

V. Fotodioda

Cel ćwiczenia: Pomiar charakterystyk prądowo - napięciowych fotodiody.

Zagadnienia: Efekt fotowoltaiczny, złącze p-n.

Wprowadzenie

Fotodioda jest urządzeniem półprzewodnikowym, w którym zachodzi proces zamiany energii świetlnej fotonów padających na fotodiode 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.

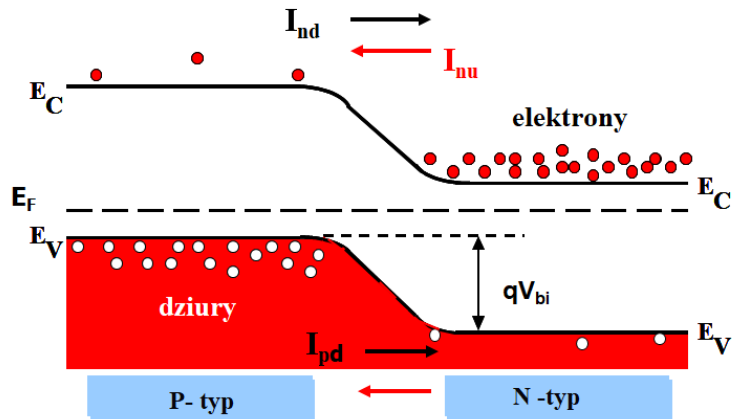
Założmy, że dioda półprzewodnikowa jest oświetlana przez promieniowanie elektromagnetyczne o energii większej od przerwy wzbronionej E_g . Gdy promieniowanie to jest absorbowane w obszarze ładunku przestrzennego złącza i (lub) w materiale przylegającym do tego obszaru po obu stronach złącza, powstające pary elektron - dziura są separowane przez pole elektryczne złącza. Szczególne znaczenie mają nośniki mniejszościowe. Nośniki te poruszają się w kierunku złącza i powodują wzrost prądu wstecznego, jeśli obwód zewnętrzny złącza jest zwarty. Jeśli złącze jest rozwarte, to na jego krańcach pojawia się różnica potencjałów. I to jest właśnie efekt fotowoltaiczny: po oświetleniu złącza można uzyskać źródło prądu lub napięcia, czyli źródło energii elektrycznej. Natomiast koncentracja nośników większościowych praktycznie nie ulega zmianie 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.
- Generowany swobodny nośnik musi zachować swoją ruchliwość dostatecznie długo tak, aby zdążył dotrzeć do niejednorodności powodującej rozdzielanie ładunku.

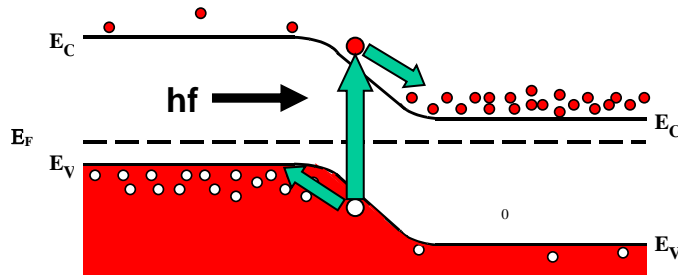
Rozważmy teraz złącze p-n w stanie równowagi termodynamicznej (patrz rys.1). Przez złącze zawsze płynie pewien prąd nośników większościowych, zwanych prądami wstrzykiwania elektronów I_{ni} i dziur I_{pi} , które są w stanie pokonać barierę potencjału na złączu. W stronę przeciwną płynie prąd generacji 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.

Gdy foton o energii większej od energii przerwy wzbronionej pada na złącze to, jak już było wspomniane, 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. Rozważymy dwa skrajne przypadki.



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

- 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 wstrzykiwania są takie same jak w złączu nieoświetlonym. Prądy te równoważą 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.



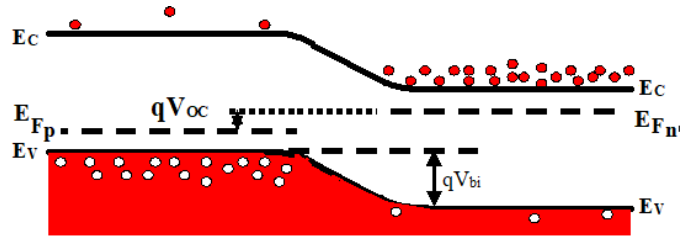
Rys.2. Prądy generacji optycznej

Ponieważ fotodioda jest zwarte, mówimy, że płynie fotoprąd zwarcia I_{sc} . Gęstość fotoprądu zwarcia wyraża się wzorem:

$$I_{sc} = q N_{ph}(E_g) \quad (1)$$

gdzie N_{ph} jest liczbą fotonów o energii równej E_g . Liczba fotonów o określonej energii jest równa stosunkowi widmowego strumienia promieniowania P_λ do energii fotonu hc/λ . Ponieważ liczba fotonów jest proporcjonalna do strumienia promieniowania, to prąd zwarcia jest również proporcjonalny do strumienia promieniowania padającego.

- 2) Jeśli fotodioda 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.

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

$$I_d = I_o [\exp(qV_{oc}/kT) - 1] \quad (2)$$

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

$$I_{sc} - I_d = 0 \quad (3)$$

Podstawiając za I_d wartość I_{sc} , otrzymuje się następującą zależność:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_o} + 1\right) \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{sc}}{I_o} \quad (4)$$

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

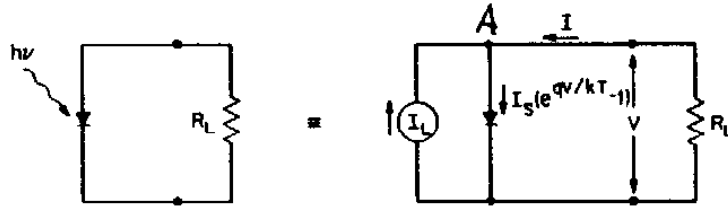
3) Jeśli fotodioda jest obciążona opornością R_L , wówczas prąd płynący przez baterię jest mniejszy od prądu zwarcia a napięcie – mniejsze od napięcia rozwarcia. Obciążoną fotodiodeę można traktować jak źródło prądowe. Elektryczny schemat zastępczy baterii przedstawiono na rys.4. Zgodnie z tym schematem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

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

Stąd prąd płynący przez obciążenie:

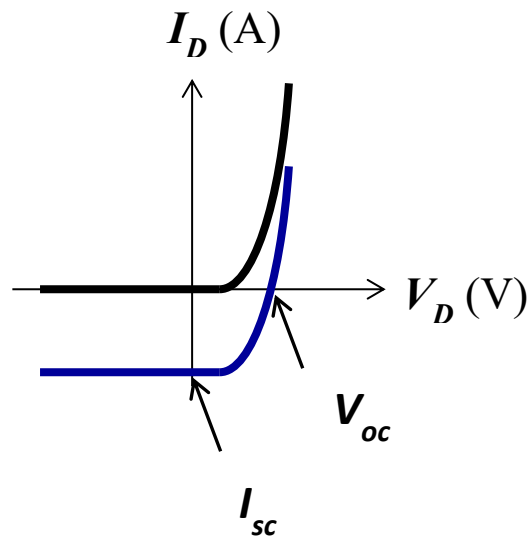
$$I = I_d - I_L = - (I_L - I_d) \quad (6)$$

Przy stałej wartości I_L wzrost oporności obciążenia R_L od 0 do ∞ , 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.

Zasada pomiaru

Celem ćwiczenia jest pomiar charakterystyk prądowo – napięciowych fotodiody nieoświetlonej i oświetlonej oraz sprawdzenie prawa odwrotnych kwadratów.