



V. Fotodiody

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, dioda elektroluminescencyjna

Wprowadzenie

Fotodiody 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.

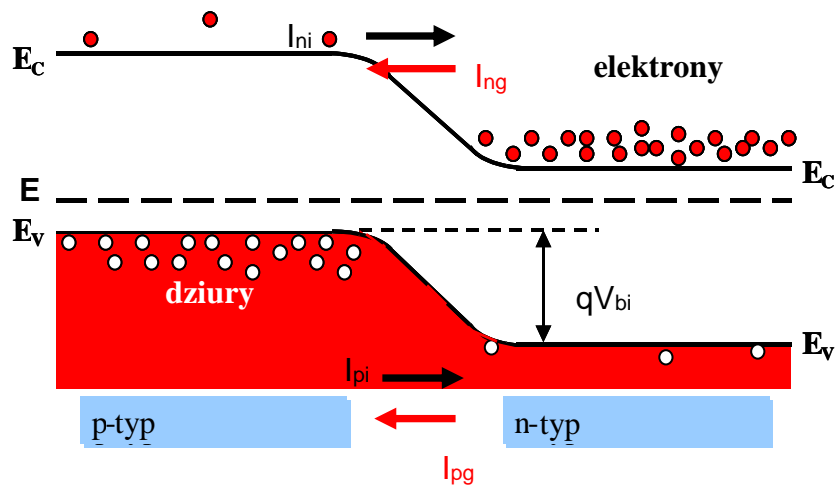
- a) Pod wpływem promieniowania muszą być generowane w półprzewodniku nadmiarowe nośniki ładunku dodatniego i ujemnego;
- b) Nośniki nadmiarowe o różnych znakach muszą być rozdzielone przez pewną elektrostatyczną niejednorodność. Rozdzielanie ładunku w fotodiodzie może nastąpić, gdy



Źródła i detektory

- 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 rozdzielenie 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.

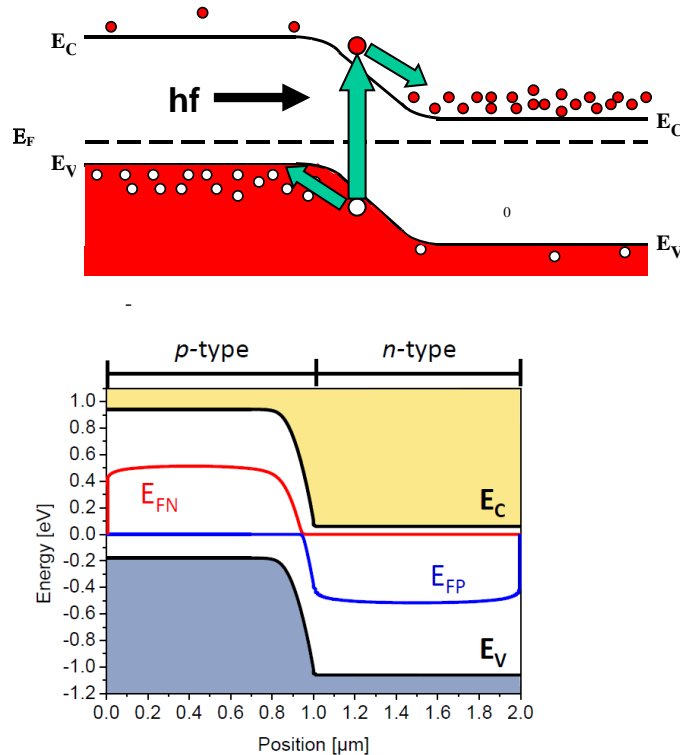
Gdy foton o energii większej od energii przerwy wzbronionej pada na złącze to jak już było wspomniane koncentracja nośników mniejszościowych silnie rośnie. Pojawia się tzw. prąd fotogeneracji. W zależności od tego jak złącze jest obciążone, różne zjawiska występują w oświetlonej baterii słonecznej. Rozważymy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



Źródła i detektory

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. Poziomy 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:

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

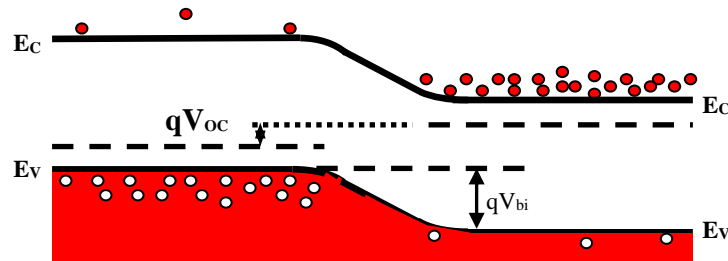
gdzie N_{ph} jest liczbą fotonów o energii równej E_g . Liczba fotonów o określonej energii jest równa stosunkowi widmowego strumienia promieniowania P_λ do energii fotonu hc/λ . Ponieważ liczba fotonów jest proporcjonalna do strumienia promieniowania to prąd zwarcia jest również proporcjonalny do strumienia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



Źródła i detektory

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



Źródła i detektory

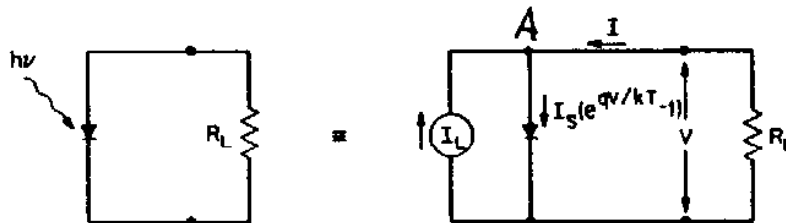
można traktować jak źródło prądowe. Elektryczny schemat zastępczy baterii przedstawiono na rys.4. Zgodnie z tym schematem i I prawem Kirchoffa dla węzła A

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

Stąd prąd płynący przez obciążenie:

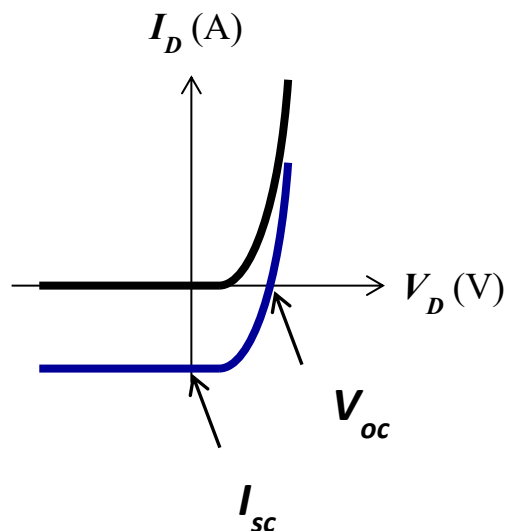
$$I = I_d - I_L = - (I_L - I_d) \quad (6)$$

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.



Źródła i detektory

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

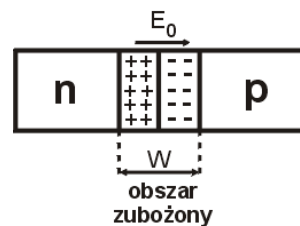


Źródła i detektory

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:

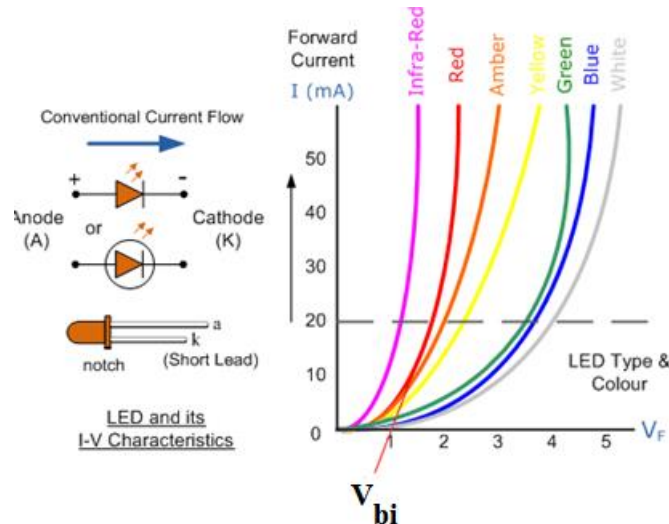
$$eV_0 < E_G \quad (7)$$



Źródła i detektory

gdzie E_G [eV] jest wartością energii wzbronionej półprzewodnika, z którego wykonano badaną diodę. Dla złączy 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.



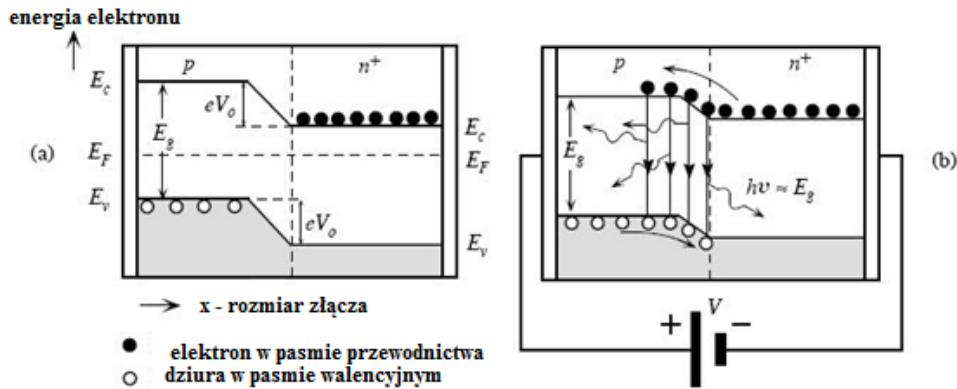
Rys. 6. Oznaczenie diody w schematach elektrycznych, sposób polaryzacji i charakterystyki I-V dla wybranych diod LED.

Na rys. 7 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. 7a). 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. 7b). 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



Źródła i detektory

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

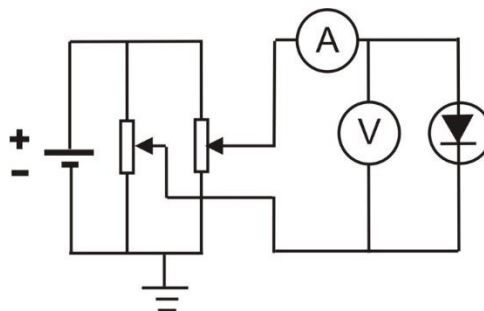


Rys.7. Złącze p-n a) bez polaryzacji b) spolaryzowane w kierunku przewodzenia. E_c - krawędź pasma przewodnictwa, E_v - krawędź pasma walencyjnego, E_F - poziom Fermiego w stanie równowagi termodynamicznej, V_0 - bariera potencjału tzw. potencjał wbudowany, E_g - przerwa wzbroniona, $h\nu$ - energia 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 oraz pomiar charakterystyk prądowo – napięciowych LED. Na rys. 8 przedstawiono układ do pomiaru charakterystyk prądowo – napięciowych fotodiody lub LED.



Rys.8.Układ do pomiaru charakterystyk I-V fotodiody

Zadania do wykonania



Źródła i detektory

- Zmierzyć charakterystykę prądowo-napięciową nieoświetlonej fotodiody w zakresie do 10mA w kierunku przewodzenia i do 2V w kierunku zaporowym.
 - 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.8).
- Zaobserwować, dla jakiej polaryzacji dioda zaczyna świecić.
- Zmierzyć charakterystykę prądowo-napięciową oświetlonej fotodiody. Oświetlaczem jest dioda elektroluminescencyjna LED. Wybrać różne natężenia oświetlenia, np. ustawiając natężenie prądu LED równe (1, 1.5, 2,5, 5, 10, 15, 20) mA. Fotodiodę należy ustawić tak, aby była na tej samej wysokości, co oświetlacz.
 - Pomiar powtórzyć dla kilku wybranych LED. Zaobserwować, czy fotodioda jest czuła na oświetlenie dowolną LED.

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 :

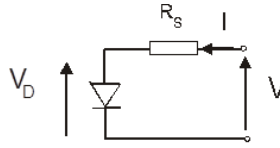
$$u(V_{bi}) = \sqrt{\left[\frac{b}{a^2} \Delta a\right]^2 + \left[\frac{1}{a} \Delta b\right]^2} \quad (9)$$

- Wyznaczyć rezystancję szeregową fotodiody.



Źródła i detektory

Obwód zastępczy dla rzeczywistego złącza p-n z opornością szeregową przedstawia rys. 9.



Rys.9 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 $\log I = f(V)$:

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

Współczynnik idealności wyraża się poprzez współczynnik kierunkowy prostej a na wykresie $\ln I - V$ (por. rys. 10).

- 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 szeregowej diody

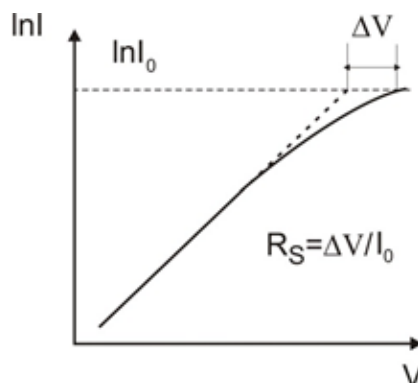
W tym celu należy wykorzystać również charakterystykę $I-V$ narysowaną w skali półlogarytmicznej. Należy wyznaczyć różnicę napięć odpowiadającą napięciu na



Źródła i detektory

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.10. 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:

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

- Narysować zależność prądu zwarcia i napięcia rozwarcia fotodiody od natężenia prądu LED.



Źródła i detektory

- 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.