

ŹRÓDŁA ŚWIATŁA

1. Podział źródeł światła

Elementarne połączenie transmisyjne:

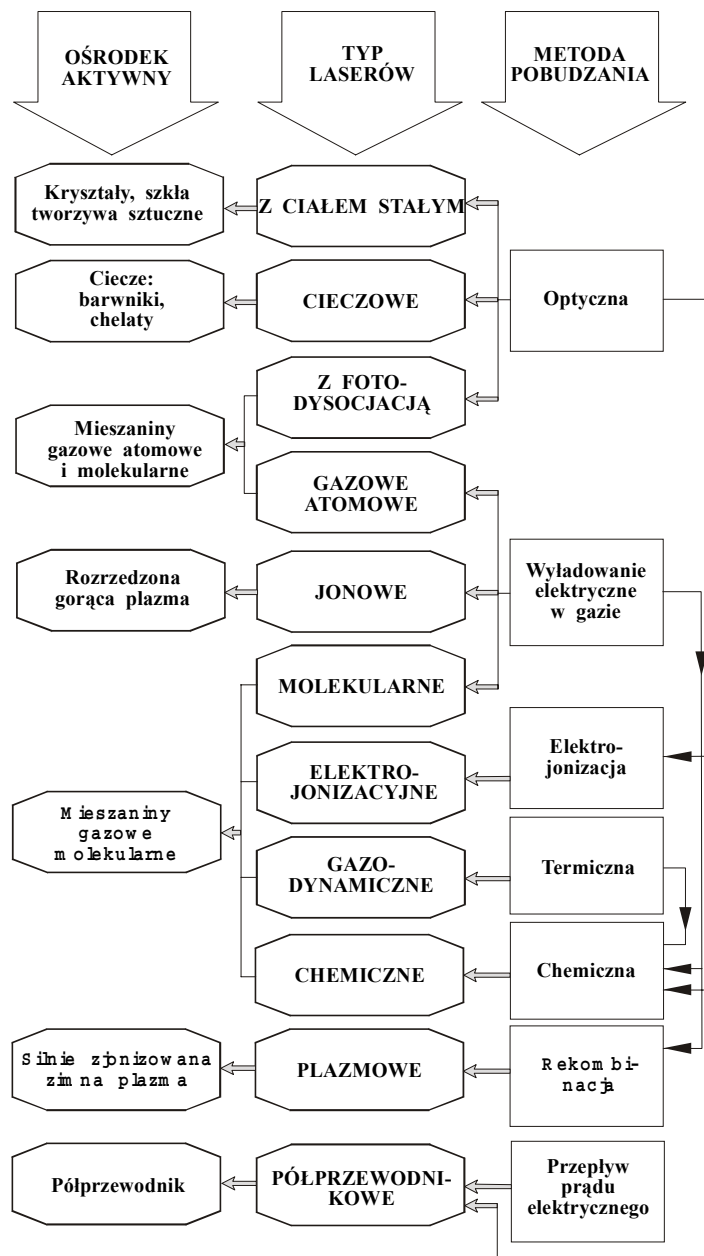
nadajnik (źródło światła) – **tor transmisyjny** (światłowód) – **odbiornik**

Podział źródeł światła: **szerokopasmowe** i **o widmie liniowym**

Szerokopasmowe: Słońce i rozgrzane metale $10^{11} - 10^{15}$ Hz (3 mm – 300 nm)

O widmie liniowym – o wielu liniach (lampy wyładowcze),

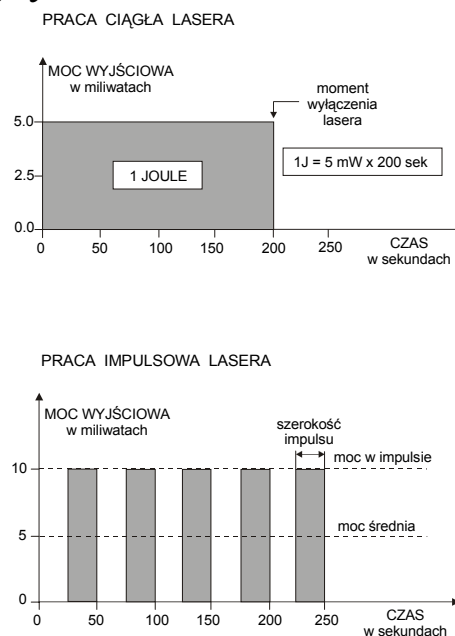
- **z pojedynczą linią** (lampy elektroluminescencyjne i lasery)



Lasery dzielą się ze względu na **materiał aktywny** i **sposób pobudzania**. Stan skupienia ośrodków wzmacniających jest najbardziej ogólnym i najczęściej stosowanym kryterium podziału laserów. Materiał aktywny pozwala wyróżnić lasery: gazowe, cieczowe, na ciele stałym i półprzewodnikowe.

Sposób zasilania i generacji dzieli lasery na ciągłego działania i impulsowe. Z wiązką ciągłą lasera mamy do czynienia wtedy, gdy moc lasera, mierzona w watach, pozostaje stała przez cały okres jego działania. Rys. 3 ilustruje te dwa sposoby zasilania i jednocześnie pracy lasera. Z rysunku tego wynika również definicja dawki energetycznej promieniowania, która jest iloczynem mocy ciągłej i czasu działania lasera. W przypadku lasera impulsowego, aby określić jego dawkę energetyczną trzeba znać trzy parametry: moc w impulsie, szerokość impulsu, liczbę pojedynczych impulsów emitowanych w ciągu 1 sekundy. Mnożąc te trzy parametry przez siebie otrzymujemy tzw. średnią moc promieniowania.

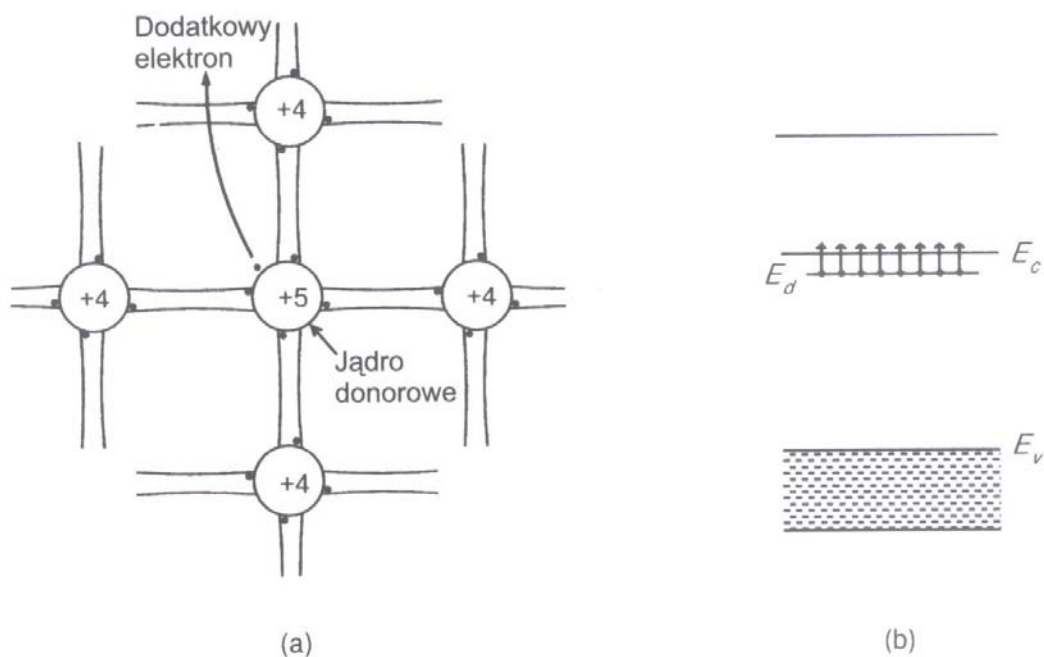
Z punktu widzenia wartości **mocy promieniowania** lasery dzielimy na: małej mocy (od 4 do 5mW), średniej mocy (od 6 do 500mW), dużej mocy $> 500\text{mW}$. Lasery małej i średniej mocy zaliczane są do laserów biostymulacyjnych.



Rys. 3 Schematyczne przedstawienie dwóch podstawowych sposobów zasilania i pracy lasera; a) praca ciągła, b) praca impulsowa.

2. Materiały półprzewodnikowe:

Półprzewodnik typu n – powstaje w wyniku zamiany niektórych atomów krzemu lub germanu atomami pierwiastków grupy V jak fosfor (P.) lub arsen (As). Atomy tej grupy mają 5 elektronów na powłoce zewnętrznej (4 niezbędne do tworzenia wiązania kowalencyjnego) – piąty elektron może być łatwo uwolniony (domieszki donorowe).



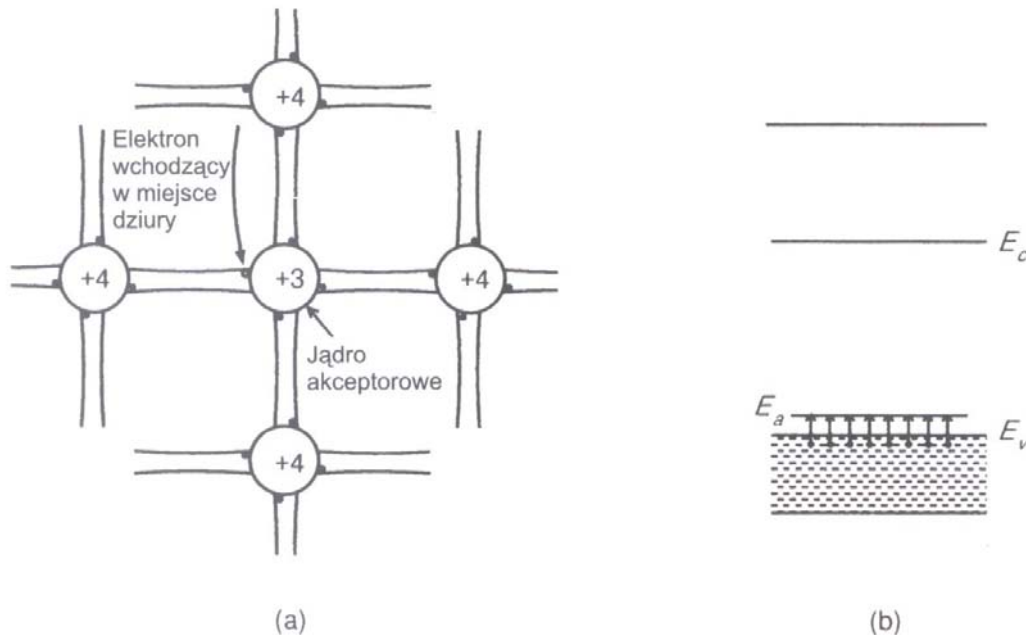
Półprzewodnik typu n
a — schematyczne przedstawienie jego struktury, b — wykres poziomów energetycznych

Rys. 4. Półprzewodnik typu n

Półprzewodnik typu p – niektóre atomy krzemu lub germanu są zastąpione atomami pierwiastków grupy III (bor (B), aluminium (Al) lub gal (Ga)). Atomy te mają trzy elektrony na powłoce zewnętrznej, więc jedno z wiązań z sąsiadami jest niekompletne (dziura, mogąca przesuwać się z miejsca na miejsce). Domieszki akceptorowe.

Dioda złączowa pn – powstaje przez wytworzenie złącza między półprzewodnikami typu p i n. Gdy oba typy półprzewodników połączymy to wolne elektrony w typie n przyciągane są przez dziury

w typie p – zapelniają dziury (rekombinacja). Powstaje po obu stronach łącza obszar pozbawiony poruszających się nośników – obszar zubożony W (1 μm). Na tym obszarze powstaje różnica potencjałów U_o (bariera potencjału, kilka dziesiątych wolta).



Półprzewodnik typu p

a — schematyczne przedstawienie jego struktury, b — wykres poziomów energetycznych

Rys. 5. Półprzewodnik typu p

$$U_o = \left(\frac{k_B T}{q}\right) \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right)$$

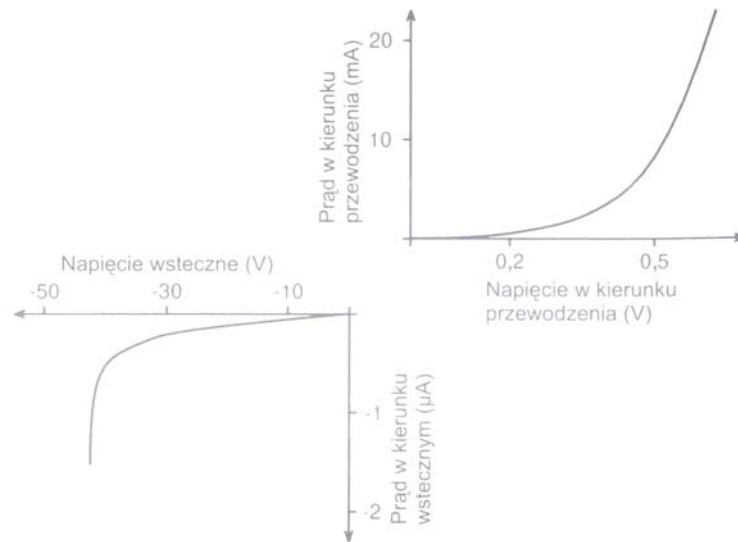
$$W = \left[\frac{2\epsilon\epsilon_o U_o}{q} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)\right]^{1/2}$$

W celu spolaryzowania diody w **kierunku wstecznym** doprowadza się do niej napięcie w taki sposób, aby złącze od strony obszaru p stało się ujemne w stosunku do obszaru n. Powoduje to dalsze rozszerzenie obszaru zubożonego i wzrost bariery potencjału.

W celu spolaryzowania diody w **kierunku przewodzenia** doprowadza się do niej napięcie w taki sposób, aby złącze od strony obszaru p. stało się dodatnie w stosunku do obszaru n. Powoduje to zmniejszenie różnicy potencjałów. Nośniki większościowe mogą łatwiej przejść przez złącze i ulegać rekombinacji. Obszar zubożony zmniejsza się do zera i powstaje obszar aktywny. Jego szerokość zależy od tego jak daleko wnikają nośniki zanim ulegną

rekombinacji (poziom domieszkiowania, temperatura). Prąd w kierunku przewodzenia – prąd wstrzykiwania

$$I = I_o[\exp(\frac{qU}{k_B T}) - 1]$$



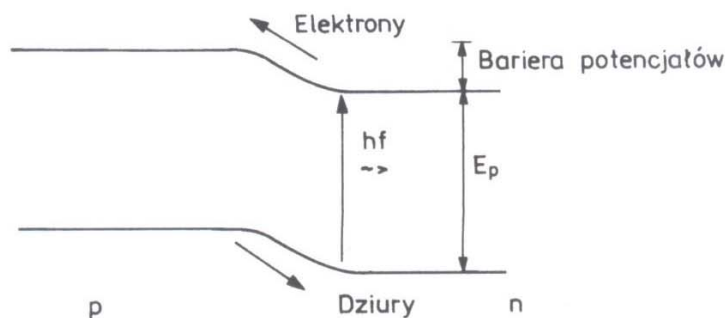
Charakterystyka zmian prądu diody w funkcji przyłożonego napięcia

Rys. 6. Polaryzacja diody p-n

3. Dioda elektroluminescencyjna (LED)

Ograniczenia – długi czas odpowiedzi (szybkość maksymalna modulacji 1 MHz) I dość duża szerokość widmowa linii widmowej emitowanego światła (30-40 nm). Zalety – liniowa zależność mocy światła od prądu.

Jest spolaryzowanym na przewodzenie złączeniem pn wykonanym z półprzewodnika, który z dobrą wydajnością emituje światło, gdy elektron i dziura rekombinują w złączu (wybór półprzewodnika – λ).



Spontaniczna emisja fotonów w złączu p-n spolaryzowanym w kierunku przewodzenia

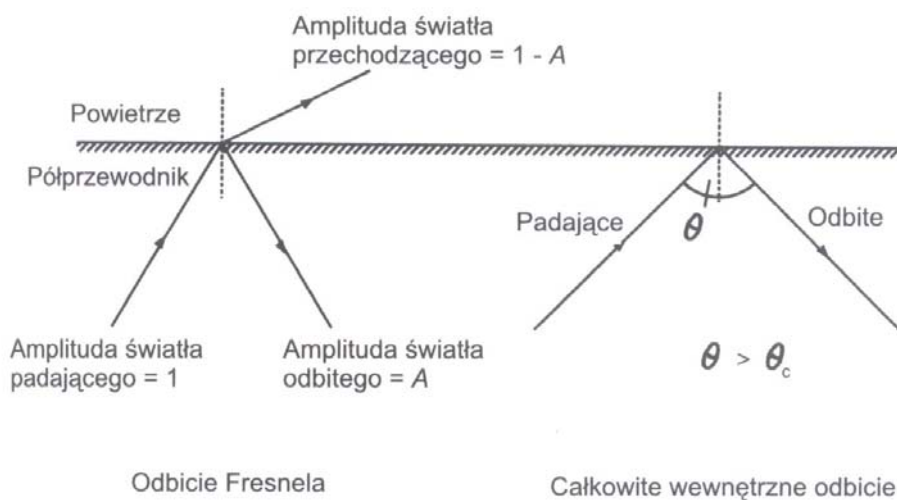
Rekombinacja nośników może być promienista lub bezpromienista (zamiana energii w ciepło):

Materiał	$\lambda[\mu\text{m}]$
AlGaInP	0.65-0.68
Ga _{0.5} In _{0.5} P	0.67
Ga _{1-x} Al _x As	0.62-0.9
AlGaAs	0.8
GaAs	0.9
In _{0.2} Ga _{0.8} As	0.98
InGaAs	1.05
In _{1-x} Ga _x As _y P _{1-y}	1.10-1.65
In _{0.73} Ga _{0.27} As _{0.58} P _{0.42}	1.31
In _{0.58} Ga _{0.42} As _{0.9} P _{0.1}	1.55

$$\lambda = \frac{1.24}{E_g[\text{eV}]}[\mu\text{m}]$$

Trudności z wyprowadzeniem z diody światła już utworzonego – zewnętrzna wydajność diody elektroluminescencyjnej (wewnętrzna ~100%):

- powtórna absorpcja emitowanych fotonów (generacja nowej pary elektron-dziura),
- odbicie od granicy między półprzewodnikiem i powietrzem.



Straty na granicy półprzewodnik/szkoło spowodowane odbiciem Fresnela i całkowitym wewnętrznym odbiciem

A — amplitudowy współczynnik odbicia, przy czym R jest proporcjonalny do A² (przyp. tłum.)

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2$$

Policz R dla $n_1=3.6$ (~ 0.32)

$$\Theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}, \text{ kąt graniczny}$$

Jeśli rozważyć oba mechanizmy straty światła łącznie:

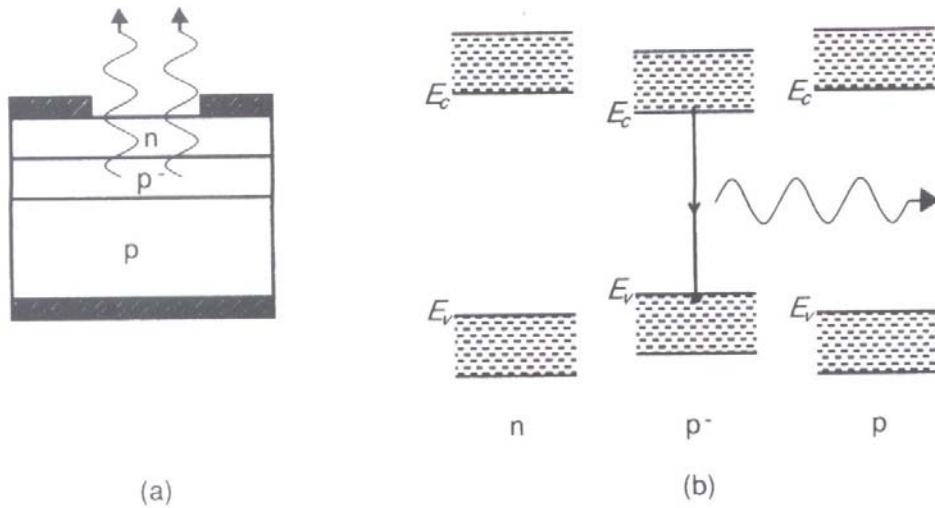
$$F \approx \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2\right]$$

F - proporcjonalne do ułamka światła nie absorbowanego – im większa różnica współczynników załamania, tym większa część światła jest tracona.

Diody elektroluminescencyjne:

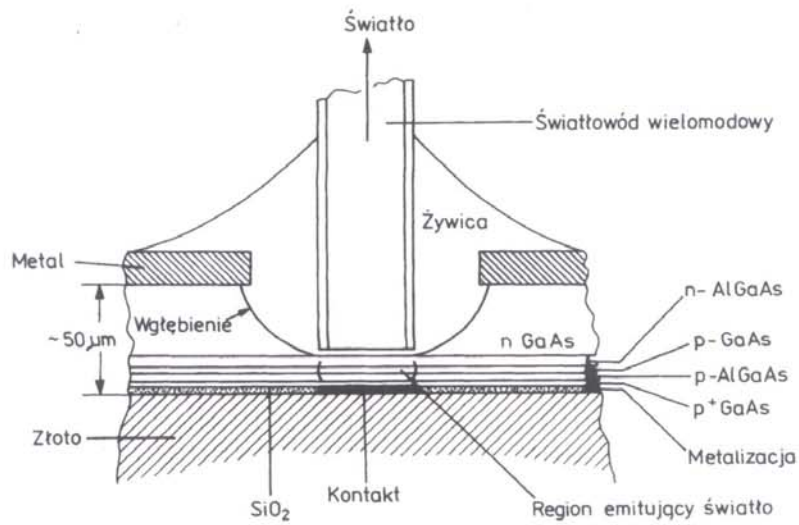
Powierzchniowa (Burrusa), krawędziowa i superluminescencyjna.

Warstwa emitująca diody powinna być cienka, aby ograniczyć ponowną absorpcję światła. Problem stanu powierzchni zakłócającego proces rekombinacji rozwiązano stosując strukturę heterozłączową, w której słabo domieszkowany obszar p^- jest umieszczony między dwoma obszarami p i n normalnie domieszkowanymi.

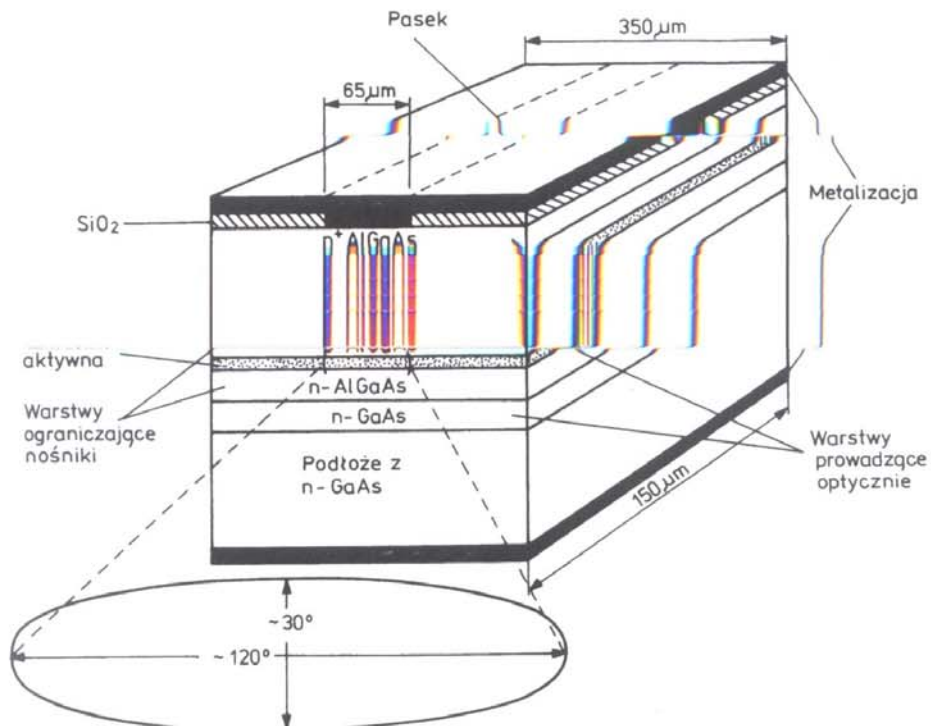


Heterozłączowa dioda elektroluminescencyjna
a — struktura, b — poziomy energetyczne

Obszar p^- - obszar aktywny diody



Struktura powierzchniowej diody elektroluminescencyjnej (typu Burrusa). Na podstawie [8]

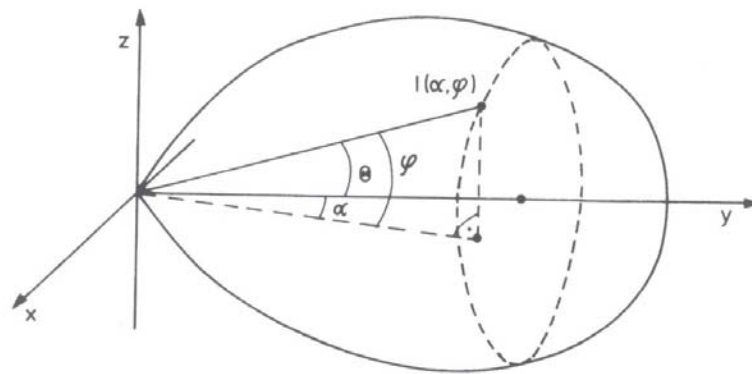


Struktura krawędziowej diody elektroluminescencyjnej o geometrii paskowej. Na podstawie [1]

A. Powierzchniowa dioda elektroluminescencyjna

Wgłębienie w GaAs dla zmniejszenia silnej absorpcji emitowanego promieniowania i maksymalnego zbliżenia światłowodu do struktury emitującej światło. Mała impedancja termiczna w rejonie aktywnym (większe natężenie prądu, duża luminancja). Zewnętrzny rozkład promieniowania – rozkład Lamberta:

$$I(\alpha, \Phi) = I(\Theta) = \begin{cases} I_{\max} \cos k\Theta & k\Theta \leq \pi/2 \\ 0 & -\pi/2 > k\Theta > \pi/2 \end{cases}$$



Przestrzenna charakterystyka promieniowania diody

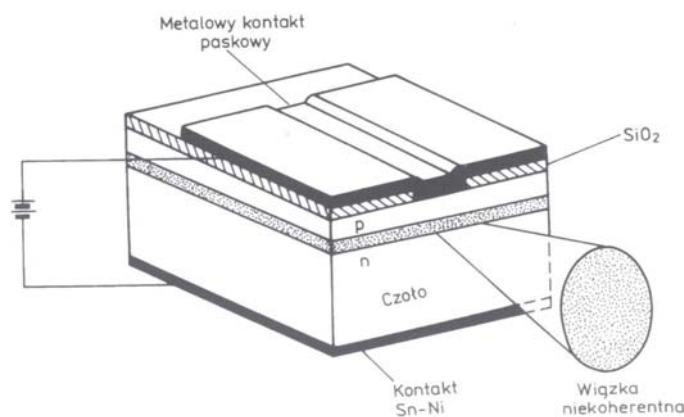
Struktura Burrusa niezbyt dobrze ogranicza obszar, w którym płynie prąd – niekorzystne zmniejszenie gęstości prądu i powiększenie obszaru, z którego emitowane jest światło.

B. Krawędziowa dioda elektroluminescencyjna

Światło wyemitowane w cienkiej (50-100 μm) warstwie aktywnej prowadzone jest jak w światłowodzie – mniejsza rozbieżność wiązki w płaszczyźnie prostopadłej do złącza (30°), w płaszczyźnie równoległej – 120°. Większość światła wypromieniowana z pokrytego warstwą AR końca struktury paskowej (przeciwny koniec pokryty warstwą odbłaskową). Efektywna luminancja >> diód powierzchniowych. Większe pasmo modulacji (kilkaset MHz). Diody te pozwalają wprowadzić do światłowodu wielomodowego moce rzędu kilkaset μW (do jednomodowego – kilkadziesiąt).

C. Diody superluminescencyjne

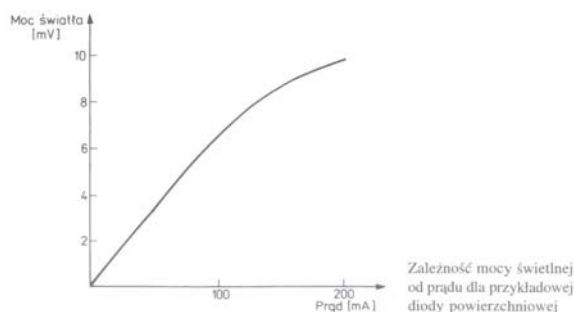
Podobna do lasera półprzewodnikowego – jeden z jej końców ma duże straty optyczne zapobiegające odbiciom i w konsekwencji akcji laserowej. Światło zostaje jednak wzmocnione – osiągane moce świetlne są większe. Światło wychodzące z takiej diody skupiane jest w małym kącie. W skutek emisji wymuszonej zmniejsza się szerokość linii widmowej. Większe pasmo modulacji. Dioda ta zapewnia wprowadzenie do światłowodu jednomodowego mocy świetlnej rzędu 1 mW przy prądzie 150 mA i paśmie modulacji 350 MHz.



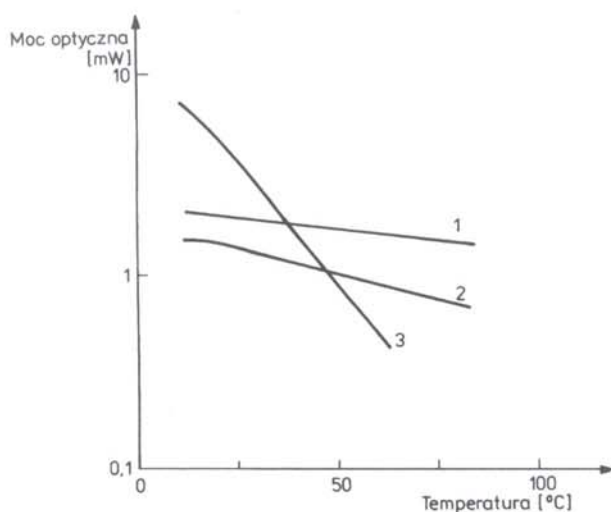
Struktura diody superluminescencyjnej. Na podstawie [9]

4. Parametry diód elektroluminescencyjnych

A). Idealny przypadek – zależność mocy świetlnej od prądu płynącego przez diodę – linia prosta. Nieliniowość (wzrost temperatury złącza przy dużych prądach). Najmniej czuła na zmiany temperatury jest dioda powierzchniowa, najbardziej superluminescencyjna.

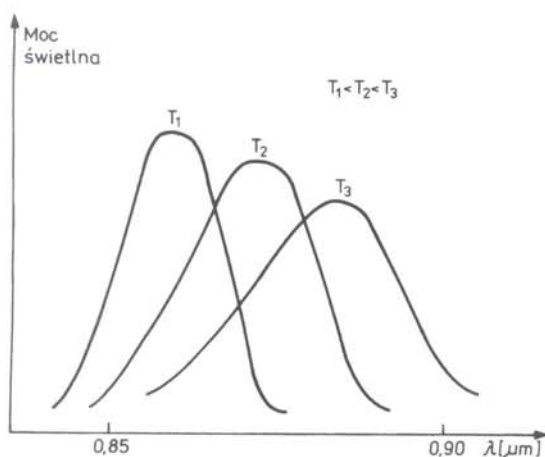


B). Szerokość linii widmowej. Ze wzrostem temperatury widmo ulega rozszerzeniu, a jego maksimum przesuwają się w stronę fal dłuższych (zmiany w rozkładach energii nośników)



Przykładowa zależność mocy wyjściowej od temperatury złącza dla trzech typów diod elektroluminescencyjnych: 1 – powierzchniowa, 2 – krawędziowa, 3 – superluminescencyjna. Na podstawie [10]

Szerokość linii widmowej diod pracujących w temperaturze pokojowej w oknie $0,85 \mu\text{m}$ zawiera się zazwyczaj w granicach $25\text{--}40 \text{ nm}$. Chodzi tutaj o pełną szerokość linii widmowej mierzoną w połowie wartości maksymalnej (tzw. FWHM – ang. *full width at half maximum*). Dla materiałów z mniejszą wartością przerwy energetycznej pracujących w oknach $1,31$ i $1,55 \mu\text{m}$ ta szerokość zwiększa się do $50\text{--}160 \text{ nm}$. Przykład widma diody powierzchniowej z AlGaAs pokazano na rys. dla kilku temperatur [1]. Jak widać wraz ze wzrostem temperatury widmo ulega rozszerzeniu, a jego maksimum przesunęło się w stronę fal dłuższych. Jest to spowodowane zmianami w rozkładach energii nośników. Na szerokość linii widmowej mają ponadto wpływ poziom domieszkowania warstwy aktywnej i technologia wykonania samej diody.



Przykładowe widmo diody powierzchniowej z AlGaAs pracującej w oknie 850 nm dla 3 różnych temperatur

C). Szybkość modulacji diody elektroluminescencyjnej – zależy od dynamiki nośników i ograniczona jest przez średni czas życia nośnika mniejszościowego w rejonie rekombinacji: τ_c

Równanie wiążące koncentrację nośników N z prądem wstrzykiwania I :

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N}{\tau_c}; V - \text{objętość warstwy aktywnej}; q - \text{ładunek elektronu};$$

$$I(t) = I_o + I_m \exp(j2\pi f_m t) \text{ sinusoidalna modulacja prądu wstrzykiwania}$$

$$I_o - \text{prąd polaryzacji}, I_m - \text{prąd modulujący}, f_m - \text{częstotliwość modulacji}$$

$$N(t) = N_o + N_m \exp(j2\pi f_m t); N_o = \frac{\tau_c I_o}{qV}; N_m(f_m) = \frac{\tau_c I_o / qV}{1 + j2\pi f_m \tau_c}$$

P_m – moc modulowanego częstotliwością f_m światła jest związana liniowo z N_m . Funkcja przenoszenia $H(f_m)$ diody LED:

$$H(f_m) = \frac{N(f_m)}{N(0)} = \frac{1}{1 + j2\pi f_m \tau_c}$$

$$\frac{P_m(f_m)}{P_m(0)} = |H(f_m)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f_m \tau_c)^2}}$$

Pasmo optyczne diody f_{3dB} (3 decybelowe) – częstotliwość modulacji, przy której $|H(f_m)|$ jest zredukowane o połowę w stosunku do wartości $|H(0)|$:

$$f_{3dB} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi\tau_c}$$

Pasmo elektryczne – częstotliwość, przy której $|H(f_m)|^2$ maleje o 3dB.

$$f_{el} = \frac{1}{2\pi\tau_c}$$

Różnica pomiędzy pasmem elektrycznym, a optycznym wynika stąd, że proces detekcji światła jest procesem nieliniowym.

D). Charakterystyka kierunkowa promieniowania :

$$I(\alpha, \Phi) = \frac{dP}{d\Omega}$$

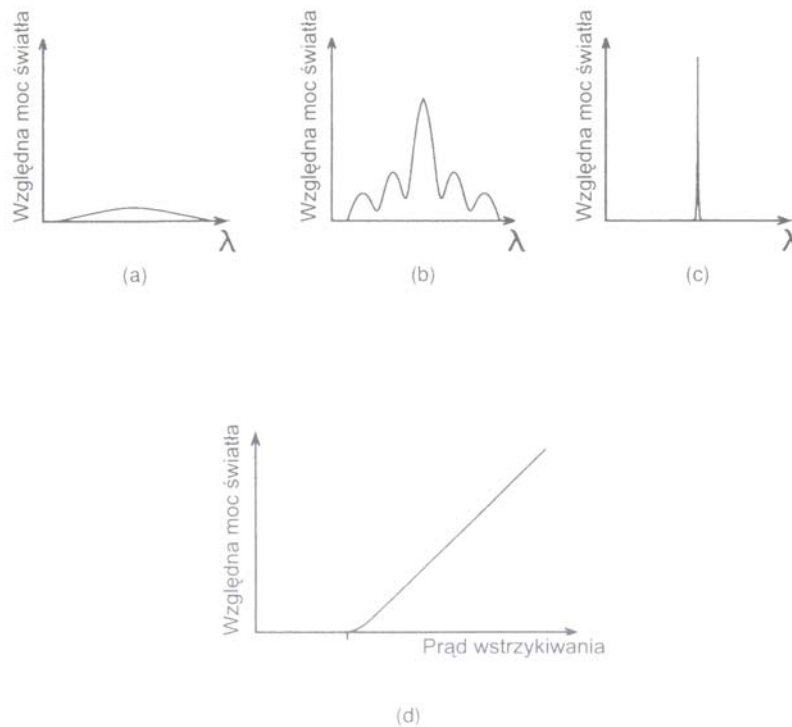
DP – moc wypromieniowywana przez diodę w małym kącie bryłowym $d\Omega$, którego położenie w przestrzeni określają kąty α i Φ .

Diody promieniujące powierzchniowo mają charakterystyki promieniowania symetryczne względem osi głównej (Lamberta).

Znajomość rozkładu natężenia promieniowania umożliwia wyznaczenie mocy, jaką za pomocą danej diody można wprowadzić do światłowodu.

5. Diody laserowe

A. Działanie diody



Zależność względnej mocy światła uzyskiwanego z diody laserowej w funkcji długości fali:
a — przy małym prądzie wstrzykiwanym, *b* — przy prądzie równym progowemu, *c* — przy prądzie większym od progowego oraz *d* — zależność względnej mocy światła od wstrzykiwanego prądu

Różnica między światłem laserowym, a zwykłym – laserowe wytwarzane w wyniku emisji wymuszonej wymagającej inwersji obsadzeń poziomów energetycznych w materiale. W półprzewodnikach inwersja oznacza jednoczesną dużą koncentrację i elektronów i dziur w obszarze aktywnym.

Modyfikuje się półprzewodnik – półprzewodnik zdegenerowany (poziom domieszkowania 10^{23} at./cm³).

Koncentracja nośników zależy od prądu wstrzykiwania, a więc od wartości napięcia polaryzującego. Przy wzroście wstrzykiwanego prądu następuje inwersja obsadzeń i emisja wymuszona zaczyna dominować nad spontaniczną – graniczny prąd I_T . Przy dalszym wzroście prądu dioda zaczyna emitować światło o jednej długości fali z typową szerokością linii widmowej 3-5 nm.

B. Budowa diody

Podobna do krawędziowej diody elektroluminescencyjnej – półprzewodnik zdegenerowany. Optyczna wnęka rezonansowa utworzona przez polerowanie dwóch końców diody, aby działały jak zwierciadła. W powiązaniu z zamknięciem światła w obszarze aktywnym przez całkowite wewnętrzne odbicie utrzymuje to gęstość promieniowania wystarczająco dużą do uzyskania akcji laserowej.

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2nL}$$

Dla typowych długości wnęki rezonansowej laserów półprzewodnikowych (kilka dziesiątych mm) odstęp między modami podłużnymi jest rzędu 0,1 nm.

