



Politechnika Wrocławska

Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów



Miernictwo elementów fotonicznych

Laboratorium nr 5 i 6

Półprzewodnikowe źródła światła LED i LD

Opracował: Ryszard Korbutowicz

1. Cel zajęć

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z półprzewodnikowymi źródłami światła. W ramach ćwiczenia będą mierzone charakterystyki prądowo-napięciowe, zależność emitowanej mocy w funkcji prądu oraz charakterystyki widmowe diod LED o różnych długościach emitowanej fali. Na podstawie różnic w charakterystykach możliwe będzie porównanie tych struktur półprzewodnikowych oraz określenie wpływu prądu zasilającego na mierzone parametry.

2. Program zajęć

Zob. instrukcje wykonawcze do ćwiczeń 5. i 6.

3. Literatura uzupełniająca

B. Ziętek, „Optoelektronika” Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń, 2005,
J. I. Pankove, „Zjawiska optyczne w półprzewodnikach”, WNT, Warszawa, 1974,
B. Mroziwicz, M. Bugajski, W. Nakwaski, „Lasery półprzewodnikowe”, PWN, Warszawa 1985,

Wykład Miernictwo elementów fotonicznych

Karty katalogowe

Podczas zajęć należy przestrzegać przepisów BHP

4. Wprowadzenie teoretyczne i zagadnienia praktyczne

Zagadnienia do przygotowania

- Podstawowe klasyfikacje źródeł światła
- Budowa diod LED
- Budowa diod LD
- Porównanie diod LED oraz LD
- Parametry diod i zjawiska, które wpływają na ich wartości
- Charakterystyka prądowo-napięciowa $I(U)$ diod
- Charakterystyka mocy w funkcji prądu $P(I)$ diod
- Charakterystyka widmowa diod

4.1 Wiadomości wstępne

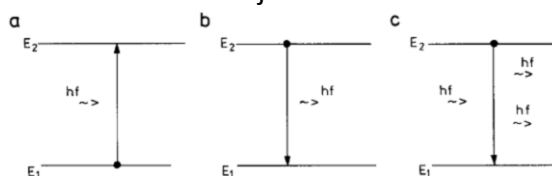
Przez termin źródło światła, rozumie się wszystkie obiekty zdolne do emitowania fali elektromagnetycznej w zakresie promieniowania widzialnego. Istnieje wiele klasyfikacji źródeł światła, np. wg parametrów fali elektromagnetycznej, wg zakresu spektralnego, wg mechanizmu generacji, czy według mocy, polaryzacji lub zastosowania.

W ćwiczeniu tym szczególna uwaga będzie poświęcona półprzewodnikowym źródłom światła, a więc źródłom emitującym wiązkę światła monochromatycznego. Badane będą elementy emitujące fale w zakresie widzialnym, odpowiadające barwom: czerwonej, zielonej oraz niebieskiej.

4.2 Podstawowe zjawiska

Rekombinacja promienista zachodzi, gdy elektron zajmujący wyższy stan energetyczny przechodzi na stan niższy oddając całą lub większość różnicy energii w postaci promieniowania elektromagnetycznego.

W diodzie LED generację spontanicznej mocy optycznej uzyskuje się przez polaryzację złącza w kierunku przewodzenia. Dochodzi wtedy do przejścia elektronów przez złącze pn z warstwy typu n do warstwy typu p, co zmniejsza szerokość obszaru zubożonego znajdującego się na granicy tych dwóch warstw. W efekcie dwa obszary o bardzo dużej koncentracji elektronów (n) i dziur (p) znajdują się dostatecznie blisko siebie, by zachodził masowy proces rekombinacji dziur i elektronów – luminescencja.



Rys. 1. Schematyczne oznaczenie przejść między poziomami energetycznymi odpowiadające: a) absorpcji, b) emisji, c) emisji wymuszonej

4.3 Charakterystyka prądowo napięciowa $I(U)$ diod LED

Diody elektroluminescencyjne pracują prawidłowo przy polaryzacji w kierunku przewodzenia. Do obszarów n i p wstrzykiwane są wtedy nośniki mniejszościowe nadmiarowe (dziury do warstwy n oraz elektrony do warstwy p), które dyfundują w głąb tych warstw i ulegają rekombinacji, w wyniku spotkań z nośnikami przeciwnego typu.

Prąd płynący przez złącze spolaryzowane w kierunku przewodzenia można, w przybliżeniu, określić za pomocą równania Shockley'a (rys. 2.):

$$I = I_s \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right),$$

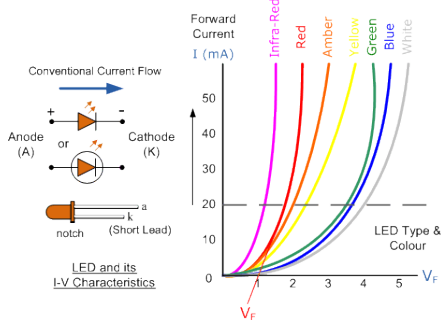
gdzie: U – napięcie polaryzujące złącze; q – ładunek elementarny, $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C; k – stała Boltzmanna ($k = 8,62 \cdot 10^{-5}$ eV/K); T – temperatura w stopniach Kelvina.

Długość wyemitowanej fali określona jest zależnością:

$$\lambda = \frac{hc}{W_g},$$

gdzie: W_g jest szerokością przerwy zabronionej; c jest prędkością światła; h jest stałą Plancka.

Można tę zależność przestawić też jako: $\lambda [\mu\text{m}] = 1,24/E_g [\text{eV}]$



Rys. 2. Przykładowe charakterystyki prądowo-napięciowe diod elektroluminescencyjnych wykonanych z różnych materiałów półprzewodnikowych

(http://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_8.html)

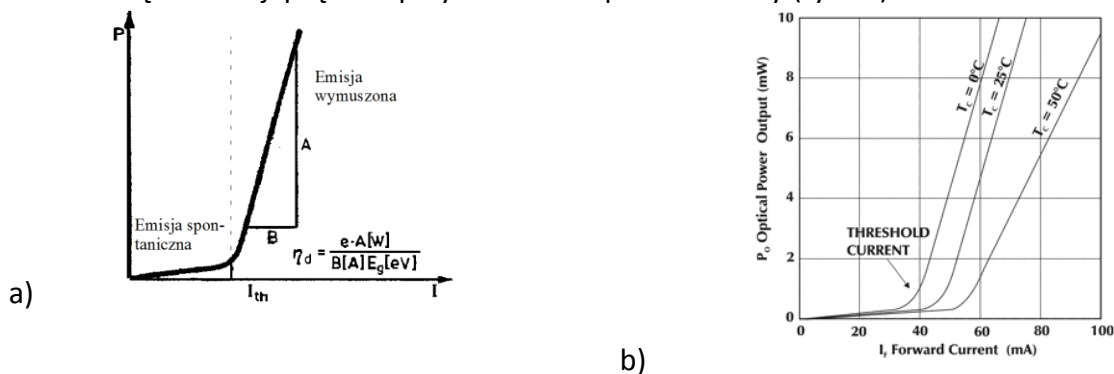
4.4 Charakterystyka mocy w funkcji natężenia prądu $P(I)$

Diody LED mają w całym zakresie swojej pracy charakterystykę, w przybliżeniu, liniową. Brak ośrodka rezonującego, na którym mogłyby występować straty emitowanego światła powodują, że nie istnieje progowa wartość prądu, przy której zachodzi generacja światła.

Moc optyczna diody LED – zgodnie z zależnością

$$P_{LED} = \eta_e \frac{h\nu}{q} I,$$

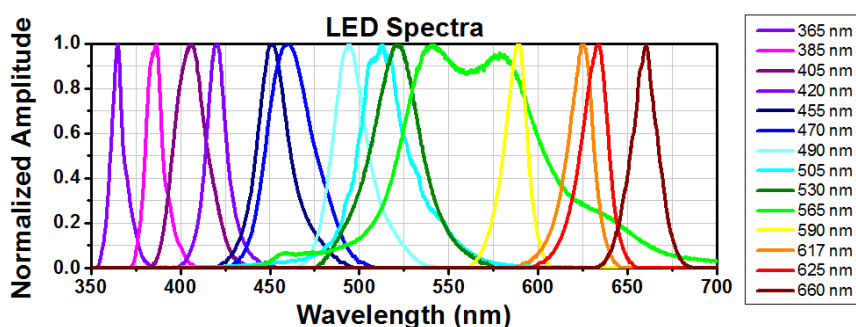
zmienia się w funkcji prądu w przybliżeniu w sposób liniowy (rys. 3.).



Rys. 3. Charakterystyka optyczna $P = f(I)$ półprzewodnikowego emitera światła: a) przykładowa charakterystyka z pokazaną przyrostową wydajnością kwantową, b) wpływ temperatury na przebieg charakterystyki; b: [http://www.fiber-optics.info/articles/laser_diodes]

4.5 Charakterystyka widmowa

Emisja spontaniczna diod LED jest zwykle szeroka spektralnie, typowo 20-30 nm. Maksimum charakterystyki związane jest z najbardziej prawdopodobnym przejściem elektronów i jest silnie zależne od szerokości przerwy zabronionej. Istotny jest, również, wpływ temperatury – powodujący przesunięcie charakterystyki widmowej diody w stronę fal dłuższych. Na rysunku 4. pokazano charakterystyki widmowe różnych diod elektroluminescencyjnych – wykonanych z różnych materiałów.

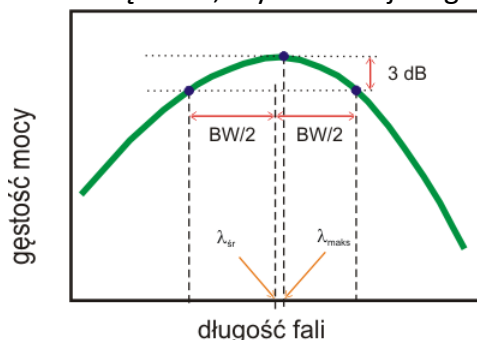


Rys. 4. Przykładowe charakterystyki widmowe diod elektroluminescencyjnych
[<http://www.reefcentral.com/forums/showthread.php?p=23946822>]

Moc optyczna emitowana przez diody LED ma dosyć szerokie widmo. Określa się więc dwa użyteczne parametry dla dwu różnych punktów gęstości mocy optycznej:

- środek pasma FWHM — punkt centralny λ_{centr} ,
- punkt mocy maksymalnej — λ_{maks} .

Te dwa punkty mogą mieć różne położenia na krzywej (asymetria widma). Jest jeszcze długość fali $\lambda_{\text{śr}}$ wyznaczana dla środka ciężkości, czyli średniej długości fali pasma optycznego.



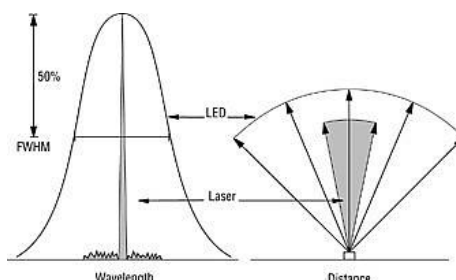
Rys. 5. Schematyczne pokazanie punktu mocy maksymalnej λ_{maks} oraz średniej długości fali $\lambda_{\text{śr}}$ oraz szerokości pasma optycznego, BW — szerokość pasma optycznego

Dla zastosowań praktycznych długość fali λ_{maks} dla maksymalnej mocy ma niewielkie znaczenie — ponieważ dwie diody LED mogą mieć tę samą długość fali λ_{maks} , ale dawać wrażenie innej barwy. Problemem może być wyznaczenie wpływu natężenia prądu zasilającego I na długość emitowanej fali λ_{maks} oraz pasmo optyczne (i związaną z nim λ_{centr}) oraz szerokość półwłokową FWHM.

Jeżeli dioda nie jest stabilizowana temperaturowo (np. przy użyciu elementu Peltiera, to przy dłuższej pracy temperatura złącza rośnie. Czasem stosuje się stałoprądowe zasilanie impulsowe — impulsy o czasie trwania na poziomie kilkudziesięciu milisekund.

4.6 Charakterystyka kierunkowa

Zależność intensywności (mocy optycznej) od kąta zawartego w stożku emisyjnym jest funkcją rodzaju diody: LED czy LD, a także jest funkcją budowy diody: krawędziowa czy powierzchniowa (rys. 6.).



Rys. 6. Przykład rozkładu przestrzennego promieniowania emitowanego przez diody LED i LD [https://www.kingfisherfiber.com/application-notes/optical-loss-testing-overview/]

Prawo Lamberta określa rozkład w przestrzeni emitowanego promieniowania:

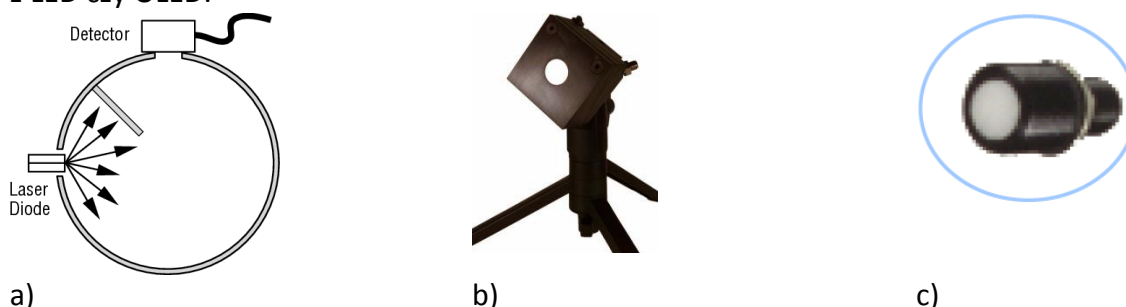
$$E = I \cos \phi / R^2$$

Tak więc, żeby zmierzyć całość emitowanego promieniowania (sumarycznie) należy użyć albo kuli całkującej albo receptora kosinusowego (rys. 7.). Kula całkująca, zwana także kulą Ulbrichta, który wykorzystał efekt wielokrotnego odbicia światła od pokrytego specjalną warstwą wnętrza kuli, dzięki któremu możliwe jest określenie całości energii wyemitowanej przez dane źródło, niezależnie od jego budowy i przestrzennego rozkładu emisji.

Pośrednie natężenie oświetlenia E jest we wszystkich miejscach ściany wewnętrznej kuli stałe i proporcjonalne do całkowitego strumienia Φ źródła. Metoda ta pozwala uzyskiwać bardzo miarodajne wyniki dla skrajnie różnych źródeł światła bez względu na ich konstrukcję, kąt świecenia czy zastosowany typ źródła. Kule całkujące są z powodzeniem wykorzystywane do pomiaru różnych źródeł światła:

- * żarowych,
- * jarzeniowych,
- * elektroluminescencyjnych (LED, LD).

Bardzo dobrze sprawdzają się również przy pomiarach oraz ocenie paneli składających się z LED czy OLED.



Rys. 7. a) zasada działania kuli całkującej, b) widok kuli całkującej, c) widok detektora kosinusowego [materiały firmowe, https://www.stellarnet.us/]

Receptor kosinusowy zbiera światło z pola widzenia 180° i przekazuje je do światłowodu. Są one potrzebne, aby zmierzyć profesjonalnie promieniowanie z dużym lub nieznanym rozkładem

dem kątowym. Mają postać demontowalnego polimerowego dyfuzora nakładanego na detektor lub końcówkę światłowodu.