

## BADANIE WŁAŚCIWOŚCI FOTOOPORNIKA I FOTOOGNIWA

- I. Cel ćwiczenia:** wprowadzenie w problematykę fotometrii fizycznej (obiektywnej) półprzewodnikowych detektorów światła widzialnego oraz zbadanie właściwości fotoopornika i fotoogniwa w oparciu o podstawowe prawo fotometrii.
- II. Przyrządy:** fotoopornik RPP 550, fotoogniwo selenowe multimetr cyfrowy VC-10T, żarówka 220V/40W, autotransformator, woltomierz i amperomierz prądu zmiennego.
- III. Literatura:**
1. S. Szczeniowski, Fizyka doświadczalna t. IV i V (fotometria, zjawisko fotoelektryczne).
  2. C.K. Kittel, Wstęp do fizyki ciała stałego (teoria półprzewodników).
  3. F.Crawford - Fale (zagadnienia ogólne).
  4. W.I.Gaponow - Elektronika (teoria, budowa i właściwości fotooniwa).

### IV. Wprowadzenie.

#### IV.1 Rodzaje fotoelementów i ich charakterystyki

Najbardziej rozpowszechnionymi miernikami strumienia świetlnego i oświetlenia są przyrządy wyposażone w elementy światłoczułe, zwane krótko fotoelementami, w których pod wpływem światła zachodzi bardzo wydajne zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne (fotokomórka, fotopowielacz) lub wewnętrzne (fotoogniwo, fotoopornik, fototranzystor).

W fotokomórce i fotopowielaczu fotony padające na elektrodę zwaną fotokatodą powodują uwolnienie z niej elektronów, które dążąc do anody wytwarzają przepływ prądu elektrycznego w obwodzie. Liczba elektronów może być powiększona wskutek wtórnej jonizacji gazu w fotokomórce gazowanej lub też wskutek wtórnej emisji elektronów z elektrod ustawionych w odpowiedni sposób na drodze elektronów od fotokatody do anody, jak ma to miejsce w fotopowielaczu elektronowym.

W pozostałych fotoelementach elektrony walencyjne, znajdujące się wewnątrz warstwy, do której przenika światło, przechodzą do pasma przewodnictwa stając się swobodnymi nośnikami ładunku przez co ulega zmianie przewodność elektryczna elementu. Powstające w odpowiednich warunkach swobodne nośniki ładunku mogą również naruszać równowagę elektryczną w elemencie i wytworzyć siłę elektromotoryczną zależną od strumienia świetlnego jak ma to miejsce w fotoogniwie.

Do podstawowych charakterystyk fotoelementu zaliczamy:

**czułość normalną**, odniesioną do strumienia świetlnego lub oświetlenia wytwarzanego przez wzorcowe źródło światła,

**wydajność kwantową** lub tzw. charakterystykę czy też czułość widmową,

**częstość graniczną** lub bezwładność elementu,

**prąd ciemny** płynący przez fotoelement znajdujący się w ciemności.

*Czułością normalną* nazywamy stosunek natężenia prądu płynącego przez fotoelement do wielkości strumienia świetlnego lub oświetlenia. Czułości normalne podawane są zwykle w amperach na lumen lub amperach na luks.

*Wydajność kwantowa* równa jest liczbowo stosunkowi liczby wyemitowanych fotoelektronów lub liczby nowo powstałych swobodnych nośników ładunku do liczby fotonów o określonej długości fali, które padły na fotoelement.

Wydajność kwantowa zależy w sposób istotny od długości fali światła. Warunkiem koniecznym na to, aby zjawisko fotoelektryczne mogło zachodzić, jest, by energia pojedynczego fotonu  $h\nu$  była większa lub równa pracy wyjścia  $W$  elektronu z fotokatody w przypadku zjawiska fotoelektrycznego zewnętrznego i szerokości pasma wzbronionego w przypadku zjawiska fotoelektrycznego wewnętrznego w półprzewodniku samoistnym:

$$h\nu \geq W \quad (1)$$

gdzie  $h$  oznacza stałą Plancka, a  $\nu$ - częstota światła.

Ponieważ między długością fali światła  $\lambda$ , częstotą  $\nu$  i prędkością rozchodzenia się światła  $c$  zachodzi związek

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2)$$

to na podstawie wzoru (1) możemy napisać warunek konieczny na niezerową wartość wydajności kwantowej (jeśli zjawisko fotoelektryczne występuje, to wydajność kwantowa posiada wartość większą od zera):

$$\lambda \leq \frac{hc}{W} = \lambda_{gr} \quad (3)$$

gdzie  $\lambda_{gr}$  nazywamy graniczną długością fali światła dla zjawiska fotoelektrycznego.

Wydajność kwantowa jest ograniczona również od strony fal krótkich i posiada wartość większą od zera jedynie w pewnym przedziale długości fali, charakterystycznym dla danego materiału. Fotoelementy czułe na światło w bardzo szerokim zakresie fali posiadają na ogół złożony skład chemiczny, którego składniki osiągają maksimum wydajności kwantowej przy różnych długościach fali.

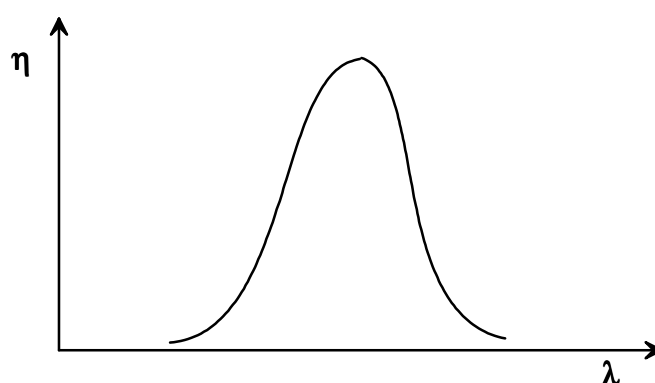
*Częstota graniczna* jest parametrem wynikającym z bezwładności fotoelementu, polegającej na tym, że zmiana przewodności elektrycznej czy też zmiana natężenia fotoprądu nie następuje natychmiast po zmianie oświetlenia, lecz z pewnym opóźnieniem. Jeżeli zmiany oświetlenia następują dostatecznie szybko po sobie, to "fotoelement nie nadąza" za zmianami strumienia świetlnego, a jego charakterystyki mierzone w określonej chwili zależą od średniej wartości oświetlenia w czasie i nie jesteśmy wówczas w stanie wyznaczyć tym elementem ani chwilowej wartości oświetlenia, ani zależności oświetlenia od czasu.

Częstota zmian oświetlenia, dla której występuje to zjawisko nazywamy częstotą graniczną, nie możemy zatem badać zmian strumienia świetlnego o częstoci większej od granicznej.

Fotoelementy o dużej bezwładności, a małej częstoci granicznej przeznaczone są do pomiarów strumieni świetlnych stałych w czasie, natomiast elementy o dużej wartości częstoci granicznej używane są do badania szybkozmiennych zjawisk optycznych.

## Typowe parametry fotoelementów

Fotoelement	Fotokomórka próżniowa	Fotopowielacz	Fotoopornik	Fotoogniwo	Fotodioda
Czułość norm. A/lm	$(2 \div 6) \cdot 10^{-5}$	$(0,1 \div 5) \cdot 10^3$	$0,01 \div 10$	$6 \cdot 10^{-3}$	30
A/lx	$(1 \div 5) \cdot 10^{-9}$		$10^{-5} \div 10^{-2}$	$10^{-7} \div 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Częstość graniczna Hz	$10^8$	$10^8$	3	$10^3 \div 10^4$	$10^5$
Napięcie zasilania V	$90 \div 250$	$1000 \div 2000$	$0,1 \div 500$	—	$10 \div 100$



**Rys.1** Wydajność kwantowa fotoelementu w zależności od długości fali.

Wykres czułości w zależności od długości fali ma taki sam kształt, a tak przedstawioną czułość nazywamy czułością widmową.

#### IV.2. Podstawowe prawo fotometrii

Wielkość oświetlenia wytwarzanego przez izotropowe źródło punktowe zmienia się w ośrodku o pomijalnie małej absorpcji, odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości od źródła światła. Twierdzenie to, w przybliżeniu słuszne również dla rozciągniętego źródła światła w odległościach znacznie większych od jego rozmiarów może być wykorzystane do wyznaczania zależności charakterystyk fotoelementu od oświetlenia.

Jeżeli np. przewodność fotoopornika maleje odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu jego odległości od źródła światła, które w przybliżeniu możemy uznać za punktowe, a ponadto w pobliżu zestawu doświadczalnego nie występują inne źródła ani też elementy dobrze odbijające światło, to oznacza to, iż przewodność badanego fotoopornika jest wprost proporcjonalna do oświetlenia.

#### IV.3. Fotoopornik

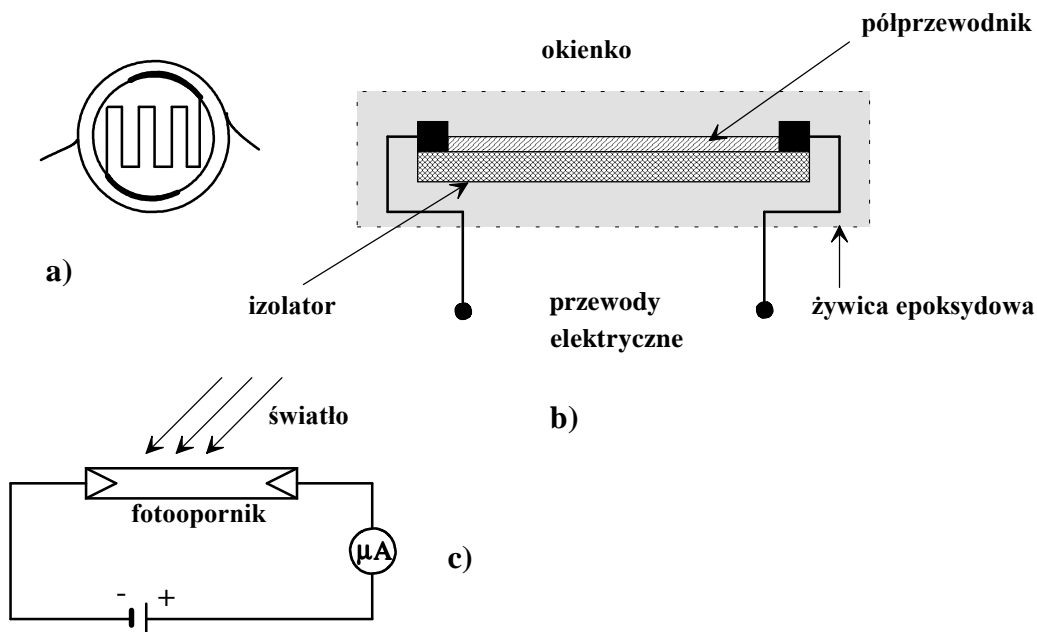
Fotoopornikiem (fotorezystorem) nazywamy element półprzewodnikowy, którego opór i przewodność zależą od oświetlenia a nie zależą od kierunku przepływu prądu. Najczęściej fotoopornik stanowi warstwa półprzewodnika (siarczku kadmu CdS lub ołowiu PbS, selenu, germanu

domieszkowanego złotem lub miedzią) naniesiona w postaci ścieżki na płytce izolacyjną i zatopiona w żywicy epoksydowej lub innym przezroczystym materiale izolacyjnym.

Zjawiskiem powodującym zmianę oporu elektrycznego i przewodności fotoopornika w zależności od oświetlenia jest zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne, a ponieważ liczba wytwarzanych w tym zjawisku par swobodnych nośników ładunku jest proporcjonalna (przynajmniej w pewnym przedziale wartości) do liczby padających fotonów to oczekujemy, że przewodność fotoopornika będzie proporcjonalna do oświetlenia.

Zaletą fotooporników jest prosta konstrukcja, łatwość stosowania w różnych układach pomiarowych i szeroki zakres czułości widmowej.

Podstawową wadą jest silna zależność przewodności od temperatury i duża bezwładność.



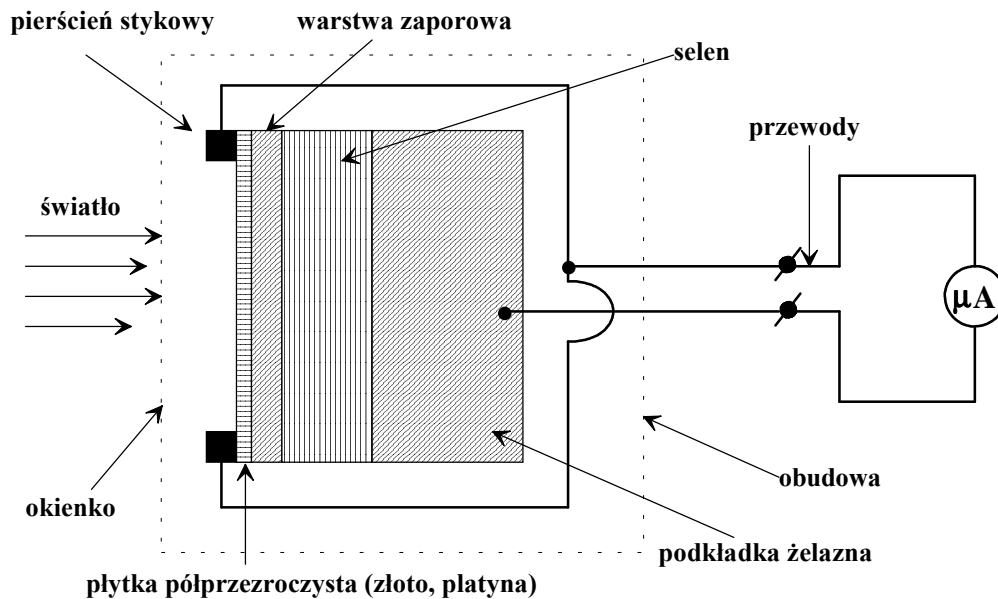
**Rys.2** Wygląd zewnętrzny a), budowa fotoopornika b) oraz sposób włączania go w obwód elektryczny c).

#### IV.4. Fotoogniwo

Fotoogniwo i fotodioda są elementami wykorzystującymi zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne zachodzące w obszarze złącza p-n. Jak wynika z teorii tego złącza na granicy dwóch półprzewodników o różnym typie przewodnictwa tworzy się bariera potencjału przeciwdziałająca dyfuzji dziur z obszaru p do obszaru n i elektronów z obszaru n do obszaru p. W warstwie półprzewodnika typu p przylegającej do niespolaryzowanego zewnętrznym napięciem złącza występuje nadmiar elektronów, a w takiej samej warstwie półprzewodnika typu n -nadmiar dziur (patrz uzupełnienie).

Jeżeli w złącze przenika światło o odpowiedniej długości fali, to dodatkowo wytwarzane w obszarze n dziury (nośniki mniejszościowe) będą przechodziły do obszaru p, a dodatkowe elektrony wytwarzane w obszarze p (również będące w tym obszarze nośnikami mniejszościowymi) przechodzą do obszaru n, co jest równoważne powstaniu siły elektromotorycznej  $E$ . Obszar typu n posiada potencjał wyższy od potencjału obszaru p, a łącząc obydwa przewodnikami o małym oporze elektrycznym uzyskamy w nim przepływ prądu o natężeniu wprost proporcjonalnym do

oświetlenia złącza. Prąd ten nazywamy najczęściej fotoprądem zwarcia w odróżnieniu od prądu płynącego przez fotoogniwo o biegunach połączonych ze sobą przez obwód o znacznym oporze - w tym ostatnim przypadku natężenie prądu nie jest wprost proporcjonalne do oświetlenia złącza.



Rys. 3 Budowa fotoogniwa selenowego

Jeżeli w pewnej chwili przerwiemy dopływ światła do złącza, to po bardzo krótkim czasie potencjały obu obszarów wyrównają się i prąd w obwodzie zaniknie - mówimy, że tzw. prąd ciemny fotoogniwa jest równy zero.

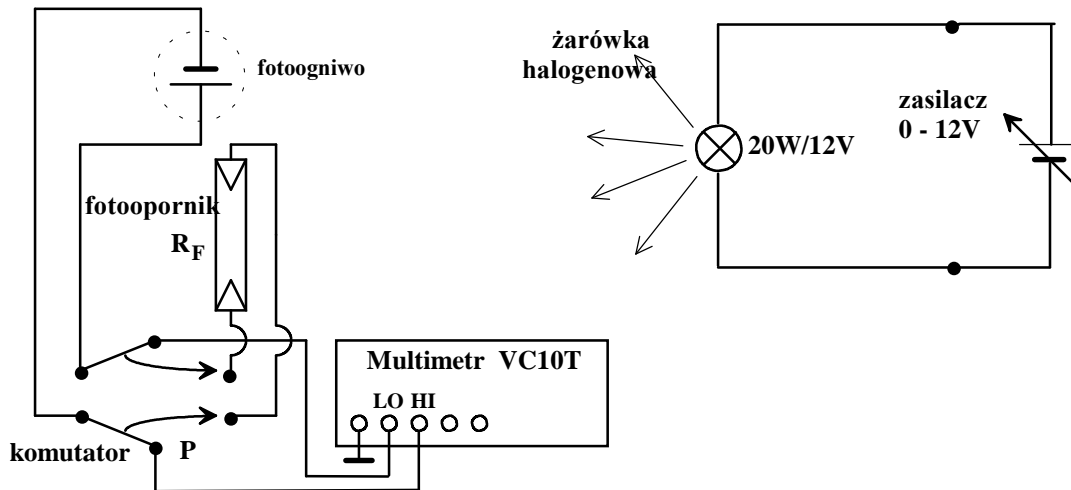
Fotoogniwo może być wykorzystane zarówno jako fotoelement w mierniku oświetlenia oraz jako źródło energii elektrycznej - np. na pokładzie sztucznego satelity lub w kalkulatorze elektronicznym. To samo złącze p-n spolaryzowane zewnętrzną różnicą potencjałów w kierunku zaporowym może również pełnić funkcję tzw. fotodiody, gdyż wzrost oświetlenia pociąga za sobą zwiększenie liczby mniejszościowych nośników ładunku i w konsekwencji wzrost prądu płynącego w kierunku zaporowym.

W przeszłości fotoogniwa selenowe, w których złącze p-n powstawało na granicy selen - metal (rys.3) wskutek procesu dyfuzji stanowiły najbardziej rozpowszechniony typ światłomierza fotoelektrycznego stosowanego w fotografii. Obecnie fotoogniwa pełnią funkcję li tylko baterii słonecznych (fotoogniwa krzemowe o złączu p-n usytuowanym na niewielkiej głębokości pod powierzchnią), natomiast w światłomierzach wykorzystuje się powszechnie fotooporniki i fotodiody krzemowe.

## V. Pomiary

- 1♦ Połączyć przyrządy według schematu przedstawionego na rys.4 ustawiając źródło światła w odległości 20 cm od fotoogniwa.
- 2♦ Ustawić przełącznik P w takiej pozycji, aby fotoogniwo zostało połączone z gniazdami pomiarowymi ("LO" i "HI" lub "N" i "W") multimetru cyfrowego, pracującego jako miliamperomierz (FUNKCJA: "mA", ZAKRES: "0,2")  
Tak dobrać napięcie zasilania żarówki, aby natężenie fotoprądu  $I_F$  wynosiło w przybliżeniu 0,2 mA. Opór wewnętrzny multimetru na tym zakresie jest na tyle mały, że mamy prawo uważać

wyznaczoną wartość  $I_F$  jako wartość fotoprądu zwarcia.



Rys.4 Schemat układu pomiarowego

3♦ Wyznaczyć zależność:

- natężenia fotoprądu ogniwa  $I_F = f(r)$ ,
- siły elektromotorycznej ogniwa  $E_F = f(r)$ ,
- oporu fotoopornika  $R = f(r)$ ,

od odległości żarówki od fotoelementów w przedziale od 0.3 m do 1.2 m. Należy pomiary tych trzech wielkości fizycznych wykonywać kolejno dla każdej z wybranych odległości pamiętając, że fotoogniwo jest źródłem siły elektromotorycznej, **a dołączenie zewnętrznego napięcia do gniazd pomiarowych multimetru cyfrowego przy wciśniętym przełączniku "  $k\Omega$  " ("  $R$  ") grozi uszkodzeniem przyrządu !**

**Dlatego też w celu zmierzenia oporu najpierw łączymy multimetr z fotoopornikiem, a dopiero później wciskamy przełącznik "  $k\Omega$  " ("  $R$  "). Aby następnie bez obawy uszkodzenia przyrządu zmierzyć  $I$  lub SEM, należy w pierwszej kolejności wcisnąć przełącznik "  $mA$  " lub "  $V$  " a dopiero później połączyć za pomocą przełącznika  $P$  ( rys 4) miernik z fotoogniwem.**

***Zadanie dla dociekliwych :*** sprawdzić doświadczalnie, czy natężenie fotoprądu czerpanego z fotoogniwa przestaje być wprost proporcjonalne do oświetlenia, gdy obwód łączący jego bieguny posiada duży opór elektryczny.

## VI. Opracowanie wyników

- 1♦ Wykreślić zależność logarytmu fotoprądu  $\lg(I_F)$  i logarytmu przewodności fotoopornika  $\lg(1/R)$  od logarytmu odległości źródła światła od fotoelementów. Współczynniki prostych, opisujących przebieg punktów doświadczalnych wyznaczyć wraz z błędami metodą najmniejszych kwadratów.
- 2♦ Wykreślić na jednym rysunku zależności:

$$I_F = f\left(\frac{1}{r^2}\right)$$

$$E_F = f\left(\frac{1}{r^2}\right)$$

$$R_{wew} = f\left(\frac{1}{r^2}\right)$$

gdzie  $R_{wew}$  jest oporem wewnętrznym fotoogniwa, a  $r$  odległością żarówki od fotoogniwa. Opór wewnętrzny fotoogniwa obliczyć przy założeniu, iż opór wewnętrzny miliamperomierza  $R_{amp}$  jest pomijalnie mały ( $E_F = (R_{amp} + R_{wew}) \times I_F$ ; ponieważ  $R_{amp} \ll R_{wew}$ , to  $R_{wew} = E_F / I_F$ ).

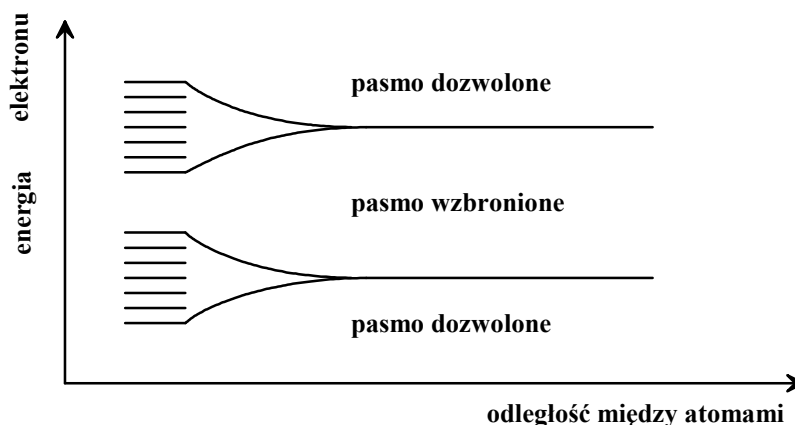
- 3♦ Przeprowadzić dyskusję wyników.

## Uzupełnienie

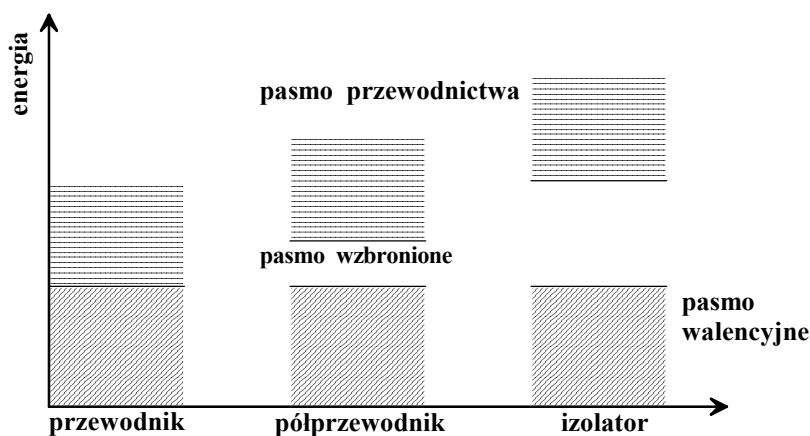
### Teoria pasmowa

Pojedynczy atom posiada dyskretne, ściśle określone poziomy energetyczne, które mogą być obsadzone przez elektrony zgodnie z zasadą Paulliego mówiącą, że na każdym poziomie energetycznym mogą się znajdować co najwyżej dwa elektrony. W atomie wchodzącym w skład kryształu każdy poziom energetyczny ulega rozszczepieniu na tyle podpoziomów, ile atomów zawiera kryształ, co oznacza w praktyce, wobec bardzo dużej ich liczby, że poszczególne podpoziomy zlewają się ze sobą tworząc ciągłe pasma energetyczne (rys.1). Inaczej mówiąc energia elektronu może się w obrębie pasma energetycznego zmieniać w sposób ciągły.

Z punktu widzenia teorii przewodnictwa w półprzewodniku występują trzy zasadnicze pasma energetyczne : *pasmo przewodnictwa*, *pasmo wzbronione* i *pasmo walencyjne* ( rys.2 ). Elektron o energii należącej do pasma przewodnictwa jest elektronem posiadającym swobodę przemieszczania się w całym kryształ ( elektron swobodny ), natomiast elektron o energii z pasma walencyjnego jest elektronem związanym z danym atomem.



Rys.1 Powstawanie pasma energii



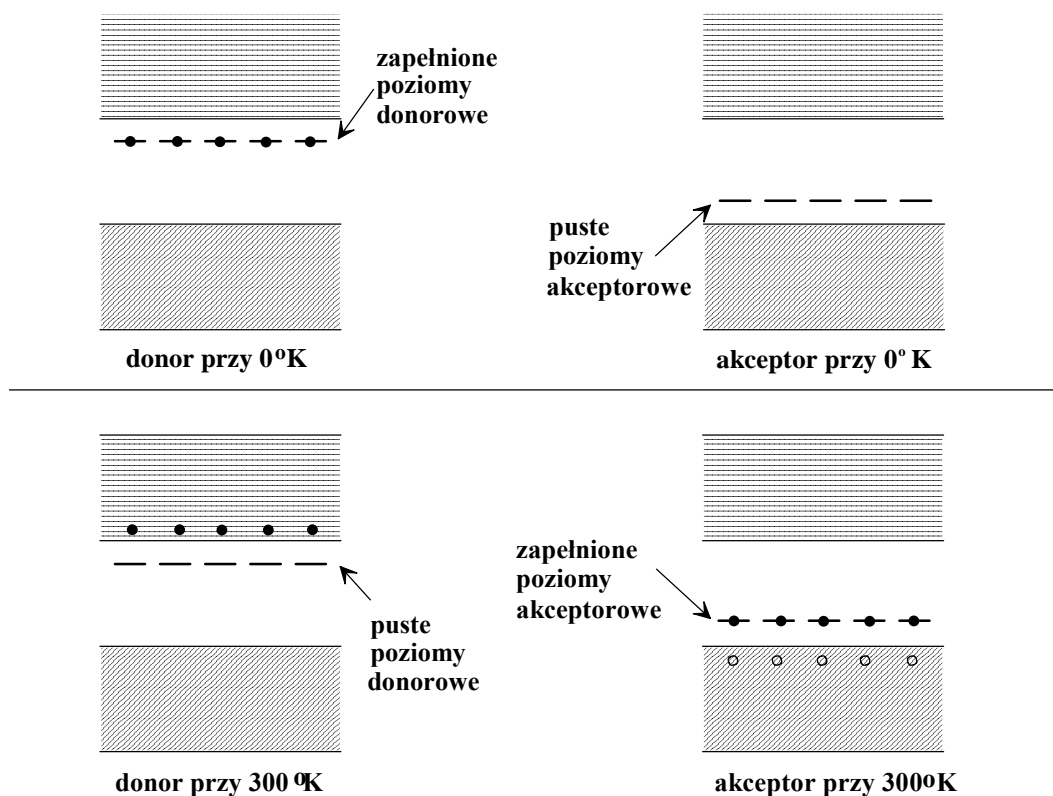
Rys.2 Schematyczne przedstawienie pasm energii przewodnika, półprzewodnika i izolatora.



### Półprzewodniki samoistne i domieszkowe

Chemicznie czyste półprzewodniki nazywamy półprzewodnikami samoistnymi, ponieważ ich przewodnictwo wynika z właściwości samego półprzewodnika, a żaden z elektronów nie może posiadać energii należącej do pasma wzbronionego. W temperaturze znacznie wyższej od zera bezwzględnej część elektronów walencyjnych osiąga wystarczającą energię, aby przejść do pasma przewodnictwa. W wyniku takich przejść, zwanych termicznymi, gdyż bezpośrednio ich przyczyną są drgania cieplne, powstają (są generowane) pary swobodnych nośników ładunku elektron - dziura. Dziurą nazywamy miejsce w wiązaniu opuszczone przez elektron, posiadające właściwości swobodnego ładunku dodatniego. W półprzewodniku samoistnym liczby elektronów swobodnych i liczby swobodnych dziur w jednostce objętości (koncentracje) są równe.

Dodając do półprzewodnika samoistnego (np. krzemu lub germanu) należącego do IV grupy układu okresowego domieszkę pierwiastka z V grupy, posiadającego odpowiedni układ poziomów energetycznych (rys 3) otrzymujemy półprzewodnik o większej koncentracji swobodnych elektronów niż swobodnych dziur. Domieszkę taką nazywamy donorem, a półprzewodnik o dominującym przewodnictwie elektronowym - półprzewodnikiem typu n. Elektrony swobodne w półprzewodniku typu n nazywamy większościami, a dziury - mniejšościami.



**Rys.3** Schematyczne przedstawienie donorowych i akceptorowych poziomów energii.

Jeżeli jako domieszki użyjemy odpowiedniego pierwiastka z III grupy układu okresowego, to otrzymamy półprzewodnik o większej koncentracji dziur (nośniki większościowe), czyli tzw. półprzewodniki typu p o dominującym przewodnictwie dziurowym (rys 3).

### Poziom Fermiego

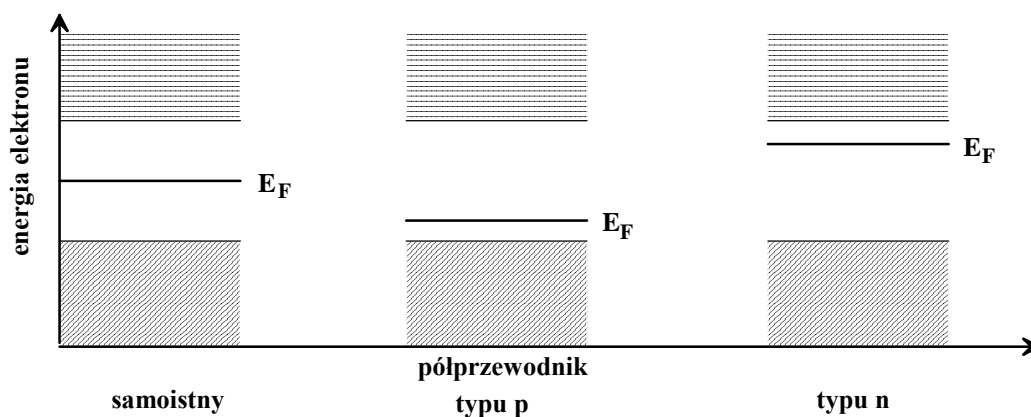
Koncentracja swobodnych elektronów i dziur w półprzewodniku znajdującym się w stanie równowagi termodynamicznej tj. w stałej temperaturze przy braku zewnętrznych oddziaływań (napięć elektrycznych, promieniowania) zależy od rozkładu poziomów energetycznych,

charakterystycznego dla danego półprzewodnika i funkcji rozkładu prawdopodobieństwa zajęcia danego poziomu energetycznego  $W$  (o ile taki poziom jest dozwolony), zwanej funkcją Fermiego - Diraca. Dla elektronów funkcja ta posiada postać

$$f_n(W) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{W - W_F}{kT}\right)}$$

gdzie  $W$  jest tzw. energią Fermiego (poziom Fermiego),  $k$  - stałą Boltzmann, a  $T$  - temperaturą bezwzględną.

Poziom Fermiego ma sens potencjału chemicznego tj. średniej energii swobodnej elektronu, a ponadto prawdopodobieństwo obsadzania poziomu Fermiego, o ile jest on poziomem dozwolonym, wynosi 0.5.



**Rys.4** Położenie poziomu Fermiego  $E_F$  w półprzewodnikach o różnym typie przewodnictwa zależy od stosunku koncentracji elektronów do koncentracji dziur.

Analogiczna funkcja dla dziur ma postać

$$f_p(W) = 1 - f_n(W)$$

a zatem funkcje  $f_n(W)$  i  $f_p(W)$  są wzajemnie symetryczne względem  $W_F$ .

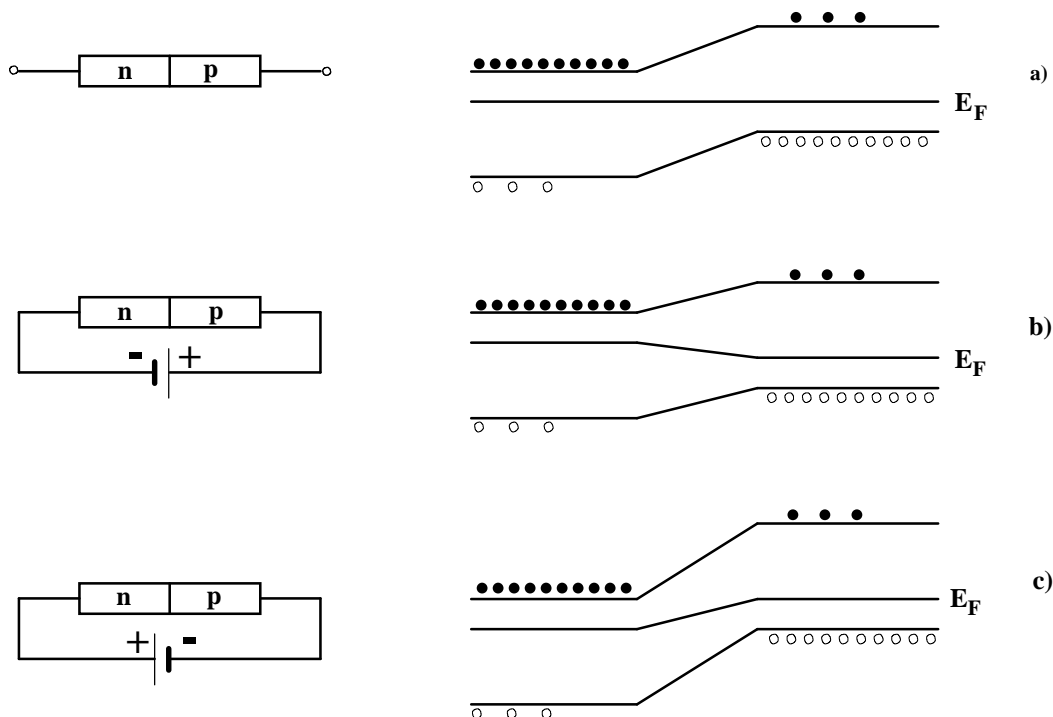
W półprzewodniku samoistnym koncentracje dziur i elektronów są takie same, a poziom Fermiego leży pośrodku pasma wzbronionego. Położenie poziomu Fermiego w półprzewodnikach domieszkowanych ilustruje rys.4.

### Złącze p - n

Złączem p-n nazywamy granicę między dwoma obszarami typu p i n w pojedynczej próbce półprzewodnika. Różnice koncentracji swobodnych elektronów i dziur w obydwu obszarach wytwarzają dyfuzyjny przepływ elektronów z obszaru n do p. Przepływ ten powoduje ujemne naładowanie się obszaru p w stosunku do obszaru n, a powstałe w ten sposób wewnętrzne pole elektryczne (bariera potencjału, warstwa zaporowa) przeciwdziała procesowi dyfuzji: natężenia prądów dyfuzyjnego i płynącego pod wpływem pola wewnętrznego stają się sobie równe, a prąd wypadkowy ma natężenie równe zero.

Poziom Fermiego w obu obszarach posiada dokładnie tę samą wartość (w stanie równowagi termodynamicznej rys.5a). Gdyby elektrony i dziury były cząstkami obojętymi elektrycznie lub naładowanymi jednoimiennie, to przepływ dyfuzyjny musiałby doprowadzić do całkowitego wyrównania się ich koncentracji w całym półprzewodniku.

Pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego (rys. 5b i c) poziom Fermiego ulega przesunięciu o wartość  $eU$ , gdzie  $U$  jest zewnętrzną różnicą potencjałów. Ruch elektronów przez złącze odbywa się zgodnie z nachyleniem poziomu Fermiego, a ruch dziur - w kierunku przeciwnym, na wykresach energii elektronów dziury "spadają" do góry.



**Rys.5** Położenie poziomu Fermiego w złączu p-n w zależności od polaryzacji złącza. Poziom Fermiego ulega przesunięciu o wartość  $eU$ , gdzie  $U$  jest zewnętrzną różnicą potencjałów. Ruch elektronów odbywa się zgodnie z nachyleniem poziomu Fermiego.

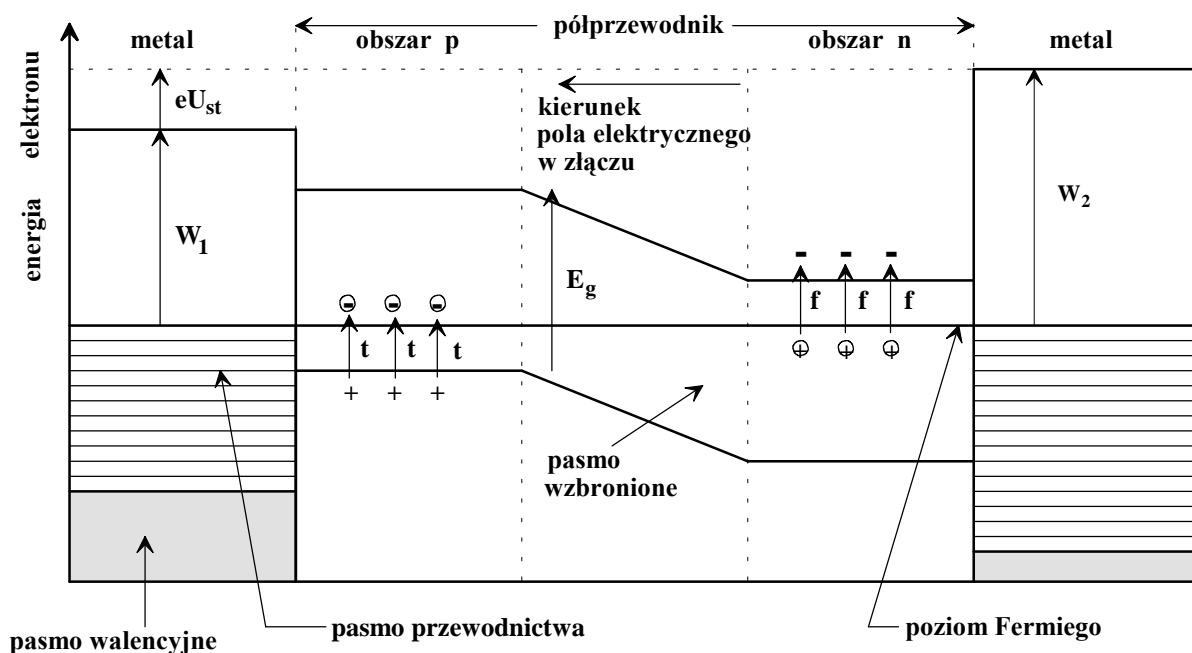
### Zjawisko zachodzące w złączu p-n pod wpływem światła

Selen krystaliczny, z którego składa się podstawowa warstwa półprzewodnika umieszczona na podkładce metalowej fotoogniwa selenowego charakteryzuje się przewodnością dziurową (typu p). Na warstwę tę nanosi się półprzezroczystą warstwę metalu, którego atomy dyfundują w selen, wytwarzając cienką warstwę obszaru typu n. Pomiedzy obydwoma metalami, tj. podkładką i warstwą półprzezroczystą występuje w ciemności napięcie równe kontaktowej różnicy potencjałów

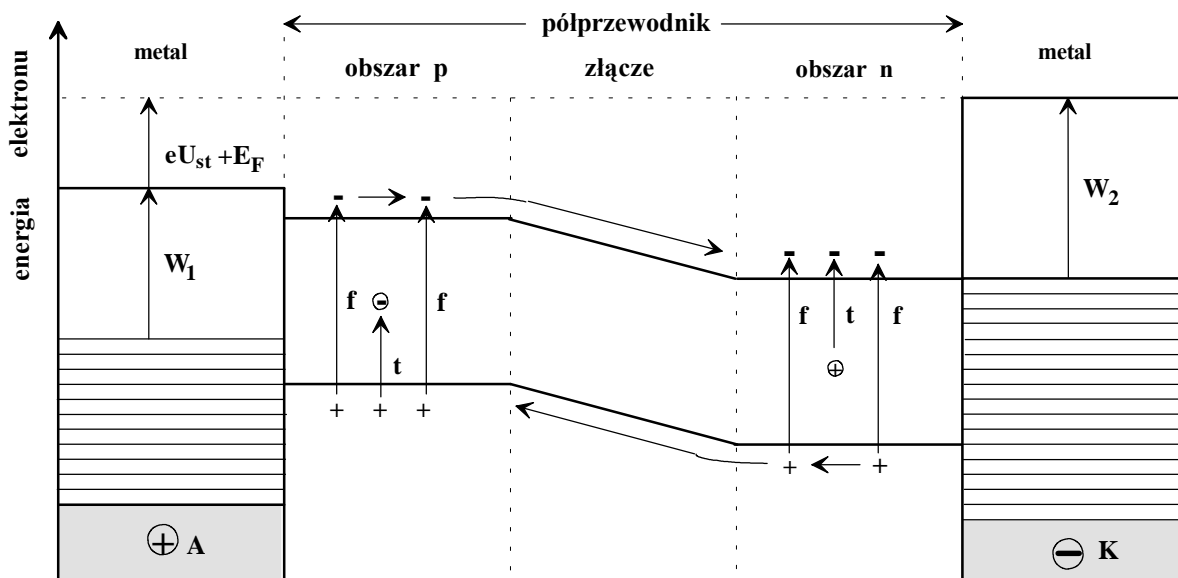
$$U_{st} = \frac{1}{e}(W_1 - W_2)$$

gdzie  $W_1$ ,  $W_2$  są pracami wyjścia elektronu z metalu (rys. 6).

Jeżeli obszar złącza p-n zostanie oświetlony światłem o energii fotonów  $h\nu > E_g$ , gdzie  $E_g$  jest szerokością pasma wzbronionego, to nastąpi wydajne powstawanie par elektron - dziura (rys.7) przy czym ilość powstających par będzie proporcjonalna do wielkości strumienia światła. Mniejszościowe nośniki ładunku dyfundują do złącza p-n i są przesuwane pod wpływem pola elektrycznego przez złącze - obszar p ładuje się dodatnio w stosunku do obszaru n, a w złączu powstaje siła elektromotoryczna  $E$ .



Rys. 6 Na rysunku zaznaczono termiczne przejście elektronów ( $t$ ) i przejścia powodowane przez strumień światła ( $f$ ) o energii fotonów  $h\nu < E_g$ , gdzie  $E_g$  jest szerokością pasma wzbronionego. Pojawiają się tylko większościowe nośniki prądu. Poziomy Fermiego w zetkniętych ze sobą metalach są sobie równe (w stanie ustalonym).



Rys.7 Przejścia elektronów pod wpływem padania fotonów o energii  $h\nu > E_g$  powodują pojawienie się mniejszościowych nośników prądu i powstanie fotoelektrycznej SEM -  $E_F$ .

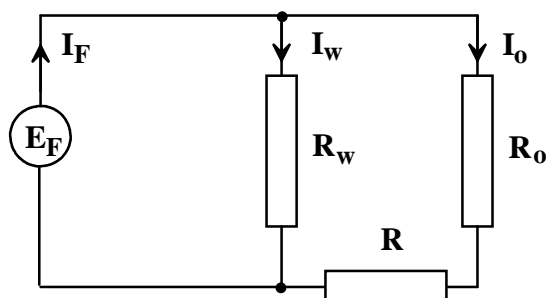
Jeżeli obydwie elektrody fotoogniwa są zwarte ze sobą poprzez opór obciążenia (np. przez miernik natężenia prądu)  $R_o$ , to schemat zastępczy fotoogniwa wygląda tak jak przedstawia to rys.8.

Natężenie fotoprądu  $I_F$  jest proporcjonalne do wartości strumienia światła  $\Phi$ :

$$I_F = I_w + I_o = k\Phi .$$

Na podstawie schematu zastępczego możemy napisać:

$$I_o = \frac{k\Phi}{1 + \frac{R+R_o}{R_w}} .$$



**Rys.8** Schemat zastępczy fotoogniwa obciążonego oporem  $R_o$ :  $R_w$  - opór warstwy zaporowej (złącza p-n),  $R$  - opór warstwy półprzewodnika podstawowego (selenu),  $E_F$  - źródło SEM fotoogniwa.

Dla małych wartości natężenia oświetlenia  $R_w \gg R$ ; przy wzroście natężenia oświetlenia  $R_w$  i  $R$  maleją, ale  $R_w$  maleje szybciej niż  $R$ .

Jeśli oporem obciążenia dla fotoogniwa jest miernik natężenia prądu o bardzo małym oporze wewnętrznym, to  $R_o + R \ll R_w$  i natężenie prądu przepływającego przez miernik jest w przybliżeniu wprost proporcjonalne do strumienia świetlnego padającego na fotoogniwo. Jeśli opór obciążenia jest bardzo duży (np. do fotoogniwa dołączony jest woltomierz cyfrowy wysokiej klasy), to wartość  $I_o$  jest bardzo bliska zeru i w przybliżeniu

$$E_F = I_F \cdot R_w = k \cdot R_w \cdot \Phi$$

z czego wynika, iż SEM nie jest wprost proporcjonalna do strumienia świetlnego  $\Phi$ , gdyż  $R_w$  maleje ze wzrostem  $\Phi$ . A zatem SEM fotoogniwa rośnie wolniej niż wzrasta strumień świetlny.

Dla ogniwa zwartego  $R_o \ll R_w$ ,  $R \ll R_w$  i dlatego mamy :

$$I_o = I_{zwarcia} = k\Phi .$$