



## **Ćwiczenie nr 5**

### **Wpływ oświetlenia na półprzewodnik oraz na złącze p-n**

#### **I. Zagadnienia do samodzielnego przygotowania**

- model pasmowy półprzewodnika,
- konduktywność półprzewodników domieszkowanych i niedomieszkowanych,
- wpływ światła na konduktywność półprzewodnika,
- wewnętrzne zjawisko fotoelektryczne,
- parametry fotorezystorów,
- charakterystyka prądowo-napięciowa złącza p-n, wzór Shockley'a,
- wpływ światła na charakterystykę prądowo-napięciową złącza p-n,
- dioda półprzewodnikowa jako detektor promieniowania (parametry, budowa),
- ogniwo słoneczne (parametry, budowa).

#### **II. Program zajęć**

- pomiar zależności rezystancji fotorezystora od natężenia oświetlenia,
- pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej fotodiody,
- pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej ogniwa słonecznego (wyznaczenie parametrów charakterystycznych)

#### **III. Literatura**

- C. Świt, J. Pułtorak - Przyrządy półprzewodnikowe.  
D. Ohly, Z. Radzimski - Elementy elektroniczne, Skrypt do Laboratorium.  
E. Streetman - Przyrządy półprzewodnikowe.

Wykonując pomiary **PRZESTRZEGAJ** przepisów BHP związanych z obsługą urządzeń elektrycznych.

#### IV. Wiadomości wstępne

##### 1. Wewnętrzne zjawisko fotoelektryczne

Fotony absorbowane przez półprzewodnik mogą spowodować powstanie nośników prądu w drodze generacji par elektron-dziura lub w drodze generacji jednego typu nośników z poziomów domieszkowych (jonizacji donorów lub akceptorów w niskich temperaturach). Warunkiem wystąpienia opisanych efektów jest odpowiednia energia absorbowanego fotonu. Warunek progowy zjawiska fotoelektrycznego wewnętrznego:

półprzewodnik samoistny:  $h\nu \geq W_g$     stąd:  $\lambda_{prog} = \frac{ch}{W_g}$     czyli  $\lambda_{prog} [\mu m] = \frac{1,24}{W_g [eV]}$

półprzewodnik donorowy:  $h\nu \geq W_c - W_d$     stąd:  $\lambda_{prog} = \frac{ch}{W_c - W_d}$ ,

$$\lambda_{prog} [\mu m] = \frac{1,24}{W_c - W_d [eV]}$$

c - prędkość światła, h - stała Plancka

półprzewodnik akceptorowy:  $h\nu \geq W_a - W_v$     stąd:  $\lambda_{prog} = \frac{ch}{W_a - W_v}$ ,

$$\lambda_{prog} [\mu m] = \frac{1,24}{W_a - W_v [eV]}$$

Przykładowe wartości progowej długości fali:

materiał	Ge	Si	GaN	Ge (dom. Au)	Ge (dom. Zn)	InSb
$\lambda_{prog} [\mu m]$	1,8	1,1	0,37	15	40	10

Konduktywność półprzewodnika oświetlonego  $\sigma_f$  wyraża się sumą konduktywności ciemnej  $\sigma_o$  (półprzewodnik nieoświetlony) i konduktywności fotoelektrycznej  $\Delta\sigma$  (przyrost konduktywności półprzewodnika wynikający z oświetlenia)

$$\sigma_f = \sigma_o + \Delta\sigma$$

$$\sigma_o = q (n_o \mu_n + p_o \mu_p)$$

$\mu_n, \mu_p$  - ruchliwości elektronów i dziur

$n_o, p_o$  - koncentracje równowagowe elektronów i dziur

q - ładunek elementarny

$$\Delta\sigma = q (\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p)$$

przy czym: przyrost liczby nośników  $\Delta n, \Delta p$  jest liniową funkcją strumienia świetlnego (dla małych mocy promieniowania) i wyraża się wzorem:

$$\Delta n = \beta k \Phi \tau \quad - \text{dla elektronów (dla dziur analogicznie),}$$

gdzie:  $\beta$  - wydajność kwantowa,  $\lambda$  - długość fali światła,  $k$  - współczynnik absorpcji półprzewodnika;  
 $\Phi$  - strumień świetlny;  $\tau$  - czas życia nośników

Stąd kondukcyjność półprzewodnika jest liniową funkcją strumienia świetlnego w granicach stosowalności wzoru  $\Delta n = \beta k \Phi \tau$ .

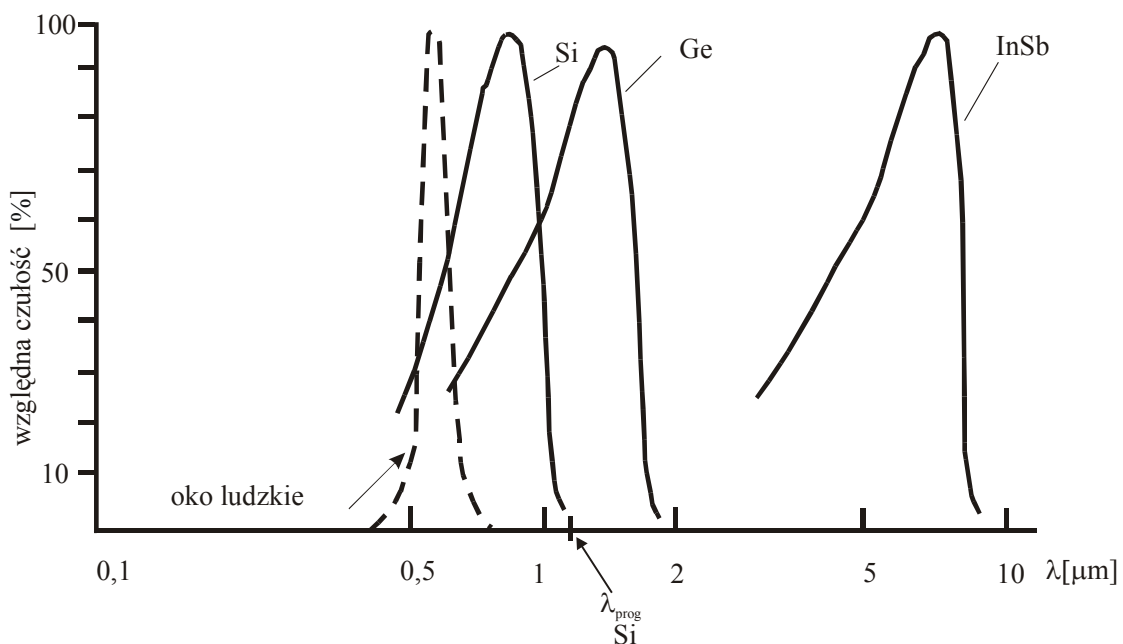
Właściwość tą wykorzystuje się w fotorezystorach. Wzrost kondukcyjności pod wpływem światła powoduje malenie rezystancji fotorezystora. Przy stałym napięciu przyłożonym do fotorezystora spowoduje to określony przyrost prądu w obwodzie fotorezystora. Do parametrów charakterystycznych fotorezystorów zalicza się: wartość rezystancji ciemnej (zwykle zakres  $M\Omega$ ), wartość rezystancji przy określonym natężeniu oświetlenia (np.  $1k\Omega$  dla  $E=1klx$ ) oraz zakres widmowy i czułość.

Czułość fotoelementu (fotorezystora, ale także fotodiody złączonej) dla światła monochromatycznego określa się następującymi wzorami:

$$C_{\lambda} = \frac{\Delta I_{\Phi}}{P_{\lambda}} \left[ \frac{A}{W} \right] \quad \text{lub} \quad C_{\lambda} = \frac{\Delta I_{\Phi}}{E_{\lambda}} \left[ \frac{A}{lx} \right]$$

gdzie:  $P_{\lambda}$  - moc padającego promieniowania,  $E_{\lambda}$  - natężenie oświetlenia,  $\Delta I_{\Phi}$  - przyrost prądu (fotoprądu) w stosunku do prądu ciemnego przy określonym napięciu na fotoelemencie.

Czułość zależy od rodzaju półprzewodnika i długości fali świetlnej - tę ostatnią zależność przedstawia Rys. 1. Zwykle w katalogach podaje się wartość maksymalną czułości dla optymalnej długości fali.



Rys. 1. Przebieg względnej czułości widmowej kilku materiałów półprzewodnikowych

## 2. Wpływ światła na złącze p-n

Zależność prądowo-napięciową oświetlonego złącza p-n opisuje zmodyfikowany wzór Shockley'a:

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right] - I_\Phi$$

gdzie:  $I_s$  - prąd ciemny, generacji lub nasycenia

$I_\Phi$  - fotoprąd, prąd związany z występowaniem wewn. efektu fotoelektrycznego

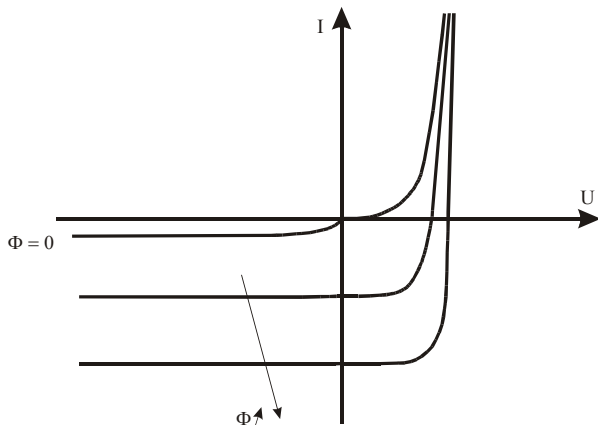
Fotoprąd zależy od strumienia świetlnego  $\Phi$  (ilości padających fotonów), a nie zależy od napięcia polaryzacji złącza. Pole elektryczne złącza p-n powoduje natychmiastowe rozdzielanie nośników generowanych przez fotony w obszarze złącza i przepływ zwiększonego prądu w obwodzie zewnętrznym. Również nośniki prądu generowane poza obszarem złącza ale w jego pobliżu, dyfundując do obszaru warstwy zaporowej, podlegają działaniu pola w złączu.

Na rys. 2 przedstawiono charakterystykę prądowo-napięciową oświetlonego złącza p-n. Parametrem rodziny krzywych jest strumień świetlny  $\Phi$  (odpowiadający mocy padającego światła,  $P$  wyrażonej w lumenach) lub natężenie oświetlenia  $E$  (jednostką jest luks, przy czym:  $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$ ).

Jak widać, ze wzrostem strumienia świetlnego rośnie prąd wsteczny złącza spolaryzowanego zaporowo (wykres w III ćwiartce układu współrzędnych). Ten rodzaj pracy, polaryzacja złącza stałym napięciem w kierunku zaporowym, jest wykorzystywany w fotodiodach. Fotodiody pracują jako czujniki promieniowania optycznego w wielu zastosowaniach; w telekomunikacji światłowodowej przede wszystkim jako bardzo szybkie detektory sygnałów optycznych.

*Ogniwo fotowoltaiczne (fotoogniwo, ogniwo słoneczne).*

Opisany wyżej mechanizm rozdzielania ładunków (nośników) w polu wbudowanym złącza powoduje wytworzenie w niespolaryzowanym złączu siły elektromotorycznej,  $E_\Phi$



Jest to zjawisko fotowoltaiczne, które wykorzystuje się w ogniwie słonecznym. Siła elektromotoryczna fotoogniwa,  $E_\Phi$  inaczej nazywana jest napięciem rozwarcia fotoogniwa,  $U_{oc}$ : patrz Rys.3. W IV ćwiartce ukł. wsp. ogniwo jest elementem dostarczającym moc elektryczną.

Rys. 2. Charakterystyka prądowo-napięciowa złącza p-n oświetlonego strumieniem światła  $\Phi$

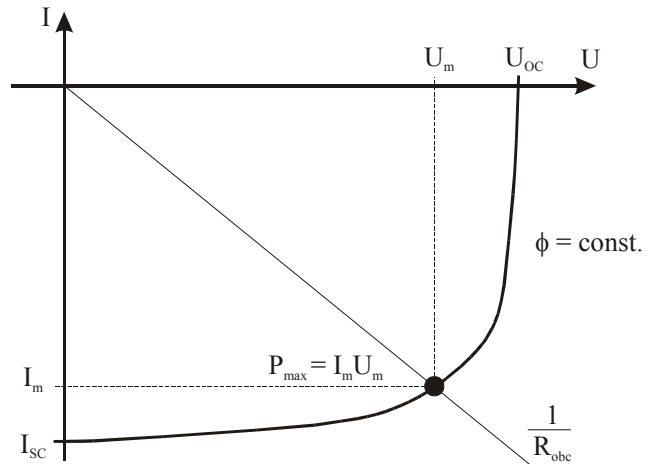
Napięcie rozwarcia  $U_{oc}$ , można wyznaczyć z podanego wyżej wzoru na prąd oświetlonego złącza p-n. Dla ogniwa rozwartego, prąd w obwodzie zewnętrznym nie płynie, więc:

$$I_s \left[ \exp\left(\frac{qU_{oc}}{nkT}\right) - 1 \right] - I_\Phi = 0$$

$$\text{stąd} \quad U_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(1 + \frac{I_\Phi}{I_s}\right)$$

Na charakterystyce prądowo-napięciowej ogniwa fotowoltaicznego (Rys. 3), wartość siły

elektromotorycznej odpowiada punktowi przecięcia charakterystyki z osią odciętych (U). Przecięcie tej charakterystyki z osią rzędnych (I) wyznacza prąd zwarcia ogniwa fotowoltaicznego  $I_{sc}$  dla ogniwa zwartego czyli dla  $U=0$ . Na charakterystyce I-U wyznaczyć można punkt  $P_{max}$ , w którym moc dostarczana przez ogniwo będzie maksymalna. Przez punkt mocy maksymalnej o współrzędnych  $(U_m, I_m)$ , który jest punktem pracy ogniwa, oraz początek układu współrzędnych wykreślić



Rys. 3. Charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa słonecznego

można prostą obciążenia. Nachylenie tej prostej związane jest z wartością rezystancji obciążenia  $R_{obc}$  (w tym wypadku obciążenia optymalnego) dołączonego do ogniwa.

Współczynnik wypełnienia FF (*ang.* fill-factor) definiowany jest jako (patrz Rys. 3) stosunek maksymalnej mocy wydzielonej w obciążeniu do iloczynu  $I_{sc} \cdot U_{oc}$ :

$$FF = \frac{I_m \cdot U_m}{I_{sc} \cdot U_{oc}}$$

Wartość współczynnika wypełnienia świadczy o jakości fotoogniwa, dla ogniw słonecznych o dobrej konstrukcji i technologii zawiera się w granicach 0,7...0,8.

Ważnym, z energetycznego punktu widzenia, parametrem ogniw fotowoltaicznych jest ich sprawność  $\eta$  definiowana jako stosunek wytworzonej mocy elektrycznej do mocy padającego promieniowania świetlnego ( $P_{we}$ )

$$\eta = \frac{I_m \cdot U_m}{P_{we}} \cdot 100\%$$

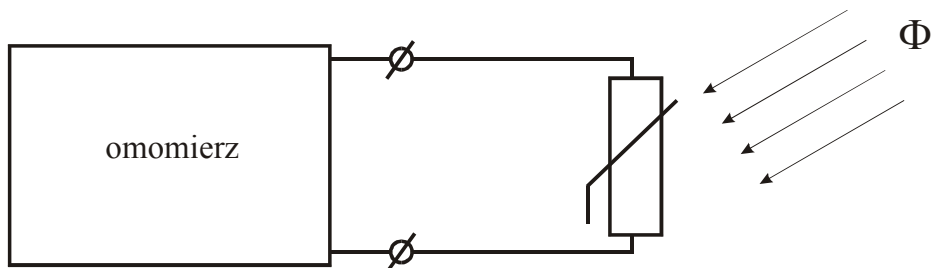
Sprawność wytwarzanych przemysłowo krzemowych ogniw fotowoltaicznych zawiera się w granicach 12-14%, a sprawność teoretyczna wynosi: dla ogniw krzemowych ok. 24%, dla ogniw wykonanych z GaAs przekracza 30%.

## V. Pomiary

Jako źródło promieniowania świetlnego stosujemy rzutnik z żarówką halogenową. Wielkość strumienia światła  $\Phi$  jest proporcjonalna do natężenia oświetlenia  $E$ . Oświetlenie mierzonego elementu fotoelektrycznego maleje w miarę wzrostu odległości elementu od źródła światła. Zmieniając położenie elementu fotoelektrycznego względem źródła światła mierzymy charakterystyki oświetleniowe. Przed pomiarami elementów należy wyskalować źródło światła dla danego stanowiska za pomocą luksomierza według wskazówek Prowadzącego.

### 1. Pomiar charakterystyki fotorezystora

Zależność rezystancji fotorezystora od oświetlenia zmierzyć w układzie jak na Rys. 4 a wykreślić w liniowym układzie współrzędnych zależności  $R^{-1}=f(E)$  gdzie:  $R$  - rezystancja fotorezystora,  $E$  - natężenie oświetlenia wyrażone w klx (kilo-luksach).

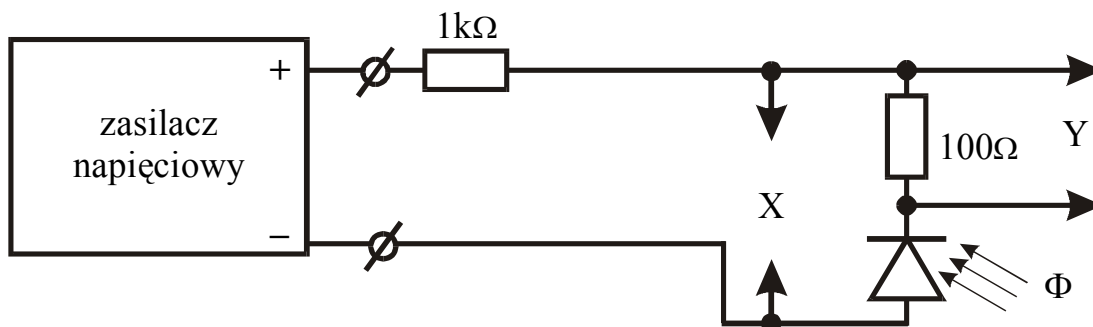


Rys. 4. Układ do pomiaru zależności rezystancji fotorezystora od oświetlenia

### 2. Pomiar charakterystyki $I=f(U)$ / <sub>$E=const.$</sub> dla fotodiody pracującej jako fotodetektor

Zmierzyć charakterystyki  $I=f(U)$  / <sub>$E=const.$</sub>  fotodiody, kierunek zaporowy, dla trzech wartości oświetlenia, w układzie jak na Rys. 5.

**UWAGA: Zwrócić uwagę na prawidłową polaryzację elementu i dopuszczalne napięcie.**

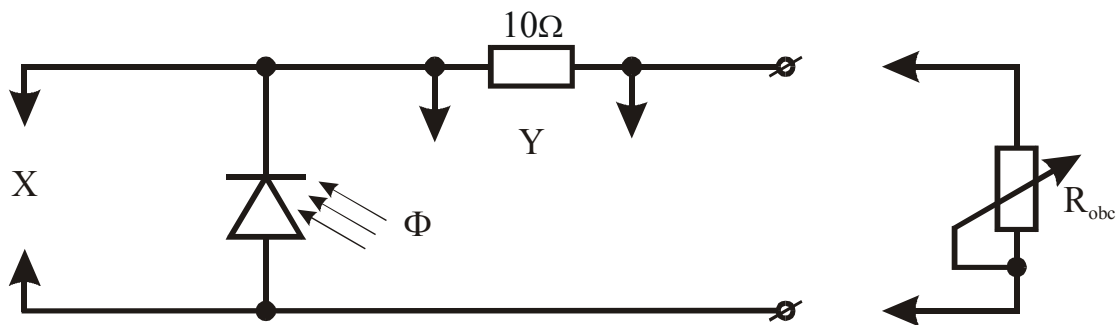


Rys. 5. Układ do pomiaru charakterystyki prądowo-napięciowej fotodiody pracującej jako detektor (X,Y – wejścia rejestratora)

### 3. Pomiar charakterystyk $I=f(U)$ dla ogniwa fotowoltaicznego

W układzie jak na rys. 6 zmierzyć dla co najmniej trzech wartości natężenia oświetlenia  $E$ =parametr, zależność  $I=f(U)$  ogniwa. Wykres charakterystyki  $I-U$  otrzymujemy zmieniając płynnie wartość rezystora regulowanego  $R_{obc}$ , czyli zmieniając płynnie punkt pracy ogniwa.

Pomiar przeprowadzić wykorzystując rejestrator X-Y.



Rys. 6. Układ do pomiaru charakterystyki napięciowo-prądowej ogniwa słonecznego  
X,Y – wejścia rejestratora

dla  $R_{obc} \rightarrow 0$  uzyskujemy warunek bliski  $I=I_{sc}$ ,  $U \cong I_{sc} \cdot 10 \Omega$

dla  $R_{obc} \rightarrow \infty$  uzyskujemy warunek bliski  $U=U_{oc}$ ,  $I \rightarrow 0$ ;

dla odczytu  $U_{oc}$  spowodować rozwarcie obwodu odłączając  $R_{obc}$ .

Na arkuszu z wykreślonymi charakterystykami, dla jednej ze zmierzonych zależności, wyznaczyć punkt pracy dla optymalnego obciążenia  $R_{obc}$ ,  $P_{max}$  oraz współczynnik FF.

Punkt pracy dla  $P_{max}$  określić orientacyjnie porównując wartość mocy w wybranych 3 punktach położonych w zakresie „kolana” charakterystyki  $I-U$ .