

I. DIODA ELEKTROLUMINESCENCYJNA

Cel ćwiczenia : Pomiar charakterystyk elektrycznych diod elektroluminescencyjnych.

Zagadnienia: Emisja spontaniczna, złącze p-n, zasada działania diody elektroluminescencyjnej LED

1. Wprowadzenie

Dioda elektroluminescencyjna nazywana także diodą świecąca - **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 wiele składnikowe, przy czym skład dobiera się tak, aby uzyskana w procesie technologicznym struktura półprzewodnikowa umożliwiała emisję światła w zadanym zakresie spektralnym.

Najmniej skomplikowane diody LED 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 diody LED, a tym samym jego barwa, zależy od materiału półprzewodnikowego, z którego została wytworzona (patrz tabela 1).

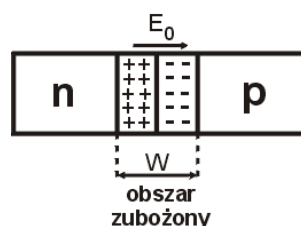
Zasada działania diody LED jest oparta na zjawisku elektroluminescencji, które polega na wytwarzaniu światła pod wpływem pola elektrycznego. Elektroluminescencja zachodzi w wyniku rekombinacji dziur i elektronów w obszarze złącza p-n. Przejściom elektronów z wyższego poziomu energetycznego na niższy 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
InGaN	zielona, niebieska, bliski ultrafiolet
SiC	niebieska
Al ₂ O ₃	niebieska
ZnSe	niebieska

1.1. 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.1. Schemat złącza p –n.

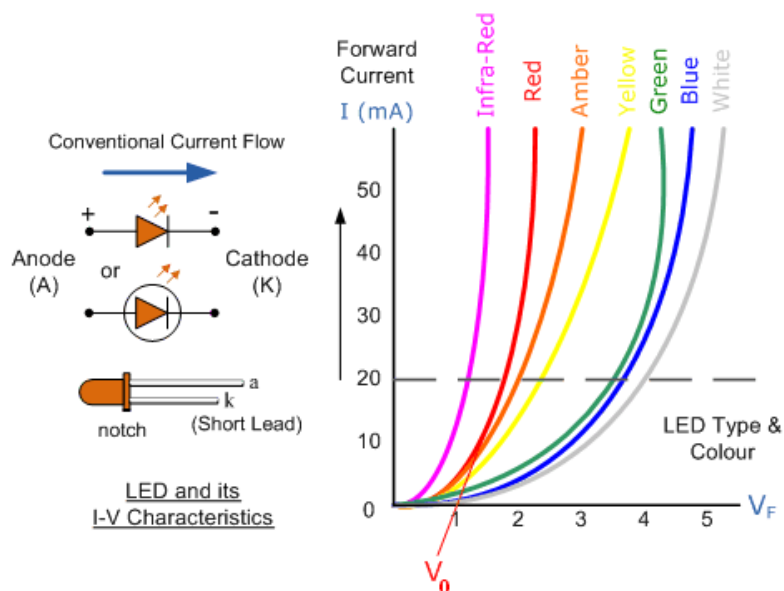
powstaje tzw. **prąd dyfuzyjny**, który jest skutkiem przechodzenia elektronów z obszaru n do obszaru p i dziur z obszaru p do obszaru n. W wyniku dyfuzji nośników nadmiarowych (elektronów) z obszaru n pozostają w nim dodatnio naładowane jony atomów domieszki donorowej, zaś w skutek dyfuzji dziur z obszaru 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. 1. Różnica potencjałów w warstwie zaporowej nosi nazwę **bariery potencjału** V_0 . Wysokość bariery potencjału w przypadku diod LED zwykle spełnia warunek:

$$eV_0 < E_G \quad (1.1)$$

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.

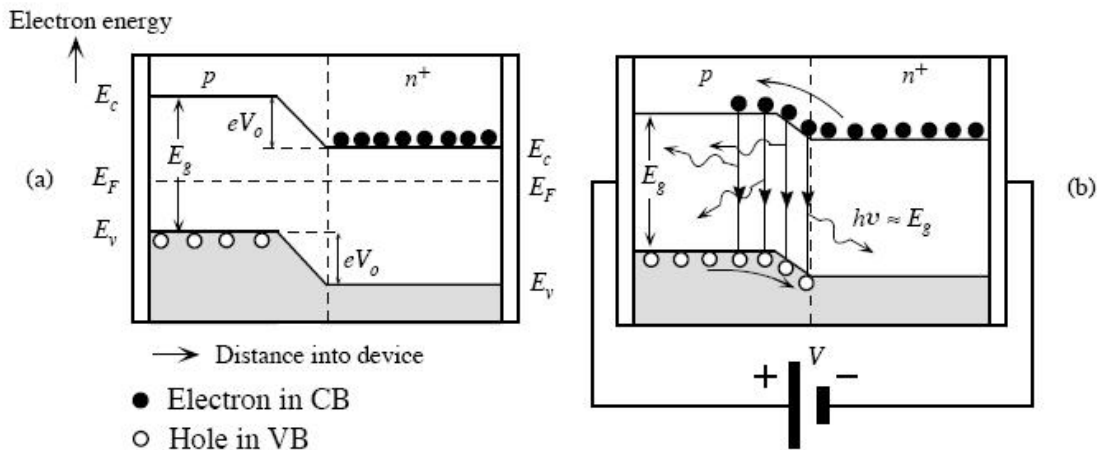
Na rys. 2 pokazano szereg charakterystyk I-V dla różnych diod LED. Jak wynika z rys.2, potencjał wbudowany jest tym mniejszy im większa długość fali odpowiadająca maksimum zdolności emisyjnej diody LED.



Rys. 2. Oznaczenie diody w schematach elektrycznych, sposób polaryzacji i charakterystyki I-V dla wybranych diod LED.

Na rys. 3a 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. 3a). 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. 3b). 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 od złącza p-n w głąb półprzewodnika. Dlatego do rekombinacji promienistej dochodzi jedynie w obszarze zubożonym złącza p-n.



Rys.3. 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.

1.2. Charakterystyka prądowo – napięciowa złącza p-n

Całkowity prąd przepływający przez idealne złącze p-n jest sumą prądu elektronowego i dziurowego. Charakterystykę prądowo – napięciową idealnego złącza p-n opisuje równanie

$$I = I_{s0} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1.2)$$

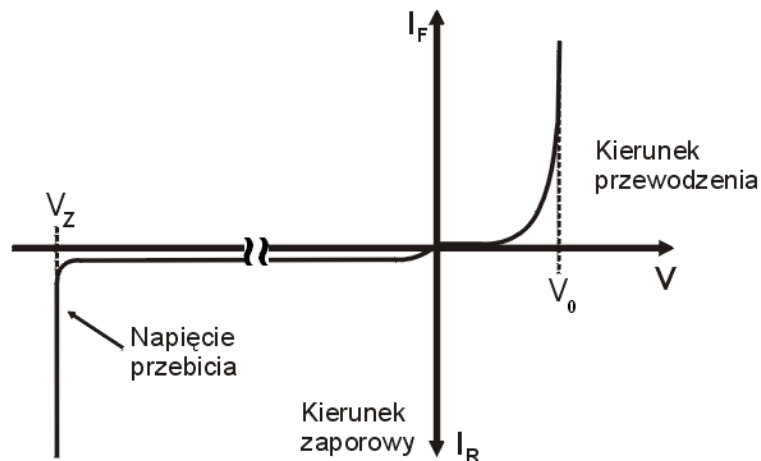
gdzie $I_{s0} = (C_1 N_p + C_2 N_n) \exp\left(\frac{-qV_0}{kT}\right)$ oznacza natężenie tzw. prądu nasycenia, V jest napięciem ze znakiem „+” dla polaryzacji w kierunku przewodzenia, a ze znakiem „-” dla polaryzacji w kierunku zaporowym, k – stałą Boltzmanna, T – temperaturą w której przeprowadzany jest pomiar, C_1, C_2 są współczynnikami proporcjonalności, zaś N_p - koncentracją dziur w obszarze typu p, N_n - koncentracją elektronów w obszarze typu n. W rzeczywistym złączu p-n obok prądu dyfuzyjnego i prądu unoszenia mogą płynąć jeszcze inne prądy takie jak prąd generacji – rekombinacji, prąd tunelowy i powierzchniowe prądy upływności. Ich przepływ powoduje, że charakterystyka I-V odbiega od idealnej i jest opisana zależnością:

$$I = I_{s0} \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (1.3)$$

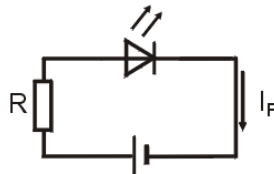
gdzie n jest współczynnikiem idealności złącza zależnym od konstrukcji diody.

Na rys. 4. przedstawiono typowy przebieg charakterystyki I-V diody elektroluminescencyjnej, który odzwierciedla najważniejszą cechę półprzewodnikowego złącza p-n – jego prostowniczy charakter. Prostująca charakterystyka prądowo – napięciowa oznacza, że prąd płynie przez złącze tylko w jednym kierunku. W efekcie przyłożenia do złącza napięcia polaryzującego je w kierunku przewodzenia obserwuje się wzrost wartości natężenia prądu wraz ze wzrostem napięcia. Wartość natężenia tego prądu jest ograniczona wielkością powyżej której, dioda ulega zniszczeniu. Dla diod znajdujących się na pracowni, średnia wartość prądu w kierunku przewodzenia nie powinna przekraczać 20mA. Odpowiednio dobrany rezystor, połączony szeregowo z diodą ogranicza wielkość prądu,

przebiegającego przez diodę (patrz rys.5). W przypadku, gdy do złącza przyłożone zostanie napięcie polaryzujące w kierunku zaporowym, wówczas przepływa przez nie prąd o niewielkim natężeniu. Dopiero wzrost wartości napięcia powyżej tzw. napięcia przebicia V_Z powoduje gwałtowny wzrost natężenia prądu (patrz rys. 4). Napięcie przebicia jest zwykle rzędu kilku dziesiątek volt.



Rys.4. Przykładowa charakterystyka prądowo- napięciowa diody półprzewodnikowej.



Rys.5. Przykładowy schemat układu elektrycznego, w którym pracuje dioda LED.

Pomiar charakterystyki prądowo – napięciowej złącza p-n umożliwia wyznaczenie bariery potencjału V_0 w tym złączu. Można to zrobić ekstrapolując prostoliniową część charakterystyki I-V dla dużych napięć w kierunku przewodzenia do osi napięcia tak, jak to pokazano na rys.4. Pomiar ten umożliwia również wyznaczenie dwóch ważnych parametrów: współczynnika idealności diody n oraz oporności szeregowej R_S .

Dla napięć takich, że $qV / kT \geq 3$ równanie (1.3) upraszcza się do postaci:

$$I = I_{s0} \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) \right]. \quad (1.4)$$

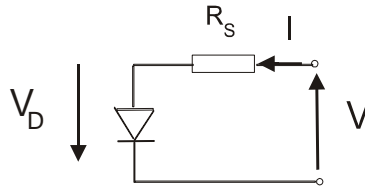
Zatem po jego obustronnym logarytmowaniu otrzymujemy:

$$\ln I = \ln I_{s0} + \frac{qV}{nkT}. \quad (1.5)$$

Wykres funkcji $\ln I$ jest więc linią prostą o współczynniku kierunkowym q/nkT , która przecina oś rzędnych w punkcie o współrzędnej $\ln I_{s0}$. Znając nachylenie prostej można więc wyznaczyć współczynnik idealności złącza n , natomiast znajomość punktu przecięcia z osią rzędnych pozwala obliczyć wartość prądu nasycenia.

1.3 Wyznaczenie oporności szeregowej złącza półprzewodnikowego i współczynnika idealności dla rzeczywistego złącza p-n.

Obwód zastępczy dla rzeczywistego złącza p-n z opornością szeregową przedstawia rys. 6.



Rys.6 Obwód zastępczy dla rzeczywistego złącza p-n.

Część napięcia polaryzującego diodę odkłada się na oporności szeregowej złącza:

$$V = V_D + IR_s \quad (1.6)$$

Wówczas prąd płynący przez złącze :

$$I = I_{s0} \left[\exp \frac{q(V - IR_s)}{nkT} - 1 \right] \quad (1.7)$$

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

Współczynnik n obliczamy korzystając z wykresu $\ln I = f(V)$ (dla $V > 3kT/q$):

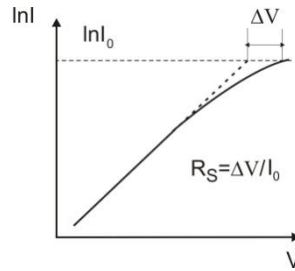
$$n = \frac{q}{kT} \frac{d \ln I}{dV} \quad (1.8)$$

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

$$n = \frac{q}{2.3} \frac{d \log I}{dV} kT \quad (1.9)$$

Oporność szeregową obliczamy korzystając z wykresu $\ln I=f(V)$ lub $\log I=f(V)$ dla dużych napięć w kierunku przewodzenia. Z odchylenia tego wykresu od linii prostej dla dużego prądu I_0 otrzymujemy (patrz rys. 7):

$$R_s = \frac{\Delta V}{I_0} \quad (2)$$



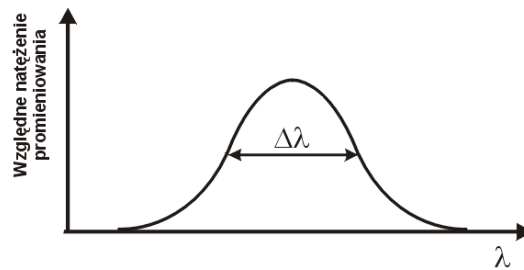
Rys. 7. Sposób wyznaczenia oporności szeregowej z charakterystyki I-V.

1.4. Charakterystyka spektralna diody LED

Długość fali promieniowania emitowanego przez diodę półprzewodnikową w skutek rekombinacji par elektron – dziura wyraża się wzorem:

$$\lambda = \frac{hc}{E_G} \quad (2.1)$$

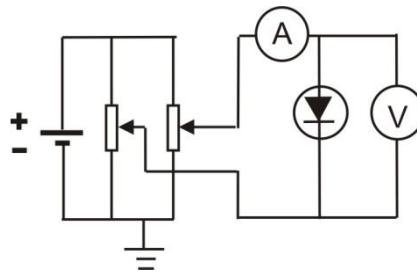
gdzie E_G jest szerokością przerwy wzbronionej półprzewodnika. Zatem aby oszacować E_G należy wyznaczyć długość fali odpowiadającej maksymalnej zdolności emisyjnej diody. Należy zdawać sobie sprawę z faktu, iż w praktyce dioda LED emituje światło w pewnym zakresie spektralnym, a nie jedynie światło o długości fali odpowiadającej maksimum zdolności emisyjnej. Wartość tego przedziału charakteryzuje wielkość zwana **szerokością połówkową** spektrum diody. Szerokość połówkowa to parametr, który charakteryzuje linię widmową. Jest to przedział częstości, dla których natężenie linii widmowej jest większe od połowy maksymalnego natężenia. W przypadku diod LED szerokość połówkowa zawiera się w przedziale 40 -190 nm (w przypadku laserów jest to przedział od 0.00001 do 10 nm). Na rys. 8 przedstawiono profil linii widmowej wraz z zaznaczoną szerokością połówkową $\Delta\lambda$.



Rys.7. Przykładowy profil linii widmowej.

1.5. Układ pomiarowy – zasada pomiaru

W ćwiczeniu wykonuje się pomiary charakterystyk I-V diod LED w układzie przedstawionym schematycznie na rys.9.



Rys.9.Układ do pomiaru charakterystyk I-V diody LED.

1.6. Zadania do wykonania

Pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej diod LED świecących w zakresie widzialnym

- a) Połączyć układ pomiarowy według schematu przedstawionego na rys.9.(Na schemacie nie zaznaczono, że woltomierz i amperomierz są podłączone do komputera i pomiary można wykonać przy użyciu programu komputerowego).
- b) Zmierzyć charakterystykę prądowo-napięciową diod LED w zakresie :
 - dla polaryzacji zaporowej : dla napięć $U \leq 4V$;
 - dla polaryzacji w kierunku przewodzenia : dla prądu $I \leq 25 \text{ mA}$)
 Zaobserwować dla jakiej polaryzacji dioda zaczyna świecić.

1.7. Opracowanie wyników

1. Narysować charakterystyki (wykresy punktowe) prądowo-napięciowe, osobno dla każdej mierzonej diody LED. Następnie obliczyć i zaznaczyć na wykresach niepewności pomiaru dla prądu i napięcia, korzystając z formuł podanych w instrukcjach do multimetrów.
2. Wyznaczyć wysokości barier potencjału V_0 oraz oporności szeregowy (R_s) dla każdej z mierzonych diod z przecięcia osi napięcia z przedłużeniem prostej ($y = ax + b$) najlepiej dopasowanej do charakterystyki w zakresie dużych napięć w kierunku przewodzenia. Odwrotność współczynnika kierunkowego tej prostej jest opornością szeregową ($R_s=1/a$), zaś $V_0=-b/a$.
4. Dla każdej diody LED obliczyć wartość energii wzbronionej półprzewodnika z którego została wykonana, korzystając z zależności $E_g=hc/\lambda$, gdzie h – stała Plancka, c – prędkość światła w próżni, λ_{\max} – długość fali odpowiadająca maksimum zdolności emisyjnej diody LED. Wartości dla badanych diod LED są podane w poniższej tabeli:

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

5. Porównać obliczone wartości przerw wzbronionych z potencjałem wbudowanym wyznaczonym w p.p. 2.
6. Narysować charakterystyki $\ln I = f(V)$ dla każdej z mierzonych diod, przy czym prąd wyrazić w [A] a napięcie w [V] (uwaga: w programie komputerowym wartości prądu i napięcia podane są odpowiednio w [mA] i [mV]). Liniową część charakterystyk aproksymować prostą $y = ax + b$. Znając współczynniki kierunkowe prostych obliczyć współczynniki idealności n dla poszczególnych diod, korzystając ze wzoru:

$$n = \frac{q}{k_B T \cdot a}, \quad (2.2)$$

gdzie $a = \frac{d(\ln I)}{dU}$, k_B – stała Boltzmana. Przyjąć $T=300K$.