

LABORATORIUM OPTOELEKTRONIKI

Ćwiczenie 9

Badanie emiterów promieniowania optycznego

Cel ćwiczenia:

Zapoznanie studentów z podstawowymi charakterystykami emiterów promieniowania optycznego.

Badane elementy:

Źródło żarowe, dioda LED, oraz dioda laserowa LD.

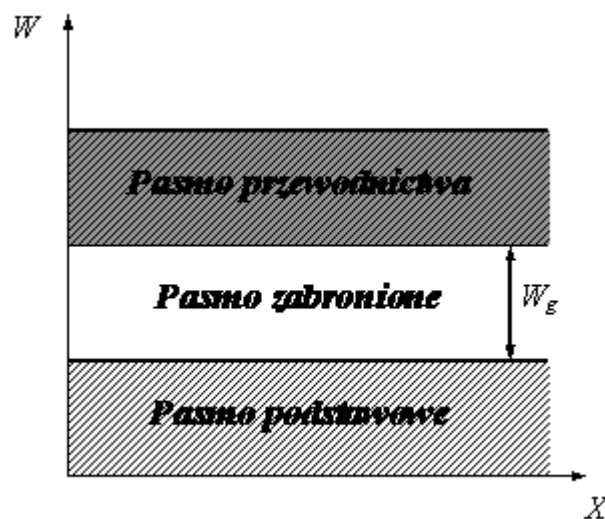
Zakres ćwiczenia:

Pomiar charakterystyk prądowo- napięciowych, mocy emitowanej oraz charakterystyk widmowych wymienionych wyżej źródeł.

1. Wstęp teoretyczny

1.1 Model pasmowy

Teoria pasmowa kryształów tłumaczy różnice między metalami, izolatorami oraz półprzewodnikami. Pozwala nam ona zrozumieć skąd wynikają różnice we własnościach elektrycznych wyżej wymienionych materiałów. W modelach pasmowych wyróżnia się 2 podstawowe poziomy energetyczne: górną granicę pasma walencyjnego oraz dolną granicę pasma walencyjnego. Między nimi znajduje się pasmo zabronione co widać na Rys.1.



Rys.1 Model pasmowy

Wartość W_g , zwana jest szerokością przerwy zabronionej, określa minimalną wartość energii, która musi być dostarczona elektronom, aby zostały one wyrwane z wiązań atomowych sieci krystalicznej i mogły przejść z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Szerokość tę mierzy się w elektronowoltach (eV).

1.2 Półprzewodniki

Półprzewodnik samoistny

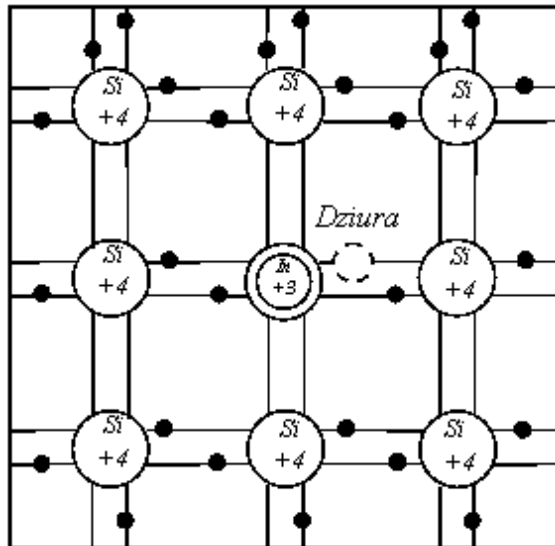
Półprzewodnik samoistny to monokryształ pozbawiony domieszek, czyli obcych atomów w sieci krystalicznej. W wyniku dostarczenia energii do takiego materiału, np. przez podgrzanie, część elektronów pasma walencyjnego, budujących wiązania walencyjne, zyskuje energię, która pozwala im pokonać przerwę zabronioną i przedostać się do pasma przewodnictwa. Energia ta musi być większa od W_g . Elektrony te stają się swobodnymi nośnikami ładunku i mogą tworzyć prąd elektryczny. W miejscach opuszczonych przez elektrony, które przedostały się do pasma przewodnictwa powstają dziury. Najprościej tłumacząc są to dodatnie nośniki ładunku, wynikające z braku elektronu w paśmie walencyjnym w wyniku jego przejścia do pasma przewodnictwa (całkowity ładunek półprzewodnika pozostaje neutralny).

Półprzewodniki domieszkowane

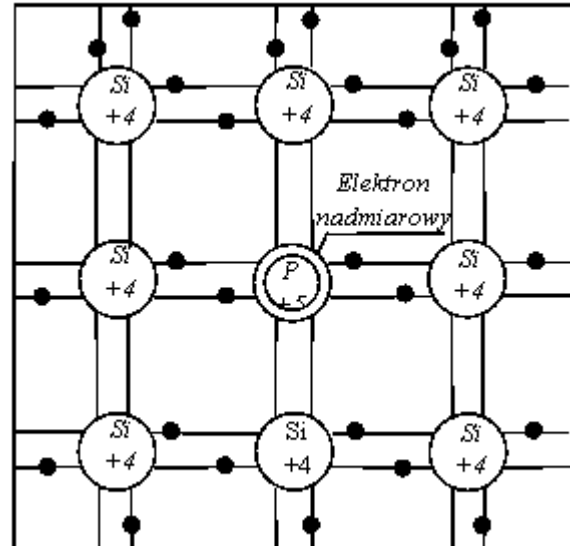
Domieszkowanie półprzewodników samoistnych, zbudowanych zazwyczaj z atomów czterowartościowych (np. krzem, german), polega na umyślnym wprowadzeniu w ich sieć atomów innych niż sam kryształ. Pozwala to na modyfikację właściwości materiałów. Rozróżniamy dwa podstawowe rodzaje domieszek: akceptorowe i donorowe. Domieszki akceptorowe to pierwiastki trójwartościowe. Taki atom ma trzy atomy walencyjne, którymi wiąże się z siecią krystaliczną. Do wypełnienia czwartego wiązania sąsiadującego brakuje mu jednego elektronu. Zostaje on uzupełniony poprzez pobranie elektronu z sąsiadującego wiązania. W wiązaniu tym powstaje dziura. W ten sposób powstaje półprzewodnik akceptorowy, czyli półprzewodnik **typu p** (Rys.2).

Domieszki donorowe powstają w wyniku wprowadzenia do półprzewodnika samoistnego pierwiastków pięciowartościowych. Poprzez cztery elektrony walencyjne wiążą się one z siecią krystaliczną. Niewykorzystany piąty elektron staje się swobodnym nośnikiem ładunku ujemnego. Tak domieszkowany kryształ nazywamy półprzewodnikiem donorowym, czyli półprzewodnikiem **typu n** (Rys.3).

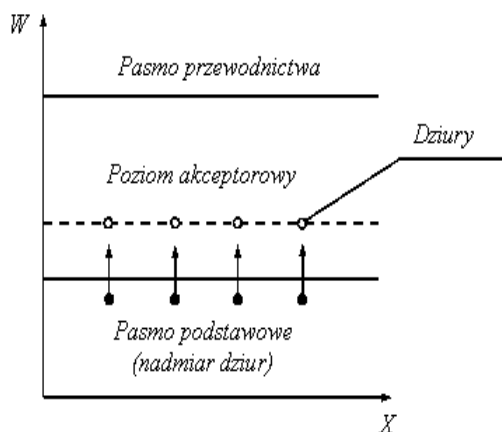
Konsekwencją domieszkowania jest wprowadzenie do modelu pasmowego nowych poziomów, odpowiednio poziomu donorowego (Rys.4) i akceptorowego (Rys.5).



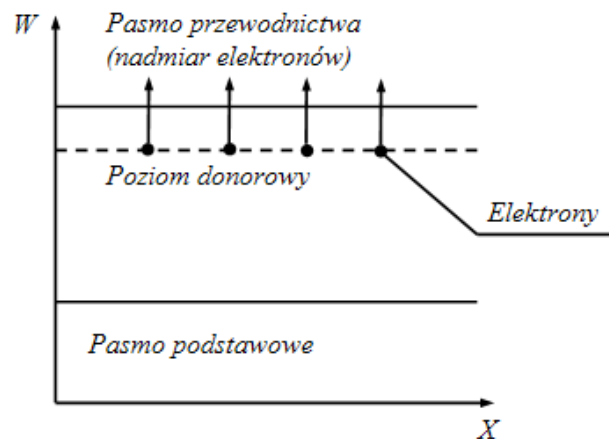
Rys.2 Półprzewodnik akceptorowy („p”)



Rys.3 Półprzewodnik akceptorowy („n”)



Rys.4 Półprzewodnik akceptorowy („p”).
Poziom akceptorowy.



Rys.5 Półprzewodnik donorowy („n”).
Poziom donorowy.

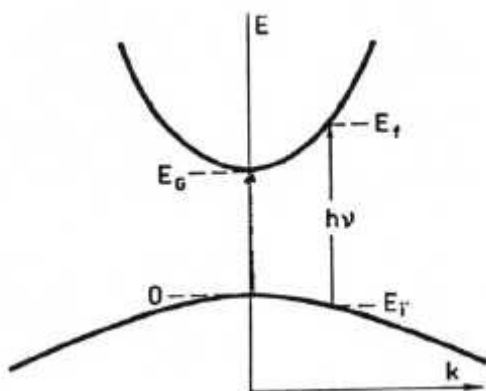
1.3 Rekombinacje

W półprzewodnikach samoistnych i domieszkowanych zachodzą rekombinacje. Zjawiska te polegają na łączeniu się elektronów i dziur, w wyniku czego oba nośniki ładunku zanikają. Opisane są one przez odpowiednie równania matematyczne i parametry. Z procesami tymi zawsze związane jest wydzielanie się pewnej energii, której ilość i forma zależna jest od charakteru tych zjawisk. W półprzewodnikach wyróżniamy następujące rodzaje rekombinacji:

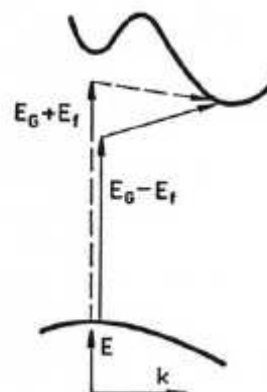
- **Rekombinacja fononowa** - wydzielona energia przekazana jest drganiom sieci krystalicznej.
- **Rekombinacja Augera** - energia przekazywana jest swobodnemu nośnikowi ładunku, w wyniku czego powstaje „gorący nośnik” (gorący elektron lub gorąca dziura).

- **Rekombinacja promienista** – związana z wydzieleniem się promieniowania elektromagnetycznego w postaci fotonu.
- **Rekombinacja powierzchniowa** – związana ze zjawiskami zachodzącymi przy powierzchni kryształu półprzewodnika.

Najważniejsza z punktu widzenia diod LED i LD jest rekombinacja promienista. Sposób w jaki zachodzi to zjawisko jest ściśle uzależniony od ukształtowania pasm energetycznych kryształu oraz charakteru przerwy zabronionej. Pod tym względem rozróżniamy dwa rodzaje półprzewodników: z prostą (Rys.6) oraz skośną (Rys.7) przerwą zabronioną. W przypadku prostej przerwy minimum pasma przewodnictwa i maksimum pasma walencyjnego przypadają dla tej samej wartości wektora falowego k . W przeciwnym przypadku mamy do czynienia z przerwą zabronioną skośną. Obydwa układy pasm przedstawiają poniższe rysunki 6 i 7.



Rys.6 Prosta przerwa zabroniona



Rys.7 Skośna przerwa zabroniona

Do budowy diod emitujących promieniowanie świetlne wykorzystywane są jedynie półprzewodniki o prostej przerwie zabronionej. Spośród wszystkich zjawisk rekombinacyjnych proces promienisty ma dominujące znaczenie. W jego wyniku uwolniona energia powstała w trakcie łączenia się elektronu i dziury pozwala na wyemitowanie fotonu. Częstotliwość promieniowania elektromagnetycznego, czyli barwa światła diody, ściśle zależy od wartości E_g . W przypadku przerwy skośnej rekombinacje promieniste zachodzą bardzo rzadko i półprzewodniki takie nie dają efektu emisji światła.

Mechanizm rekombinacji promienistej może przechodzić na kilka sposobów:

- **Rekombinacja pasmo-pasmo** - elektron z pasma przewodnictwa rekombinuje bezpośrednio z dziurą z pasma walencyjnego, w wyniku czego wytwarzany jest foton o energii równej lub większej od energii przerwy energetycznej E_g półprzewodnika.

- **Rekombinacja przez płytkie poziomy donorowe lub akceptorowe** - elektron z pasma przewodnictwa rekombinuje z dziurą przetrzymywaną na poziomie związanym z akceptorem, lub elektron z poziomu donorowego rekombinuje z dziurą z pasma walencyjnego.
- **Rekombinacja donor-akceptor** - elektron z poziomu donorowego rekombinuje z dziurą przetrzymywaną na poziomie akceptorowym. Energia odpowiadająca temu przejściu zależy od przestrzennej odległości donora i akceptora.
- **Rekombinacja poprzez głębokie poziomy** - w tym przypadku energia fotonu jest znacznie mniejsza niż wartość przerwy energetycznej.

1.4 Dioda LED

Dioda elektroluminescencyjna jest źródłem promieniowania elektromagnetycznego widzialnego (diody LED – light emitting diod) jak i niewidzialnego (diody IR – infra red). Emisja fotonów zachodzi w trakcie przepływu prądu elektrycznego przez diodę w kierunku przewodzenia (czyli od warstwy P do warstwy N).

Zjawisko promieniowania jest ściśle powiązane z mechanizmem rekombinacji promienistej. W trakcie przewodzenia nośniki są wstrzykiwane przez złącze PN, przy czym elektrony z obszaru N do P, a dziury z P do N. Swobodne nośniki rekombinują z nośnikami przeciwnego rodzaju. Sprawność procesu elektroluminescencyjnego w diodach może sięgać nawet 50%. Energia wypromieniowana w postaci fotonu ma wartość szerokości przerwy zabronionej W_g . Długość fali jest określa poniższy wzór:

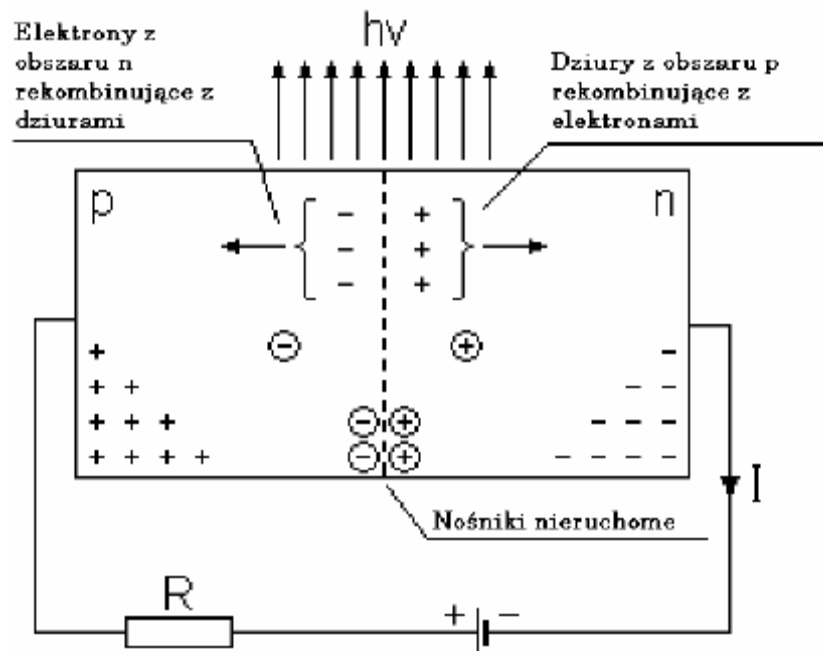
$$\lambda = \frac{c * h}{W_g}$$

gdzie:

c – prędkość światła,

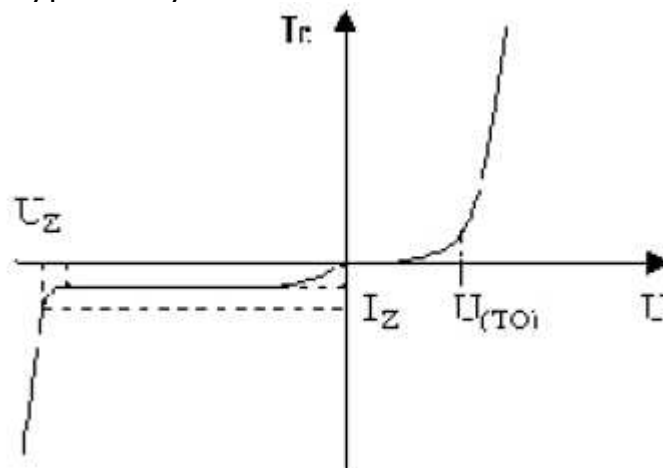
h – stała Planck'a,

W_g – szerokość przerwy zabronionej.



Rys.8 Zasada działania diody LED

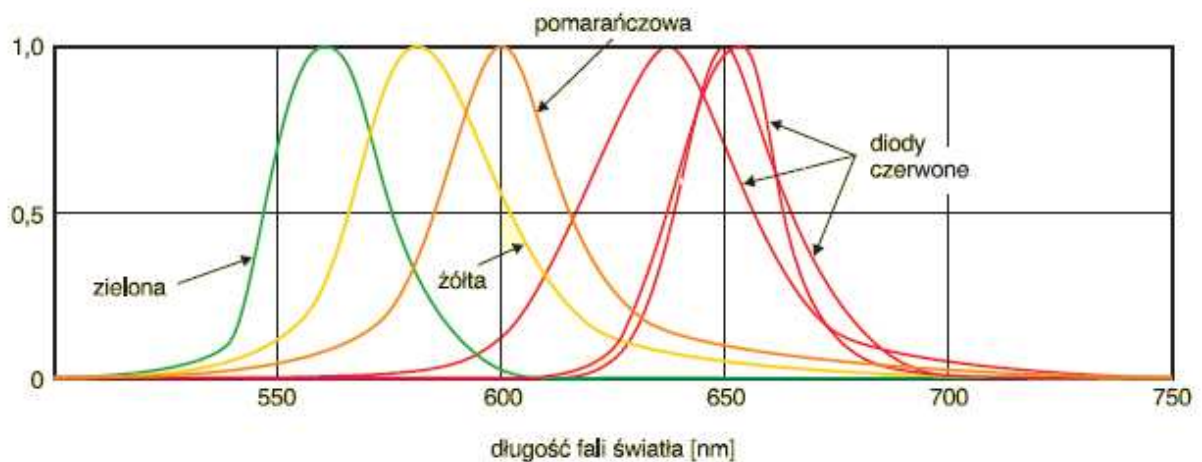
Charakterystyka prądowo-napięciowa diody LED jest zbliżona do diod prostowniczych. W układach elektronicznych działają one zazwyczaj z szeregowo połączonym rezystorem ze względu na wysoki przyrost prądu przewodzenia diody przy niewielkim wzroście jej napięcia przewodzenia. Spadek napięcia na diodzie, przez którą płynie prąd jest wyższy niż w przypadku zwykłych diod i w zależności od barwy promieniowania waha się w przedziale 2-3V. Napięcie zaporowe diod LED jest dosyć niskie i wynosi od 2 do 5V. Maksymalny prąd przewodzenia wynosi 20 – 50mA i zależy od typu diody.



Rys.9 Charakterystyka U-I diody LED

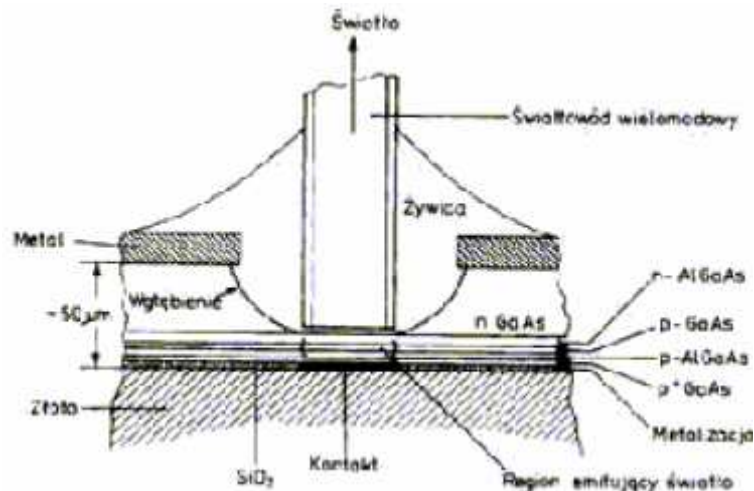
Tabela 1 Zestawienie diod w zależności od zastosowanego materiału

Materiał	W_g	Domieszka	Zakres
<i>GaAs</i>	1.443	<i>Si</i>	IR
<i>GaP</i>	2.26	<i>N</i>	Zielony
<i>GaP</i>	2.26	<i>N,N</i>	Żółty
<i>GaP</i>	2.26	<i>Zn,O</i>	Czerwony
<i>GaAs_{0.6}P_{0.4}</i>	2.1	<i>N</i>	Czerwony
<i>GaAs_{0.35}P_{0.65}</i>	2.1	<i>N</i>	Pomarańczowy
<i>GaAs_{0.15}P_{0.85}</i>	2.1	<i>N</i>	Żółty
<i>Ga_{0.6}Al_{0.4}As</i>	2.1	<i>Zn</i>	Czerwony
<i>Ga_xAl_{1-x}As (1 < x < 0.7)</i>	2.1	<i>Si</i>	IR



Rys.10 Przykładowe charakterystyki widmowe diod LED

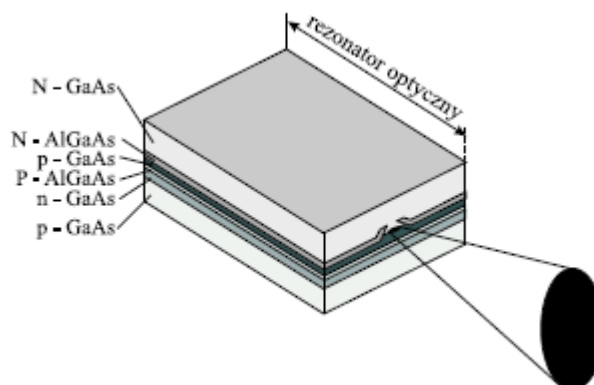
Najczęściej spotykaną i zarazem najprostszą w budowie jest dioda powierzchniowa. W zastosowaniach telekomunikacyjnych stosuje się tzw. diodę Burrusa, która posiada specjalne wgłębienie, powodujące polepszenie emisji fotonów do włókna światłowodowego. Wgłębienie to zmniejsza długość na której promieniowanie może być absorbowane oraz przybliża emitujące złącze PN do światłowodu. Strukturę powierzchniowej diody Burrusa i sposób łączenia jej z medium transmisyjnym przedstawia rysunek 10.



Rys.11 Powierzchniowa dioda elektroluminescencyjna (typu Burrusa)

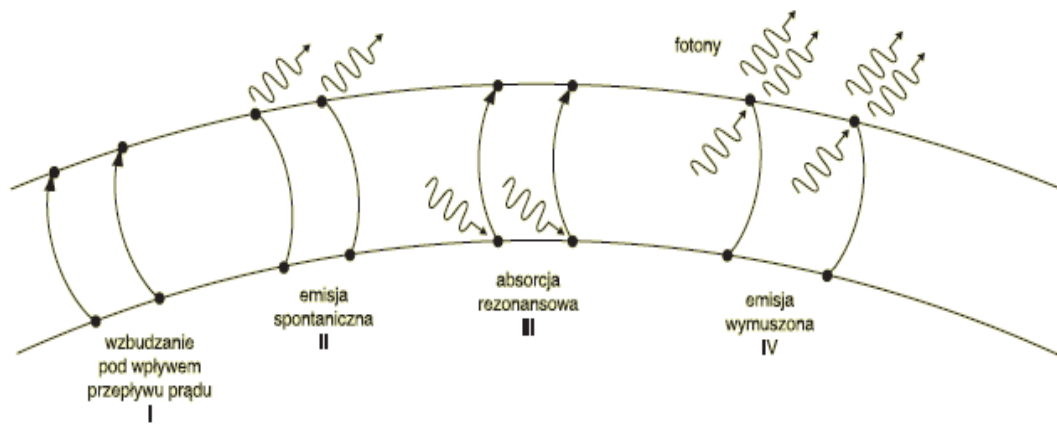
1.5 Dioda LD (laserowa).

Najważniejszą różnicą między diodami LD i LED jest to, że diody laserowe posiadają w swojej strukturze rezonator optyczny. Tworzą go dwie przeciwległe, wzajemnie równoległe i wypolerowane krawędzie diody laserowej. Krawędzie te służą jako zwierciadła, przy czym jedno lub obydwa mają pewną przepuszczalność dla światła. Od tego zależy, czy dioda LD promieniuje w jednym, czy w obydwu kierunkach.

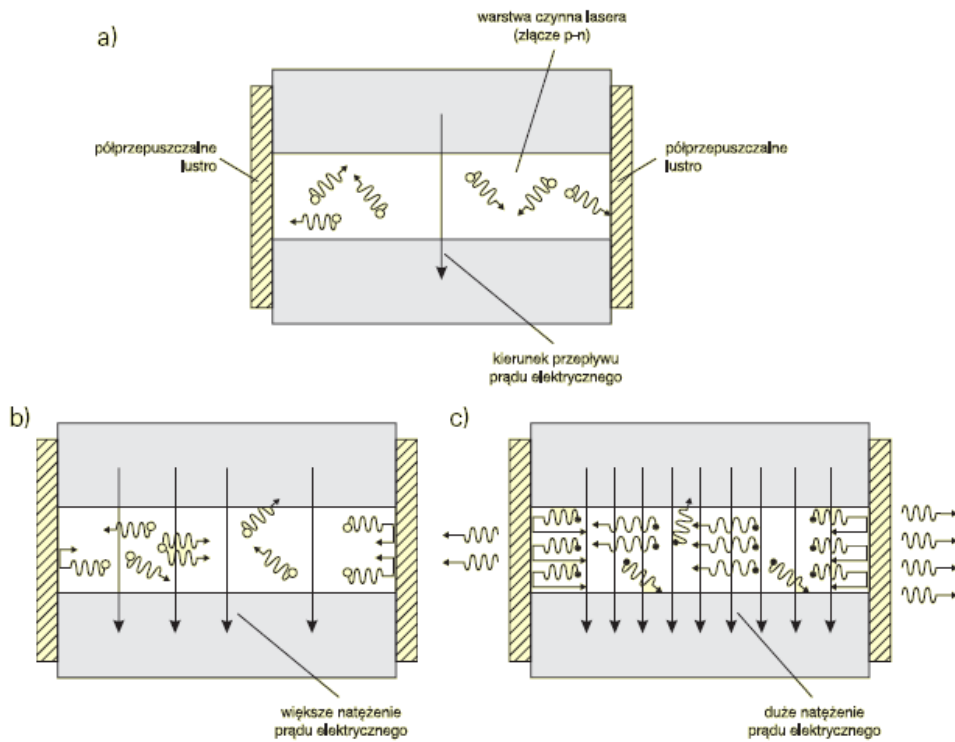


Rys.12 Struktura diody LD

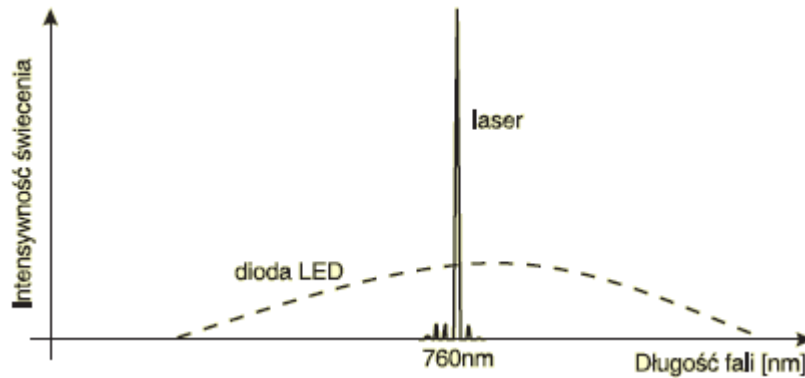
Przy przepływie prądu o natężeniu niższym od tzw. natężenia progowego dioda LD działa jak normalna dioda LD. Gdy prąd przekroczy tę wartość zaczyna zachodzić akcja laserowa. Obecność dużej ilości nośników przy wysokim natężeniu prądu stwarza dobre warunki do zachodzenia rekombinacji promienistej. Rezonator optyczny sprawia, że wyemitowane fotony mogą się poruszać jedynie wzdłuż złącza. Mogą one powodować tzw. przejścia wymuszone. Polegają one na wymuszeniu przez foton przejścia elektronu do pasma walencyjnego i połączenia się z dziurą, a w efekcie emisję promieniowania. Powstały w ten sposób foton ma taki sam kierunek propagacji, długość fali i fazę, co foton który przyczynił się do zajścia rekombinacji promienistej. Emisja wymuszona jest zjawiskiem które decyduje o najważniejszych cechach diod LD, czyli dużej gęstości mocy, spójności oraz wąskim zakresie spektralnym.



Rys.13 Zjawisko rezonansu optycznego



Rys.14 Zasada działania diody LD: a) mały prąd diody, b) średni prąd diody, d) duży prąd diody

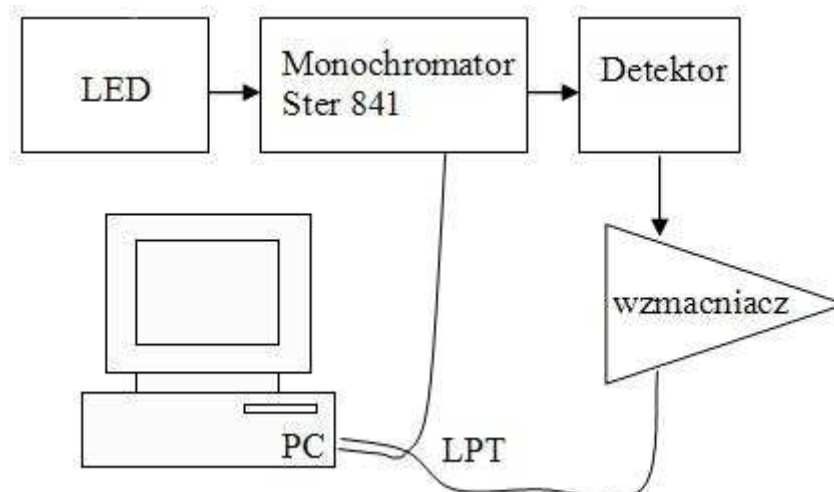


Rys.15 Przykładowa charakterystyka widmowa diody LD

2. Wykonanie doświadczenia.

2.1 Wyznaczenie charakterystyk widmowych.

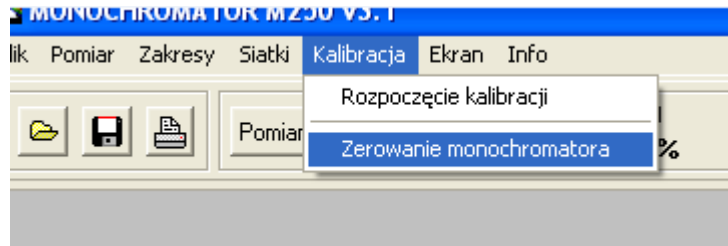
Dla podanej przez prowadzącego stałej wartości prądu należy wyznaczyć charakterystykę widmową diod LED, LD i źródła żarowego. Pomiar polega na odczytaniu wartości promieniowania wskazywanej przez detektor dla różnych nastaw monochromatora (zakres 200-800nm). **UWAGA! Przed przystąpieniem do pomiarów należy koniecznie zapoznać się z podpunktem 2.2 „Kalibracja monochromatora”!!!**



Rys.18 Schemat układu do pomiaru widma.

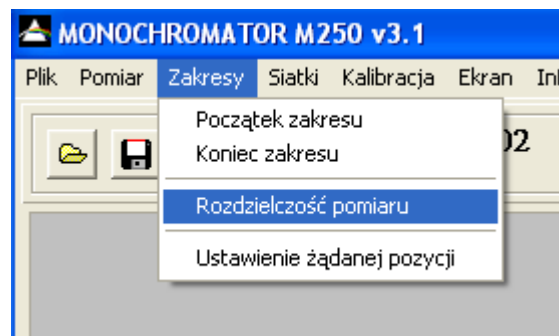
2.2 Kalibracja monochromatora.

1. Przed rozpoczęciem każdego pomiaru należy wyzerować monochromator. Dokonujemy tego otwierając zakładkę „Kalibracja” a następnie wybierając opcję „Zerowanie monochromatora”. Tak jak na rysunku Rys.19. **UWAGA! W razie niewykonania tego punktu może dojść do uszkodzenia monochromatora.**



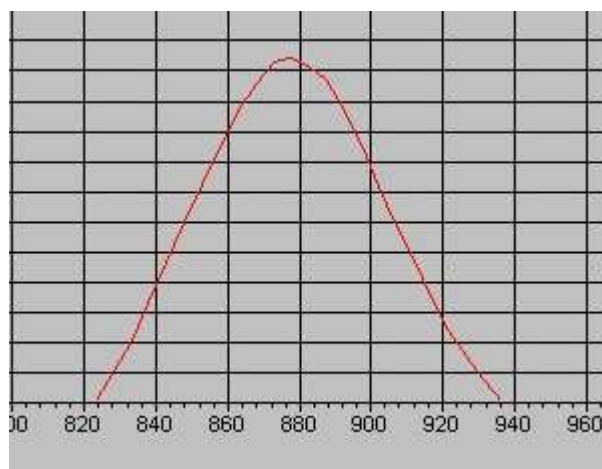
Rys.19
Zerowanie monochromatora.

2. Wchodząc w zakładkę „Zakresy” ustawiamy początek zakresu pomiaru (nie mniejszy niż 300nm) oraz koniec zakresu pomiaru (nie większy niż 1200nm). Rozdzielczość pomiaru odpowiada za częstotliwość próbkowania uzyskiwanej charakterystyki.

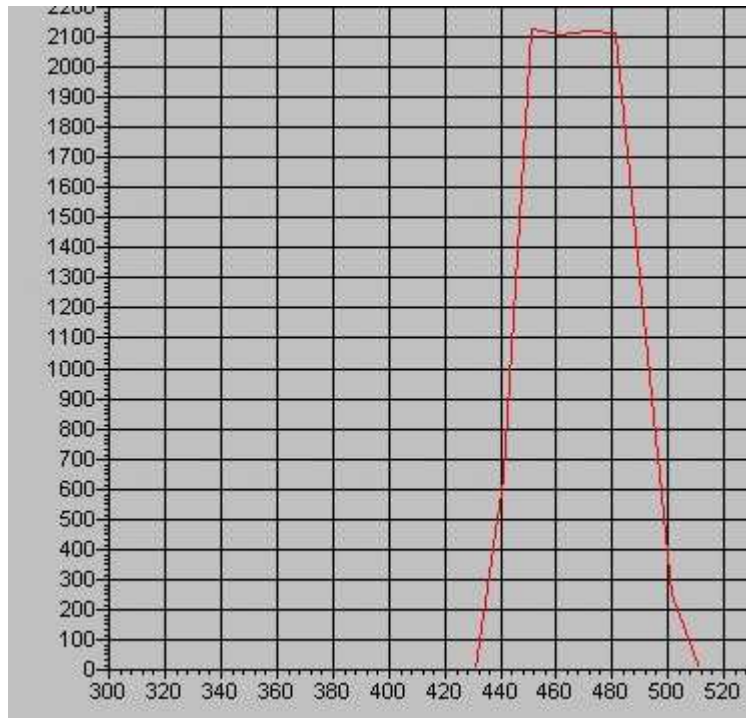


Rys.20 Ustawianie zakresów pomiarowych.

3. Uzyskany w toku pomiaru wykres powinien posiadać wyraźne maksimum mocy optycznej tak jak na Rys.21. Ścięta od góry charakterystyka widmowa taka jak na Rys.22 oznacza że moc optyczna badanego emitera wyszła poza zakres pomiarowy detektora i nastąpiło jego nasycenie. Należy wtedy postępować według punktów zawartych w pkt.4.



Rys.21
Prawidłowy kształt charakterystyki widmowej.



Rys.22

Zniekształcona wskutek nasycenia detektora charakterystyka widmowa.

4. W razie wystąpienia zniekształceń opisanych w punkcie 3 oraz zilustrowanych na Rys.22 należy zmniejszyć moc optyczną emitera stosując wymienione niżej metody:
 - a) Odsunąć źródło światła od monochromatora
 - b) Zmniejszyć szczelinę pomiarową monochromatora
 - c) Zmniejszyć czułość wzmacniacza pokrętlą sensivity w sekcji input na wzmacniaczu detektora, umieszczonego pod monochromatorem.

3. Opracowanie wyników doświadczenia.

Sprawozdanie z doświadczenia powinno zawierać:

- opis badanych przyrządów,
- tabele z wynikami pomiarów charakterystyk i widm,
- wykresy badanych charakterystyk i widm,
- wnioski.

4. Literatura.

B. Ziętek *Optoelektronika* Toruń 2001

Z. Lisik *Zjawiska w strukturach półprzewodnikowych – metody ich modelowania* Łódź 2005

J.T.Pankove *Zjawiska optyczne w półprzewodniku* Warszawa 1974