



Wydział

Elektryczny

Mechaniczny

Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki

LABORATORIUM

ZASTOSOWAŃ OPTOELEKTRONIKI

Pomiary elementów fotoemisyjnych

Opracował: Grzegorz Wiśniewski, Robert Czechowski

Zagadnienia do przygotowania

- Opisz budowę diod.
- W jaki sposób światło jest wytwarzane w diodach półprzewodnikowych.
- Gdzie znalazły obecnie zastosowanie diody elektroluminescencyjne LED i diody laserowe LD - przykłady.
- Opisać charakterystyczne właściwości diody elektroluminescencyjnej – LED i diody laserowej - LD.
- Wymienić i opisać sposób pomiarów charakterystyk widmowych.

Literatura

- [1]. <http://www.lodd.p.lodz.pl/~konrad/>
- [2] <http://slideplayer.pl/slide/59517/>

1) Wprowadzenie

Duży procent energii elektrycznej wytwarzanej na świecie zużywana jest przez źródła światła. Klasyczne rozwiązania źródeł światła ze względu na ich nieekonomiczność sprawiły, że poszukiwania coraz to doskonalszych i tańszych sposobów generowania promieniowania widzialnego doprowadziły do rozwoju półprzewodnikowych źródeł światła. Diody świecące, spełniające dotychczas rolę zaledwie wskaźników świetlnych, stały się w ciągu zaledwie kilku lat, najszybciej rozwijającym się segmentem tego rynku. Przewiduje się, że w niedalekiej przyszłości oświetlenie wykorzystujące półprzewodnikowe źródła promieniowania widzialnego będzie miało rewolucyjny wpływ na technikę oświetleniową. Opiera się ono na oprawach używających diod elektroluminescencyjnych (LED) jako źródeł światła zamiast lamp żarowych, fluorescencyjnych lub wyładowczych. W przeciwieństwie do swych tradycyjnych konkurentów pracujących przy napięciu zmiennym, elektroluminescencyjnych (LED) korzystają z zasilania prądem stałym o niskim napięciu, wykorzystując procesy, w wyniku których mogą wytworzyć takie same ilości promieniowania świetlnego przy znacznie mniejszym zużyciu energii elektrycznej. Diody świecące będą więc w istocie pierwszymi na świecie, prawdziwie energooszczędnymi źródłami światła. Szacuje się że dzięki zastąpieniu diodami, żarówek stosowanych np. w sygnalizacji ulicznej, można zaoszczędzić rocznie biliony kW. Dotychczasowy rozwój tego typu rozwiązań hamowany był również słabą wydajnością źródeł oraz ograniczeniami związanymi z uzyskaniem naturalnej barwy.

Celem ćwiczenia jest zapoznanie z podstawowymi źródłami światła stosowanymi w technice, a dokładniej wyznaczeniu ich charakterystyk spektralnych.

Wstęp teoretyczny.

Dioda elektroluminescencyjna, dioda świecąca, LED (ang. *Light Emitting Diode*) – dioda jest zaliczana do półprzewodnikowych przyrządów optoelektronicznych, emitujących promieniowanie zarówno w zakresie światła widzialnego jak i podczerwieni. Opracowana przez amerykańskiego inżyniera Nicka Holonyaka juniora, który jest uważany za jej wynalazcę, weszła do produkcji w latach sześćdziesiątych. Możliwe jednak jest, że została odkryta już wcześniej, w latach 20. XX wieku. Radziecki technik radiowy Oleg Władimirowicz Łosew zauważył, że diody używane w odbiornikach radiowych emitują światło, w latach 1927-30 opublikował 16 artykułów opisujących działanie diod elektroluminescencyjnych.

Działanie diody elektroluminescencyjnej (LED) jest oparte na zjawisku rekombinacji nośników ładunku (rekombinacja promienista). Zjawisko to zachodzi w półprzewodnikach wówczas, gdy elektrony przechodząc z wyższego poziomu energetycznego na niższy zachowują swój pseudo-pęd. Jest to tzw. przejście proste. Podczas tego przejścia energia elektronu zostaje zamieniona na kwant promieniowania elektromagnetycznego. Przejścia tego rodzaju dominują w półprzewodnikach z prostym układem pasmowym, w którym minimum pasma przewodnictwa i wierzchołkowi pasma walencyjnego odpowiada ta sama wartość pędu.

Główne parametry diod elektroluminescencyjnych (LED):

- sprawność kwantowa (zewnątrzna)
- skuteczność świetlna
- długość fali emitowanego światła
- szerokość widmowa
- moc wyjściowa
- częstotliwość graniczna
- czas narastania lub opadania
- maksymalny prąd (przewodzenia) zasilający (w mA)
- maksymalne napięcie wsteczne (do kilku V)

Półprzewodnikiem charakteryzującym się tego rodzaju przejściami jest arsenek galu (GaAs) dzięki temu, jest on głównie stosowany do źródeł promieniowania (drugim powodem jest bardzo duża sprawność kwantowa – jest to parametr określający udział przejść rekombinacyjnych w wyniku których generowane są fotony do ilości nośników ładunku przechodzących przez warstwę zaporową złącza p-n, przejścia rekombinowane zachodzą w obszarze czynnym złącza). W krzemie i germanie dominują przejścia skośne.

$$\nu_{qw} = \frac{N_{fot}}{N_{no\dot{s}o}} = \frac{\frac{P_{prom}}{h\nu}}{\frac{I}{e}} \quad (1)$$

przy czym:

- N_{fot} – całkowita ilość fotonów generowanych wewnątrz obszaru czynnego;
- $N_{no\dot{s}o}$ – całkowita ilość nośników wstrzykiwanych do obszaru czynnego złącza;
- P_{prom} – moc promieniowania generowanego wewnątrz półprzewodnika;

- h – stała Plancka;
- ν – częstotliwość generowanego promieniowania;
- I – prąd elektryczny doprowadzony do diody;
- e – ładunek elektronu.

Luminescencja jest to zjawisko fizyczne polegające na emitowaniu przez materię promieniowania elektromagnetycznego pod wpływem czynnika pobudzającego, które dla pewnych długości fali przewyższa emitowane przez tę materię promieniowanie temperaturowe. W diodzie elektroluminescencyjnej (LED) mamy do czynienia z tzw. elektroluminescencją, gdzie źródłem energii pobudzającej jest prąd elektryczny dostarczony z zewnątrz, czasami pole elektryczne. Najefektywniejsza elektroluminescencja w półprzewodniku powstaje w wyniku rekombinacji swobodnych nośników ładunku w złączu p-n, gdy jest ono spolaryzowane w kierunku przewodzenia. Intensywność świecenia zależy od wartości doprowadzonego prądu, przy czym zależność ta jest liniowa w dużym zakresie zmian prądu. Zjawiska przeszkadzające elektroluminescencji to pochłanianie wewnętrzne i całkowite odbicie wewnętrzne. Długość fali generowanego promieniowania (2):

$$\lambda^2 = \frac{ch}{W_g} \quad (2)$$

przy czym:

- $W_g = W_c - W_v$ – szerokość pasma zabronionego lub różnica energii poziomów, między którymi zachodzi rekombinacja,
- c – prędkość światła,
- h – stała Plancka.

Miarą strat na odbicie wewnętrzne i pochłanianie jest stosunek sprawności kwantowej zewnętrznej do wewnętrznej n_{qz}/n_{qw} . Wewnętrzna sprawność kwantowa n_{qw} jest zależna od technologii procesu wytwarzania złącza oraz właściwości zastosowanego półprzewodnika, o tyle na zewnętrzną sprawność kwantową ma także wpływ kształt diody.

Zalety diod elektroluminescencyjnych w porównaniu z żarówką:

- mały pobór prądu (mA)
- mała wartość napięcia zasilającego

- duża sprawność
- mała moc strat (znikome wydzielanie ciepła)
- małe rozmiary
- duża trwałość (nawet 100000 h)
- duża wartość luminacji (nawet 90 lm przy około 18 lm dla żarówek)
- większa intensywność świecenia (nawet kilkadziesiąt razy)

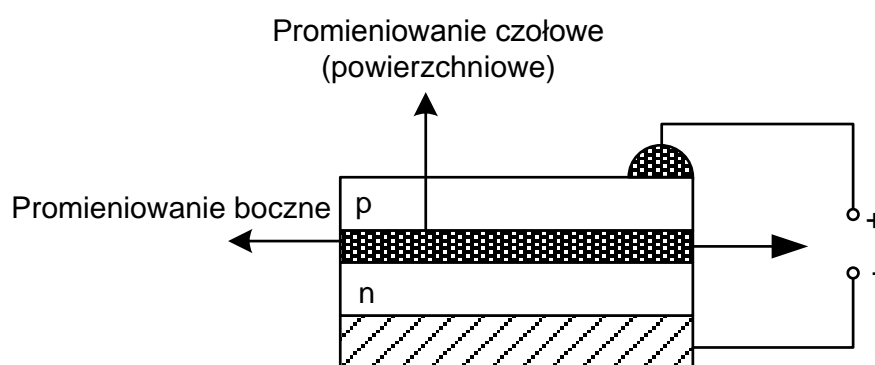
Wady diod elektroluminescencyjnych w porównaniu z żarówkami (szacunkowo w celu otrzymania podobnych parametrów):

- większa cena zakupu niż żarówki

Diody stosowane w technice światłowodowej:

Diody powierzchniowe.

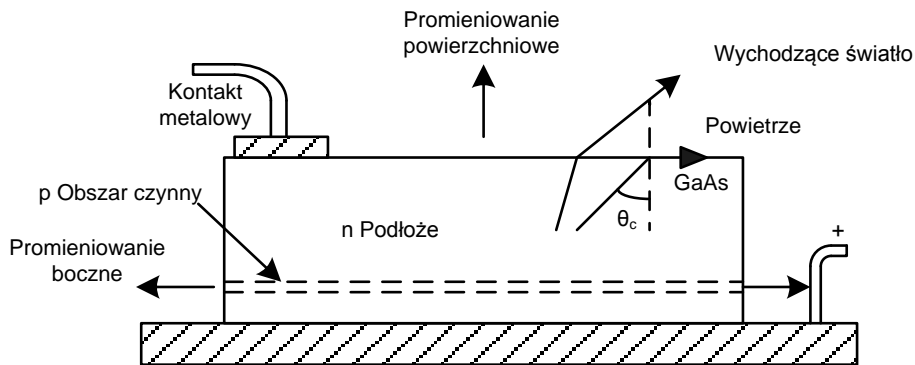
Najprostsze do wykonania diody elektroluminescencyjne wykorzystują homozłącza p-n (Rys. 1.1). Nadmiarowe elektrony wstrzykiwane są do warstwy p, w której następuje rekombinacja promienista. Gęstość prądu sięga kilku tysięcy A/cm^2 . Proces osiągać może sprawności kwantowe rzędu 50%, ale niestety nie decyduje to o całkowitej sprawności diody.



Rys. 1.1 Konstrukcja prostej diody elektroluminescencyjnej ze złączem p-n.[1]

Należy dodać, że przez sprawność kwantową rozumie się stosunek ilości wyemitowanych fotonów do ilości elektronów przepływających przez złącze. Miarą mocy emitowanej przez jednostkę powierzchni diody w danym kierunku w jednostce kąta bryłowego jest luminancja energetyczna. Wynosi ona w diodach elektroluminescencyjnych kilkadziesiąt watów na steradian i na centymetr kwadratowy.

Mniejsze jej wartości odnoszą się do opisywanych diod homozłączowych, które zazwyczaj promieniają czołowo (rys.1).

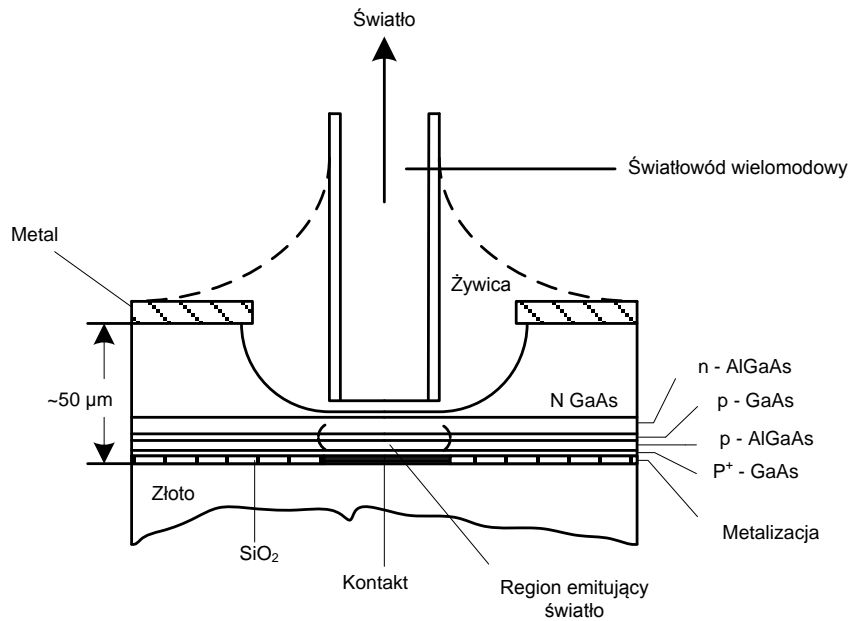


Rys. 1.2 Homozłączowa dioda elektroluminescencyjna o odwróconej strukturze z arsenku galu.[1]

Otrzymanie dużych wartości luminancji jest związane z dużą mocą zasilania diody, która nie odznacza się przecież dobrą sprawnością energetyczną, sięgającą zaledwie kilku procent. Pozostała część mocy jest tracona głównie w warstwie czynnej i tę moc należy efektywnie z niej odprowadzić. Dlatego też obecnie stosuje się często strukturę odwróconą, warstwę p umieszcza się na radiatorze odprowadzającej ciepło, a promieniowanie wyprowadza się przez warstwę n (Rys. 1.2). Jest to ważny zabieg gdyż moc wyjściowa maleje do połowy przy wzroście temperatury złącza do 100⁰C.

Moc wprowadzona do światłowodu jest proporcjonalna do powierzchni czołowej rdzenia światłowodu i kwadratu apertury numerycznej. Dlatego bardzo trudno jest sprzęgnąć pojedyncze włókna światłowodowe o małej aperturze numerycznej z opisywanymi diodami. Ułatwia to wskazana na (Rys. 1.3) klasyczna już dzisiaj konstrukcja diody Burrusa wprowadzającej promieniowanie przez okno optyczne w wytrawionej wnęce podłoża.

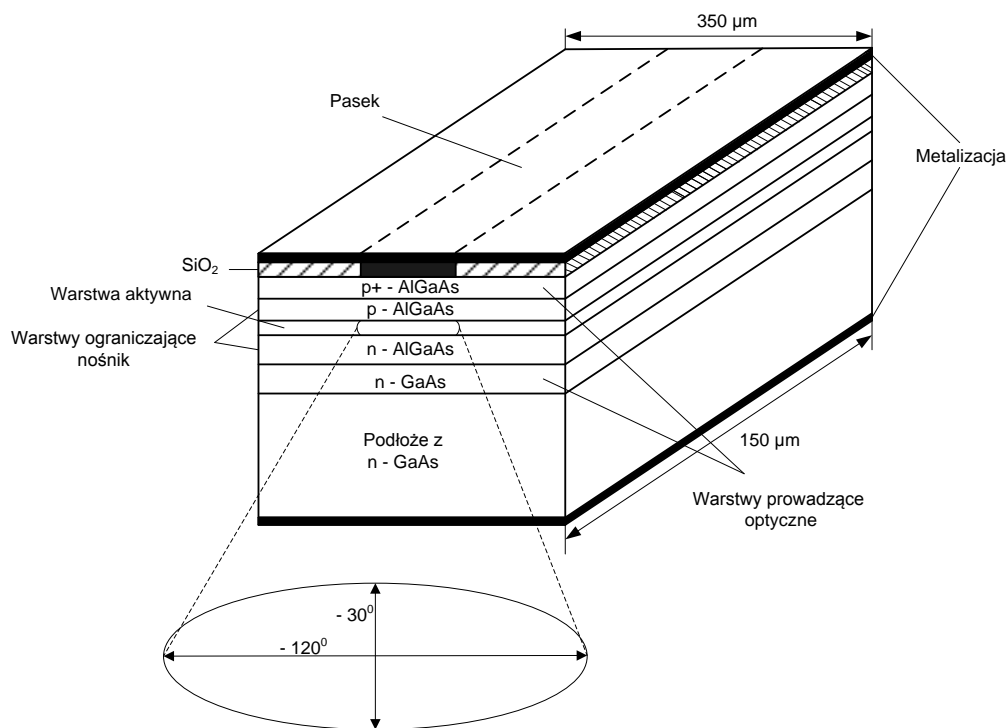
Jest to obecnie najczęściej stosowana w telekomunikacji konfiguracja diody (Rys. 1.3). Wykonuje się tam zagłębienie w podłożu z GaAs w celu zmniejszenia zachodzącej w nim silnej absorpcji emitowanego promieniowania i maksymalnego zbliżenia światłowodu do struktury emitującej światło. Promieniowanie to trafia bezpośrednio do światłowodu, który wiąże się mechanicznie z oprawką diody.



Rys. 1.3 Powierzchniowa dioda elektroluminescencyjna (typu Burrusa).

Dioda krawędziowa.

Struktura diody Burrusa niezbyt dobrze ogranicza obszar, w którym płynie prąd, co prowadzi do niekorzystnego zmniejszenia gęstości prądu i powiększenia obszaru, z którego emitowane jest promieniowanie (Rys. 1.4).

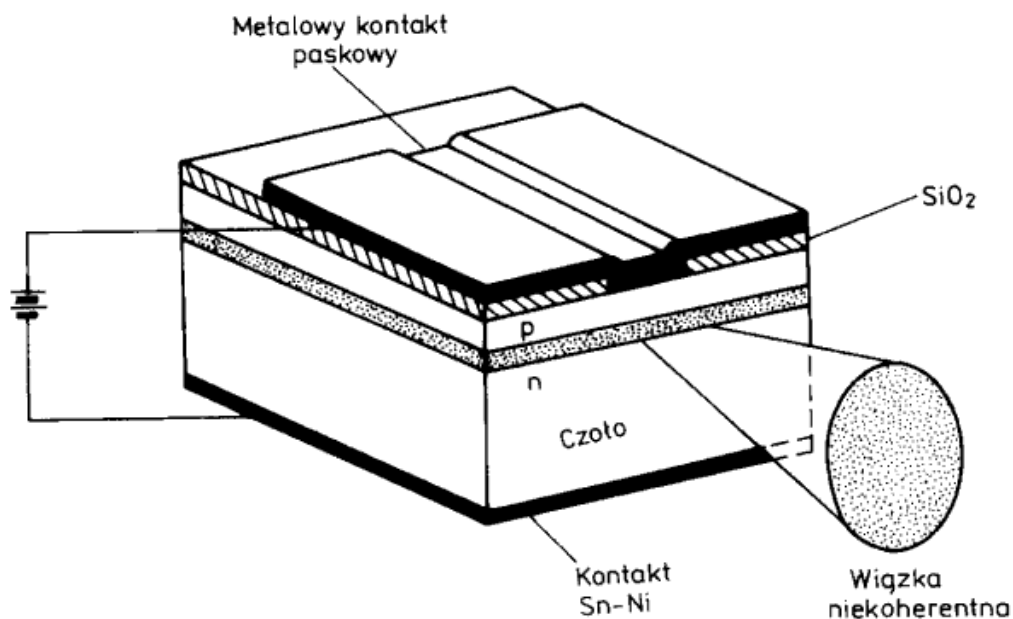


Rys. 1.4 Krawędziowa dioda elektroluminescencyjna o geometrii paskowej.[2]

Ten typ diod wykorzystuje boczne promieniowanie z warstwy czynnej. Warstwa ta jest zazwyczaj bardzo cienka zwykle rzędu $1\mu\text{m}$. Z tego względu występuje w niej rekombinacja bimolekularna, co umożliwia zwiększenie luminancji. Sprzyja temu zawężenie strefy rekombinacji do środkowego paska oraz odpowiednie skierowanie promieniowania wzdłuż niego. W celu wyprowadzenia wytworzonego promieniowania na zewnątrz jedną tylko powierzchnią boczną, tylną ścianę kostki półprzewodnikowej pokrywa się powłoką odbijającą, a przednią ścianę warstwą antyrefleksyjną. Zastosowanie większych gęstości prądu zasilającego wywołuje zjawisko emisji wymuszonej, zwiększając w ten sposób luminancję, a więc i moc wypromieniowaną przez diody.

Dioda superluminescencyjna.

Struktura diody superluminescencyjnej (Rys. 1.5) jest podobna do diody krawędziowej i lasera półprzewodnikowego. Od lasera różni się tym, że jeden z jej końców ma duże straty optyczne, co zapobiega odbiciom, a w konsekwencji akcji laserowej.



Rys. 1.5 Struktura diody superluminescencyjnej [1].

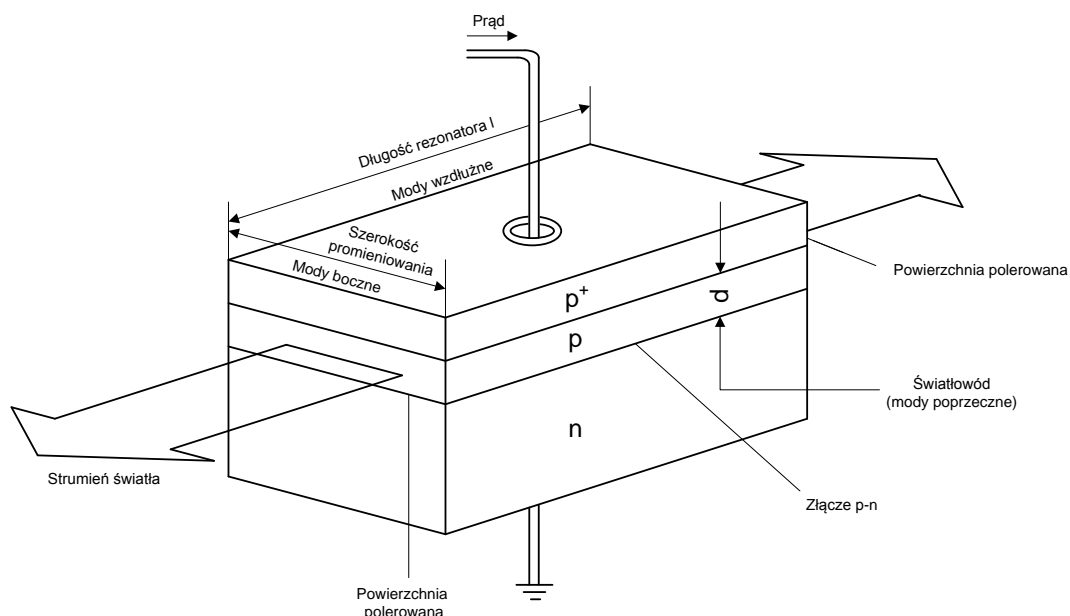
W trakcie pracy prąd wstrzykiwania jest na tyle duży, że zachodzi zjawisko emisji wymuszonej przy charakterystycznym dla laserów wzroście mocy przy przekraczaniu prądu progowego. Światło zostaje wzmocnione, ale przy braku sprzężenia optycznego akcja laserowa nie zachodzi. Dzięki wzmocnieniu optycznemu moce świetlne są większe niż dla przedstawionych diod. Kolejną zaletą takiej diody jest to, że światło wychodzące jest skupione i o małym kącie.

Laser półprzewodnikowy.

Lasery półprzewodnikowe, czyli kwantowe generatory optyczne są laserami złączowymi, w których ośrodkiem czynnym (aktywnym) jest półprzewodnik. Inwersję obsadzeń poziomów energetycznych, (inaczej pompowanie) uzyskuje się poprzez wstrzykiwanie mniejszościowych nośników ładunku do obszaru złącza p-n (lub heterozłącza) spolaryzowanego w kierunku przewodzenia. Rezonator czyli wnęka (Rys. 1.6) ma najczęściej kształt prostopadłościanu o rozmiarach rzędu ułamka milimetra. Sprzężenie optyczne uzyskuje się dzięki parze zwierciadeł prostopadłych do płaszczyzny obszaru czynnego (rezonator Fabry'ego-Perota) lub dzięki specjalnie pofalowanej powierzchni równoległej do tego obszaru (lasery z rozłożonym sprzężeniem zwrotnym DFB - Distributed FeedBack). Obszar czynny leży w płaszczyźnie złącza p-n i jest zwykle ograniczony do wąskiego paska. Dla zainicjowania akcji laserowej prąd zasilający musi mieć odpowiednią wartość zwaną prądem progowym I_{th} . Emisja wymuszona jest emisją w dużym stopniu uporządkowaną, a emitowana wiązka światła ma niewielką rozbieżność kątową, zazwyczaj kilka stopni. Stosowane w telekomunikacji lasery dają dużą moc

dochodzącą do jednego wata. Istotną zaletą diody laserowej jest jej wąskie widmo częstotliwościowe promieniowania, rzędu kilku nanometrów lub nawet kilku dziesiątych części nanometra. Jednakże, obecność zwierciadeł na końcach struktury może spowodować generację kilku różnych długości fal promieniowania - długość rezonatora jest kwantowana i wytworzyć się może kilka fal stojących. Dlatego też widmo częstotliwościowe promieniowania laserowego jest widmem dyskretnym. Wyróżnia się z tego powodu dwa typy laserów:

- wielomodowe - generacja kilku (co najmniej dwóch) modów laserowych różniących się częstotliwością i długością fali świetlnej.
- jednomodowe - generacja jednego modu laserowego czyli jednej częstotliwości i jednej długości fali świetlnej.



Rys. 1.6 Rezonator lasera półprzewodnikowego [1].

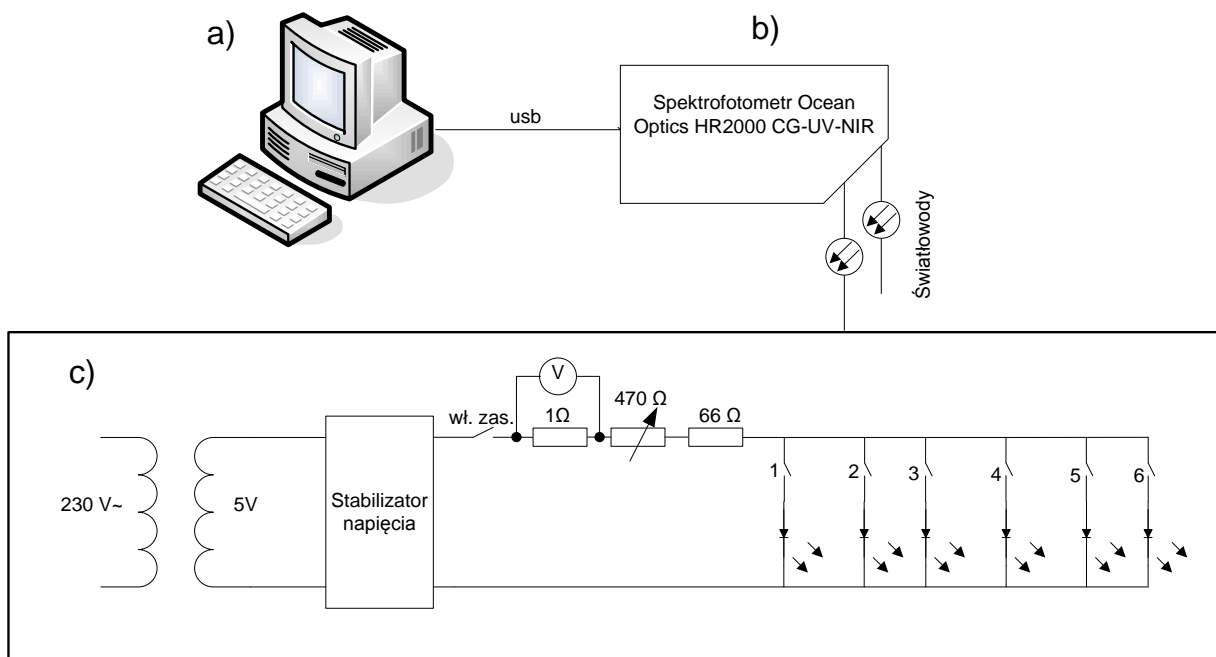
2) Przebieg ćwiczenia

Badanie elementów fotoemisyjnych przeprowadza się w celu wyznaczenia charakterystyki spektralnych źródeł światła.

Pomiar składa się z czterech etapów. Pierwszym jest pomiar widma typowych źródeł światła takich jak tradycyjna lampa żarowa, lampa wyładowcza (np. świetlówka) oraz żarówki kompaktowej. Kolej-

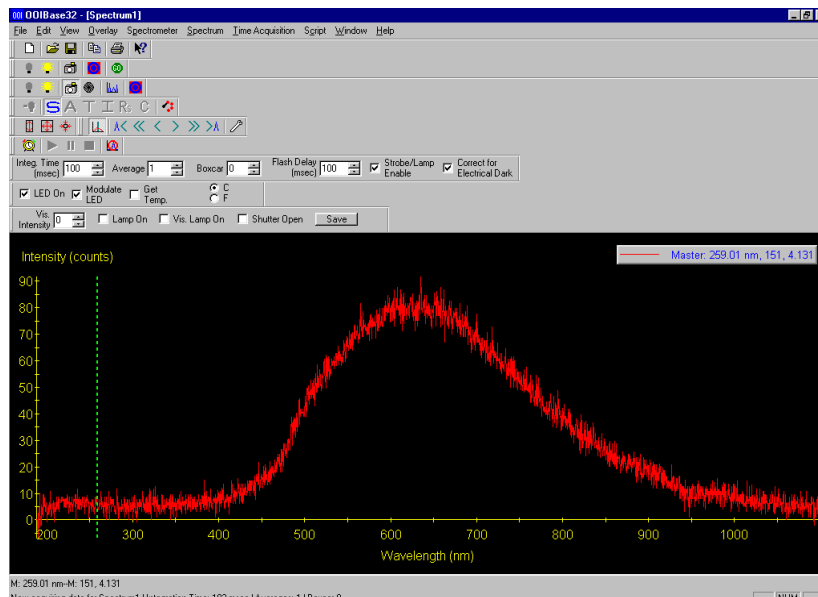
nymi etapami są pomiar widm wybranych półprzewodnikowych źródeł światła oraz ich charakterystyk prądowych. Na zakończenie należy porównać różnego typuysterowanie diod RGB.

Opis poszczególnych elementów stanowiska:



Rys. 2.1 Stanowisko do badań elementów fotoemisyjnych, a) komputer, b) spektrofotometr, c) źródła światła.

a) Komputer PC – komputer musi posiadać wejście USB w standardzie 2.0 w celu podłączenia spektrofotometru oraz odpowiednie oprogramowanie. Program Ocean Optics dostarczany przez producenta spektrofotometru pozwala na uzyskanie charakterystyk spektralnych badanego źródła światła .



Rys. 2.2 Przykładowy „screen” programu Ocean Optics, charakterystyka przedstawia światło żarówki.

Na rysunku (Rys. 2.2) przedstawione jest przykładowe okno interfejsu graficznego programu Ocean optics w „górnej” części programu znajduje się szereg opcji umożliwiających skonfigurowanie spektrofotometru. W głównym oknie wyświetlany jest wykres badanego źródła światła, aplikacja umożliwia nam uchwycenie jednego wykresu gdyż podczas ciągłego pomiaru, charakterystyka delikatnie faluje. Pionowa przerywana zielona linia pozwala nam uchwycić konkretny punkt charakterystyki i odczytać jego wartość. Dodatkowo program zawiera opcje eksportu danych z charakterystyki do pliku tekstowego.

b) Spektrofotometr Ocean Optics HR2000 CG-UV-NIR.



Rys. 2.3 Spektrofotometr Ocean Optics HR2000 CG-UV-NIR.

Spektrometr HR2000+ (Rys. 2.3) posiada zintegrowaną wysokiej rozdzielczości optykę, mocny 2-MHz przetwornik analogowo – cyfrowy, programowalną elektronikę, 2048- elementowa matryce i wysokiej prędkości port USB 2.0

Ta nowoczesna kombinacja pozwala na uzyskanie bardzo szybkiego spektrometru oraz uzyskanie rozdzielczości na poziomie 0,035nm. HR2000+ umożliwia zrzucanie i przechowywanie w pamięci pełnych spektrów co jedna milisekundę (daje to 1000 pełnych spektrów na każdą sekundę). Warunkiem jest podłączenie spektrometru do komputera przez port USB 2.0.

Zalety spektrometru:

- 1 000 pełnych spektrów na sekundę
- Hr2000 posiada na płycie głównej 2MHz przetwornik analogowo – cyfrowy, pozwala to na zrzut do pamięci pełnego spektrum każdej milisekundy, kiedy spektrometr jest podłączony do PC.
- programowalny mikrokontroler

Hr2000 ma wbudowany programowalny mikrokontroler, który pozwala na elastyczne kontrolowanie spektrometru i jego akcesoriów. Poprzez 30 pinowe przełączniki, można implementować wszystkie parametry w oprogramowaniu, takie jak kontrola zewnętrznych źródeł światła, tworzenie procesów i odtwarzanie danych z zewnętrznych urządzeń. Spektrometr umożliwia dostęp do 10 programowalnych przez użytkownika cyfrowych wejść i wyjść, umożliwiając one współpracę z innymi urządzeniami. Posiada również jedno analogowe wejście i wyjście oraz generator impulsów.

- wysoka rozdzielczość ławy optycznej,

Spektrometr ten jest idealny dla aplikacji, które wymagają monitorowania szybkich zmian w wysokiej rozdzielczości. Duża (0,035nm) rozdzielczość optyczna, możliwa jest do uzyskania, dzięki zastosowaniu ławy optycznej o wysokiej rozdzielczości (przekątna 25,4 mm, długość ogniskowej 101,6 mm). Spektrometr ten umożliwia pomiary długości fali z zakresu 200 – 1100 nm. Zarówno rozdzielczość jak i czułość pomiaru można dowolnie ustawiać używając odpowiednich opcji w dedykowanym do urządzenia oprogramowaniu.

- prosta instalacja Plug and Play

Interfejs spektrofotometru umożliwia podłączenie go do komputera poprzez USB 2.0 lub port szeregowy RS-232.

c) Źródła światła.

a)



b)



Rys. 2.4 Makieta zawierająca badane źródła światła. a) widok od strony czolowej, b) widok od strony bocznej.

Dla potrzeb laboratorium wykonano makiety zawierającą różne półprzewodnikowe źródła światła. Przełączając włączniki 1-6 (Rys. 2.4) wybieramy źródło światła. Urządzenie posiada potencjometr, który umożliwia nastawę prądu zasilającego wybrane źródło oraz wyjścia woltomierza, który mierząc napięcie na odpowiednio dobranej rezystancji umożliwia pomiar prądu ($mV \approx mA$).

W celu uzyskania maksymalnej dokładności badanych źródeł, urządzenie zostało wyposażone w specjalne końcówki umożliwiające podłączenie światłowodów sprzężonych z spektrofotometrem. Takie rozwiązanie zapewnia prawie bezstratny przesył promieniowania generowanego przez źródło do urządzenia pomiarowego.

3) Przebieg ćwiczenia

Aby wyznaczyć charakterystykę badanego źródła, należy do niego podłączyć odpowiedni światłowod (spektrometr posiada dwa kanały, należy podłączyć kanał, który jest skonfigurowany). Po włączeniu źródła światła (np. włączniki 1-6 Rys. 2.4) w oknie programu Ocean Optics powinna pojawić się charakterystyka spektralna badanego źródła.

Następnie należy ją uchwycić (aby nie falowała) i dokonać eksportu jej wartości oraz obrazu widma do pliku, w celu wyznaczenia charakterystyk. Należy to wykonać eksportując dane np. do arkusza Excela.

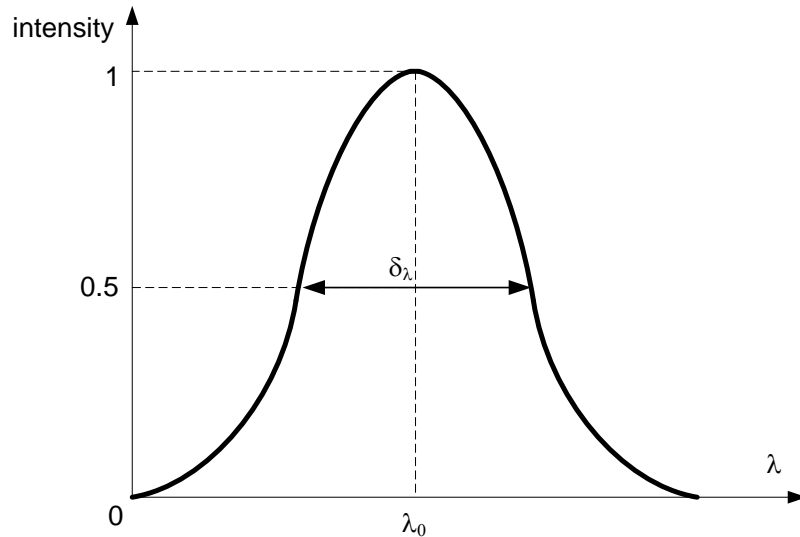
Dla każdego rodzaju źródła należy wykonać pomiary dobierając zasilanie w taki sposób aby charakterystyka widmowa miała jak największą intensywność (bez odcięcia wykresu).

Zadania do wykonania:

- I. Zapoznanie się ze stanowiskiem pomiarowym – dostępnym oprzyrządowaniem i programem Ocean Optics.**
- II. Pomiar charakterystyki spektralnej tradycyjnych źródeł światła.**

Należy wykonać i zapisać pomiary widm emisyjnych z uwzględnieniem:

- początku i końca charakterystyki,
- charakterystycznych punktów (tzw. pików i dolin),
- maksymalnego punktu charakterystyki λ_0 ,
- szerokości widma,
- szerokości połówkowej widma (Rys. 3.1).



Rys. 3.1 Przykładowa teoretyczna charakterystyka spektralna diody LED

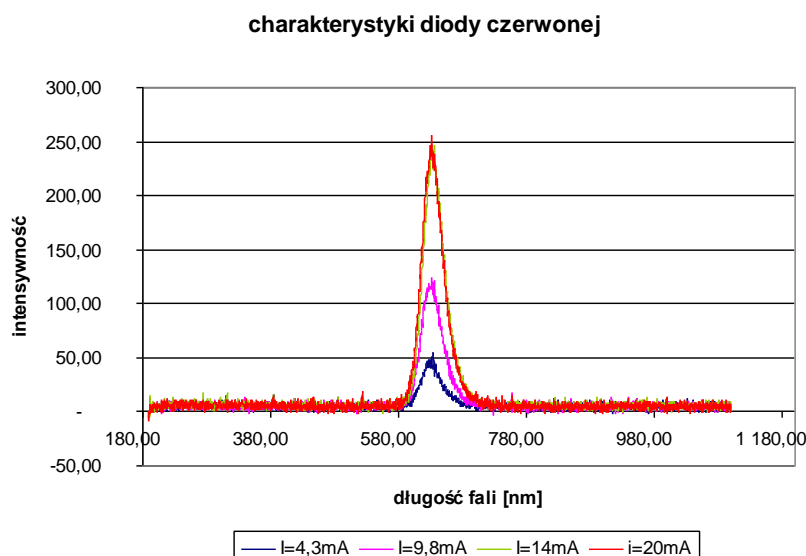
$$\lambda_0 \sim 0.8 \div 0.9 \mu\text{m} \quad \text{FWHM} = \delta_{\lambda} \sim 20 \div 40 \text{ nm}$$

III. Pomiar charakterystyk spektralnych dla źródeł LED i LD.

Wyznaczyć charakterystyki spektralne dla każdego badanego źródła (opis w punkcie II). W arkuszu Excela na jednym wykresie należy umieścić wszystkie charakterystyki widmowe, a następnie określić jakie barwy i w jakim procencie należy dobrać aby uzyskać widmo zbliżone do światła białego. Wynik takiego działania należy umieścić zarówno na wykresie jak i podsumować za pomocą tabeli.

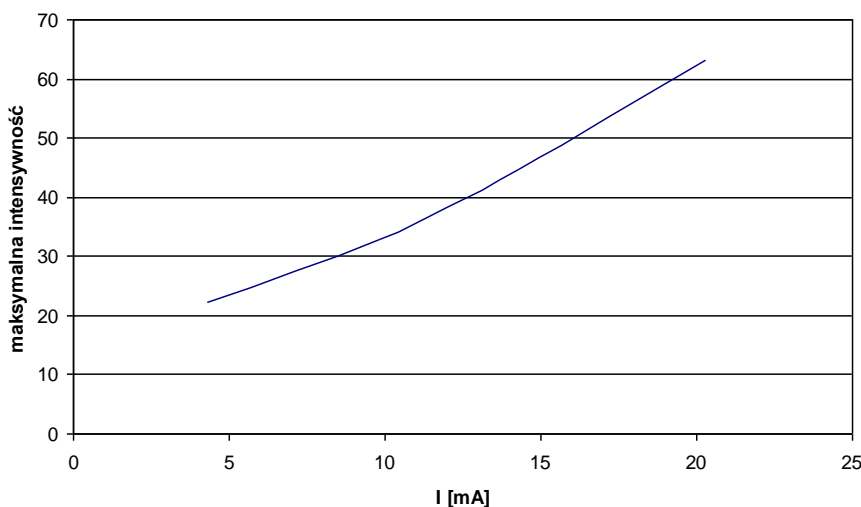
IV. Pomiar charakterystyk spektralnych dla źródeł LED i LD w funkcji prądu wysterowania.

Dla każdego rodzaju źródła wskazanego przez prowadzącego należy wykonać minimum sześć pomiarów, przy różnym prądzie zasilającym. Zakres prądu należy tak dobrać, aby było możliwe uzyskanie dużej różnicy w intensywności świecenia źródła. Ustawiając maksymalny prąd, otrzymujemy prąd znamionowy diody, który dzieląc na ilość pomiarów, daje nam wartości prądu, przy których należy wykonać pomiar (przykład dla czterech wartości prądu pokazano na Rys. 3.2). (np. dla $I_{\text{ndiody}}=12\text{mA}$, prądy będą miały przykładowo wartości 2, 4, 6, 8, 10, 12 [mA]).



Rys. 3.2 Przykładowa charakterystyka diody czerwonej w zależności od prądu.

Charakterystyki intensywności odzwierciedlające charakterystyczne punkty spektrum w funkcji prądu należy wykonać na jednym wykresie. Przykład charakterystyki wyznaczonej, dla której wartość maksymalnej intensywności przy danym prądzie ilustruje rysunek (Rys. 3.3),



Rys. 3.3 Przykładowa charakterystyka intensywności w funkcji prądu – dioda żółta.

V. Pomiar charakterystyk spektralnych dla źródeł RGB.

Pomiaru dokonujemy ustawiając dowolną charakterystykę widmową (nie odciętą) z wysterowaniem cyfrowym PWM. Należy tą charakterystykę opisać tak jak w poprzednich punktach instrukcji, zanotować poszczególne wartości ustawianych parametrów R, G, B. Zarchiwizować wykres napięć zarejestrowany dla poszczególnych wyprowadzeń diody z oscyloskopu. Po wykonaniu tych czynności nale-

ży uruchomić moduł zysterowaniem analogowym i ustawić identyczną proporcjonalnie charakterystykę widmową i powtórzyć eksport danych. W sprawozdaniu należy porównać obie charakterystyki i odnieść się do otrzymanych wyników uwzględniając również opis barw spotykanych są w komputerowych programach graficznych.

4) W sprawozdaniu uwzględnić:

A. Wyniki pomiarów, wykresy, charakterystyki porównawcze

B. Wnioski i komentarze do otrzymanych wyników

5) Pytania kontrolne

- Opisz budowę diod.
- W jaki sposób światło jest wytwarzane w diodach półprzewodnikowych.
- Gdzie znalazły obecnie zastosowanie diody elektroluminescencyjne – LED i diody laserowe – LD - przykłady.
- Opisać charakterystyczne właściwości diody elektroluminescencyjnej – LED i diody laserowej - LD.
- Wymienić i opisać sposób pomiarów charakterystyk widmowych.