



Politechnika Lubelska  
Wydział Elektrotechniki i Informatyki  
Katedra Urządzeń Elektrycznych i TWN  
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38A  
[www.kueitwn.pollub.pl](http://www.kueitwn.pollub.pl)

---

## **LABORATORIUM INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ**

Podstawy teoretyczne do ćwiczenia **nr 7**

**Badanie właściwości ogniw słonecznych**

## 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest poznanie budowy, zasad działania i właściwości oraz niektórych metod badania elementów słonecznych, których podstawą konstrukcyjną jest półprzewodnikowe złącze p - n.

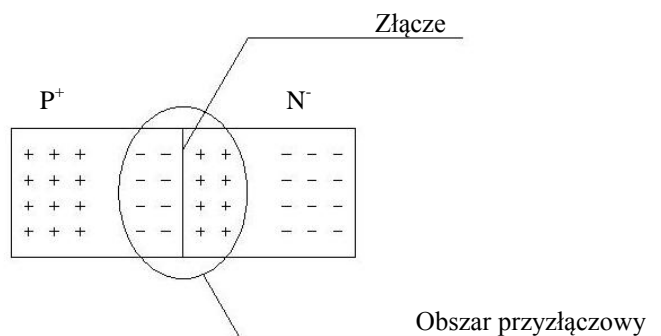
## 2. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

Dziedziną nauki zajmującą się zagadnieniami wytwarzania, odbioru i przesyłania elektromagnetycznego promieniowania optycznego oraz jego przetwarzania na sygnały elektryczne jest **optoelektronika**, w ramach której prowadzone są badania nad właściwościami materiałów półprzewodnikowych, mające na celu dalszy rozwój w tej dziedzinie.

**Elementem słonecznym** (fotoelementem) określa się półprzewodnikowe urządzenie - złącze p - n, które wykorzystuje do swego działania światło, tzn. przetwarza energię promieniowania elektromagnetycznego jakim jest światło, na energię elektryczną. w jego widzialnym zakresie oraz nadfiolecie i podczerwieni.

### 2.1. Złącze p - n

W wyniku zetknięcia półprzewodników typu p i n rozpoczyna się dyfuzja dziur (większościowych nośników ładunku w półprzewodniku typu p) do półprzewodnika typu n i elektronów (większościowych nośników ładunku w półprzewodniku typu n) do półprzewodnika typu p - czyli dodatnie (typ n), bądź ujemne (typ p) ładowanie obu półprzewodników.

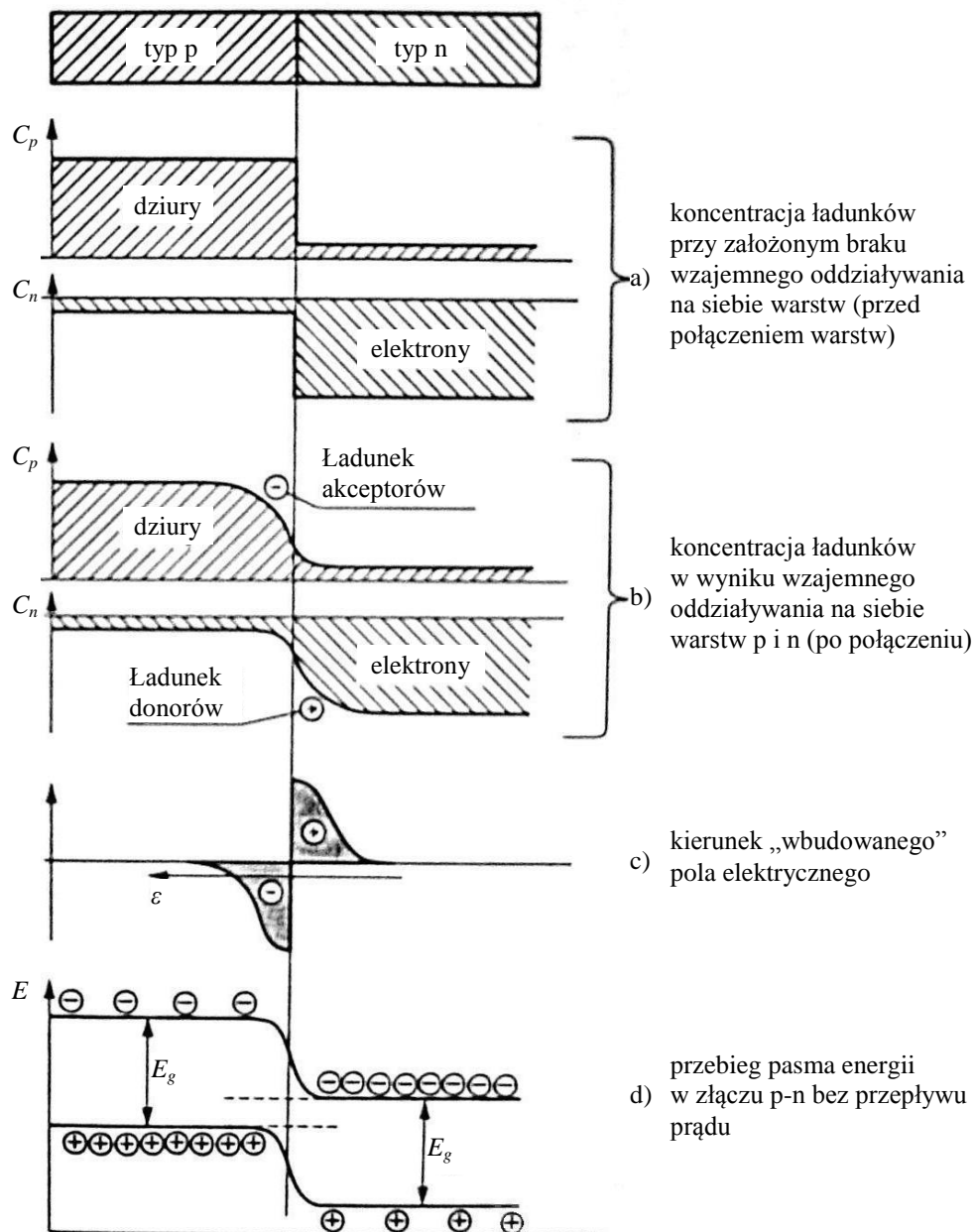


Rys. 1. Schemat ideowy złącza p - n

W obszarze złącza obserwujemy skok potencjału, wynikający z różnicy znaku ładunków i ich ustawienia w wąskim pasie wzdłuż powierzchni styku oraz ze znacznej rezystancji złącza, wynikającej z unieruchomienia w sieci krystalicznej jonów donorów i akceptorów, które nie mogą być nośnikami ładunku.

Wytworzone w ten sposób jednorodne pole elektryczne, będące efektem powstałego ładunku przestrzennego, skierowane od dodatnich jonów donorowych półprzewodnika typu n do ujemnych jonów akceptorowych półprzewodnika typu p tworzy różnicę potencjałów zwaną **barierą potencjału**, która blokuje ruch dziur i elektronów przez złącze. W konsekwencji tego powstaje

równowaga między zjawiskiem dyfuzji, a wpływem pola elektrycznego, która może zostać naruszona w wyniku dostarczenia do obszaru złącza odpowiedniej ilości energii, np. energii fotonów. W przypadku oświetlenia półprzewodnika typu n strumieniem świetlnym  $\Phi$  następuje zakłócenie stanu równowagi w złączu.



Rys. 2. Powstawanie bariery potencjału na granicy warstw p - n

## 2.2. Wpływ oświetlenia na złącze p - n

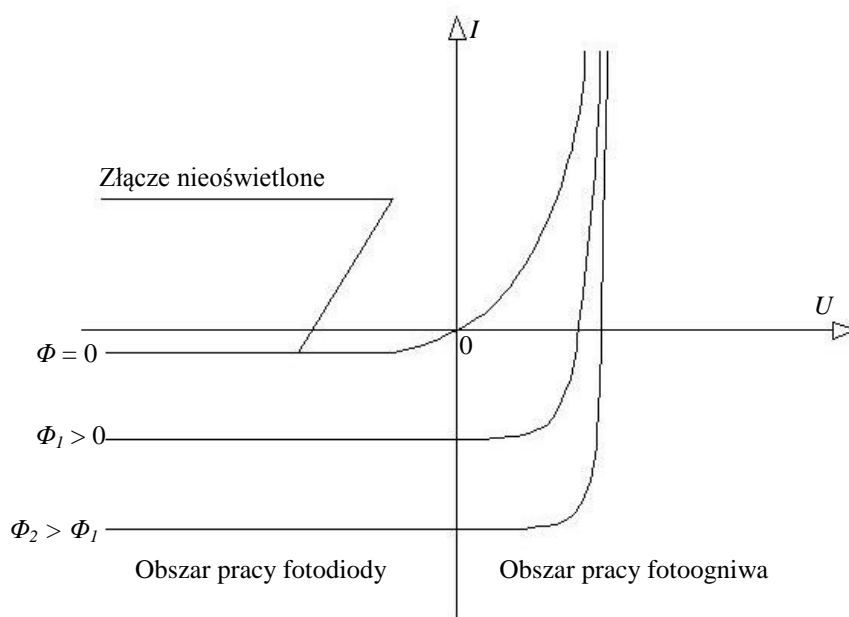
Absorpcja światła w półprzewodnikach zachodzi przez uwalnianie elektronów z wiązań chemicznych międzyatomowych. W celu wytworzenia swobodnego elektronu w danym materiale półprzewodnikowym należy dostarczyć pewną ilość energii, co najmniej równą energii przerwy energetycznej, która przykładowo dla krzemu (Si) wynosi  $E_g = 1,12 \text{ eV}$  w temperaturze

300 K (ok. 27°C). Uwolniony elektron pozostawia za sobą dziurę, która posiadając ładunek dodatni może poruszać się przez dyfuzję lub pod wpływem pola elektrycznego.

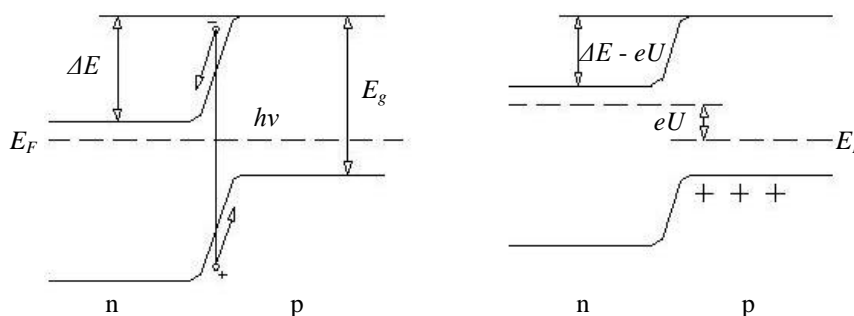
Jeżeli złącze p - n zostanie oświetlone fotonami o energii równej lub większej od szerokości przerwy energetycznej  $E_g$  ( $h \cdot \nu \geq E_g$ ), to po obu stronach złącza powstaną pary elektron - dziura, podobnie jak przy generacji termicznej. Nośniki powstające w odległości od bariery potencjału nie większej niż droga dyfuzji nośników mniejszościowych, będą dochodzić do bariery potencjału ruchem dyfuzyjnym i zostaną rozdzielone przez pole elektryczne, związane z obecnością złącza. Za **drogę dyfuzji** uznaje się średnią odległość, na jaką muszą przemieścić się nośniki mniejszościowe zanim nie zrekombinują z nośnikami większościowymi.

Pole elektryczne w obszarze złącza przesuwają nośniki mniejszościowe w przeciwnych kierunkach, elektrony do obszaru n, a dziury do obszaru p. Takie rozdzielanie ładunków powoduje powstanie różnicy potencjałów  $V_f$  w poprzek złącza. Dzięki temu w obwodzie zamkniętym powstanie **prąd fotoelektryczny**  $I_f$  o tym samym kierunku co prąd zaporowy  $I_{so}$  i podobnie jak  $I_{so}$  niezależny od wysokości bariery potencjału.

Charakterystykę prądowo - napięciową oświetlonego złącza p - n przedstawiono na rysunku 3.



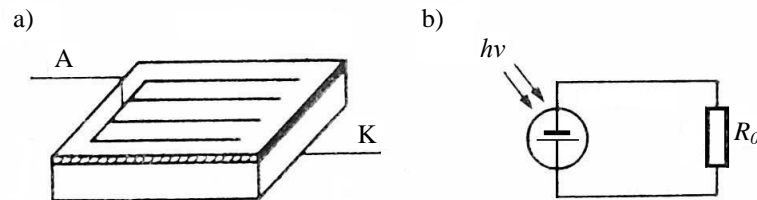
Rys. 3. Charakterystyki prądowo - napięciowe oświetlonego złącza p - n, gdzie  $\Phi$  - strumień świetlny



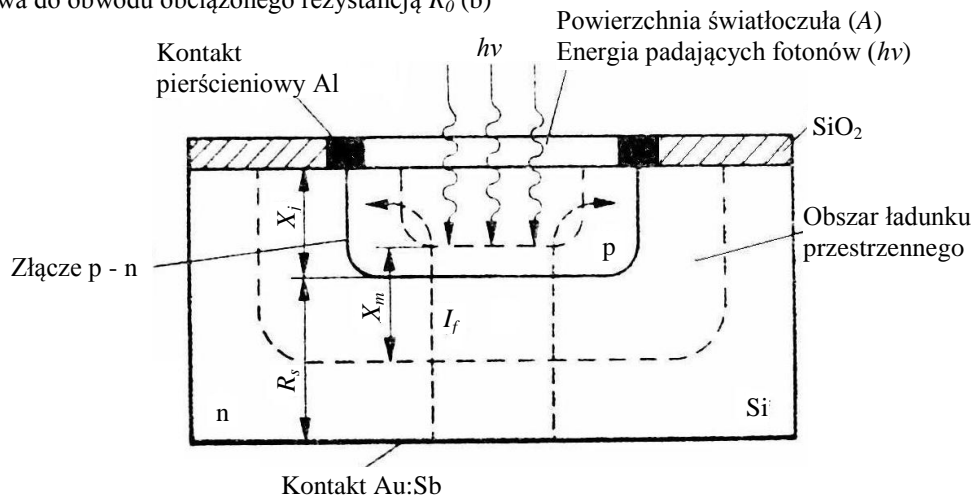
Rys. 4. Powstanie napięcia fotoelektrycznego  $U_{oc}$  (b) na złączu p - n oświetlonym fotonami o energii  $h \cdot \nu > E_g$  (a)

### 2.3. Fotoogniwo

Ogniwo fotoelektryczne jest elementem fotoczułym ze złączeniem p - n, w którym pod wpływem promieniowania elektromagnetycznego widzialnego wytwarzana jest siła elektromotoryczna foto - SEM (napięcie fotowoltaiczne). Fotoogniwa zasilające znajdują głównie zastosowanie jako baterie słoneczne, które są optymalizowane na dużą wyjściową moc elektryczną.



Rys. 5. Struktura złączonego fotoogniwa krzemowego wraz z wyprowadzeniami anody A i katody K (a) oraz sposób włączenia ogniwa do obwodu obciążonego rezystancją  $R_0$  (b)



Rys. 6. Pojedyncza struktura krzemowego fotoogniwa złączonego (w przekroju)

Oznaczenia do rysunku 6:

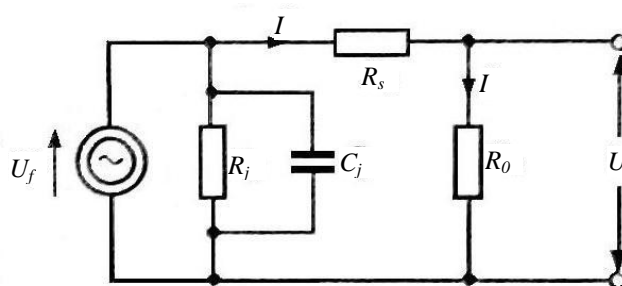
- $h \cdot \nu$  - energia padających fotonów,
- $I_f$  - prąd fotoelektryczny,
- $R_s$  - szeregową rezystancję zastępczą,
- A - pole powierzchni światłoczułej,
- Al - aluminiowy kontakt pierścieniowy,
- Si - krzem (typu n),
- $SiO_2$  - warstwa dwutlenku krzemu,
- Au : Sb - złoto domieszkowane antymonem (kontakt warstwy typu n),
- $X_j$  - głębokość złącza p - n,
- $X_m$  - głębokość obszaru ładunku przestrzennego złącza p - n,
- $\beta$  - współczynnik absorpcji promieniowania.

Warunkiem optymalnym dla fotoogniw jest spełnienie równania:

$$X_j + X_m = \frac{1}{\beta}, \quad (1)$$

gdzie:  $1/\beta$  - głębokość wnikania promieniowania.

Na struktury złączone fotoogniw stosuje się krzem o małej rezystywności (około  $1 \Omega \cdot \text{cm}$ ). Szerokość przerwy energetycznej między pasmem walencyjnym, a pasmem przewodnictwa dla krzemu wynosi  $E_g = 1,12 \text{ eV}$ . Mała rezystywność krzemu oraz duża głębokość złącza p - n warunkują zmniejszenie do minimum szeregowej rezystancji zastępczej  $R_s$ . Wymaganie minimalnej  $R_s$  dla materiału przyczynia się z kolei do otrzymania dużego prądu fotoelektrycznego  $I_f$  oraz do wzrostu prędkości działania fotoogniw, jak również innych fotodetektorów.



Rys. 7. Zastępczy obwód elektryczny fotoogniwa

Oznaczenia do rysunku 7:

$R_s$  - szeregową rezystancją zastępczą,

$R_j$  - rezystancją złącza,

$R_o$  - rezystancją obciążenia,

$C_j$  - pojemnością złącza,

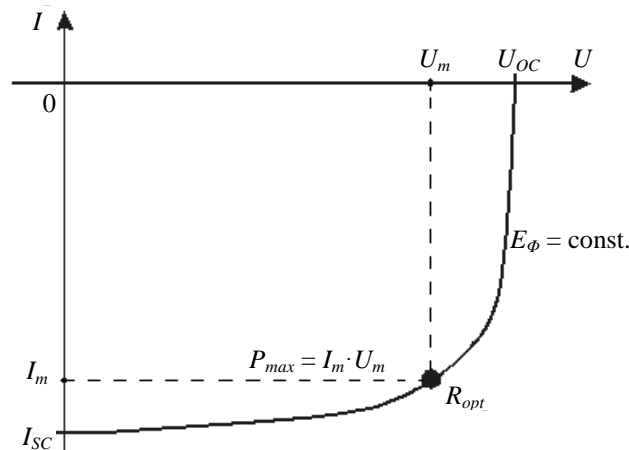
$U$  - napięciem na rezystancji obciążenia,

$I$  - prądem płynącym przez  $R_o$  i  $R_s$  ze źródła (prąd jasny).

Dla zastępczego obwodu elektrycznego fotoogniwa rozwartego rezystancją obciążenia jest nieskończenie duża i napięcie fotoelektryczne dąży do wartości maksymalnej. Dla zastępczego obwodu zwartego rezystancją obciążenia równa się zero i prąd fotoelektryczny zwarciaowy jest prądem maksymalnym fotoogniwa.

$$U = U_f - I \cdot R_s, \quad (2)$$

gdzie:  $U_f$  - napięcie fotoelektryczne (fotowoltaiczne).



Rys. 8. Charakterystyka prądowo - napięciowa fotoogniwa krzemowego z wyznaczonym punktem mocy optymalnej  $P_{max}$ , wydzielonej w obwodzie

Oznaczenia do rysunku 8:

- $U_{OC}$  - napięcie fotoelektryczne jałowe ogniwa, przy odłączonej rezystancji obciążenia  $R_0$ ,
- $I_{SC}$  - prąd zwarcia fotoogniwa przy  $R_0 = 0$ ,
- $E_\phi$  - natężenie strumienia świetlnego,
- $P_{max}$  - maksymalna moc wydzielona w obwodzie, przy stałym natężeniu strumienia  $E_\phi$ ,
- $R_{opt}$  - wartość rezystancji obciążenia, przy której moc w obwodzie jest największa,
- $I_m, U_m$  - wartości prądu i napięcia, przy optymalnej rezystancji obciążenia  $R_{opt}$ .

### 3. PRZEPROWADZENIE POMIARÓW

#### 3.1. Opis stanowiska pomiarowego

Układ pomiarowy został umieszczony w zaciemnionym pomieszczeniu pomiarowym, wraz z zainstalowaną w nim żarówką halogenową. Na przesuwanej prowadnicy umieszczono fotoogniwo oraz czujnik luksomierza. Umożliwia to dokładny pomiar natężenia światła przy maksymalnym przesunięciu prowadnicy w prawo. Pomiar parametrów ogniwa fotowoltaicznego odbywa się przy maksymalnym przesunięciu prowadnicy w lewo. Wszystkie pomiary należy wykonywać przy zamkniętym pomieszczeniu pomiarowym.

Jako źródło światła została wykorzystana żarówka halogenowa o mocy maksymalnej  $P_{max} = 35 \text{ W}$ , przy zasilaniu napięciem stałym 12 V, która przy maksymalnej mocy emituje strumień światła o natężeniu  $E_\phi \approx 19 \text{ klx}$ . Żarówka zasilana jest z zasilacza prądu stałego (DC) NDN DF1730SL.

W układzie pomiarowym zostały wykorzystane następujące mierniki:

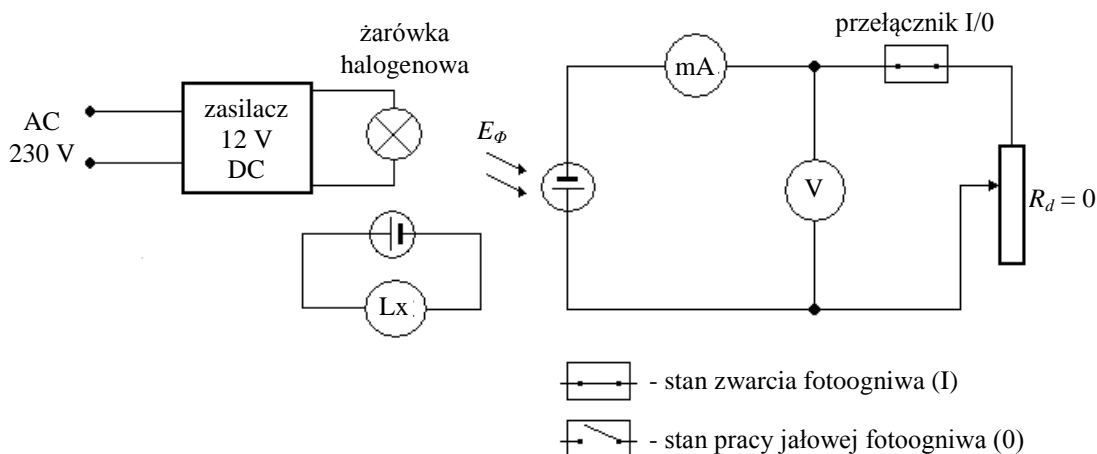
- miliwoltomierz cyfrowy MXD-4660A,
- miliamperomierz cyfrowy APPA 207,

- luksomierz cyfrowy.

Jako obciążenie w obwodzie pomiarowym wykorzystany został rezystor dekadowy o zakresie rezystancji (0 ÷ 1) MΩ.

### 3.2. Pomiar prądu zwarcia i napięcia jałowego fotoogniwa

Pomiary należy przeprowadzić dla 11 wartości natężenia oświetlenia  $E_\phi$ . W tym celu należy zmieniać napięcie zasilające źródło światła  $U_z$  w dopuszczalnym dla niego zakresie (0 ÷ 12) V. Dla każdej wartości natężenia strumienia światła należy zmierzyć prąd zwarcia  $I_{SC}$  oraz napięcie jałowe ogniwa  $U_{OC}$ . Przy pomiarze prądu zwarcia w obwodzie włączona pozostaje rezystancja dekadowa  $R_d$ , ustawiona na zero ( $R_d = 0$ ). W celu zmierzenia napięcia jałowego należy odłączyć z obwodu obciążenie  $R_d$ , używając zainstalowanego w obwodzie przełącznika: *Stan zwarcia / Stan pracy jałowej*. Wyniki należy zanotować w zamieszczonej w instrukcji tabeli pomiarowej i na ich podstawie wykreślić charakterystyki  $I_{SC} = f(E_\phi)$  oraz  $U_{OC} = f(E_\phi)$ .



Rys. 9. Schemat układu do pomiaru prądu zwarcia i napięcia jałowego fotoogniwa

Tabela 1. Wyniki pomiarów prądu zwarcia i napięcia jałowego fotoogniwa

L.p.	$U_z$	$E_\phi$	$I_{SC}$	$U_{OC}$
	V	lx	mA	V
1.	2,0			
2.	3,0			
3.	4,0			
4.	5,0			
5.	6,0			
6.	7,0			
7.	8,0			
8.	9,0			
9.	10,0			
10.	11,0			
11.	12,0			



Oznaczenia w tabeli:

$U_z$  - napięcie zasilające źródło światła,

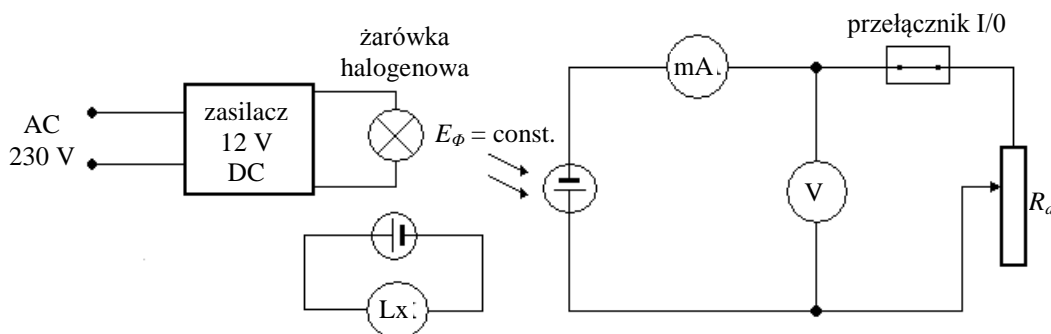
$E_\phi$  - natężenie strumienia świetlnego,

$I_{SC}$  - prąd zwarcia generowany fotoelektrycznie,

$U_{OC}$  - napięcie jałowe generowane fotoelektrycznie.

### 3.3. Pomiar charakterystyk prądowo - napięciowych fotoogniwa

W przedstawionym układzie pomiarowym należy dla 4 wartości natężenia strumienia świetlnego  $E_\phi$  wykonać pomiary charakterystyk prądowo - napięciowych. Wartości natężenia strumienia świetlnego uzyskujemy przez regulację napięcia zasilającego źródła światła  $U_z$ . Pomiary należy wykonać dla zamieszczonych w tabeli wartości rezystancji obciążenia  $R_d$  w zakresie  $(0 \div 1) \text{ M}\Omega$ . Wyniki należy zanotować w zamieszczonej w instrukcji tabeli pomiarowej i na ich podstawie wykreślić na wspólnym wykresie charakterystyki  $I = f(U)$ .



Rys. 10. Schemat układu do pomiaru charakterystyk prądowo - napięciowych fotoogniwa

Tabela 2. Wyniki pomiarów charakterystyk prądowo - napięciowych fotoogniwa

L.p.	$U_{z1} = 8 \text{ V}$ $E_{\phi 1} = \dots\dots\dots$			$U_{z2} = 9 \text{ V}$ $E_{\phi 2} = \dots\dots\dots$			$U_{z3} = 11 \text{ V}$ $E_{\phi 3} = \dots\dots\dots$			$U_{z4} = 12 \text{ V}$ $E_{\phi 4} = \dots\dots\dots$		
	$R_d$	$I_1$	$U_1$	$R_d$	$I_2$	$U_2$	$R_d$	$I_3$	$U_3$	$R_d$	$I_4$	$U_4$
	$\Omega$	mA	V	$\Omega$	mA	V	$\Omega$	mA	V	$\Omega$	mA	V
1.	0			0			0			0		
2.	10			10			10			10		
3.	20			20			20			20		
4.	30			30			30			30		
5.	40			40			40			40		
6.	50			50			50			50		
7.	60			60			60			60		
8.	80			80			80			80		
9.	100			100			100			100		

Ćw. 7. Badanie właściwości ogniw słonecznych

10.	120			120			120			120		
11.	150			150			150			150		
12.	200			200			200			200		
13.	300			300			300			300		
14.	400			400			400			400		
15.	500			500			500			500		
16.	700			700			700			700		
17.	1 000			1 000			1 000			1 000		
18.	1 500			1 500			1 500			1 500		
19.	2 000			2 000			2 000			2 000		
20.	4 000			4 000			4 000			4 000		
21.	6 000			6 000			6 000			6 000		
22.	8 000			8 000			8 000			8 000		
23.	10 000			10 000			10 000			10 000		

Oznaczenia w tabeli:

$R_d$  - rezystancja obciążenia w obwodzie pomiarowym,

$I_l$  - prąd płynący przez rezystancję obciążenia,

$U_l$  - spadek napięcia na rezystancji obciążenia.

### 3.4. Opracowanie wyników pomiarów

Wszystkie charakterystyki prądowo - napięciowe należy przedstawić na wspólnym wykresie. Dla każdej z nich należy wyznaczyć wartości mocy w zależności od rezystancji obciążenia  $R_d$ , korzystając ze wzoru:

$$P(R_d) = U \cdot I \quad (3)$$

oraz wartość optymalnej rezystancji dopasowania obciążenia  $R_{opt}$ , dla której moc wydzielona w obwodzie fotoogniwa, przy stałym natężeniu strumienia świetlnego jest maksymalna. Wyniki obliczeń mocy zestawić w tabeli 3 i na ich podstawie na wspólnym wykresie przedstawić zależność mocy od rezystancji obciążenia  $P = f(R_d)$  dla każdej wartości natężenia światła. Przy wykonywaniu charakterystyk rezystancję należy przyjąć w skali logarytmicznej, ze względu na szeroki zakres obciążeń.

Tabela 3. Wyniki obliczeń

L.p.	$R_d$	$E_{\phi 1} = \dots\dots\dots$	$E_{\phi 2} = \dots\dots\dots$	$E_{\phi 3} = \dots\dots\dots$	$E_{\phi 4} = \dots\dots\dots$
	$\Omega$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
		mW	mW	mW	mW
1.	10				
2.	20				
3.	30				
4.	40				
5.	50				
6.	60				
7.	80				
8.	100				
9.	120				
10.	150				
11.	200				
12.	300				
13.	400				
14.	500				
15.	700				
16.	1 000				
17.	1 500				
18.	2 000				
19.	4 000				
20.	6 000				
21.	8 000				
22.	10 000				

#### 4. OPRACOWANIE SPRAWOZDANIA

Sprawozdanie powinno zawierać:

- schematy układów pomiarowych,
- tabele wyników przeprowadzonych pomiarów,
- przykładowe obliczenia,
- wykresy zależności:  $I_{SC} = f(E_{\phi})$ ,  $U_{OC} = f(E_{\phi})$ ,  $I = f(U)$ ,  $P = f(R_d)$ ,
- uwagi i wnioski odnośnie otrzymanych wyników.

## 5. PYTANIA KONTROLNE

- Przedstawić budowę złącza p - n oraz wyjaśnić zjawisko powstawania tzw. bariery potencjału.
- Charakterystyka prądowo - napięciowa oświetlonego złącza p - n (wykres i wzór).
- Przedstawić budowę typowego fotoogniwa krzemowego oraz jego zastępczy obwód elektryczny.
- W jakich warunkach wykonujemy pomiary prądu zwarcia i napięcia jałowego fotoogniwa (układ pomiarowy, otrzymane charakterystyki)?
- Pomiar charakterystyk prądowo - napięciowych fotoogniwa (warunki pomiarów, układ pomiarowy, otrzymane charakterystyki).
- Jak się wyznacza punkt mocy maksymalnej (otrzymane charakterystyki)?

## 6. LITERATURA

- Pluta Z.: *Słoneczne instalacje energetyczne*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2008.
- Klugmann E.: *Alternatywne źródła energii. Energetyka fotowoltaiczna*. Białystok, Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko 1999.
- Świt C., Pułtorak J.: *Przyrządy półprzewodnikowe*. Warszawa, WNT 1976.
- Streetman B.: *Przyrządy półprzewodnikowe*. Warszawa, WNT 1976.
- Cieślak J.: *Półprzewodnikowe elementy optoelektroniczne*. Warszawa, Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej 1981.
- Gaponow W. I.: *Elektronika - część I. Podstawy fizyczne*. Warszawa, PWN 1965.
- Watson J.: *Elektronika*. Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 2006.
- Stecewicz T., Kotlicki A.: *Elektronika w laboratorium naukowym*. Warszawa, PWN 1994.