



Politechnika Łódzka

Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki

Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych
i Optoelektronicznych

Niekonwencjonalne źródła energii

Laboratorium

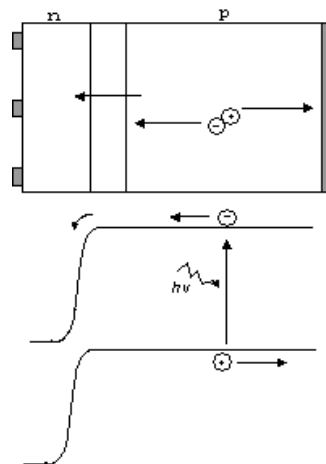
Ćwiczenie 4

Badanie różnych konfiguracji modułów fotowoltaicznych

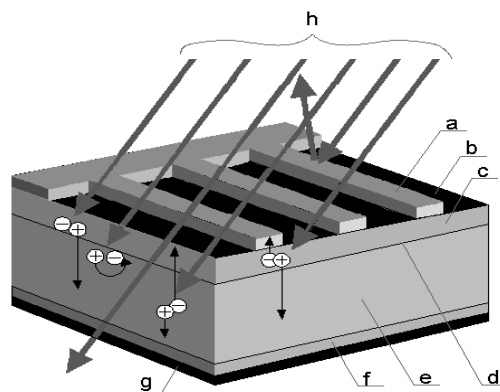
I Wstęp teoretyczny

1. Zasada działania i budowa ogniwa słonecznego

Zasada działania ogniwa słonecznego opiera się na zjawisku konwersji fotowoltaicznej, która polega na bezpośredniej zamianie energii promieniowania słonecznego w energię elektryczną. Proces ten dla ogniwa z krzemu krystalicznego opartego na złączu p-n przedstawiony jest na Rys. 1.1. Pierwszy schemat pokazuje budowę fizyczną przyrządu oraz transport elektronu i dziury w przeciwnych kierunkach, ilustrując proces konwersji fotowoltaicznej. Drugi przedstawia te same zjawiska na schemacie pasmowym półprzewodnika (poziomach energetycznych w przyrządach). Budowę krzemowego ogniwa homozłączowego opartego na złączu p - n przedstawia Rys. 1.2.



Rys. 1.1 Budowa fizyczna oraz schemat pasmowy ogniwa słonecznego wykonanego z krzemu krystalicznego.



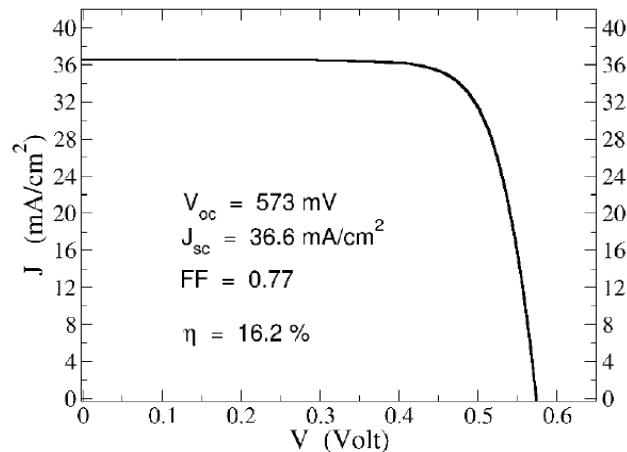
Rys. 1.2 Schemat budowy monokrystalicznego krzemowego ogniwa słonecznego: (a) kontakty przednie -, (b) teksturowana powierzchnia, (c) obszar emitera typu n, (d) złącze p - n, (e) baza typu p, (f) wbudowane pole typu p^+ BSF, (g) kontakt tylny +, (h) padające fotony.

2. Charakterystyka I-V i związane z nią parametry

Podstawową charakterystyką określającą najważniejsze parametry ogniwa słonecznego jest charakterystyka prądowo - napięciowa I-V. Z charakterystyki tej można odczytać takie wartości jak: prąd zwarcia I_{SC} i napięcie obwodu otwartego V_{OC} . Ponadto można wyznaczyć

prąd I_m i napięcie V_m , będące wartościami na charakterystyce I-V dla maksymalnej mocy ogniwa. Mając takie dane, łatwo obliczyć kolejne parametry, takie jak: współczynnik wypełnienia FF, moc maksymalną P_{max} , czy sprawność ogniwa η . Wszystkie wymienione parametry zostaną dokładnie opisane w dalszej części.

Przykładową charakterystykę prądowo - napięciową (wraz z jej parametrami) rzeczywistego ogniwa słonecznego przedstawia Rys. 2.2. Jest to ogniwo heterozłączone wykonane na podłożu krzemowym (CZ-Si) typu n.



Rys. 2.1 Charakterystyka I-V rzeczywistego ogniwa słonecznego **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**

Napięcie obwodu otwartego

Gdy kontakty przednie ogniwa nie są połączone z kontaktem tylnym, to w wyniku oświetlenia przez złącze p - n płyną prądy generacji nośników mniejszościowych. Prąd elektronowy płynie z obszaru typu p do n, natomiast prąd dziurowy z obszaru n do p. W wyniku tego, w półprzewodniku typu n gromadzą się ładunki ujemne, a w typu p dodatnie. Taki rozkład ładunku wytwarza największą różnicę potencjałów nazywaną napięciem obwodu otwartego V_{OC} (*ang. Open Circuit Voltage*).

Napięcie obwodu otwartego (dla $I = 0$, $R_0 \rightarrow \infty$) można odczytać z charakterystyki prądowo - napięciowej oświetlonego ogniwa słonecznego i jest ono jednym z ważniejszych parametrów określających ogniwo fotowoltaiczne.

Prąd zwarcia

Gdy kontakty przednie ogniwa są zwarte z kontaktem tylnym, wówczas napięcie między nimi jest równe zero i przez ogniwo przepływają tylko prądy generowane światłem: prąd elektronowy płynie od obszaru typu p do n, natomiast prąd dziurowy od n do p. W takim przypadku wartość fotoprądu I_{ph} jest największa dla danego ogniwa słonecznego w danych warunkach oświetlenia. Wielkość ta nazywana jest prądem zwarcia I_{SC} (*ang. Short Circuit Current*) i jest ona zależna od parametrów materiałowych półprzewodnika, jak również od konstrukcji ogniwa słonecznego.

Dla idealnego ogniwa słonecznego, prąd zwarcia zależny jest jedynie od przerwy energetycznej półprzewodnika, z którego jest ono wykonane, oraz od natężenia padającego promieniowania. Im węższa przerwa energetyczna półprzewodnika, tym więcej fotonów ulega absorpcji, co prowadzi do większych prądów. W przypadku gdy przerwa energetyczna

jest szeroka, prądy są mniejsze. Prąd zwarcia I_{SC} (dla $V = 0$, $R_0 = 0$) jest bardzo ważną wielkością określającą jakość ogniwa słonecznego i podobnie jak napięcie obwodu otwartego, można ją łatwo odczytać z charakterystyki prądowo - napięciowej oświetlonego ogniwa.

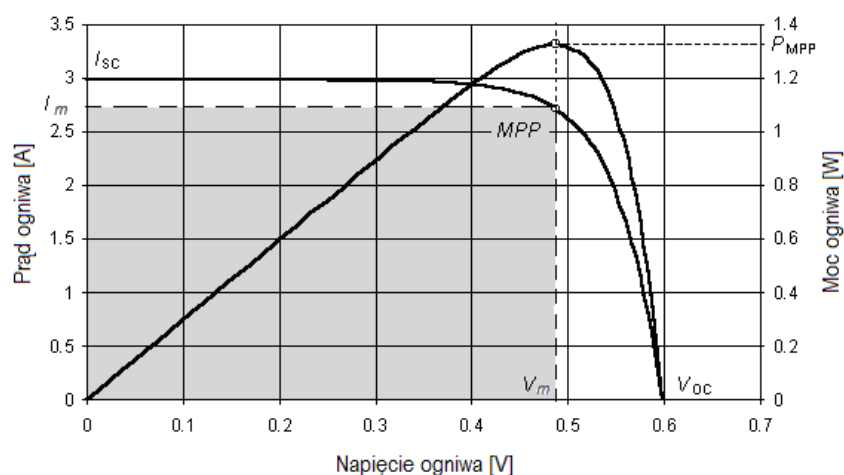
Moc maksymalna

Charakterystyka prądowo - napięciowa dla idealnego ogniwa słonecznego powinna mieć kształt prostokąta o bokach I_{SC} i V_{OC} . W praktyce oczywiście nie spotykamy idealnych ogniw. Maksymalna moc rzeczywistego ogniwa jest więc zawsze mniejsza od mocy ogniwa idealnego, równej iloczynowi napięcia obwodu otwartego V_{OC} i prądu zwarcia I_{SC} , gdyż praktycznie nigdy nie można osiągnąć charakterystyki prostokątnej. Maksymalna moc elektryczna rzeczywistego ogniwa słonecznego P_{max} wyznaczana jest z następującego wzoru:

$$P_{max} = I_m V_m$$

gdzie: I_m , V_m – odpowiednio prąd i napięcie, dla których pole prostokąta, którego jeden z wierzchołków leży na charakterystyce prądowo - napięciowej (punkt MPP), jest największe.

Krzywą mocy ogniwa przedstawia Rys. 2.3(b), moc w maksymalnym punkcie pracy MPP (ang. *Maximum Power Point*), jest równa polu zacienionego prostokąta.



Rys. 2.3 Charakterystyka: (a) prądowo- napięciowa ogniwa słonecznego, (b) mocy generowanej przez ogniwo w funkcji napięcia.

Współczynnik wypełnienia

Kolejnym istotnym parametrem opisującym jakość ogniwa fotowoltaicznego jest współczynnik wypełnienia, określany jako FF (ang. *Fill Factor*). Wartość tego współczynnika jest tym większa im kształt charakterystyki prądowo - napięciowej I-V jest bardziej zbliżony do prostokąta. Jest to stosunek powierzchni prostokąta o bokach I_m i V_m , do powierzchni prostokąta o bokach I_{SC} i V_{OC} . Może być on wyrażony w procentach lub jako wielkość bezwymiarowa, mniejsza od jedności:

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{SC} V_{OC}} \quad \text{lub} \quad FF = \frac{I_m V_m}{I_{SC} V_{OC}} \cdot 100\%$$

Sprawność

Najważniejszym parametrem określającym jakość ogniwa słonecznego jest jego sprawność. Definiowana jest ona jako stosunek mocy maksymalnej ogniwa do mocy promieniowania światła słonecznego padającego na powierzchnię czynną tego ogniwa. Sprawność oznaczana symbolem η , wyraża się wzorem:

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_0} \cdot 100\%$$

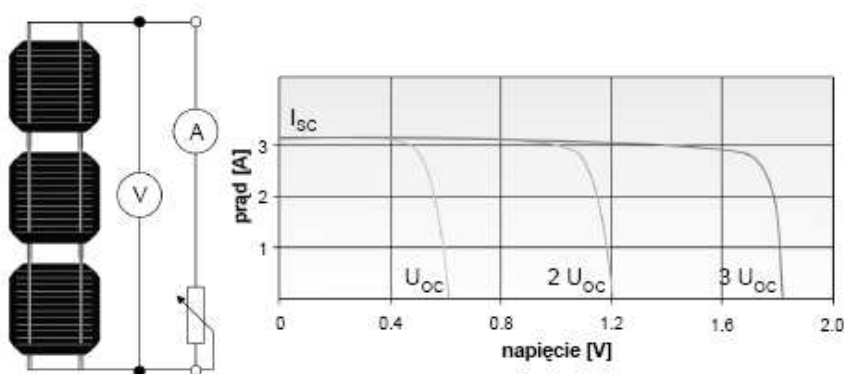
gdzie: P_0 – moc promieniowania słonecznego oświetlającego czynną powierzchnię ogniwa.

3. Sposoby łączenia ogniw w moduły

Moc maksymalna możliwa do uzyskania z pojedynczego ogniwa jest stosunkowo niewielka. Dla ogniwa krzemowego o standardowych wymiarach 125 mm x 125 mm są to wartości ok. 1,5 W – 2,6 W. W celu uzyskania większej mocy wyjściowej ogniwa słoneczne są ze sobą łączone w sposób szeregowy, równoległy lub szeregowo - równoległy.

Łączenie szeregowe

Połączenie ogniw słonecznych w szereg polega na łączeniu ze sobą przedniej elektrody (–) poprzedniego ogniwa z tylną elektrodą (+) ogniwa następnego, lub odwrotnie. Przy takim połączeniu napięcia kolejnych ogniw są sumowane. Na Rys. 3.1 przedstawione jest schematycznie połączenie szeregowe sześciu ogniw. Rys. 3.2 ilustruje natomiast trzy ogniwa połączone w szereg wraz z charakterystykami I-V oczekiwanymi z takiej konfiguracji.

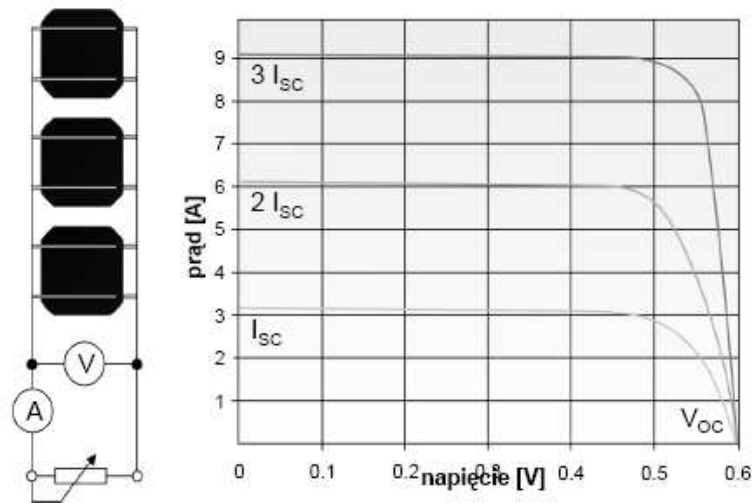


Rys. 3.1 Moduł PV składający się z trzech ogniw połączonych szeregowo oraz oczekiwana charakterystyka I-V.

Łączenie równoległe

Połączenie równoległe powstaje na skutek połączenia przedniej elektrody (–) poprzedniego ogniwa z przednią elektrodą (–) ogniwa następnego przy jednoczesnym połączeniu ze sobą tylnych elektrod (+). Prądy połączonych w ten sposób ogniw są

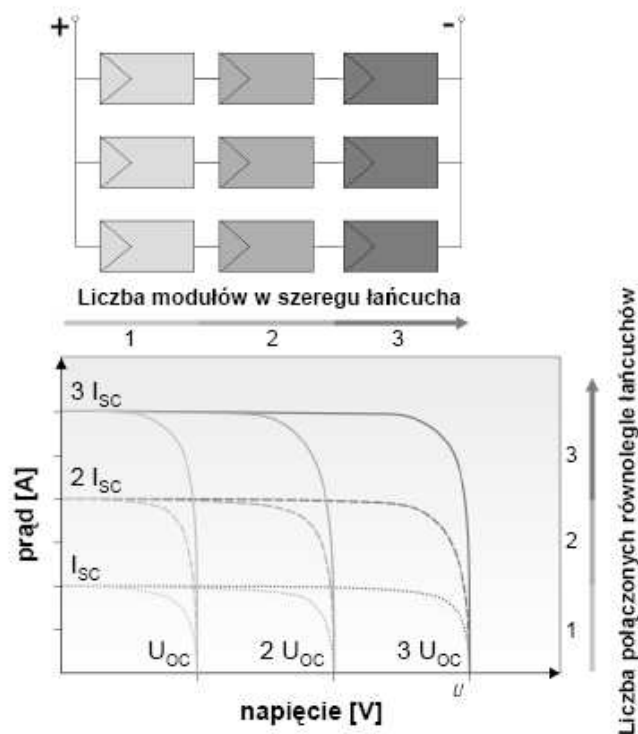
sumowane. Na Rys. 3.3 przedstawione jest schematycznie połączenie równoległe sześciu ogniw. Rys. 3.4 ilustruje natomiast trzy ogniwa połączone równoległe wraz z charakterystykami I-V oczekiwanymi z takiej konfiguracji.



Rys. 3.2 Moduł PV składający się z trzech ogniw połączonych równoległe oraz oczekiwana charakterystyka I-V.

Łączenie szeregowo - równoległe

Połączenie szeregowo - równoległe polega na jednoczesnym połączeniu ogniw szeregowo i równoległe. Poniższy Rys. 3.5 przedstawia schematycznie połączenie szeregowo - równoległe dziewięciu ogniw oraz charakterystyki I-V oczekiwane w takiej konfiguracji.

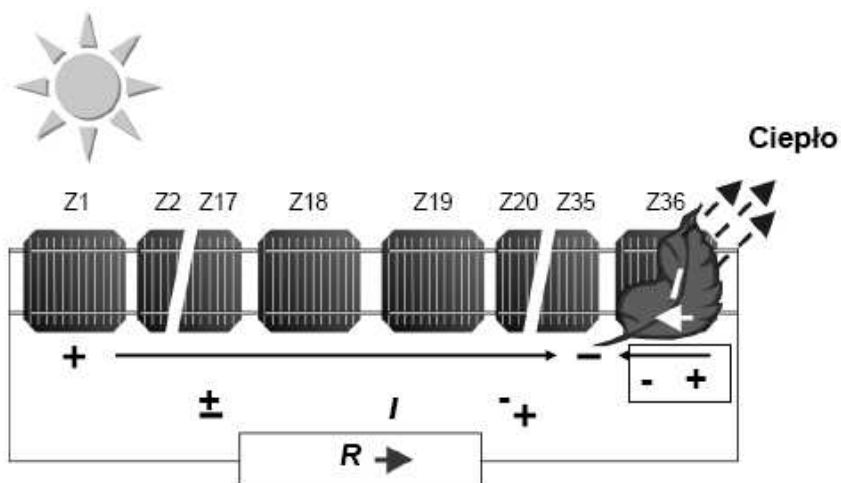


Rys. 3.3 Moduł PV składający się z dziewięciu ogniw słonecznych połączonych szeregowo - równoległe oraz oczekiwana charakterystyka I-V.

4. Częściowe zacinienie instalacji

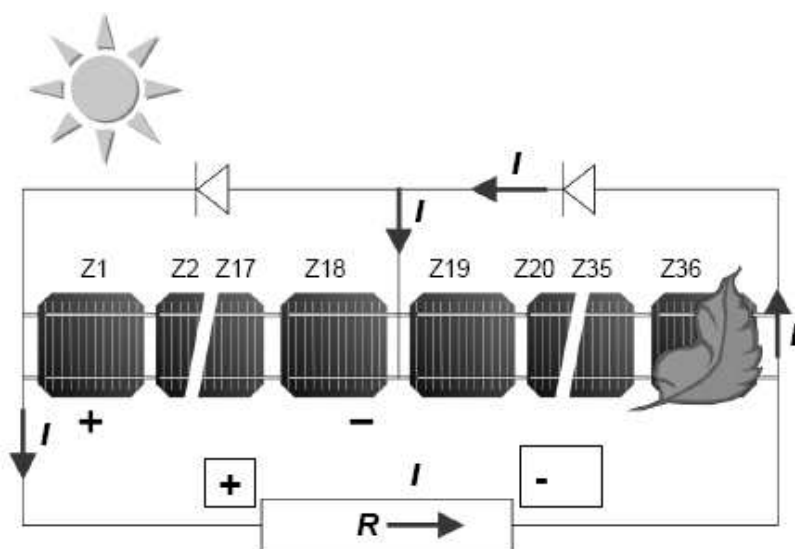
Częściowe zacinienie instalacji elektrycznej powoduje spadek energii produkowanej przez dany moduł fotowoltaiczny.

Przy połączeniu szeregowym ogniw fotowoltaicznych prąd zwarcia obwodu jest nie większy niż prąd generowany przez jedno oświetlone ogniwo Rys. 3.2. Jeżeli więc jedno z ogniw jest całkowicie zasłonięte, wówczas moc wyjściowa modułu jest równa zero. Częściowe lub całkowite przysłonięcie ogniw w module, spowodowane na przykład liśćmi, gałęziami lub śniegiem, jest częstym powodem ograniczenia mocy instalacji fotowoltaicznej. Przykład częściowego zacinienia ogniwa w szeregu przedstawia Rys. 4.1.



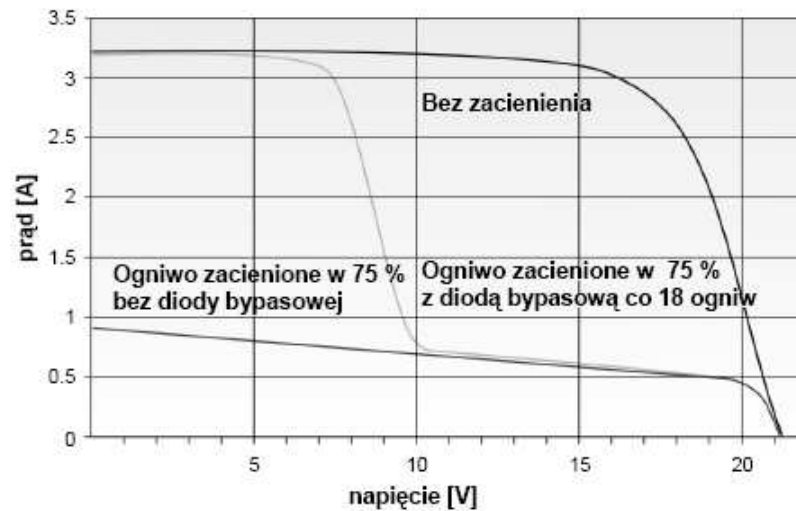
Rys. 4.1 Częściowe zacinienie instalacji w połączeniu szeregowym.

Aby ograniczyć skutki nierównomiernego oświetlenia modułów stosowane są diody bocznikujące, które w przypadku zacinienia części ogniw, chronią pozostałe elementy przed uszkodzeniami spowodowanymi ich przegrzaniem. Diody te włączone są równoległe do ogniwa lub szeregu ogniw Rys. 4.2 i przy normalnej pracy modułu są spolaryzowane w kierunku zaporowym.



Rys. 4.2 Częściowe zacinienie instalacji z diodą bocznikującą co 18 ogniw.

Poniższy wykres przedstawia charakterystykę prądowo - napięciową modułu słonecznego w trzech przypadkach: baz zaciemnienia, przy częściowym zaciemnieniu bez diody bocznikującej oraz przy częściowym zaciemnieniu z diodą co 18 ogniw.



Rys. 4.3 Wpływ zastosowania diody bocznikującej przy częściowym zaciemnieniu instalacji fotowoltaicznej **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania..**

II Cel i wykonanie ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z działaniem modułów fotowoltaicznych składających się z monokrystalicznych, krzemowych ogniw słonecznych połączonych ze sobą szeregowo, równoległe oraz szeregowo - równoległe, a także zbadanie wpływu częściowego zaciemnienia instalacji na ilość produkowanej energii. W ćwiczeniu wyznaczane będą charakterystyki prądowo - napięciowe I-V oraz niektóre parametry elektryczne otrzymane w różnych konfiguracjach.

1. Charakterystyka badanych ogniw i oświetlenia

W skład zestawu wchodzi dziewięć ogniw monokrystalicznych MOTECH IS125-R150-B o następujących parametrach:

-) wymiary 125 mm x 125 mm \pm 1.5 mm,
-) grubość 320 μ m \pm 40 μ m,
-) przednia powierzchnia pokryta niebieską antyodbiciową warstwą azotku krzemu,
-) srebrne kontakty przednie o szerokości 1,5 mm,
-) aluminiowa powierzchnia tylna stanowi tylny kontakt ogniwa.

Parametry elektryczne pojedynczego ogniwa podane przez producenta: η (%) 17,25 – 17,49; P_{max} (W) 2,57 – 2,61; I_m (A) 5,02 - 5,18; I_{SC} (A) 5,59; max. V_m (V) 0,511, V_{OC} (V) 0,613.

Oświetlacz o całkowitej mocy 315 W składa się z dziewięciu lamp halogenowych OSRAM DECOSTAR Standard zasilanych napięciem 12 V o mocy 35 W każda.

2. Pomiary pojedynczego ogniwa

Podłącz jedno dowolnie wybrane ogniwo słoneczne do mierników prądu i napięcia. Regulując wartością rezystancji od $R = 0$ do $R = R_{\max}$ zmierz wartości prądu i napięcia. Wyniki pomiarów umieść w tabeli:

Lp.	Prąd I [A]	Napięcie V [V]	Moc P [W]
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			
7.			
8.			

Na podstawie otrzymanych wyników wyznacz charakterystykę prądowo – napięciową ogniwa i krzywą mocy (na jednym wykresie) oraz takie parametry jak: prąd zwarcia I_{SC} , napięcie obwodu otwartego V_{OC} , moc maksymalną P_{\max} .

3. Połączenie szeregowe

a) Połącz szeregowo wszystkie ogniwa. Regulując wartością rezystancji od $R = 0$ do $R = R_{\max}$ zmierz wartości prądu i napięcia. Wyniki pomiarów umieść w tabeli:

Lp.	Prąd I [A]	Napięcie V [V]	Moc P [W]
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			
7.			
8.			

Na podstawie otrzymanych wyników wyznacz charakterystykę prądowo – napięciową ogniwa i krzywą mocy (na jednym wykresie) oraz takie parametry jak: prąd zwarcia I_{SC} , napięcie obwodu otwartego V_{OC} , moc maksymalną P_{\max} .

b) Przy takim samym połączeniu jak w punkcie a) zasłoń częściowo jedno ogniwo. Regulując wartością rezystancji od $R = 0$ do $R = R_{\max}$ zmierz wartości prądu i napięcia. Wyniki pomiarów umieść w tabeli:

Lp.	Prąd I [A]	Napięcie V [V]	Moc P [W]
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			
7.			
8.			

Na podstawie otrzymanych wyników wyznacz charakterystykę prądowo - napięciową ogniwa i krzywą mocy (na jednym wykresie) oraz takie parametry jak: prąd zwarcia I_{SC} , napięcie obwodu otwartego V_{OC} , moc maksymalną P_{\max} .

c) Pozostaw konfigurację z punktu b) z częściowym zaciemnieniem jednego z ogniw. Do zaciemnionego ogniwa podłącz równolegle diodę bocznikującą tak aby w warunkach normalnej pracy była spolaryzowana w kierunku zaporowym (A -, K +). Regulując wartością rezystancji od $R = 0$ do $R = R_{\max}$ zmierz wartości prądu i napięcia. Wyniki pomiarów umieść w tabeli:

Lp.	Prąd I [A]	Napięcie V [V]	Moc P [W]
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			
7.			
8.			

Na podstawie otrzymanych wyników wyznacz charakterystykę prądowo - napięciową ogniwa i krzywą mocy oraz takie parametry jak: prąd I_{SC} , napięcie V_{OC} , moc max P_{\max} .

4. Połączenie równoległe

Połącz równoległe wszystkie ogniwa. Regulując wartością rezystancji od $R = 0$ do $R = R_{\max}$ zmierz wartości prądu i napięcia. Wyniki pomiarów umieść w tabeli:

Lp.	Prąd I [A]	Napięcie V [V]	Moc P [W]
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			
7.			
8.			

Na podstawie otrzymanych wyników wyznacz charakterystykę prądowo – napięciową ogniwa i krzywą mocy (na jednym wykresie) oraz takie parametry jak: prąd I_{SC} , napięcie V_{OC} , moc maksymalną P_{\max} .

5. Połączenie szeregowo – równoległe

Połącz po trzy ogniwa szeregowo, a następnie otrzymane trzy łańcuchy połącz równoległe Rys. 3.5. Regulując wartością rezystancji od $R = 0$ do $R = R_{\max}$ zmierz wartości prądu i napięcia. Wyniki pomiarów umieść w tabeli:

Lp.	Prąd I [A]	Napięcie V [V]	Moc P [W]
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			
7.			
8.			

Na podstawie otrzymanych wyników wyznacz charakterystykę prądowo - napięciową ogniwa i krzywą mocy (na jednym wykresie) oraz takie parametry jak: prąd zwarcia I_{SC} , napięcie obwodu otwartego V_{OC} , moc maksymalną P_{\max} .