



## Optoelektronika W12EIT-SI0031L

### Laboratorium nr 9

### Ogniwa słoneczne

Opracował zespół: I. Zborowska-Lindert, B. Boratyński, W. Dawidowski

#### 1. Cel zajęć

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z podstawowymi właściwościami krzemowych ogniw słonecznych oraz wykonanie podstawowych pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych. Dodatkowo badany będzie wpływ natężenia oświetlenia, jak również wpływ sposobu łączenia ogniw na ich parametry wyjściowe.

#### 2. Program zajęć

- \* pomiar charakterystyk prądowo-napięciowych,
- \* określenie wpływu natężenia promieniowania na parametry ogniwa,
- \* określenie wpływu sposobu łączenia ogniw na parametry ogniwa,
- \* sporządzenie wykresów, przeprowadzenie obliczeń, sformułowanie wniosków.

#### 3. Literatura uzupełniająca

B. Ziętek, „Optoelektronika” Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń, 2005,  
J. I. Pankove, „Zjawiska optyczne w półprzewodnikach”, WNT, Warszawa, 1974,  
Z. M. Jastrzębski „Energia słoneczna: konwersja fotowoltaiczna” PWN, Warszawa 1990,  
Karty katalogowe ogniw oferowanych przez firmę Conrad na stronie <http://www.conrad.pl/>  
Wykład Optoelektronika W12IEA-SI0031W

#### 4. Wprowadzenie teoretyczne i zagadnienia praktyczne

##### Zagadnienia do przygotowania

- \*Wpływ oświetlenia na półprzewodnik i złącze p-n
- \*Budowa ogniwa słonecznego
- \*Parametry ogniw słonecznych
- \*Charakterystyka prądowo-napięciowa I(U) ogniwa słonecznego.
- \*Charakterystyka mocy w funkcji napięcia P(U) ogniwa słonecznego
- \*Połączenie pojedynczych ogniw w układach szeregowych i równoległych

Instrukcje obsługi programu Rejestrator oraz multimetrów/zasilaczy itp.:  
[lpp.pwr.edu.pl/materialy-dydaktyczne](http://pp.pwr.edu.pl/materialy-dydaktyczne)

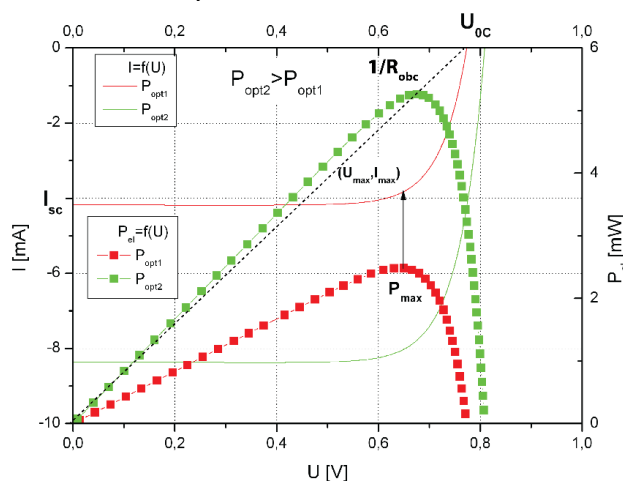
**Podczas zajęć należy przestrzegać przepisów BHP**

### 4.1 Wstęp teoretyczny

Zależność prądowo-napięciową oświetlonego złącza p-n opisuje wzór Shockleya:

$$I = I_s \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - I_s - I_\Phi$$

gdzie:  $I_s$  – prąd ciemny (generacji lub nasycenia),  $I_\Phi$  – fotoprąd, prąd związany z występowaniem wewnętrznego efektu fotoelektrycznego. Przykładową charakterystykę prądowo-napięciową ogniwa oraz mocy elektrycznej generowanej przez to ogniwo dla dwóch różnych mocy optycznych przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Przykładowe charakterystyki prądowo-napięciowe oraz zależność mocy od napięcia występującego na zaciskach fotoogniwa

Podstawowe parametry ogniwa można wyznaczyć korzystając z przedstawionego wykresu:

\* **napięcie obwodu otwartego  $U_{oc}$**  – napięcie wytworzone przez siłę elektromotoryczną wytworzoną przez wygenerowane pary elektron-dziura. Można je wyznaczyć ze wzoru:

$$U_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(1 + \frac{I_{sc}}{I_s}\right) \quad [?]$$

\* **prąd zwarcia  $I_{sc}$**  – fotoprąd płynący dla  $U = 0$  V;

\* **rezystancja obciążenia  $R_{obc}$**  definiowana przez nachylenie prostej (prostej obciążenia) przechodzącej przez punkt mocy maksymalnej o współrzędnych  $(U_m, I_m)$  i początek układu współrzędnych. Nachylenie tej prostej związane jest z wartością rezystancji obciążenia  $R_{obc}$  dołączonego do ogniwa. Obciążenie powinno mieć tak dobraną wartość, aby prosta obciążenia o nachyleniu  $1/R_{obc}$  ustalała punkt pracy dla  $P_{max}$ ;

\* **moc maksymalna  $P_{max}$**  – wyznaczona ze wzoru:

$$P_{max} = I_{max} \cdot U_{max} ;$$

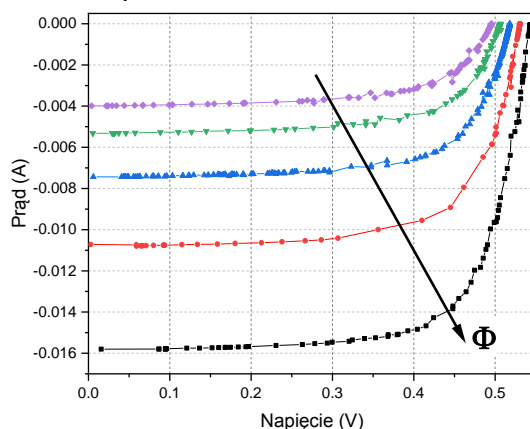
\* **współczynnik wypełnienia  $FF$**  – zdefiniowany jako:

$$FF = \frac{I_{max} \cdot U_{max}}{I_{sc} \cdot U_{oc}} ;$$

\* **sprawność  $\eta$**  – definiowana zależnością:

$$\eta = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{P_{opt}} \cdot 100\% ,$$

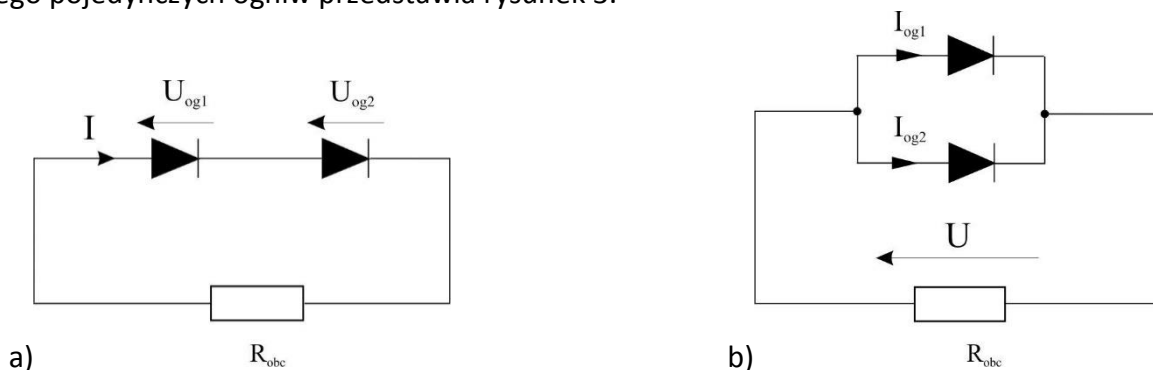
gdzie  $P_{opt}$  jest mocą promieniowania oświetlającego czynną powierzchnią ogniwa. Generowany w ogniwie fotoprąd zależy w sposób liniowy od strumienia świetlnego  $\Phi$  padającego na powierzchnię ogniwa. Na rysunku 2. przedstawiono serię charakterystyk prądowo-napięciowych  $I = f(U)$  zmierzonych dla różnych wartości strumienia świetlnego  $\Phi$ .



Rysunek 2. Wpływ strumienia świetlnego  $\Phi$  na kształt charakterystyki prądowo-napięciowej ogniwa słonecznego

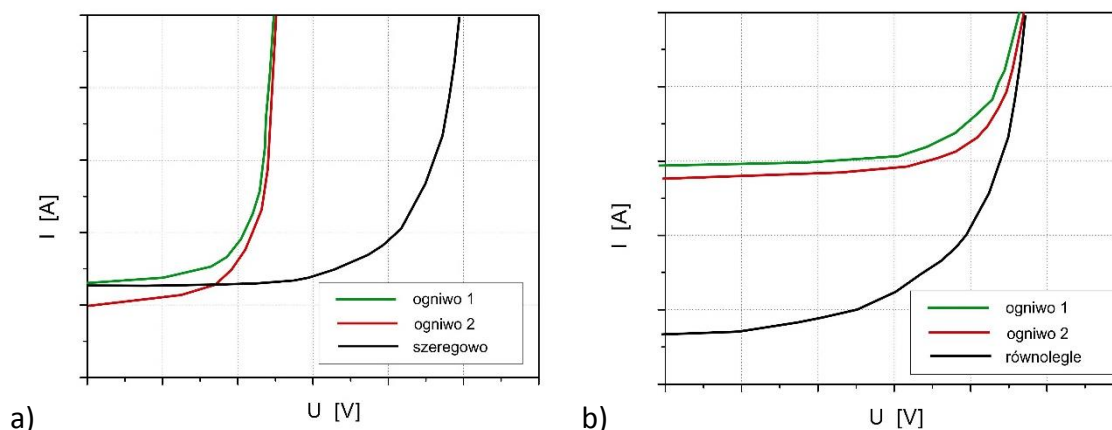
Charakterystyka zmierzona przy braku oświetlenia ( $\Phi = 0$ ) nazywana jest charakterystyką ciemną. Wraz ze wzrostem natężenia oświetlenia następuje wzrost prądu generowanego w oświetlonym ogniwie.

Ponieważ moc maksymalna uzyskana z pojedynczego ogniwa jest niewielka, łączy się większą ilość pojedynczych ogniw w baterie (moduły fotowoltaiczne). Wykorzystuje się połączenia szeregowe, równoległe lub szeregowo-równoległe. Ideę połączenia szeregowego i równoległego pojedynczych ogniw przedstawia rysunek 3.



Rysunek 3. Idea połączenia ogniw w baterię a) szeregowo, b) równoległe

Zgodnie z prawami Kirchhoffa w połączeniu szeregowym ogniw napięcie na obciążeniu jest sumą napięć na każdym z nich, natomiast dla połączenia równoległego prąd w obciążeniu jest sumą prądów połączonych ogniw. **Oznacza to, że przy połączeniu szeregowym zwiększa się napięcie baterii, a przy równoległym – prąd płynący przez obciążenie.** Przykładowe charakterystyki  $I = f(U)$  dla dwóch ogniw połączonych szeregowo i równoległe przedstawiają charakterystyki widoczne na rysunku 4.



Rysunek 4. Charakterystyki ogniw pojedynczych i połączonych w baterię a) szeregowo, b) równolegle

## 4.2 Realizacja ćwiczenia

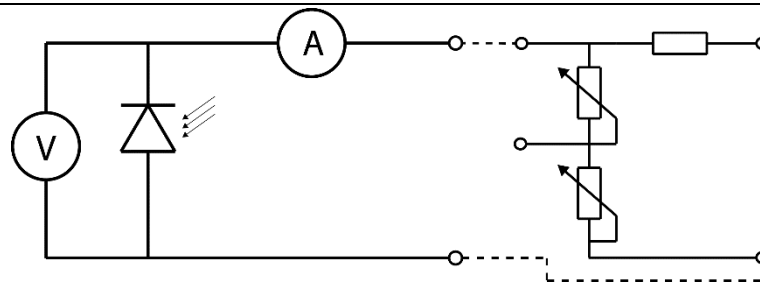
Analiza pracy ogniw i baterii fotowoltaicznych będzie przeprowadzona na podstawie pomiarów ich charakterystyk  $I = f(U)$  dla różnych warunków oświetlenia. Źródłem promieniowania świetlnego jest lampa halogenowa zainstalowana na szynie optycznej. Moc optyczna  $P_{opt}$  padająca na ogniwo jest proporcjonalna do strumienia światła  $\Phi$  zawartego w danym kącie bryłowym. Natężenie oświetlenia mierzonego ogniwa maleje w miarę wzrostu odległości elementu od źródła światła zgodnie z prawem odwrotnych kwadratów. Zmieniając położenie elementu względem źródła światła mierzy się charakterystyki prądowo-napięciowe dla różnych wartości oświetlenia (mocy optycznej). Gęstość mocy optycznej dla odpowiednich położzeń na ławie optycznej przedstawiono w tabeli 1.

1 Tabela. 1. Tabela skalowania mocy optycznej  $P_{opt}$

odległość od oświetlacza (cm)	5	10	15	20	25
Gęstość mocy $P_{opt}$ ( $W/m^2$ )	68,1	53,2	41,8	28,8	14,6

### 4.2.1 Przebieg ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest ocena wpływu sposobu konstrukcji baterii słonecznej (połączenia pojedynczych ogniw w układzie szeregowym lub równoległym) na parametry baterii oraz zbadanie wpływu zmiany natężenia oświetlenia na parametry ogniwa. Pomiar realizowany jest według schematu przedstawionego na rys. 5. W układzie tym należy zmierzyć charakterystyki prądowo-napięciowe  $I = f(U)$  obu ogniw YH-36×56 191267 dla 5 wartości natężenia oświetlenia. Dodatkowo dla wskazanego przez prowadzącego poziomu natężenia należy zmierzyć charakterystyki  $I=f(U)$  pojedynczych ogniw, a następnie połączonych szeregowo i równolegle (wykorzystać dostępną na stanowisku płytkę uniwersalną w celu realizacji odpowiedniego połączenia).



Rysunek 5. Schemat pomiarowy do wyznaczenia charakterystyk prądowo-napięciowych ogniw

Po podłączeniu układu pomiarowego i ustaleniu odpowiedniej odległości pomiędzy ogniwem a oświetlaczem diodowym należy włączyć oświetlacz i rozpocząć pomiar. **W tym celu uruchamiamy Pomiar bez zasilacza w programie Rejestrator**, następnie jednostajnym ruchem, bardzo powoli zmieniamy nastawę potencjometrów na płytce z rezystorami obciążającymi, czemu towarzyszy zmiana punktu pracy ogniwa. Pozwoli to na zarejestrowanie całej charakterystyki  $I = f(U)$  badanego przyrządu. W kolejnym kroku powtarzamy pomiar charakterystyki dla innych wartości strumienia światła  $\Phi$ .

#### Uwagi do pomiarów:

- pomiar wykonywany jest za pomocą programu *Rejestrator*, wybieramy opcję *Pomiar bez zasilacza*,
- zmiana obciążenia ogniwa  $R_{obc}$  następuje na skutek zmiany nastaw potencjometrów,
- dla  $R_{obc} \rightarrow 0$  uzyskujemy warunek bliski  $I = I_{SC}$ ,
- w celu odczytu  $I_{SC}$  należy odłączyć rezystor  $R_{obc}$  i zewrzeć układ ogniwa,
- dla  $R_{obc} \rightarrow \infty$  uzyskujemy warunek bliski  $U = U_{OC}$ ,  $I \rightarrow 0$ ,
- w celu odczytu  $U_{OC}$  spowodować rozwarcie obwodu odłączając  $R_{obc}$
- zmierzone charakterystyki  $I = f(U)$  należy wyeksportować (zapisać csv), a następnie zaimportować do programu *Origin*
- **ogniwo YH-36x56 191267 ma rozmiary 36 mm x 56 mm**

#### 4.2.2 Opracowanie wyników pomiarowych

Analizę uzyskanych wyników należy wykonać wykorzystując program *Origin*. Po zaimportowaniu wyników należy sporządzić następujące charakterystyki:

- $I = f(U)$  dla różnych wartości natężenia oświetlenia,
- $I = f(U)$  dla indywidualnych ogniw oraz połączenia szeregowego i równoległego.

**Dla wszystkich zmierzonych charakterystyk należy wyznaczyć wartości napięcia rozwarcia, prądu zwarcowego, punkt mocy maksymalnej, rezystancję obciążenia, współczynnik FF oraz sprawność.** Aby uzyskać zależność  $P_{el}=f(U)$  konieczne jest wpisanie (skopiowanie) do tabeli (*workbook* w programie *Origin*) wyników z zaimportowanego zbioru, a następnie, po utworzeniu nowej kolumny w tej tabeli, obliczyć w niej wartość mocy.

**Uwaga: Moc musi być dodatnia, tzn. należy zastosować funkcję matematyczną wartości bezwzględnej.**

Utworzone wykresy pozwolą na wyznaczenie podstawowych parametrów charakteryzujących badane ogniwa, które należy zamieścić w tabeli 2. Sprawność należy obliczyć wykorzystując wartości gęstości mocy optycznej podane w tabeli 1.

Do wydruku przygotować wykresy (*layout*):

- $I=f(U)$  dla ogniwa zmierzonego w funkcji natężenia oświetlenia,
- $I=f(U)$  dla indywidualnych ogniw i połączeń szeregowego i równoległego.

Do sprawozdania poza wykresami dołączyć wypełnioną tabelę 2.

Tabela 2. Zestawienie wyznaczonych parametrów ogniw na podstawie zmierzonych charakterystyk  $I=f(U)$

	$U_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (mA)	$P_{max}$ (mW)	$U_{max}$ (V)	$I_{max}$ (mA)	$R_{obc}$ ( $\Omega$ )	FF (%)	$\eta$ (%)
Ogniwo 1, $\Phi_1$								
Ogniwo 2, $\Phi_1$								
Ogniwo 1, $\Phi_2$								
Ogniwo 2, $\Phi_2$								
Ogniwo 1, $\Phi_3$								
Ogniwo 2, $\Phi_3$								
Ogniwo 1, $\Phi_4$								
Ogniwo 2, $\Phi_4$								
Ogniwo 1, $\Phi_5$								
Ogniwo 1, $\Phi_5$								
<b>Uwaga: <math>\Phi_1 &gt; \Phi_2 &gt; \Phi_3 &gt; \Phi_4 &gt; \Phi_5</math></b>								
Ogniwo 1								
Ogniwo 2								
Szeregowe								
Równoległe								