



IV. Fotodioda i LED

Cel ćwiczenia: Pomiar charakterystyk prądowo - napięciowych fotodiod: krzemowej i germanowej oraz diod elektromuinescencyjnych. Wyznaczenie zależności prądu zwarcia i napięcia rozwarcia fotodiod od natężenia oświetlenia oraz sprawdzenie prawa odwrotnych kwadratów.

Zagadnienia: Efekt fotowoltaiczny, złącze p-n, dioda elektroluminescencyjna

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, powstające pary elektron - dziura są 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 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.

- a) Pod wpływem promieniowania muszą być generowane w półprzewodniku nadmiarowe nośniki ładunku dodatniego i ujemnego;
- b) Nośniki nadmiarowe o różnych znakach muszą być rozdzielone przez pewną elektrostatyczną niejednorodność. Rozdzielanie ładunku w fotodiodzie może nastąpić, gdy

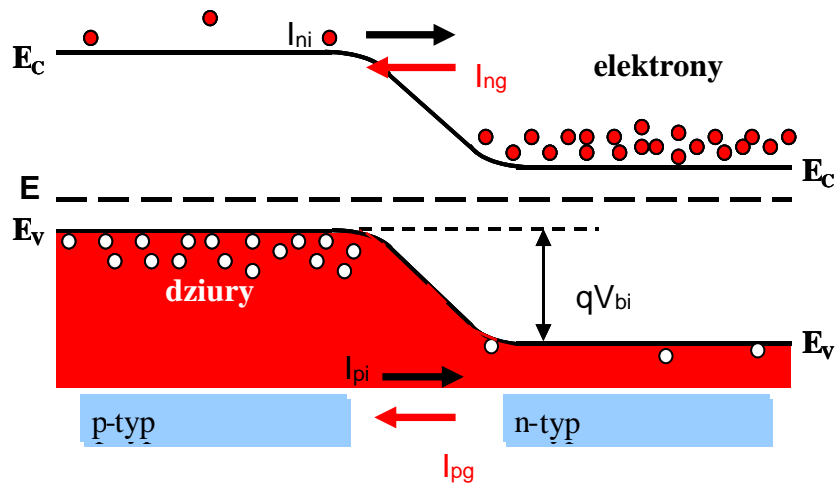


Detekcja promieniowania elektromagnetycznego

wytworzy się elektrostatyczną różnicę potencjałów np. taką jaka istnieje w złączu p-n, na kontakcie metal – półprzewodnik czy na heterozłączu półprzewodnikowym.

c) 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. 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.



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

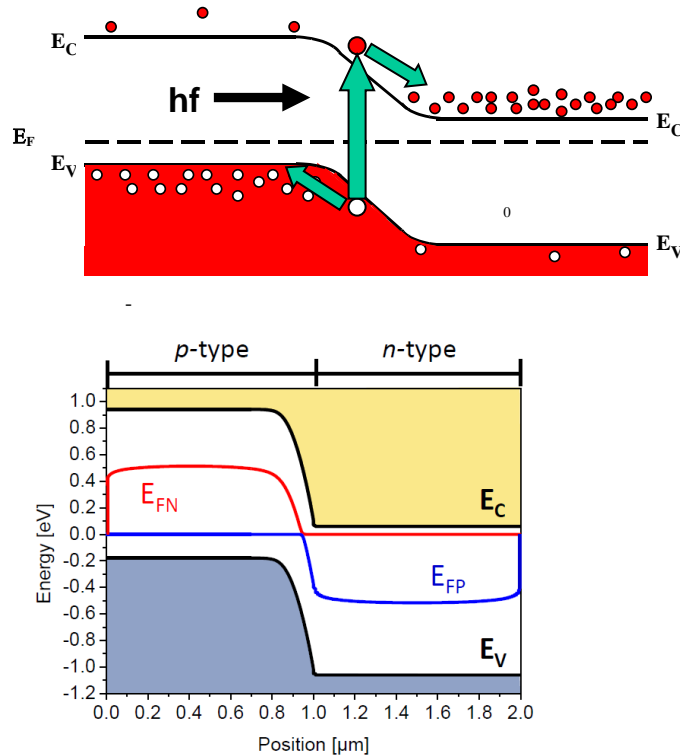
Gdy foton o energii większej od energii przerwy wzbronionej pada na złącze to jak już było wspomniane koncentracja nośników mniejszościowych silnie rośnie. Pojawia się tzw. prąd fotogeneracji. W zależności od tego jak złącze jest obciążone, różne zjawiska występują w oświetlonej baterii słonecznej. Rozważymy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

- 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



Detekcja promieniowania elektromagnetycznego

2) złącza 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. Diagram pasmowy zwartego oświetlonego złącza p-n. a) prądy generacji optycznej, b) kwazi-poziomy Fermiego E_{FN} i E_{FP} . Generacja optyczna zmienia istotnie koncentrację nośników mniejszościowych, pojawiają się kwazi-poziomy Fermiego E_{FN} i E_{FP} odpowiednio dla elektronów po stronie p i dziur po stronie n. Poziom Fermiego dla nośników większościowych nie ulega zmianie.

Ponieważ fotodiody jest zwarta, mówimy, że płynie fotoprąd zwarcia I_{sc} . Zwróćmy uwagę, że kierunek tego prądu jest zgodny z kierunkiem prądu diody spolaryzowanej zaporowo. Gęstość fotoprądu zwarcia wyraża się wzorem:

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

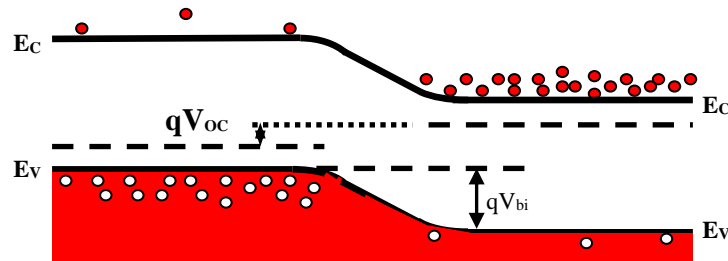
gdzie N_{ph} jest liczbą fotonów o energii równej E_g . Liczba fotonów o określonej energii jest równa stosunkowi widmowego strumienia promieniowania P_λ do energii fotonu hc/λ . Ponieważ liczba fotonów jest proporcjonalna do strumienia promieniowania to prąd zwarcia jest również proporcjonalny do strumienia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

3) 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



Detekcja promieniowania elektromagnetycznego

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. Diagram 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:

$$J_d = J_o [\exp(eV_{oc}/kT) - 1] \quad (2)$$

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 $I_{sc} \sim P_\lambda$, 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 fotodiodę



Detekcja promieniowania elektromagnetycznego

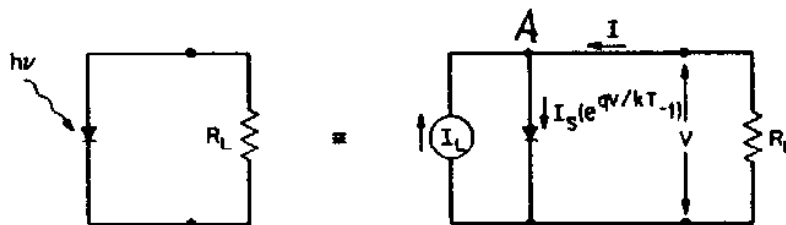
można traktować jak źródło prądowe. Elektryczny schemat zastępczy baterii przedstawiono na rys.4. Zgodnie z tym schematem i I prawem Kirchoffa dla węzła A

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

Stąd prąd płynący przez obciążenie:

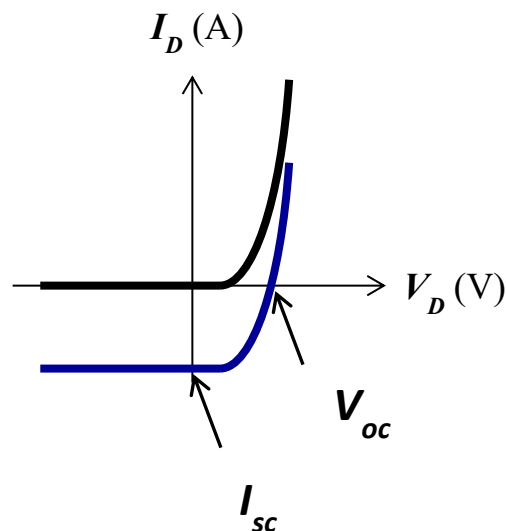
$$I = I_d - I_L = - (I_L - I_d) \quad (6)$$

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.



Detekcja promieniowania elektromagnetycznego

Wprowadzenie – dioda elektroluminescencyjna (LED)

Dioda elektroluminescencyjna nazywana także diodą świecącą - **LED** (ang. *Light Emitting Diode*) jest jednym z półprzewodnikowych przyrządów optoelektronicznych przetwarzającym energię elektryczną na energię promieniowania elektromagnetycznego. LED-y wytwarzane są zwykle jako związki pierwiastków grupy III i V układu okresowego. W praktyce wykorzystuje się zarówno związki dwu jak i wielo- składnikowe, przy czym skład dobiera się tak, aby uzyskana w procesie technologicznym struktura półprzewodnikowa umożliwiała emisję światła w zadanym zakresie spektralnym.

Najmniej skomplikowane LED-y realizowane są w postaci zwykłych półprzewodnikowych złączy p-n, które spolaryzowane odpowiednio dużym napięciem w kierunku przewodzenia emitują promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie światła widzialnego i podczerwieni. Długość fali promieniowania emitowanego przez LED, a tym samym jego barwa, zależy od materiału półprzewodnikowego, z którego została wytworzona (patrz tabela 1).

Zasada działania LED jest oparta na zjawisku elektroluminescencji, które polega na wytwarzaniu światła pod wpływem pola elektrycznego. Elektroluminescencja zachodzi w wyniku rekombinacji dziur i elektronów w obszarze złącza p-n. Przejściom elektronów z wyższego poziomu energetycznego na niższy towarzyszy wydzielenie energii w postaci ciepła (rekombinacja niepromienista) lub światła (rekombinacja promienista). Rekombinacja niepromienista zachodzi w półprzewodnikach ze skośną przerwą energetyczną np. w Si czy Ge. Rekombinacja promienista jest charakterystyczna dla półprzewodników z prostą przerwą energetyczną. Ten typ rekombinacji, podczas której energia wydzielana jest w postaci kwantów promieniowania – fotonów, zachodzi w materiałach takich jak np. GaAs, InAs, InP, InSb.

Tabela.1. Porównanie barwy światła emitowanego przez diody LED w zależności od materiału użytego do ich produkcji.

Związek półprzewodnikowy	Barwa emitowanego promieniowania
AlGaAs	czerwona, podczerwień
AlGaP	zielona
AlGaInP	pomarańczowo-czerwona, pomarańczowa, żółta, zielona
GaAsP	czerwona, czerwono – pomarańczowa, żółta
GaP	czerwona, żółta, zielona
GaN	zielona, niebieska

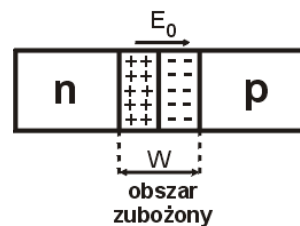


Detekcja promieniowania elektromagnetycznego

InGaN	zielona, niebieska, bliski ultrafiolet
SiC	niebieska
Al ₂ O ₃	niebieska
ZnSe	niebieska

Zasada działania półprzewodnikowego złącza p-n

W technologii przyrządów półprzewodnikowych najczęściej realizuje się złącze p-n poprzez odpowiednie wprowadzenie do kryształu półprzewodnikowego domieszek akceptorowych (dziurowych) oraz donorowych (elektronowych). W efekcie w obrębie tego samego półprzewodnika uzyskuje się obszary o różnym typie przewodnictwa. W złączu p-n koncentracja dziur w obszarze typu p jest zdecydowanie większa niż ich ilość w obszarze typu n i analogicznie w przypadku elektronów – jest ich znacznie więcej w obszarze n w stosunku do ich koncentracji w obszarze p. Na skutek tego gradientu koncentracji nośników



Rys.6. Schemat złącza p –n.

powstaje tzw. **prąd dyfuzyjny**, który jest skutkiem przechodzenia elektronów z obszaru n do obszaru p i dziur z obszaru p do obszaru n. W wyniku dyfuzji nośników nadmiarowych (elektronów) z obszaru n pozostają w nim dodatnio naładowane jony atomów domieszki donorowej, zaś w skutek dyfuzji dziur z obszaru o przewodnictwie dziurowym pozostają w nim ujemnie naładowane atomy domieszki akceptorowej. Powstała w ten sposób w obszarze przejściowym dipolowa warstwa ładunku przestrzennego wytwarza pole elektryczne o natężeniu E_0 skierowane od potencjału dodatniego (obszar typu n) do potencjału ujemnego (obszar typu p). Pole to przeciwdziała dalszej dyfuzji nośników większościowych. Jednocześnie pole to stanowi źródło prądu nośników mniejszościowych (elektronów z obszaru p do n i dziur z obszaru n do p) nazywanego **prądem unoszenia**. Opisaną sytuację schematycznie ilustruje rys. 6. Różnica potencjałów w warstwie zaporowej nosi nazwę **bariery potencjału** V_0 . Wysokość bariery potencjału w przypadku diod LED zwykle spełnia warunek:

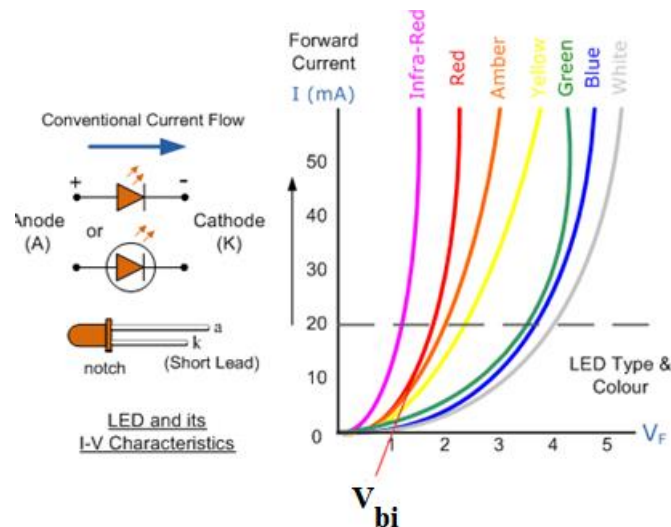
$$eV_0 < E_G \quad (7)$$



Detekcja promieniowania elektromagnetycznego

gdzie E_G [eV] jest wartością energii wzbronionej półprzewodnika, z którego wykonano badaną diodę. Dla złącza p-n silnie domieszkowanych, jak to ma miejsce w przypadku diod laserowych, $eV_0 \cong E_G$. Wówczas poziom Fermiego po obydwu stronach złącza znajduje się w obrębie odpowiednich pasm.

Na rys. 7 pokazano szereg charakterystyk I-V dla różnych LED. Jak wynika z rys.2, potencjał wbudowany V_{bi} jest tym mniejszy im większa długość fali odpowiadająca maksimum zdolności emisyjnej LED.



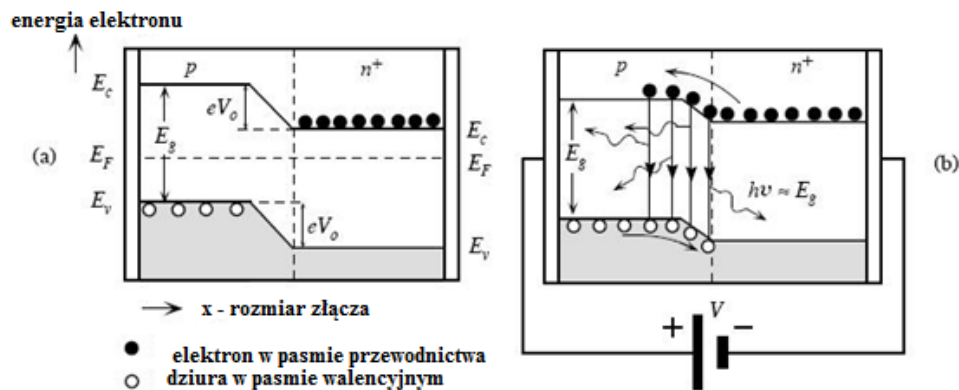
Rys. 7. Oznaczenie diody w schematach elektrycznych, sposób polaryzacji i charakterystyki I-V dla wybranych diod LED.

Na rys. 8 przedstawiono model pasmowy złącza p-n przy zerowej polaryzacji. W przypadku, gdy w złączu utrzymuje się stan równowagi termodynamicznej prądy dyfuzyjny i unoszenia równoważą się i przez złącze nie przepływa prąd. Ponadto w stanie równowagi termodynamicznej poziom Fermiego musi leżeć tak samo po obu stronach złącza co jest równoznaczne z zakrzywieniem pasma przewodnictwa i walencyjnego w obszarze złącza (patrz rys. 8a). Przyłożenie do złącza p-n zewnętrznego napięcia polaryzującego V zaburza stan równowagi w układzie. Polaryzacja złącza w kierunku przewodzenia tj. przyłożenie potencjału dodatniego do obszaru p i ujemnego do obszaru n, skutkuje obniżeniem wysokości bariery, a zatem prowadzi do wzrostu wartości prądu nośników większościowych (rys. 8b). Prąd unoszenia nie ulega zmianie. Dla napięcia polaryzującego V równego wysokości bariery V_0 następuje wzmożone wstrzykiwanie nośników mniejszościowych (dziur do obszaru n i elektronów do obszaru p), które następnie rekombinują z nośnikami większościowymi. Jeśli następuje rekombinacja promienista to emitowane są fotony o energii równej energii przerwy wzbronionej. Koncentracja nośników mniejszościowych szybko maleje w miarę oddalania się



Detekcja promieniowania elektromagnetycznego

od złącza p-n w głąb półprzewodnika. Dlatego do rekombinacji promienistej dochodzi jedynie w obszarze zubożonym złącza p-n.

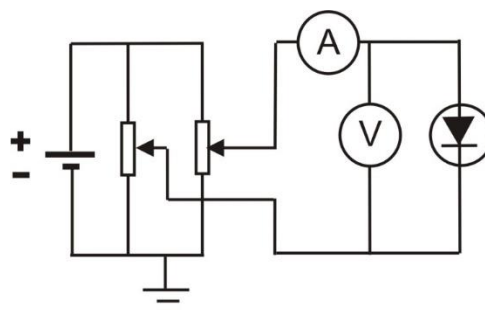


Rys.8. Złącze p-n a) bez polaryzacji b) spolaryzowane w kierunku przewodzenia. E_C - krawędź pasma przewodnictwa, E_V - krawędź pasma walencyjnego, E_F - poziom Fermiego w stanie równowagi termodynamicznej, V_0 - bariera potencjału tzw. potencjał wbudowany, E_g - przerwa wzbroniona, $h\nu$ - energia fotonu

Polaryzacja złącza p-n w kierunku zaporowym prowadzi do zwiększenia wartości bariery. Wówczas prąd nośników większościowych jest bliski zera. Prąd unoszenia pozostaje ten sam i w przypadku dużych napięć w kierunku zaporowym stanowi on jedyny prąd płynący przez złącze.

Zasada pomiaru

Celem ćwiczenia jest pomiar charakterystyk prądowo – napięciowych fotodiody nieoświetlonej i oświetlonej. Na rys. 9 przedstawiono układ do pomiaru charakterystyk prądowo – napięciowych fotodiody lub LED.



Rys.9.Układ do pomiaru charakterystyk I-V fotodiody

Zadania do wykonania



Detekcja promieniowania elektromagnetycznego

1. Fotodiody

- Zmierzyć charakterystykę prądowo-napięciową nieoświetlonych fotodiod Si i Ge w zakresie do 20mA w kierunku przewodzenia i do 2V w kierunku zaporowym.
- Zmierzyć charakterystykę prądowo-napięciową oświetlonej fotodiody Si. Oświetlaczem jest dioda elektroluminescencyjna LED. Wybrać 3 różne natężenia oświetlenia, np. ustawiając natężenie prądu LED równe (5mA, 20mA i 40mA). Fotodiode należy ustawić tak, aby była na tej samej wysokości, co oświetlacz.
- Wykonać pomiary prądu zwarcia I_{sc} i napięcia rozwarcia V_{oc} dla fotodiody Si przy różnych natężeniach prądu płynącego przez LED: 0,5mA, 1mA, 2mA, 5mA, 10mA, 15mA, 20mA i 40mA.

2. Diody elektroluminescencyjne LED

- Zmierzyć charakterystyki prądowo-napięciowe LED emitujących światło widzialne w zakresie:

- dla polaryzacji zaporowej: dla napięć $U \leq 4V$;

- dla polaryzacji w kierunku przewodzenia aż do maksymalnego prądu możliwego do uzyskania przy pomocy układu potencjometru w układzie pomiarowym (rys.9).

Zaobserwować, dla jakiej polaryzacji dioda zaczyna świecić.

Opracowanie wyników:

1. Fotodioda nieoświetlona.

- Narysować charakterystykę prądowo-napięciową nieoświetlonej fotodiody. Wyznaczyć potencjał wbudowany fotodiody korzystając z części liniowej wykresu I-V (dla dużych napięć w kierunku przewodzenia). Wykorzystać do tego celu regresję liniową. Potencjał wbudowany jest równy:

$$V_{bi} = -\frac{b}{a}, \quad (8)$$

gdzie a i b – współczynniki regresji w równaniu $y = ax + b$.

- Zaznaczyć niepewności pomiarowe. Obliczyć niepewności pomiaru prądu i napięcia korzystając z formuł podanych w instrukcjach do multimetrów i ze wzorów $u(I) = \frac{\text{dokładność pomiaru prądu}}{\sqrt{3}}$, $u(U) = \frac{\text{dokładność pomiaru napięcia}}{\sqrt{3}}$.
- Aby obliczyć niepewność pomiaru potencjału wbudowanego, należy skorzystać z niepewności wynikających z regresji liniowej Δa i Δb :

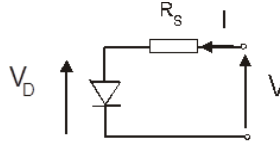
$$u(V_{bi}) = \sqrt{\left[\frac{b}{a^2} \Delta a\right]^2 + \left[\frac{1}{a} \Delta b\right]^2} \quad (9)$$



Detekcja promieniowania elektromagnetycznego

- Wyznaczyć rezystancję szeregową fotodiody.

Obwód zastępczy dla rzeczywistego złącza p-n z opornością szeregową przedstawia rys. 10.



Rys.10 Obwód zastępczy dla złącza p-n

Część napięcia polaryzującego diodę odkłada się na oporności szeregowej złącza:

$$V = V_D + IR_S \quad (10)$$

Wówczas prąd płynący przez złącze:

$$I = I_{s0} \left[\exp \frac{q(V - IR_S)}{nkT} - 1 \right] \quad (11)$$

gdzie n - współczynnik idealności złącza a I_{s0} prąd nasycenia.

Dla napięć $V > 3kT/q$ w powyższym wzorze możemy pominąć jedynkę.

- Wyznaczenie współczynnika idealności diody

Współczynnik n obliczamy korzystając z liniowej części wykresu $\ln I = f(V)$.

Sprawdzić od jakiego napięcia dla $T = 300$ K spełniona jest zależność $V > 3kT/q$.

$$n = \frac{q}{kT} \frac{d \ln I}{dV}, \quad (12)$$

lub, jeśli rysujemy wykres $\log I = f(V)$:

$$n = \frac{q}{2.3} \frac{d \log I}{dV} \frac{1}{kT} \quad (13)$$

Współczynnik idealności wyraża się poprzez współczynnik kierunkowy prostej a na wykresie $\ln I - V$ (por. rys. 11).

- Niepewność pomiaru współczynnika idealności obliczamy korzystając z niepewności wynikającej z regresji liniowej i wzoru (12) lub (13):

$$u(n) = \frac{q}{kT} \frac{\Delta a}{a^2}. \quad (14)$$

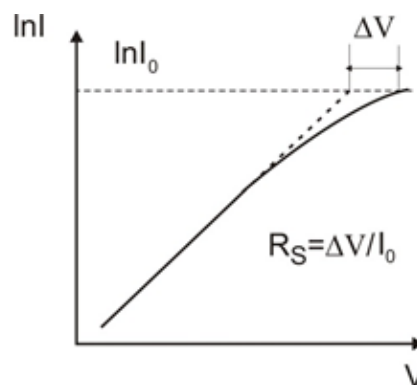
- Wyznaczenie rezystancji szeregowy diody



Detekcja promieniowania elektromagnetycznego

W tym celu należy wykorzystać również charakterystykę $I-V$ narysowaną w skali półlogarytmicznej. Należy wyznaczyć różnicę napięć odpowiadającą napięciu na fotodiodzie przy maksymalnym prądzie i napięciu dla tego samego prądu na przedłużeniu prostoliniowej części wykresu $\ln I - V$, tak jak to przedstawiono na rys. 10. Przy dużym napięciu w kierunku przewodzenia prąd płynący przez diodę jest ograniczony jedynie opornością szeregową. Aby obliczyć oporność szeregową należy skorzystać z zależności:

$$R_s = \frac{\Delta V}{I_0} \quad (15)$$



Rys.11. Sposób wyznaczenia oporności szeregowej z charakterystyki $\ln I-V$.

2. Fotodioda oświetlona

- Narysować charakterystykę prądowo-napięciową fotodiody oświetlonej światłem o różnej intensywności. Wyznaczyć prąd zwarcia i napięcie rozwarcia.
- Narysować zależność fotoprądu zwarcia od kwadratu odwrotności odległości między źródłem światła a fotodiodą. Sprawdzić, czy spełnione jest prawo odwrotnych kwadratów.
- Zaznaczyć na wykresie niepewności pomiarowe. Przyjąć niepewność pomiaru fotoprądu zwarcia korzystając ze wzoru:

$$u(I) = \frac{\text{dokładność pomiaru prądu}}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

Niepewność pomiaru odległości:

$$u(d) = \frac{0.5 \text{ cm}}{\sqrt{3}} \quad (17)$$

Niepewność pomiaru odwrotności kwadratu odległości:

$$u\left(\frac{1}{d^2}\right) = \frac{2u(d)}{d^3} \quad (18)$$



Detekcja promieniowania elektromagnetycznego

- Narysować zależność prądu zwarcia i napięcia rozwarcia fotodiody od natężenia prądu LED.
- Zaznaczyć niepewności pomiarowe na wykresach. Obliczyć $u(I)$ i $u(V)$ korzystając ze wzoru (16).
- Uzasadnić uzyskane rezultaty odpowiednimi prawami.

3. Diody elektroluminescencyjne

- Narysować na jednym wykresie charakterystyki I-V dla wszystkich badanych diod.
- Wyznaczyć dla każdej diody potencjał wbudowany i niepewność potencjału wbudowanego, zgodnie z zaleceniami dla fotodiody nieoświetlonej.
- Porównać potencjały wbudowane dla różnych diod z przerwą wzbronioną (eV_{bi} z $E_g = \frac{hc}{\lambda_{max}}$) korzystając z załączonej tabeli.

kolor diody	λ_{max} [nm]	półprzewodnik
zielona	575	AlGaInP
żółta	585	GaAsP/GaP
pomarańczowa	620	AlGaInP
czerwona	660	GaAlAs
podczerwona	940	GaAlAs

Literatura:

Wykład: 7 i 10 „Źródła i detektory”

Pytania kontrolne

1. Zasada działania diody elektroluminescencyjnej
2. Zasada działania fotodiody. Efekt fotowoltaiczny.