



### Ćwiczenie III. Zjawisko fotowoltaiczne na złączu p-n

**Cel ćwiczenia:** Pomiar charakterystyk prądowo - napięciowych fotodiody krzemowej, germanowej i arsenko-indowej. Wyznaczenie zależności prądu zwarcia i napięcia rozwarcia fotodiod od natężenia oświetlenia oraz sprawdzenie prawa odwrotnych kwadratów.

**Zagadnienia:** Efekt fotowoltaiczny, złącze p-n, fotodioda.

#### Wprowadzenie

Fotodioda jest urządzeniem półprzewodnikowym, w którym zachodzi proces zamiany energii świetlnej fotonów padających na fotodiodę w energię elektryczną. Fotodiody mogą być realizowane na różnych strukturach półprzewodnikowych. Podstawą działania fotodiody jest efekt fotowoltaiczny. Poniżej przedstawiono, na czym polega ten efekt w półprzewodnikowym złączu p-n.

Założmy, że dioda półprzewodnikowa jest oświetlana przez promieniowanie elektromagnetyczne o energii większej od przerwy wzbronionej  $E_g$ . Gdy promieniowanie to jest absorbowane w obszarze ładunku przestrzennego złącza i (lub) w materiale przylegającym do tego obszaru po obu stronach złącza, powstają pary elektron – dziura, które są następnie separowane przez pole elektryczne złącza. Szczególne znaczenie mają nośniki mniejszościowe. Nośniki te poruszają się w kierunku złącza powodując wzrost prądu wstecznego, jeśli obwód zewnętrzny złącza jest zwarty. Jeśli złącza jest rozwarne, to na jego krańcach pojawia się różnica potencjałów. I to jest właśnie efekt fotowoltaiczny: po oświetleniu złącza można uzyskać źródło prądu i/lub napięcia, czyli źródło energii elektrycznej. Natomiast koncentracja nośników większościowych praktycznie nie ulega zmianie na wskutek absorpcji światła, gdyż ilość nośników generowanych światłem jest o kilka rzędów mniejsza od koncentracji równowagowej tych nośników.

Aby powstało zjawisko fotowoltaiczne muszą być spełnione następujące warunki.

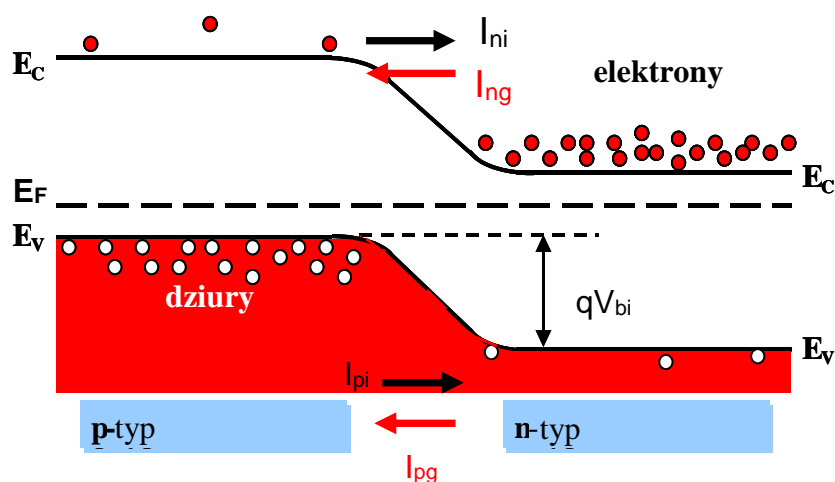
- Pod wpływem promieniowania muszą być generowane w półprzewodniku nadmiarowe nośniki ładunku dodatniego i ujemnego;
- Nośniki nadmiarowe o różnych znakach muszą być rozdzielone przez pewną elektrostatyczną niejednorodność. Rozdzielanie ładunku w fotodiodzie może nastąpić, gdy wytworzy się elektrostatyczną różnicę potencjałów np. taką jaka istnieje w złączu p-n, na kontakcie metal – półprzewodnik czy na heterozłączu półprzewodnikowym.



## Laboratorium Fotowoltaiki dla NI

- Generowany swobodny nośnik musi zachować swoją ruchliwość dostatecznie długo, tak aby zdążył dotrzeć do niejednorodności powodującej rozdzielenie ładunku.

Rozważmy teraz złącze p-n w stanie równowagi termodynamicznej. Przez złącze płynie pewien prąd nośników większościowych, zwany prądem dyfuzyjnym, elektronów  $I_{ni}$  i dziur  $I_{pi}$ , które są w stanie pokonać barierę potencjału na złączu. W stronę przeciwną płynie prąd generacji termicznej nośników mniejszościowych: elektronów  $I_{ng}$  i dziur  $I_{pg}$ . Na rys.1. przedstawiono model pasmowy złącza p-n i pokazano kierunek tych prądów. W stanie równowagi obydwie prądy równoważą się i wypadkowy prąd jest równy zero.



Rys.1. Złącze p-n i prądy nośników większościowych i mniejszościowych.

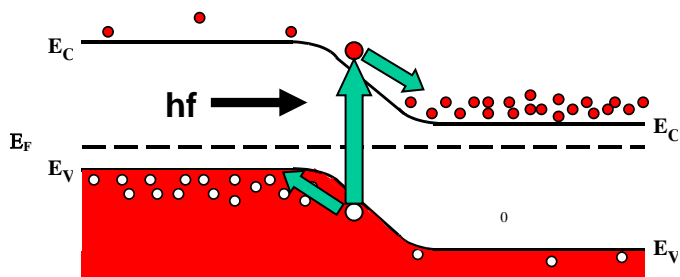
Gdy foton o energii większej od energii przerwy wzbronionej pada na złącze to koncentracja nośników mniejszościowych silnie rośnie. Pojawia się tzw. prąd fotogeneracji. W zależności od tego jak złącze jest obciążone, różne zjawiska występują w oświetlonej baterii słonecznej. Rozważmy dwa skrajne przypadki.

- 1) Jeśli złącze jest zwarte, co jest równoznaczne temu, że napięcie w obwodzie zewnętrznym jest równe zero ( $U_{zewn} = 0$ ) wówczas bariera potencjału na złączu nie zmienia się. W takiej sytuacji gęstości prądów dyfuzyjnych są takie same jak w



## Laboratorium Fotowoltaiki dla NI

złącza nieoświetlonym. Prądy te są równoważone przez prądy generacji termicznej ale pozostają niezrównoważone prądy fotogeneracji. Stanowią je: strumień elektronów z obszaru **p** do **n** i dziur z **n** do **p**, jak to przedstawiają zielone strzałki na rys. 2.



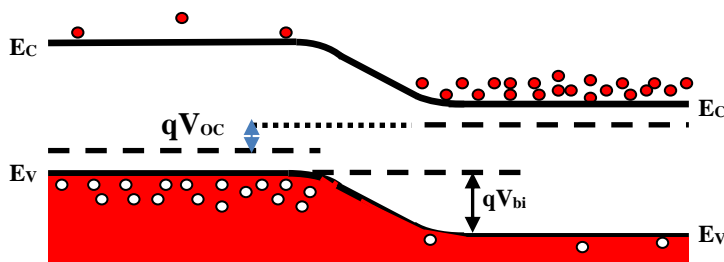
Rys.2. Prądy generacji optycznej

Ponieważ fotodiody jest zwarta, mówimy, że płynie fotoprąd zwarcia  $J_{sc}$ . Gęstość fotoprądu zwarcia wyraża się wzorem:

$$J_{sc} = qN_{ph}(E_g), \quad (1)$$

gdzie  $N_{ph}$  jest liczbą fotonów o energii równej lub większej od  $E_g$ , padających w czasie 1s na jednostkową powierzchnię. Liczba fotonów o określonej energii jest równa stosunkowi widmowego strumienia promieniowania  $P_\lambda$  do energii fotonu  $hc/\lambda$ . Ponieważ liczba fotonów jest proporcjonalna do strumienia promieniowania to prąd zwarcia jest również proporcjonalny do strumienia promieniowania padającego.

- 2) Jeśli fotodiody jest rozwarta, wówczas wypadkowy prąd stanowią prądy fotogeneracji: płyną elektrony z **p** do **n** i dziury z **n** do **p**. W wyniku tego obszar typu **n** ładuje się ujemnie a typu **p** – dodatnio. Taka polaryzacja obszarów złącza jest równoważna polaryzacji w kierunku przewodzenia. Wartość tego napięcia polaryzacji nazywa się fotonapięciem rozwarcia,  $V_{oc}$ . Sytuację tę ilustruje rys. 3, na którym przedstawiono model pasmowy rozwartej fotodiody.



Rys.3. Model pasmowy fotodiody rozwartej.



## Laboratorium Fotowoltaiki dla NI

Obniżenie bariery potencjału w złączu p-n powoduje, że rośnie prąd dyfuzyjny. W stanie równowagi, ten prąd jest równoważony prądem fotogeneracji. Prąd ciemny płynący przez złącze p-n spolaryzowane napięciem  $V_{oc}$ , wyraża się równaniem:

$$J_d = J_o \left[ \exp\left(\frac{eV_{oc}}{kT}\right) - 1 \right]. \quad (2)$$

Ten prąd równoważy w rozwartym oświetlonym złączu p-n maksymalny prąd fotogeneracji, czyli  $J_{sc}$ :

$$J_{sc} - J_d = 0. \quad (3)$$

Podstawiając za  $J_d$  wartość  $J_{sc}$ , otrzymuje się następującą zależność:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_o} + 1\right) \cong \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_o}\right). \quad (4)$$

Ponieważ  $J_{sc} \sim P_\lambda$ , to napięcie rozwarcia zależy logarytmicznie od strumienia promieniowania padającego na baterię.

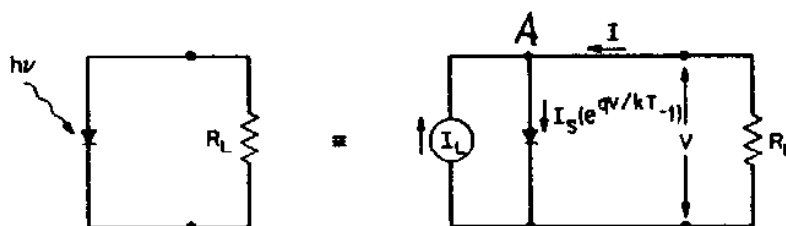
3) Jeśli fotodioda jest obciążona opornością  $R_L$ , wówczas prąd płynący przez baterię jest mniejszy od prądu zwarcia a napięcie – mniejsze od napięcia rozwarcia. Obciążoną fotodiodeę można traktować jak źródło prądowe. Elektryczny schemat zastępczy baterii przedstawiono na rys.4. Zgodnie z tym schematem i I prawem Kirchoffa dla węzła A

$$I_L + I = I_d. \quad (5)$$

Stąd prąd płynący przez obciążenie:

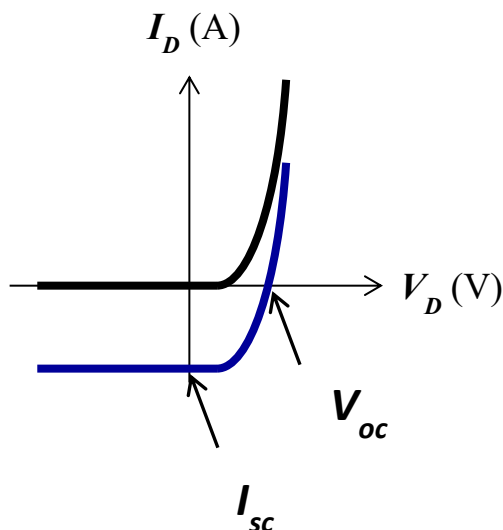
$$I = I_d - I_L = -(I_L - I_d). \quad (6)$$

Przy stałej wartości  $I_L$  wzrost oporności obciążenia  $R_L$  od 0 do  $\infty$ , powoduje, że rośnie  $V_{oc}$  a zatem maleje wysokość bariery w złączu. W wyniku tego prąd ciemny  $I_d$  maleje i jednocześnie zmniejsza się prąd płynący przez obciążenie.



Rys.4. Schemat elektryczny fotodiody

Na rys. 5 przedstawiono charakterystykę prądowo – napięciową fotodiody nieoświetlonej i oświetlonej.



Rys.5. Charakterystyka prądowo – napięciowa fotodiody nieoświetlonej (czarna krzywa) i oświetlonej (niebieska krzywa).  $I_{sc}$  – prąd zwarcia,  $V_{oc}$  – napięcie rozwarcia.

Literatura:

Źródła i detektory wykłady 8 i 9.

Materiały dydaktyczne do laboratorium NLTK dla studentów Inżynierii Kwantowej. Część II. Rozdział 3. (skrypt II.pdf na e-portalu).

Pytania kontrolne

1. Zasada działania złącza p-n.
2. Efekt fotowoltaiczny.