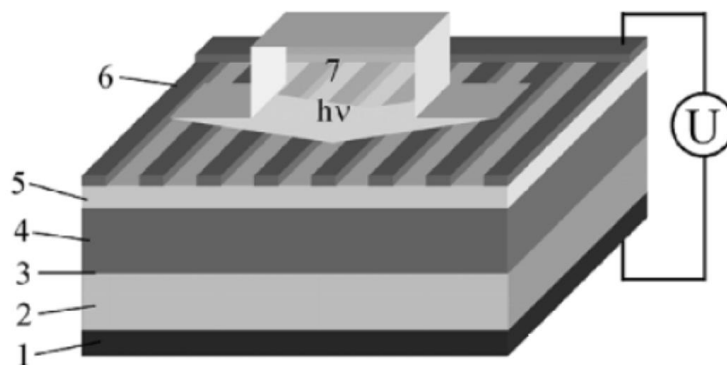
Schemat budowy pojedynczego ogniwa pokazano na rys. 5. Składa się ono ze złącza p-n, dwóch elektrod oraz warstwy przeciwo odbiciowej. Elektroda metalowa, która jest oświetlana ma odpowiedni kształt, tak aby powierzchnia czynna ogniwa była jak największa.

Złącze p-n powstaje poprzez zetknięcie półprzewodnika typu p z półprzewodnikiem typu n. 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 podążają w kierunku półprzewodnika typu p, a elektrony w kierunku półprzewodnika typu n. Schemat działania baterii słonecznej przedstawiono na rys. 6.

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 V_{OC} (ang. *open circuit voltage*).

Ćwiczenie E-19: Wyznaczanie charakterystyki prądowo-napięciowej, mocy maksymalnej i sprawności modułu ogniwa słonecznego

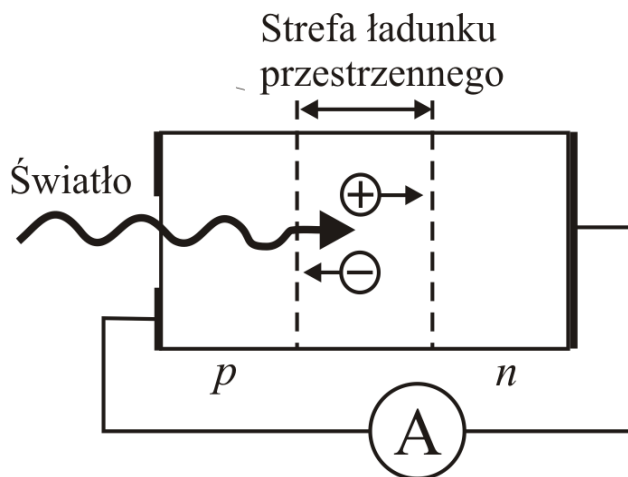


Rysunek 5. Schemat ogniwa słonecznego: 1 – nieoświetlona elektroda; 2 – półprzewodnik typu n; 3 – złącze p-n; 4 – półprzewodnik typu p; 5 – warstwa przeciwodblasiowa; 6 – oświetlana elektroda; 7 – fotony o energii $h\nu$ padające na ogniwo.

Gdy elektrody ogniwa są zwarte przez amperomierz, tak jak na Rys. 6, wówczas napięcie jest równe zero ($V = 0 \text{ V}$) i przez ogniwo przepływa prąd zwarcia I_{sc} (ang. *short circuit current*) generowany światłem. Gęstości prądu zwarcia jest zdefiniowana wzorem:

$$J_{sc} = \frac{I_{sc}}{A} \quad (3)$$

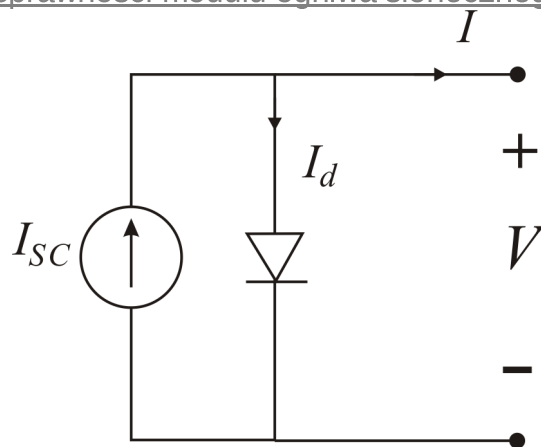
gdzie A jest powierzchnią aktywną fotoogniwa. Prąd ten jest zależny od parametrów materiałowych półprzewodnika i konstrukcji ogniwa.



Rysunek 6. Schemat działania złącza p-n jako fotoogniwa.

Natomiast gdy elektrody fotoogniwa są rozwarne ładunek równoważny ładunkowi mniejszościowych nośników ładunku, które przepłyną na drugą stronę złącza i zrekombinują z nośnikami przeciwnego znaku, spowoduje powstanie różnicy potencjałów zwanej napięciem otwartego obwodu V_{oc} (ang. *open circuit voltage*).

Ćwiczenie E-19: Wyznaczanie charakterystyki prądowo-napięciowej, mocy maksymalnej i sprawności modułu ogniwa słonecznego



Rysunek 7. Układ zastępczy fotoogniwa.

W sytuacji, gdy oświetlenie produkuje dodatkowe nośniki, ale nie zmienia nic w mechanizmie transportu, charakterystyka prądowo-napięciowa oświetlonego złącza ma postać (zasada superpozycji):

$$I = I_{sc} - I_d \quad (4)$$

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{eV}{Ak_B T}} - 1 \right) \quad (5)$$

gdzie: A – współczynnik idealności złącza i I_d – prąd płynący przez diodę I_0 – prąd nasycenia (zależą od dominującego mechanizmu transportu w złączu).

Z tej zależności wynika relacja między napięciem otwartego obwodu a prądem zawarcia, gdyż dla $I=0$, $V=V_{oc}$ i stąd:

$$V_{oc} = \frac{Ak_B T}{e} \ln \left(1 + \frac{I_{sc}}{I_0} \right) \cong \frac{Ak_B T}{e} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} \right) \quad (6)$$

Ze wzrostem I_{sc} wzrasta SEM (wg prawa logarytmicznego). Jednocześnie maleje wysokość bariery potencjału w złączu $p-n$. Kiedy bariera jest rzędu $k_B T$, wzrost SEM ustaje. Wynika stąd, że SEM nie może przewyższać stykowej różnicy potencjałów pomiędzy obszarami p i n .

Dla najkorzystniejszego przypadku (bez oświetlenia) poziom Fermiego położony jest w pobliżu krawędzi pasm energetycznych:

$$V_{0,max} \approx E_g/e,$$

Np. german Ge: $V_{0,max} \approx 0,6$ V, krzem Si: $V_{0,max} \approx 1$ V

Ćwiczenie E-19: Wyznaczanie charakterystyki prądowo-napięciowej, mocy maksymalnej i sprawności modułu ogniwa słonecznego

Absorpcja fotonów w ogniwach słonecznych wywołuje przejścia elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa (absorpcja podstawowa). Energia E_{ph} zaabsorbowanego fotonu musi być większa od przerwy energetycznej E_g półprzewodnika:

$$E_{ph} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} > E_g \quad (7)$$

gdzie: ν jest częstością drgań fali elektro-magnetycznej, λ długością fali świetlnej, a c jest prędkość światła w próżni.

Po przejściu elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa powstaje para nośników ładunku: elektron i dziura.

3. Charakterystyka prądowo-napięciowa.

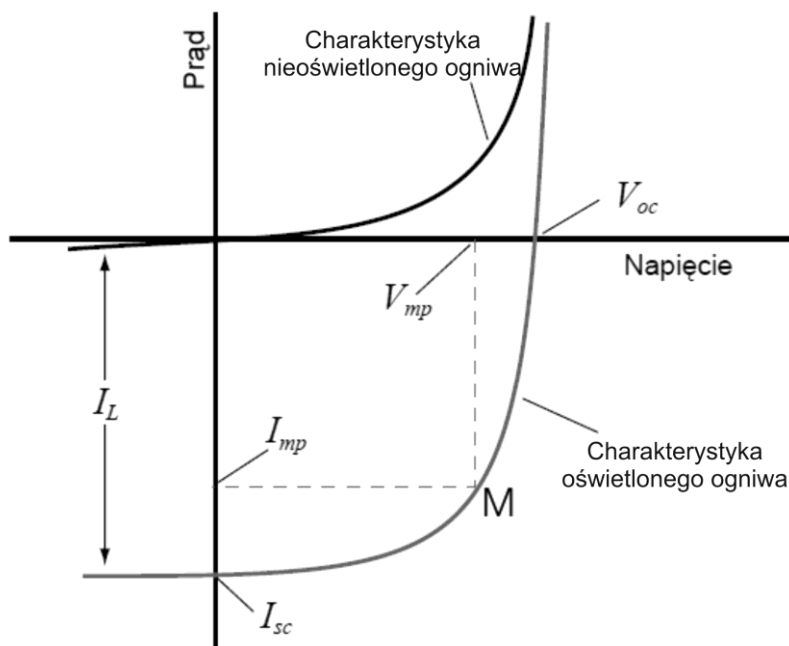
Określenie podstawowych parametrów ogniwa fotowoltaicznego uzyskuje się poprzez badanie charakterystyki prądowo-napięciowej. O właściwościach fotowoltaicznych ogniwa decyduje kształt charakterystyki prądowo-napięciowej $I(V)$ w IV ćwiartce układu współrzędnych.

Charakterystyka prądowo-napięciowa dla idealnego fotoogniwa powinna mieć kształt prostokąta o bokach I_{sc} i V_{oc} . W praktyce nie spotykamy idealnych fotoogniw. Maksymalna moc rzeczywistego ogniwa jest zawsze mniejsza od mocy idealnego ogniwa $P_{id}=I_{sc}V_{oc}$, gdyż praktycznie nigdy nie można osiągnąć charakterystyki prostokątnej. Współrzędne punktu M (rys. 9) pozwalają wyznaczyć moc maksymalną:

$$\text{Moc maksymalna. ogniwa: } P_{\max} = I_{mp} V_{mp} \quad (8)$$

$$\text{Moc idealna: } P_{id} = I_{sc} V_{oc} \quad (9)$$

I_{sc} – prąd zwarciaowy (**SC** – *short circuit current*), V_{oc} – napięcie otwartego obwodu (**OC** – *open circuit voltage*)



Rysunek 8. Jasna i ciemna charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa i parametry określające wydajność ogniwa.

4. Moc i sprawność ogniwa słonecznego, współczynnik wypełnienia FF.

Od wartości parametrów I_{sc} i V_{oc} zależy wydajność ogniwa. Zauważmy bowiem, że wydajność konwersji fotowoltaicznej określa stosunek maksymalnej mocy wytwarzanej w ogniwie do mocy promieniowania padającego na to ogniwo:

$$\eta = \frac{I_{mp} V_{mp}}{J \cdot S} \quad (10)$$

gdzie: η – sprawność ogniwa, J – natężenie promieniowania padającego na ogniwo [W/m^2],
 S – pole powierzchni ogniwa

Przyjęto, że maksymalną moc wyraża się poprzez tzw. współczynnik wypełnienia FF (rys. 8)

$$FF = \frac{I_{mp} V_{mp}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (11)$$

skąd wynika, że:

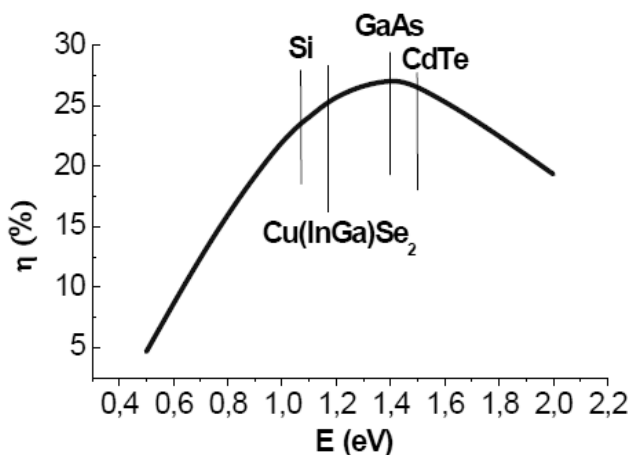
$$\eta = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{J \cdot S} \quad (12)$$

Wyrażenie (12) określa nominalną wydajność konwersji ogniwa.

Najważniejsze czynniki, które wpływają na wydajność ogniwa. Wartość prądu zwarcia zależy od tego ile fotonów zostanie zaabsorbowanych w ogniwie, czyli od natężenia światła, a także od wartości przerwy energetycznej materiału. Zauważmy, że im mniejsza jest przerwa energetyczna, tym więcej fotonów ma szansę wytworzyć pary elektron-dziura, więc I_{sc} rośnie,

Ćwiczenie E-19: Wyznaczanie charakterystyki prądowo-napięciowej, mocy maksymalnej i sprawności modułu ogniwa słonecznego

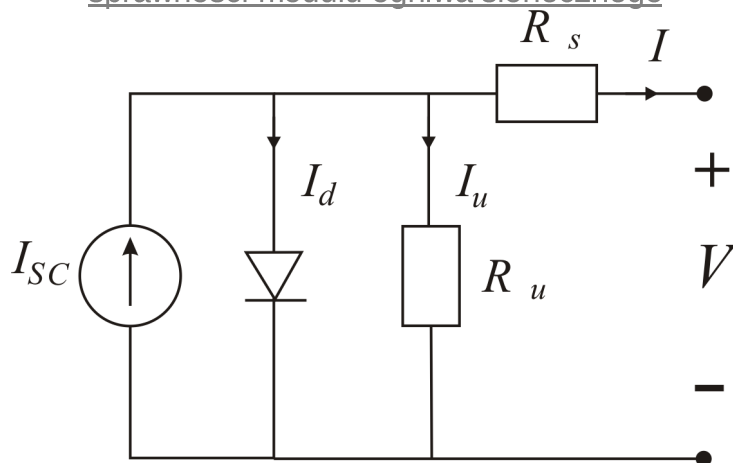
gdy E_g maleje. Z drugiej strony, V_{oc} nie może być wyższe niż bariera na złączu, a więc jego maksymalna wartość jest ograniczona wartością przerwy energetycznej materiału absorbującego światło. Wynika stąd optymalna wartość przerwy energetycznej absorbera równa ok. 1,5 eV. Na rys. 9. przedstawiono teoretycznie obliczoną zależność maksymalnej wydajności ogniwa od przerwy absorbera, otrzymaną przy założeniu, że jedynym źródłem strat jest rekombinacja radiacyjna.



Rysunek 9. Maksymalna wydajność jednozłączowego ogniwa w funkcji E_g absorbera. Zaznaczono wartości przerwy różnych materiałów fotowoltaicznych

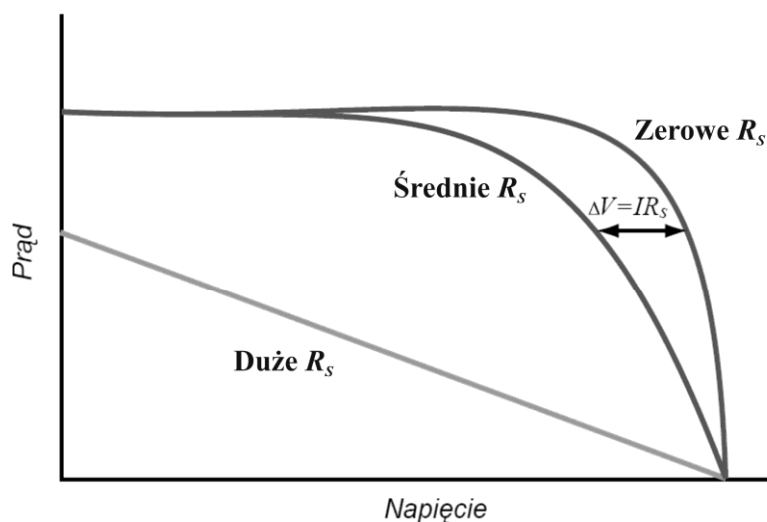
O tym, ile swobodnych nośników na jeden foton dopływa do zewnętrznego obwodu mówi spektralny rozkład wydajności kwantowej fotogeneracji. Można ten rozkład określić, jako stosunek ilości padających fotonów o długości fali z określonego przedziału do wytworzonych przez nie swobodnych nośników, którym uda się dotrzeć do obwodu zewnętrznego (ang. *external quantum efficiency*) lub jakiej części zaabsorbowanych fotonów się to uda (ang. *internal quantum efficiency*). Różnią się te dwa rozkłady ilością fotonów, które odbijają się od powierzchni ogniwa i dlatego nie ulega absorpcji. Ogniwo z reguły pokrywane jest powłoką antyrefleksyjną, aby zminimalizować straty na odbicie ograniczając je do ok. 5%. Analizując spektralną wydajność kwantową, możemy wyciągnąć wnioski, czy straty fotoprądu dotyczą rekombinacji w objętości absorbera, czy w innych miejscach struktury. Dla struktur fotowoltaicznych opartych o mono i polikrystaliczne półprzewodniki nieorganiczne wydajność kwantowa sięga 90-98 %. Współczynnik wypełnienia FF jest miarą tego, jak bardzo charakterystyka prądowo-napięciowa złącza różni się od prostokąta wyznaczonego przez I_{sc} i V_{oc} . Na jego wpływ, oprócz kształtu charakterystyki $I-V$ wynikającego ze szczegółowych własności mechanizmu transportu prądu przez złącze, ma wpływ szeregowy i równoległy opór ogniwa (patrz schemat zastępczy przedstawiony na rys. 10).

Ćwiczenie E-19: Wyznaczanie charakterystyki prądowo-napięciowej, mocy maksymalnej i sprawności modułu ogniwa słonecznego



Rysunek 10. Schemat zastępczy rzeczywistego ogniwa.

Opór szeregowy ma szczególnie negatywny wpływ na FF (rys. 10), a składa się nań m. in. opór omowy obszaru neutralnego absorbera, opór elektrody zbierającej (emiter w homozłączu, „okno” w heterozłączu), opór kontaktów i doprowadzeń. Optymalizacja poziomu domieszkowania oraz powierzchni i własności kontaktów elektrycznych prowadząca do minimalizacji R_s jest ważnym elementem projektowania struktury fotowoltaicznej. Opór równoległy R_u związany jest z upływnością po granicach ziaren, krawędziach, itp. i dla niewadliwej struktury nie ma praktycznego wpływu na FF .



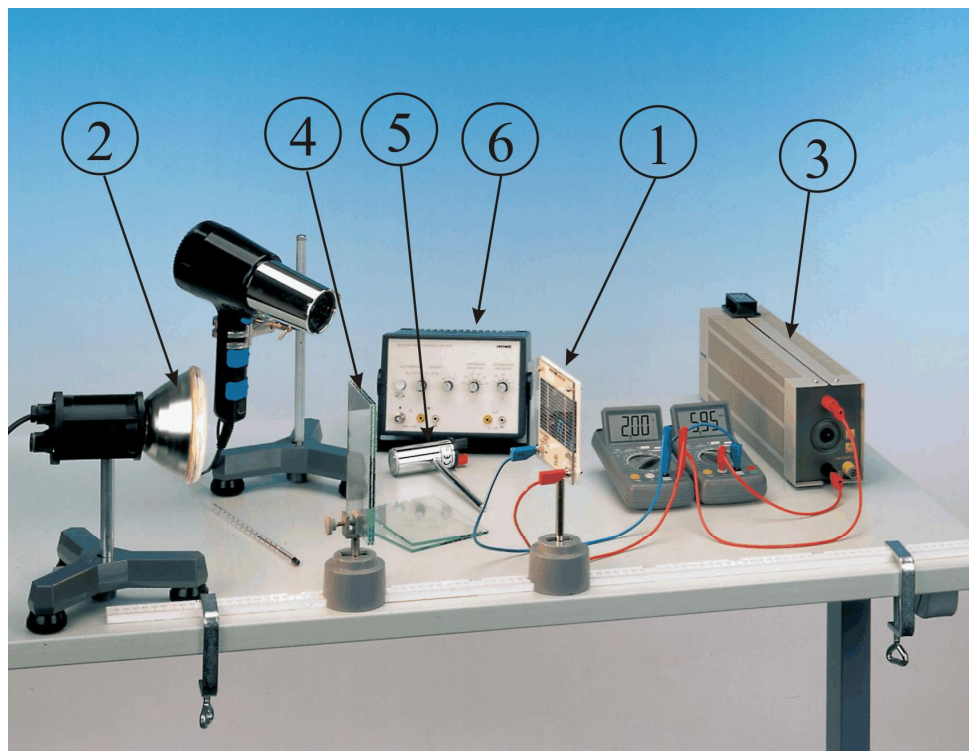
Rysunek 11. Wpływ oporu szeregowego na FF .

III. Cel ćwiczenia

Wyznaczanie punktu maksymalnej mocy na charakterystyce prądowo-napięciowej ogniwa (modułu) słonecznego i sprawności konwersji energii padającego promieniowania w warunkach zmiennego natężenia oświetlenia.

IV. Zestaw pomiarowy

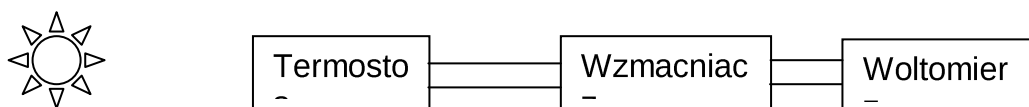
Aparaturę używaną w doświadczeniu przedstawia rys. 1. Bateria słoneczna (1), składająca się z czterech jednakowych ogniw połączonych szeregowo - równoległe, oświetlana jest lampą żarową (2). Szeregowo połączony rezystor nastawny (3) suwakowy stanowi regulowane obciążenie baterii. Płytki szklane (4), wzmacniacz sygnału (6), podawanego z termostosu (5) do pomiaru natężenia promieniowania elektromagnetycznego. Pomiar natężenia prądu i napięcia odbywa się za pomocą cyfrowych multimetrów.



Rysunek 12. Aparatura do badania baterii słonecznej: bateria słoneczna(1), lampa (źródło światła) (2), rezystor suwakowy (3), płytki szklane (4), termostot do pomiaru natężenia promieniowania elektromagnetycznego(5),wzmacniacz sygnału (6)

V. Przebieg ćwiczenia

1. Wyznaczanie natężenia promieniowania lampy oświetlającej baterie:
 - a) Podłączyć układ według schematu rys.13.



Rysunek 13. Schemat układu pomiarowego do wyznaczenia intensywności promieniowania

Ćwiczenie E-19: Wyznaczanie charakterystyki prądowo-napięciowej, mocy maksymalnej i sprawności modułu ogniwa słonecznego

Tabela 2.

Lp.	L = 60 cm $U_{oc} = \dots\dots\dots$ $I_{sc} = \dots\dots\dots$			L = 90 cm $U_{oc} = \dots\dots\dots$ $I_{sc} = \dots\dots\dots$			L = 130 cm $U_{oc} = \dots\dots\dots$ $I_{sc} = \dots\dots\dots$		
	I[mA]	U[V]	P[mW]	I[mA]	U[V]	P[mW]	I[mA]	U[V]	P[mW]
1									
2									
3									
4									
⋮									
n									

3. Wyznaczanie krzywych charakterystyk $I=f(U)$ modułu fotowoltaicznego w przypadku przysłonięcia baterii jedną i dwoma szklanymi płytkami. Pomiar przeprowadzić w odległości 90 cm od źródła światła i powtórzyć polecenia z punktu 2 b), d), e), f). Wyniki zanotować w Tabeli 3.

Tabela 3.

Lp.	Jedna płytka szklana $U_{oc} = \dots\dots\dots$ $I_{sc} = \dots\dots\dots$			Dwie płytki szklane $U_{oc} = \dots\dots\dots$ $I_{sc} = \dots\dots\dots$		
	I[mA]	U[V]	P[mW]	I[mA]	U[V]	P[mW]
1						
2						
3						
4						
⋮						
n						

VI. Opracowanie wyników

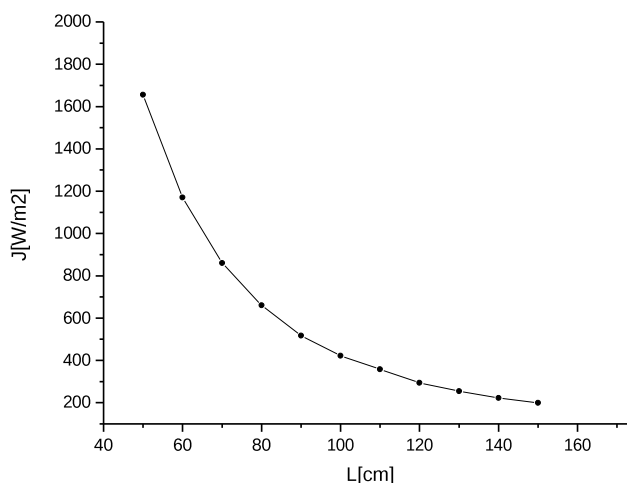
1. Sporządzenie wykresu natężenia promieniowania lampy w funkcji odległości (Tabela 1). Natężenie promieniowania obliczyć korzystając z zależności:

$$J = \frac{U_t}{100 \cdot 0.16 \cdot S} \quad (13)$$

Ćwiczenie E-19: Wyznaczanie charakterystyki prądowo-napięciowej, mocy maksymalnej i sprawności modułu ogniwa słonecznego

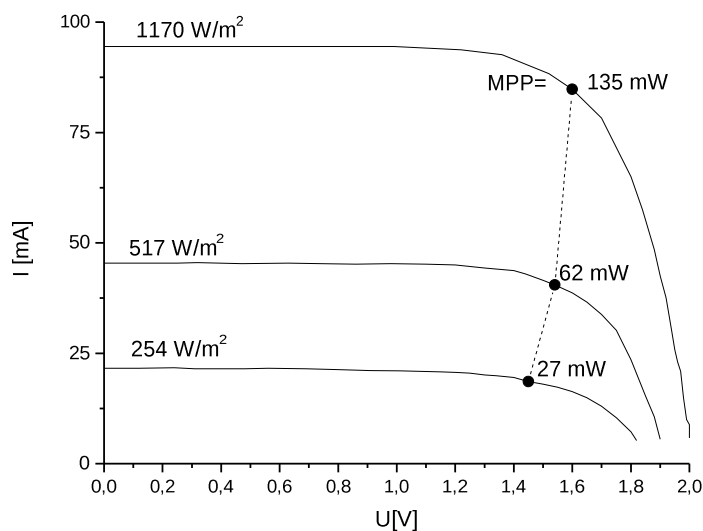
gdzie: U_t – napięcie termostosu,

S – pole powierzchni pomiarowej otworu termostosu 0.0000785 m^2



Rysunek 15. Przykładowo sporządzony wykres natężenia promieniowania elektromagnetycznego w zależności od odległości od źródła

2. We wspólnym układzie współrzędnych sporządzić wykresy funkcji $I(U)$ dla różnych odległości żarówka – bateria (Tabela 2). Sporządzić również charakterystyki $I(U)$ dla modułu przesłoniętego płytkami szklanymi (Tabela 3).

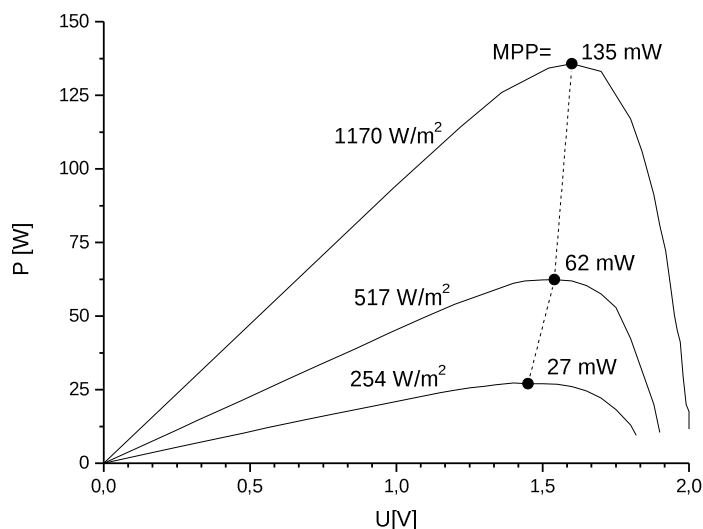


Rysunek 16. Przykładowe charakterystyki $I(U)$ ogniwa fotowoltaicznego z wyznaczonymi punktami mocy maksymalnej.

3. Sporządzić wykresy funkcji $P(U)$ i zaznaczyć położenia MPP (punkt mocy maksymalnej). Dla baterii nie przesłoniętej (Tabela 2), oraz przesłoniętej (Tabela 3)

$$P = I \cdot U \quad (14)$$

Ćwiczenie E-19: Wyznaczanie charakterystyki prądowo-napięciowej, mocy maksymalnej i sprawności modułu ogniwa słonecznego



Rysunek 17. Przykładowe charakterystyki P(U) modułu fotowoltaicznego wraz z zaznaczonymi MPP.

4. Wyznaczyć maksymalną sprawność ogniwa na podstawie:

$$\eta = \frac{U_m \cdot I_m}{J \cdot S} 100\% \quad (15)$$

gdzie:

I_m , U_m to współrzędne odpowiadające mocy maksymalnej modułu fotowoltaicznego,
 S – powierzchnia modułu ($S=4 \times 2.5 \times 5$ [cm²]),
 J – natężenie promieniowania [W/m²].

5. Wyznaczyć współczynnik wypełnienia charakterystyki FF:

$$FF = \frac{U_m \cdot I_m}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (16)$$

6. Na podstawie wzoru (12) policzyć nominalną wydajność konwersji modułu ogniwa.

7. Policzone parametry wpisać do Tabeli 4.

Tabela 4.

	60 cm	90 cm	130 cm	Przesłonięte płytką szklaną	
				Jedną	Dwiema
Sprawność					
Moc maksymalna					
FF (współczynnik wypełnienia)					
Nominalna wydajność konwersji					

VII. Dyskusja wyników

1. Przedyskutować i podać przyczynę uzyskanej sprawności ogniw fotowoltaicznych.
2. Przedyskutować uzyskany współczynnik wypełnienia charakterystyki FF.

Literatura

1. Klugmann E., Klugmann-Radziemska E.: Ogniwa i moduły fotowoltaiczne oraz inne niekonwencjonalne źródła energii, Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko, 2005
2. Jarzębski Z. M.: Energia słoneczna: konwersja fotowoltaiczna, PWN, W-wa 1990
3. Kaiser H.: Wykorzystanie energii słonecznej, Wydawnictwa AGH, Krakow, 1995
4. Pankove J. I.: Zjawiska optyczne w półprzewodnikach, Wydawnictwa Naukowo - Techniczne, Warszawa, 1974
5. Centrum Fotowoltaiki w Polsce - www.pv.pl
6. Lewandowski W. M.: Proekologiczne odnawialne źródła energii, WNT, 2007 (www.e-link.com.pl)
7. Kruk I., Typek J.: Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki Część II, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin
8. Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki w politechnice, praca zbiorowa pod redakcją T. Rewaja, PWN Szczecin 1978
9. Marciniak W.: Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone, WNT, W-wa 1987
10. Jarzębski Z. M.: Energia słoneczna: konwersja fotowoltaiczna, PWN, W-wa 1990
11. Pankove J. I.: Zjawiska optyczne w półprzewodnikach, Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa, 1974
12. Materiały firmy PHYWE Systeme GmbH & Co. KG.

Zasada sporządzania wykresów

Prawidłowe opracowanie wyników pomiarów wymaga wykonania odpowiedniego wykresu. Podczas robienia wykresu należy kierować się następującymi zasadami:

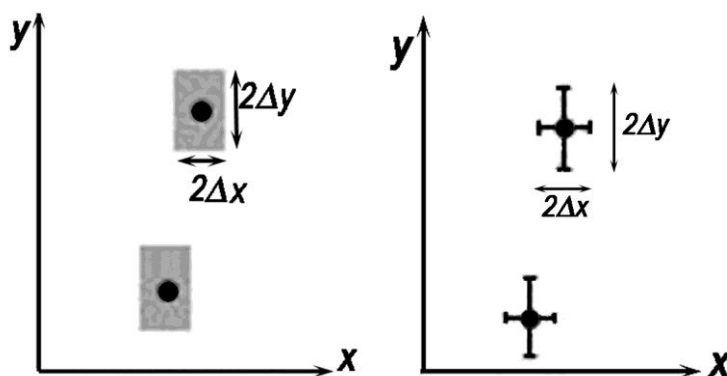
1. Wykres wykonuje się na papierze milimetrowym. Na układzie współrzędnych definiujemy liniowe osie liczbowe w przedziałach zgodnych z przedziałami zmienności wartości X i Y ; oznacza to, że na każdej z osi odkładamy tylko taki zakres zmian mierzonej wielkości fizycznej, w którym zostały wykonane pomiary. Nie ma zatem obowiązku odkładania na osiach punktów zerowych, gdy nie było w ich okolicy punktów pomiarowych (chyba, że w dalszej analizie konieczne będzie odczytanie wartości Y dla $X=0$). Skalę na osiach układu nanosimy zazwyczaj w postaci równooddalonych liczb. Ich wybór i gęstość na osi musi zapewniać jak największą prostotę i wygodę korzystania z nich.

Na osiach wykresu muszą być umieszczone odkładane wielkości fizyczne i ich jednostki lub wymiary.

2. Punkty nanosimy na wykres tak, by były wyraźnie widoczne, zaznaczamy je kółkami, trójkątami, kwadracikami itp. Na rysunku należy zaznaczyć również niepewności pomiarowe w postaci prostokątów lub odcinków.

Graficzne przedstawienie niepewności systematycznej:

Załóżmy, że wartości x i y otrzymane z pomiarów są obarczone odpowiednio niepewnościami Δx i Δy . Oznacza to, że rzeczywiste wartości tych wielkości mieszczą się w przedziałach od $x-\Delta x$ do $x+\Delta x$ oraz od $y-\Delta y$ do $y+\Delta y$. Na wykresie zależności $Y(X)$ przedziały te wyznaczają wokół punktów (x,y) prostokąty o bokach $2\Delta x$ i $2\Delta y$. Niepewności te można również zaznaczać wokół punktu pomiarowego (x,y) poprzez odcinki o długości $2\Delta x$ i $2\Delta y$ (rys.1)



Rys.1 Zaznaczanie niepewności wokół punktów pomiarowych.

Uwaga: Jeżeli wartość zmiennej X jest dokładnie znana (czyli $\Delta x=0$), to na wykresie zaznaczamy tylko niepewności na osi zmiennej zależnej (na osi y).

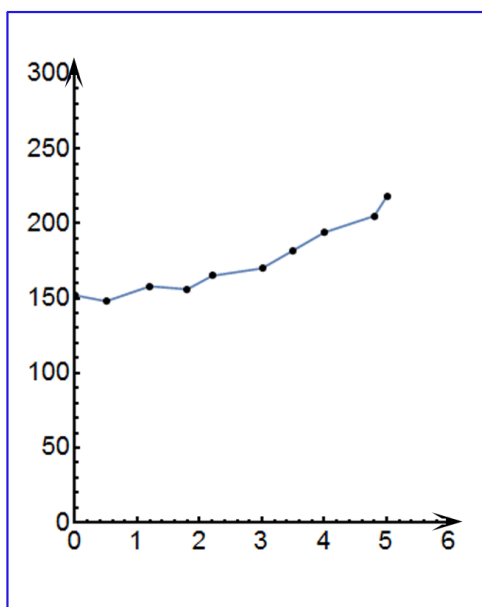
3. Rozmiar wykresu nie jest dowolny i nie powinien wynikać z tego, że dysponujemy takim, a nie innym kawałkiem papieru (na rys.2 arkusz papieru milimetrowego zaznaczony jest kolorem niebieskim). Rozmiar powinien być określony przez niepewności pomiarowe

Ćwiczenie E-19: Wyznaczanie charakterystyki prądowo-napięciowej, mocy maksymalnej i sprawności modułu ogniwa słonecznego

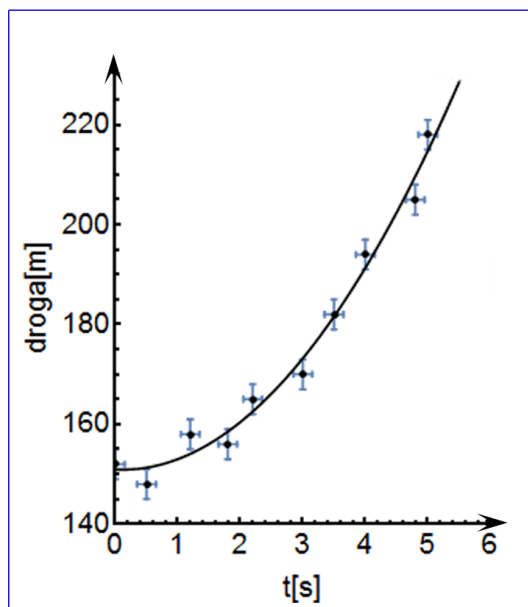
tych wielkości, które odkłada się na osiach. Niepewność ta powinna w wybranej skali być odcinkiem o łatwo zauważalnej, znaczącej długości .

- Następnie prowadzimy odpowiednią krzywą (nie może to być linia łamana!) tak, by przecinała w miarę możliwości punkty pomiarowe, ale nie należy dążyć do tego, aby przechodziła ona przez wszystkie punkty, ponieważ każdy z nich obarczony jest niepewnością. W przypadku dużych rozrzutów staramy się, by ilość punktów poniżej i powyżej krzywej była zbliżona- w ten sposób uśredniamy graficznie wyniki pomiarów. W przypadku zależności nieliniowych korzystamy z krzywików.
- Każdy rysunek powinien być podpisany. Etykieta wykresu wyjaśnia, co rysunek zawiera, co reprezentują zaznaczone krzywe.

PODSUMOWANIE:



zły wykres



dobry wykres

Rys.2