

Ćwiczenie 6

Wpływ długości widma promieniowania na parametry elektryczne modułów fotowoltaicznych

Cel ćwiczenia

Wyznaczenie charakterystyk prądowo - napięciowych w warunkach zmiennego natężenia oświetlenia i długości fali widma promieniowania oraz określenie sprawności modułu fotowoltaicznego składającego się z ogniw wykonanych z polikrystalicznego, monokrystalicznego i amorficznego krzemu.

Elementy układu pomiarowego

- ✓ moduł fotowoltaiczny składający się z jednakowych ogniw połączonych szeregowo,
- ✓ konstrukcja wsporcza z symulatorem oświetlenia RGB,
- ✓ nastawne obciążenie rezystancyjne,
- ✓ cyfrowy multimetr w postaci amperomierza, woltomierza, pyranometru,
- ✓ przewody łączeniowe i płytka.

Wstęp teoretyczny

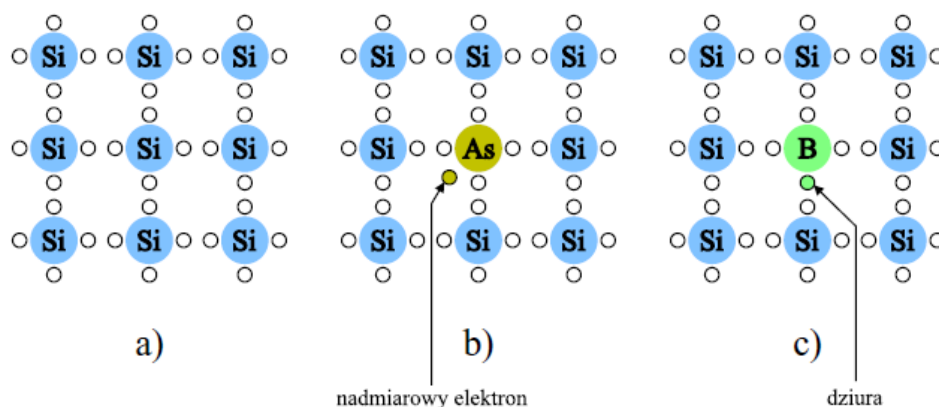
Modyfikacja światła słonecznego na etapie poprzedzającym jego absorpcję w ogniwie słonecznym tak, by jego rozkład spektralny był bardziej dostosowany do trybu pracy typowego wysokowydajnego ogniwa krzemowego, umożliwia zwiększenie sprawności konwersji fotowoltaicznej (skoncentrowanie światła w zakresie, w którym wydajność konwersji jest optymalna, podział wysokoenergetycznych fotonów z „niebieskiej” strony widma słonecznego na mniejsze części („quantum cutting”) oraz łączenie ze sobą fotonów niskoenergetycznych („quantum pasting”).

Dzięki regularnej budowie sieci krystalicznej półprzewodnika krzemowego, mamy do czynienia z pasmową strukturą energetyczną. 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:

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left[\frac{E - E_f}{kT}\right] + 1}$$

gdzie: $f(E)$ jest prawdopodobieństwem obsadzenia stanu o energii E , T — temperaturą bezwzględną, k — stałą Boltzmanna. 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 $kT \approx 0,025$ eV, co oznacza, że istnieje niezerowe prawdopodobieństwo zajęcia przez elektrony poziomów energetycznych w pasmie przewodnictwa.



Rys. 1. Dwuwymiarowa struktura kryształu krzemu: (a) bez domieszek, (b) z atomem donorowym, (c) z atomem akceptorowym

Wskutek ruchów termicznych niektóre elektrony zyskują energię wystarczającą do pokonania przerwy energetycznej i stają się swobodne. Każdy ze swobodnych elektronów pozostawia po sobie w pasmie walencyjnym dziurę, która może zostać zajęta przez inny elektron walencyjny. 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. Na rysunku 1 (fragment kryształu krzemu) obserwuje się cztery elektrony walencyjne każdego atomu, tworzące kowalencyjne wiązania z pozostałymi atomami (w trzech wymiarach kryształ ma strukturę tetraedryczną — każdy atom znajduje się w tej samej odległości od atomów sąsiednich). Gdy zamiast jednego atomu Si w strukturze umieszczony jest atom o pięciu elektronach walencyjnych (np. antymon Sb, fosfor P czy arsen As) powstaje jeden nadmiarowy elektron. Jeżeli atom krzemu zastąpić atomem z trzema elektronami walencyjnymi (np. boru B, glinu Al, galu Ga), powstanie struktura z niedoborem jednego elektronu. 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. 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 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.

W pobliżu złącza, na skutek dużych różnic koncentracji, elektrony (nośniki większościowe) z obszaru n dyfundują do obszaru p, powiększając gęstość nośników mniejszościowych. Podobnie zachowują się dziury, wędrując z obszaru p do n. Proces ten powoduje spadek koncentracji swobodnych nośników w strefie przyłączeniowej, tj. powstanie strefy zubożonej.

Odpływ dziur z obszaru typu p powoduje powstanie ujemnego ładunku przestrzennego. W podobny sposób po stronie półprzewodnika n wytwarza się przestrzenny

ładunek dodatni. Rejon złącza podobny jest więc do płaskiego kondensatora, pomiędzy okładkami którego powstaje pole elektryczne, hamujące dyfuzję nośników.

Ze względu na znaczną różnicę koncentracji elektronów w półprzewodniku typu n i półprzewodniku typu p, nastąpi ich dyfuzyjny przepływ w kierunku obszaru p. Po przyłożeniu do złącza napięcie V tak, że biegun dodatni jest połączony z półprzewodnikiem typu p następuje zmniejszenie o V potencjału przeciwdziałającego – w stosunku do prądu w stanie równowagi termicznej.

Oświetlenie złącza p-n fotonami o energii większej od szerokości przerwy energetycznej prowadzi do powstania pary elektron – dziura. Pole złącza przemieszcza każdy z nośników w przeciwnym kierunku — elektron do obszaru typu n, dziurę do półprzewodnika typu p (nośniki stają się nadmiarowe). Rozdzielenie pary ładunków powoduje powstanie różnicy potencjałów U , która polaryzuje złącze w kierunku przewodzenia. Zamykając zewnętrzny obwód elektryczny można zmierzyć napięcie fotoelektryczne U lub, jeśli opór obciążenia jest bardzo mały, prąd fotoelektryczny złącza.

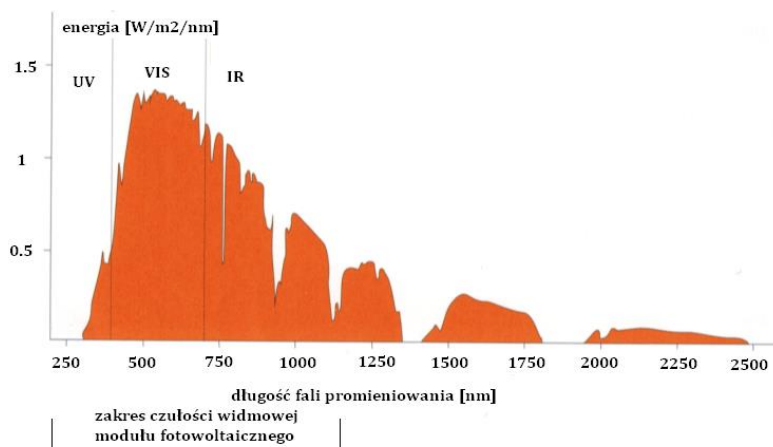
Sprawność ogniwa słonecznego jest stosunkiem maksymalnej mocy elektrycznej wydzielonej na obciążeniu, do padającej mocy promieniowania słonecznego.

Energia słoneczna docierająca do ziemi ma postać fali elektromagnetycznej o różnej długości fali. W zależności od długości fali wyróżniamy:

- promieniowanie ultrafioletowe, które stanowi ok. 4,5% promieniowania docierającego do Ziemi. Jest to promieniowanie wysokoenergetyczne, odpowiada za oparzenia słoneczne, niszczy żywe komórki, jest bardzo szkodliwe dla ludzi. Promieniowanie ultrafioletowe znajduje się w paśmie 10 nm do 400 nm. Promieniowanie ultrafioletowe o określonej długości fali ma właściwości bakterio i wirusobójcze z tego względu wykorzystywane jest do sterylizacji wody, przyrządów i pomieszczeń.
- promieniowanie widzialne (światło widzialne), zwane także słonecznym stanowi ok. 44% promieniowania słonecznego. Wywołuje ono wrażenie świetlne. Światło widzialne znajduje się w paśmie o długości 400-750 nm.
- promieniowanie podczerwone (podczerwień), noszące również nazwę promieniowania cieplnego, jest promieniowaniem niewidzialnym o długości fali powyżej 1000 nm. Emitowane jest przez rozgrzane ciała i stanowi ok. 52% promieniowania słonecznego - rodzaj promieniowania odpowiedzialny za odczuwanie ciepła.

Górnej granicy przerwy energetycznej w krzemie $E_g = 1,12$ eV odpowiada długość fali 1100 nm. Wszystkie fotony widma słonecznego o energii $E < E_g$ mają zbyt małą energię, aby wytworzyć w złączu parę elektron-dziura. Oznacza to, że ok. 23% fotonów widma nie ma wpływu na sprawność konwersji PV.

Jedynie fotony o energii $E > E_g$ produkują pary elektron - dziura o energii E . Nadwyżka energii $E - E_g$ tracona jest w półprzewodniku na ciepło, co oznacza, że jedynie energia E_g zamieniana jest na energię elektryczną. Szerokość przerwy energetycznej ogniwa wykonanych z różnych materiałów, w tych samych warunkach, będzie prowadziła do uzyskania również różnych napięć obwodu otwartego (np. GaAs i Si)



Rys.2. Zakres pracy modułu fotowoltaicznego na tle spektrum promieniowania słonecznego

Jednym z podstawowych parametrów określających sprawność ogniwa fotowoltaicznego jest wydajność kwantowa zewnętrzna i wewnętrzna.

- Wydajność kwantowa wewnętrzna – stosunek liczby par nośników generowanych przez promieniowanie słoneczne do liczby zaabsorbowanych fotonów.
- Wydajność kwantowa zewnętrzna – stosunek wynikowej gęstości fotoprądu, pochodzącego z obszarów półprzewodnika typu p, n i z obszaru ładunku przestrzennego odpowiadającego danej długości fali do iloczynu ładunku elementarnego i gęstości strumienia fotonów o długości fali λ .

Czułość widmowa ogniwa to stosunek prądu zwarciovego do mocy padającego promieniowania słonecznego o określonej długości fali λ .

Widmo słoneczne ogranicza grupę materiałów możliwych do zastosowania w ogniwach. Ogniwa fotowoltaiczne w wyniku zjawiska konwersji fotowoltaicznej przetwarzają energię słoneczną na energię elektryczną. Obecnie dostępne moduły fotowoltaiczne pracują ze sprawnością na poziomie 14 – 16 % (ogniwa monokrystaliczne) oraz 13 – 15 % (ogniwa polikrystaliczne), w wyniku, czego tylko część promieniowania słonecznego ulega zamianie na energię elektryczną. Globalny rekord pod względem sprawności konwersji fotowoltaicznej został ustalony na poziomie 44,7 % przez ogniwo czterozłączowe (31,1 % dla ogniw dwuzłączowych). Rekordowe ogniwo słoneczne z krzemu monokrystalicznego osiągnęło wydajność konwersji fotowoltaicznej na poziomie 24,13% (ogniwo typu IBC (Interdigitated Back Contact) o wymiarach 156 x 156 mm firmy Trina Solar, 2017). Sprawność konwersji zależy od wielu czynników jednak zasadniczy wpływ ma spektrum promieniowania słonecznego, gdyż różnego typu ogniwa fotowoltaiczne wykorzystują inną część widma. Z tego powodu uzyskują inną efektywność w okresie letnim i zimowym, gdy dominuje odpowiednio promieniowanie wysoko – i niskoenergetyczne. Z tego powodu oceniając wydajność energetyczną modułów PV wykonanych w różnej technologii należy sprawdzić jak zmienia się sprawność konwersji fotowoltaicznej wraz ze zmianą długości fali widma (nie tylko ze zmianą warunków meteorologicznych). W lewo na osi długości fali energia fotonów będzie rosła, w związku z czym tylko część ich energii będzie zamieniana na napięcie elektryczne, a reszta na ciepło. Idąc w prawo od punktu opisującego maksymalną sprawność konwersji fotowoltaicznej energia fotonów będzie zbyt mała, aby wybić elektron do pasma przewodnictwa. Wyniki analizy mogą zostać wykorzystane np. przy konstruowaniu koncentratorów luminescencyjnych. Do interesujących technologii nad którymi prowadzone są obecnie prace należą kropki kwantowe, perowskity czy światłoczułe barwniki.

Sprawność przetwarzania energii słonecznej na elektryczną można opisać zależnością:

$$\eta = \frac{A_a J_{sc} U_{oc}}{A_t G_o} FF$$

- ✓ A_a, A_t – powierzchnia czynna (available) i całkowita (total) ogniwa lub modułu
- ✓ J_{sc} – gęstość powierzchniowa prądu zwarcia

Na sprawność konwersji fotowoltaicznej mają wpływ następujące czynniki:

- niewykorzystanie fotonów długofalowych (szerokość przerwy energetycznej półprzewodnika),
- zasłonięcie części powierzchni ogniwa przez elektrodę górną (kompromis pomiędzy stopniem przysłonięcia a rezystancją szeregową – odpowiedni dobór kształtu elektrod),
- odbicie światła (teksturowanie powierzchni, warstwy przeciwoodbiciowe),
- niecałkowita absorpcja światła ze względu na ograniczoną grubość ogniwa (stosowanie lustro na tylnej powierzchni ogniwa),
- współczynnik wypełnienia charakterystyki,
- czynnik napięciowy ogniwa (wynika z tego, że energia fotonu do wytworzenia pary nośników powinna być równa lub większa od energii przerwy energetycznej, natomiast największe napięcie ogniwa wynosi U_{oc} , gdzie qU_{oc} zawsze $< E_g$).

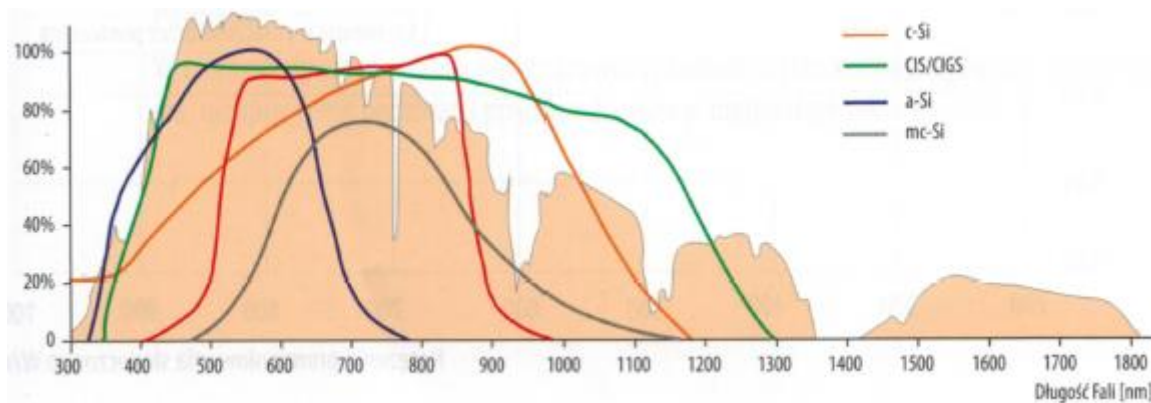
Postać współczynnika wypełnienia w funkcji napięcia obwodu otwartego ogniwa:

$$FF = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0,72)}{v_{oc} + 1}$$

gdzie: $v_{oc} = \frac{U_{oc}}{kT/q}$

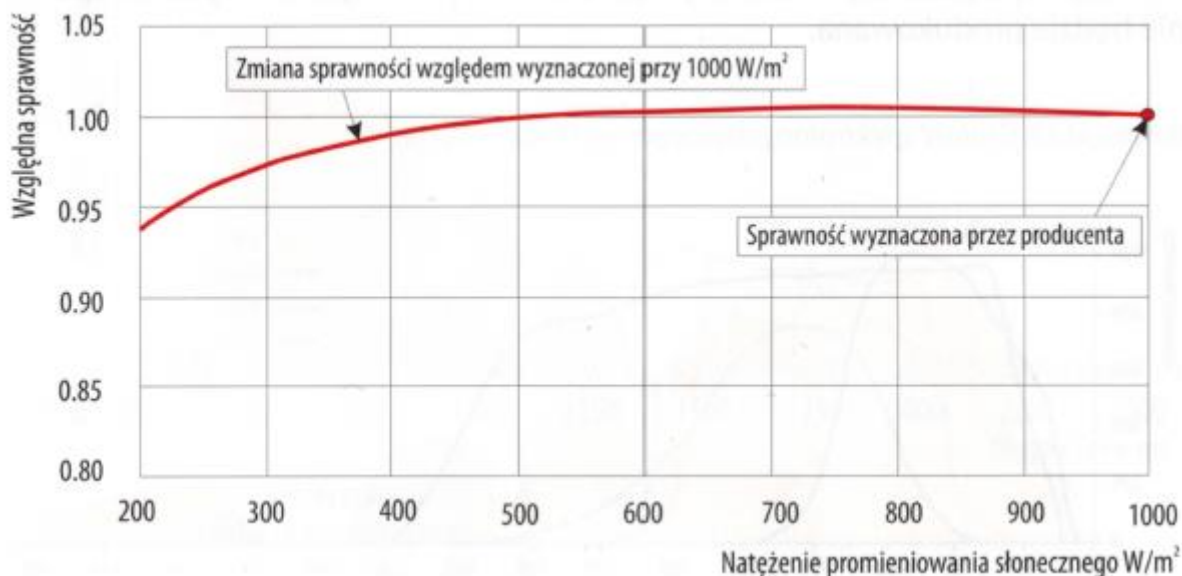
Rozwiązaniem w pewnym zakresie są ogniwa wielozłączone ze zmienną szerokością przerwy energetycznej – stopniowo maleje przy przejściu od wierzchniego do tylnego złącza. Światło pada na górną warstwę półprzewodnika (absorbera) o największej szerokości przerwy energetycznej. Fotony o energii mniejszej przechodzą przez absorber i są pochłaniane przez następny półprzewodnik.

Na rysunku 3 przedstawiono fragment widma promieniowania słonecznego wykorzystywanego przez moduły fotowoltaiczne wykonane w I i II technologii produkcji.



Rys.3. Zakres pracy modułu fotowoltaicznego na tle spektrum promieniowania słonecznego

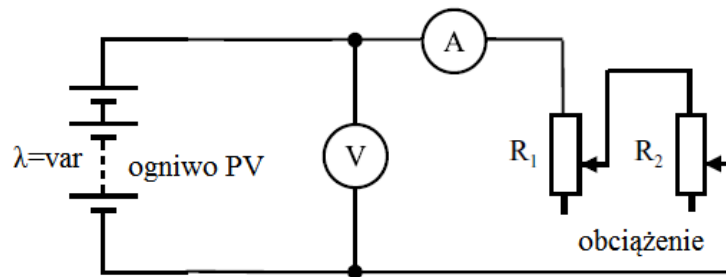
Sprawność konwersji fotowoltaicznej zależy od spektrum promieniowania słonecznego, a więc pośrednio od wartości gęstości powierzchniowej mocy promieniowania słonecznego. Na rysunku 4 przedstawiono zmianę sprawności konwersji PV dla modułu z krzemu krystalicznego przy zmianie natężenia promieniowania słonecznego. Względna sprawność konwersji fotowoltaicznej, dla każdego typu modułu PV, jest niższa od znamionowej w przedziale irradiancji 100-200 W/m² – istotne dla wybranych szerokości geograficznych.



Rys.4. Przebieg zmienności sprawności konwersji fotowoltaicznej w funkcji gęstości mocy promieniowania słonecznego

Na rysunku 5 przedstawiono schemat układu pomiarowego wykorzystanego w analizie porównawczej charakterystyk obciążenia i mocy modułu fotowoltaicznego w zależności od długości fali widma promieniowania. Jako źródło światła wykorzystano oświetlenie LED oraz system barwny RGB używany do generowania fal elektromagnetycznych z zakresu 380 – 780 nm. W systemie RGB wykorzystano 24 - bitowy system zapisu koloru, gdzie każda składowa opisana jest za pomocą 8 - bitowej reprezentacji jasności. W ten sposób każda z barw może przyjmować 256 różnych jasności. Z wykorzystaniem odpowiedniego sterownika występuje możliwość mieszania kolorów (dla wartości 255 określona składowa świeci z maksymalną jasnością, dla wartości 0 nie jest ona

emitowana). Ustawienie maksymalnej wartości w reprezentacji bitowej generuje kolor biały. Jako źródło zasilania układu wykorzystano zasilacz modułowy. Zmianę barwy światła realizuje się z wykorzystaniem panelowego sterownika radiowego.



Rys.5. Zakres pracy modułu fotowoltaicznego na tle spektrum promieniowania słonecznego

Przebieg ćwiczenia

1. Wyznaczenie charakterystyki prądowo – napięciowej $I=f(U)$ dla modułów fotowoltaicznych dla długości fali widma promieniowania nr 1

	moduł monokrystaliczny		moduł polikrystaliczny		moduł amorficzny	
	irradiancja na powierzchni ogniw [W/m^2]					
l.p.	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
sprawność η						
sprawność η STC						
współczynnik wypełnienia						
barwa:	niebieska					

2. Wyznaczenie charakterystyki prądowo – napięciowej $I=f(U)$ dla modułów fotowoltaicznych dla długości fali widma promieniowania nr 2

	moduł monokrystaliczny		moduł polikrystaliczny		moduł amorficzny	
	irradiancja na powierzchni ogniw $[W/m^2]$					
l.p.	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
sprawność η						
sprawność η STC						
współczynnik wypełnienia FF						
barwa:	czerwona					

3. Wyznaczenie charakterystyki prądowo – napięciowej $I=f(U)$ dla modułów fotowoltaicznych dla długości fali widma promieniowania nr 3

	moduł monokrystaliczny		moduł polikrystaliczny		moduł amorficzny	
	irradiancja na powierzchni ogniw $[W/m^2]$					
l.p.	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]
1						
2						
3						
4						

5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
sprawność η						
sprawność η STC						
współczynnik wypełnienia FF						
barwa:	zielona					

4. Wyznaczenie charakterystyki prądowo – napięciowej $I=f(U)$ dla modułów fotowoltaicznych dla długości fali widma promieniowania nr 4

	moduł monokrystaliczny		moduł polikrystaliczny		moduł amorficzny	
	irradiancja na powierzchni ogniw [W/m^2]					
l.p.	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						

18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
sprawność η						
sprawność η STC						
współczynnik wypełnienia FF						
barwa:	pomarańczowa					

5. Wyznaczenie charakterystyki prądowo – napięciowej $I=f(U)$ dla modułów fotowoltaicznych dla długości fali widma promieniowania nr 5

	moduł monokrystaliczny		moduł polikrystaliczny		moduł amorficzny	
	irradiancja na powierzchni ogniw [W/m^2]					
l.p.	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						

22						
sprawność η						
sprawność η STC						
współczynnik wypełnienia FF						
barwa:	różowa					

Sprawozdanie z przebiegu ćwiczenia

Sprawozdanie z przebiegu ćwiczenia powinno zawierać:

- przykładowe obliczenia z pełną dyskusją jednostek (dla każdej serii pomiarów),
- wszystkie wyniki pomiarów i obliczeń (w postaci tablic dla różnych warunków oświetleniowych wskazanych przez prowadzącego zajęcia),
- charakterystyki prądowo – napięciowe $I=f(U)$ i mocowe $P=f(U)$ modułów dla różnych długości fal widma promieniowania (w jednym układzie współrzędnych),
- określić położenia MPP, kreśląc prostokąty odpowiadające maksymalnej mocy w obwodzie obciążenia,
- wyznaczyć sprawność modułów fotowoltaicznych, współczynnik FF i sprawność w warunkach STC w poszczególnych warunkach oświetlenia. Skomentować otrzymane rezultaty.
- odniesienie uzyskanych wyników pomiarów do wyników publikowanych w literaturze przedmiotu,
- wnioski z wykonanego ćwiczenia.