



Miernictwo elementów optoelektronicznych W12EIT-SI0029L

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 Miernictwo elementów optoelektronicznych W12EIT-SI0029W

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.:
<http://pp.pwr.edu.pl/materialy-dydaktyczne>

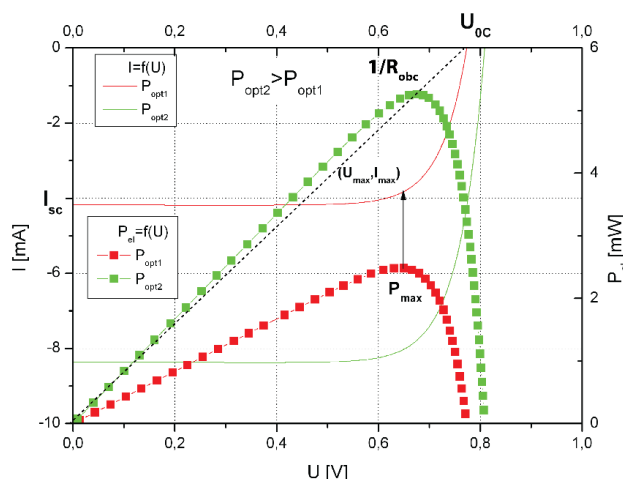
Podczas zajęć należy przestrzegać przepisów BHP

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_Φ – 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:

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

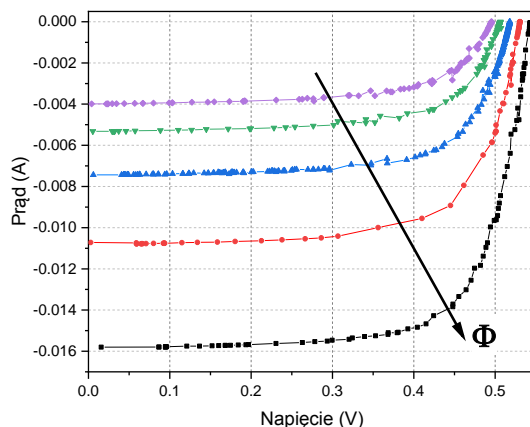
* **współczynnik wypełnienia** FF – zdefiniowany jako:

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

* **sprawność** η – definiowana zależnością:

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

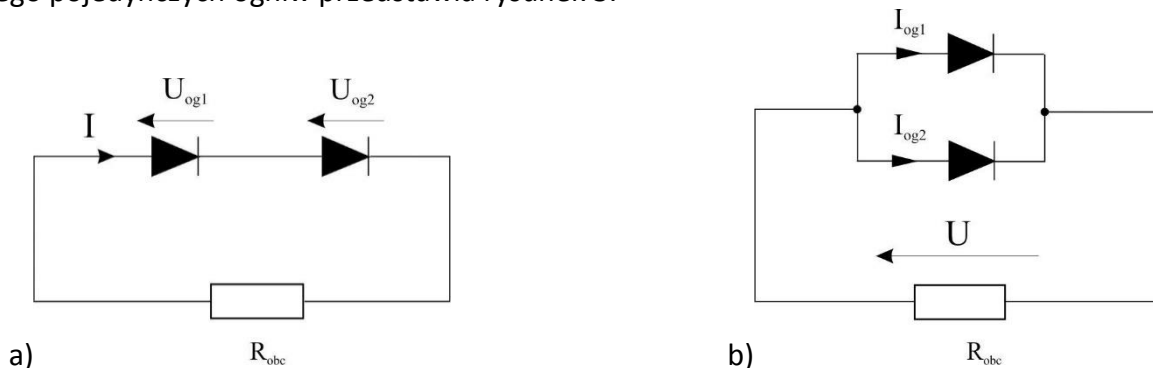
gdzie P_{opt} jest mocą promieniowania oświetlającego czynną powierzchnią ogniwa. Generowany w ogniwie fotoprąd zależy w sposób liniowy od strumienia świetlnego Φ padającego na powierzchnię ogniwa. Na rysunku 2. przedstawiono serię charakterystyk prądowo-napięciowych $I = f(U)$ zmierzonych dla różnych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



Rysunek 2. Wpływ strumienia świetlnego Φ na kształt charakterystyki prądowo-napięciowej ogniwa słonecznego

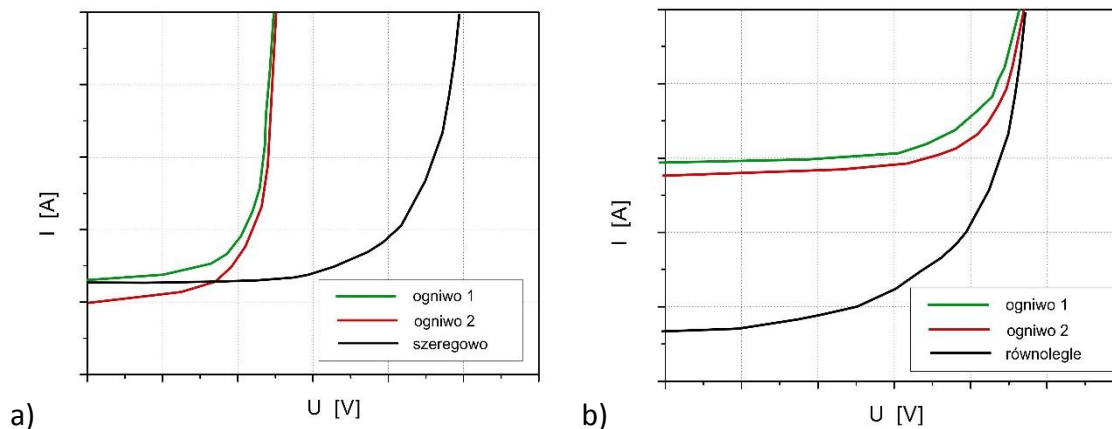
Charakterystyka zmierzona przy braku oświetlenia ($\Phi = 0$) nazywana jest charakterystyką ciemną. Wraz ze wzrostem natężenia oświetlenia następuje wzrost prądu generowanego w oświetlonym ogniwie.

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 ogniwa 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

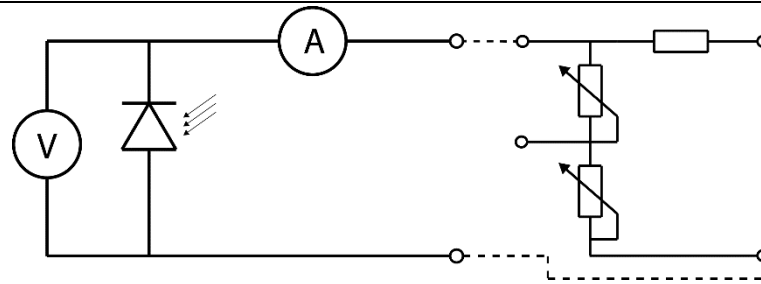
Analiza pracy ogniw i baterii fotowoltaicznych będzie przeprowadzona na podstawie pomiarów ich charakterystyk $I = f(U)$ dla różnych warunków oświetlenia. Źródłem promieniowania świetlnego jest lampa halogenowa zainstalowana na szynie optycznej. Moc optyczna P_{opt} padająca na ogniwo jest proporcjonalna do strumienia światła Φ 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 położeń 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 Φ .

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} (Ω)	FF (%)	η (%)
Ogniwo 1, Φ_1								
Ogniwo 2, Φ_1								
Ogniwo 1, Φ_2								
Ogniwo 2, Φ_2								
Ogniwo 1, Φ_3								
Ogniwo 2, Φ_3								
Ogniwo 1, Φ_4								
Ogniwo 2, Φ_4								
Ogniwo 1, Φ_5								
Ogniwo 1, Φ_5								
Uwaga: $\Phi_1 > \Phi_2 > \Phi_3 > \Phi_4 > \Phi_5$								
Ogniwo 1								
Ogniwo 2								
Szeregowe								
Równoległe								