

# ŹRÓDŁA ŚWIATŁA

## 1. Podział źródeł światła

Elementarne połączenie transmisyjne:

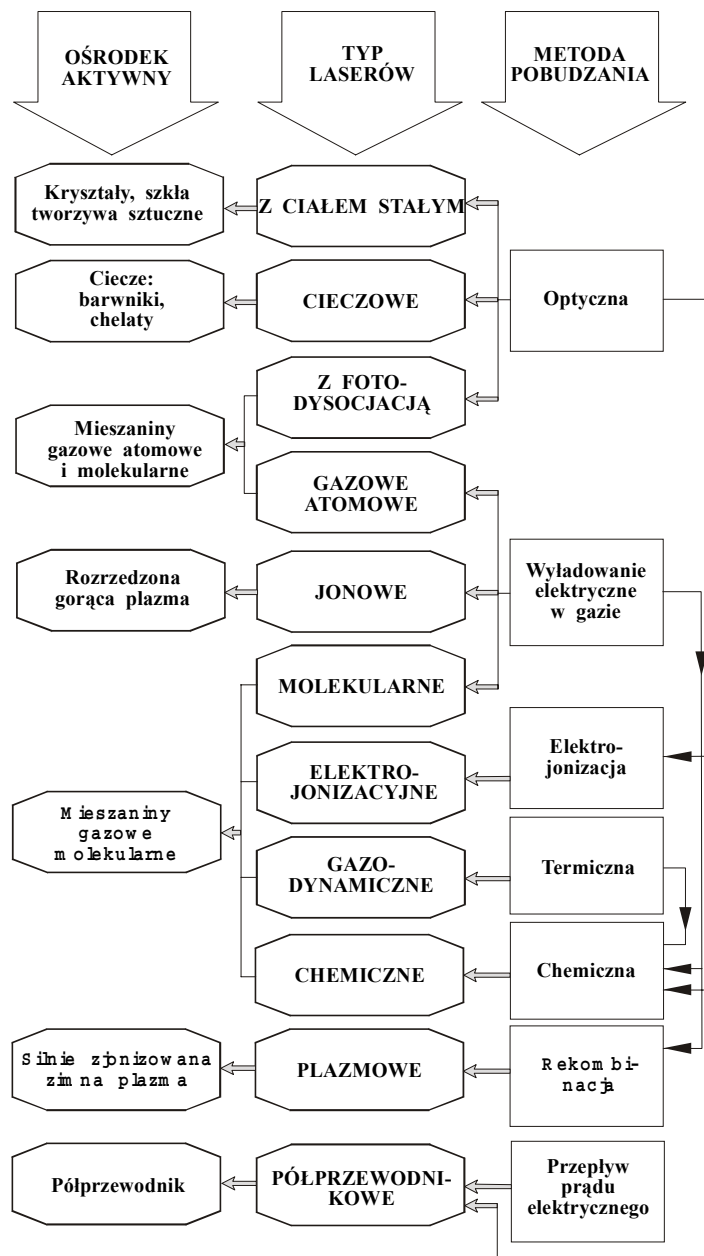
**nadajnik** (źródło światła) – **tor transmisyjny** (światłowód) – **odbiornik**

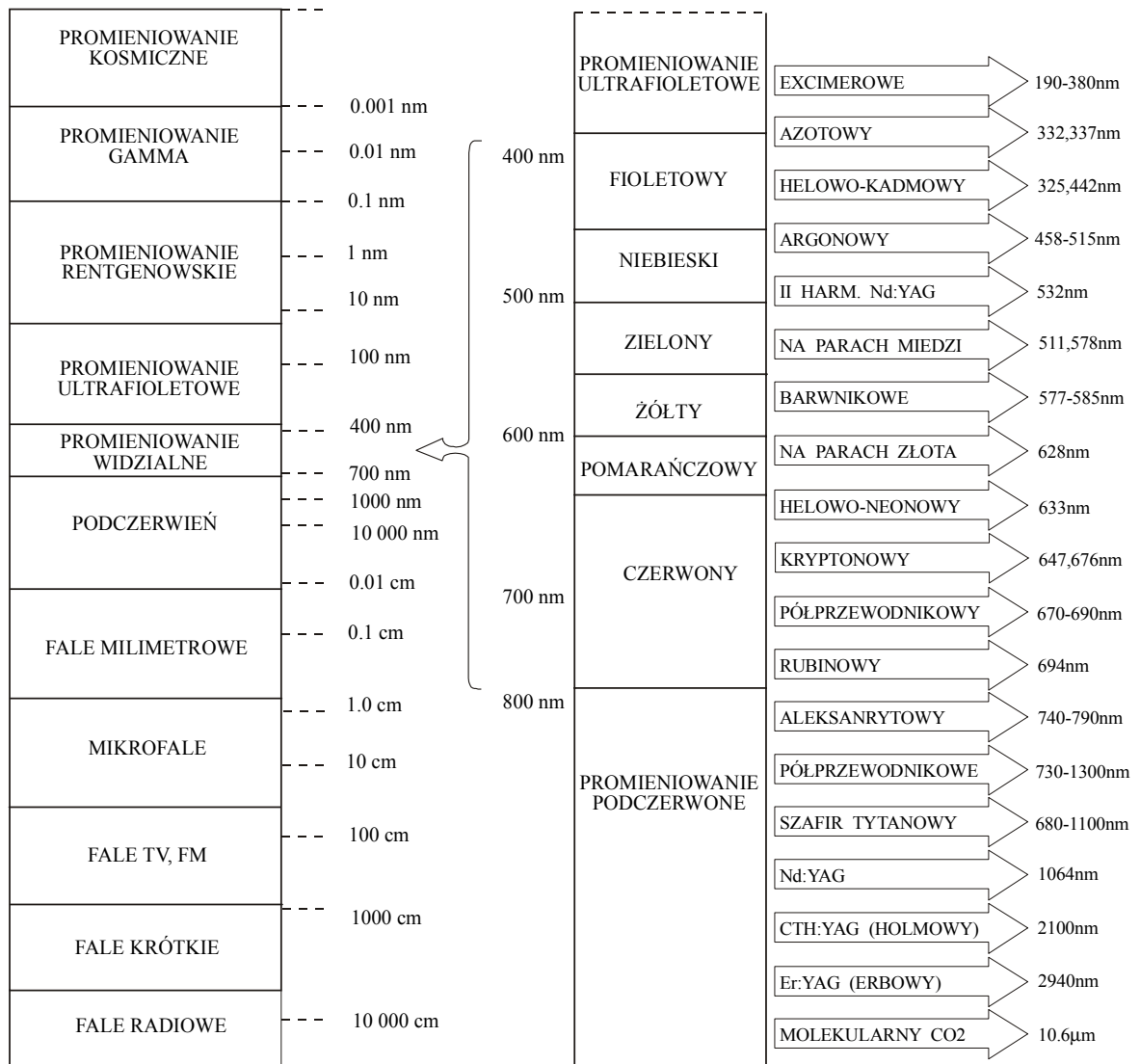
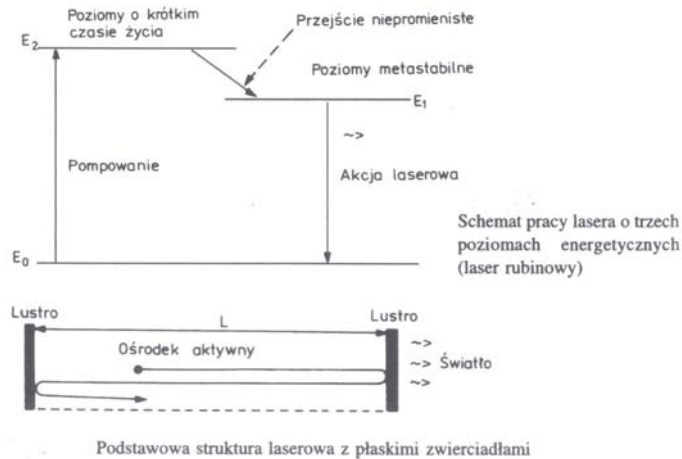
Podział źródeł światła: **szerokopasmowe** i **o widmie liniowym**

**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)





WIDMO FAŁ ELEKTROMAGNETYCZNYCH

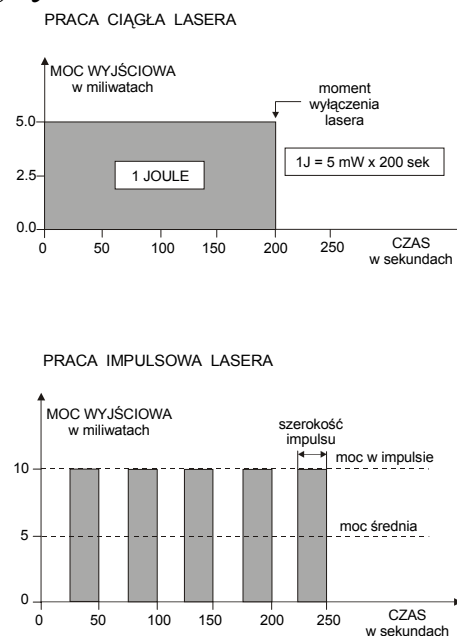
OBZAR SPEKTRALNY W KTÓRYM GENERUJĄ LASERY

**Rys. 2.** Widmo elektromagnetyczne z zaznaczeniem długości fal emitowanych przez typowe lasery stosowane w medycynie.

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.

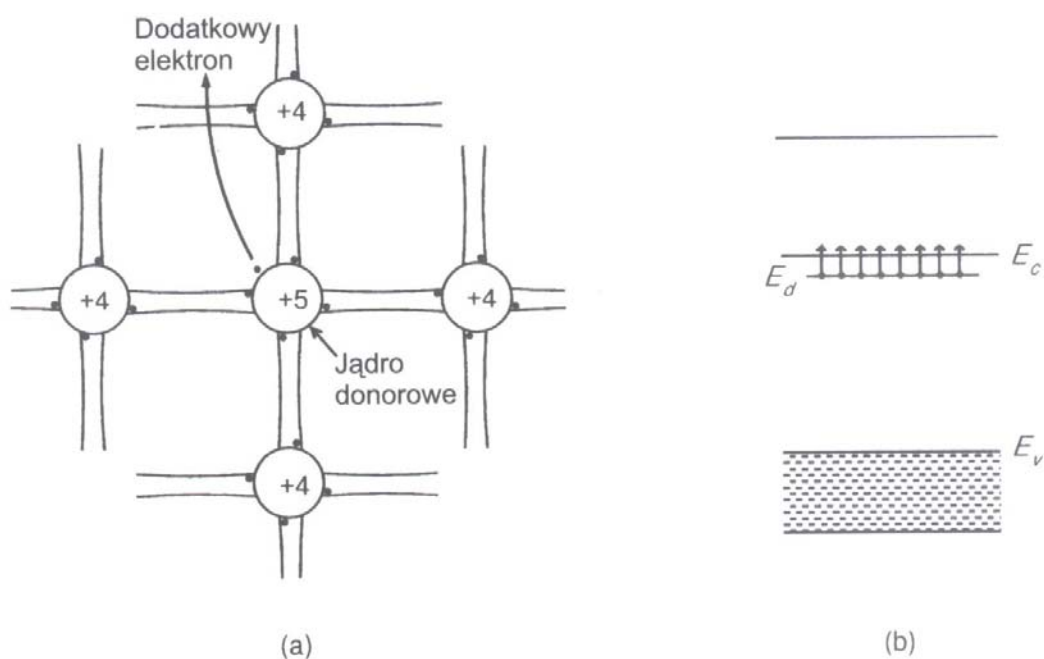
Z punktu widzenia wartości **mocy promieniowania** lasery dzielimy na: małej mocy (od 4 do 5mW), średniej mocy (od 6 do 500mW), dużej mocy  $> 500\text{mW}$ . Lasery małej i średniej mocy zaliczane są do laserów biostymulacyjnych.



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).



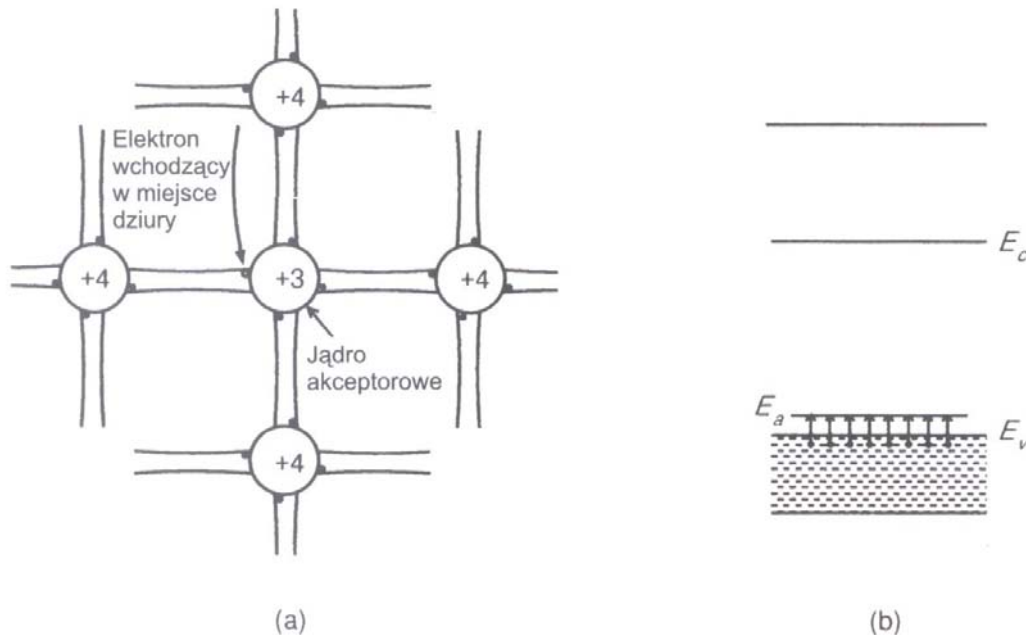
Półprzewodnik typu *n*  
*a* — schematyczne przedstawienie jego struktury, *b* — wykres poziomów energetycznych

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

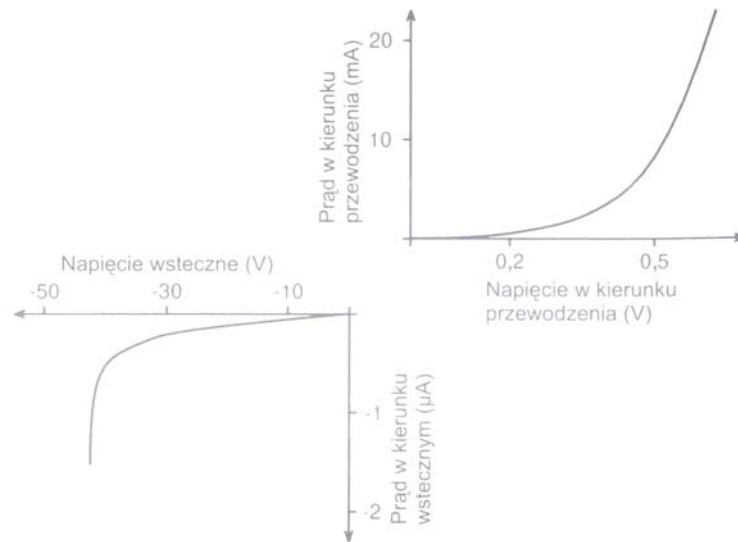
$$U_o = \left(\frac{k_B T}{q}\right) \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) \qquad W = \left[\frac{2\epsilon\epsilon_o U_o}{q} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)\right]^{1/2}$$

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 przechodzić 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 domieszkiwanie, temperatura). Prąd w kierunku przewodzenia – prąd wstrzykiwania

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



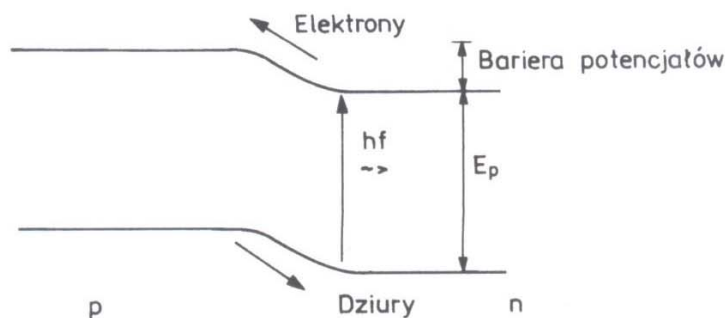
Charakterystyka zmian prądu diody w funkcji przyłożonego napięcia

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 –  $\lambda$ ).



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

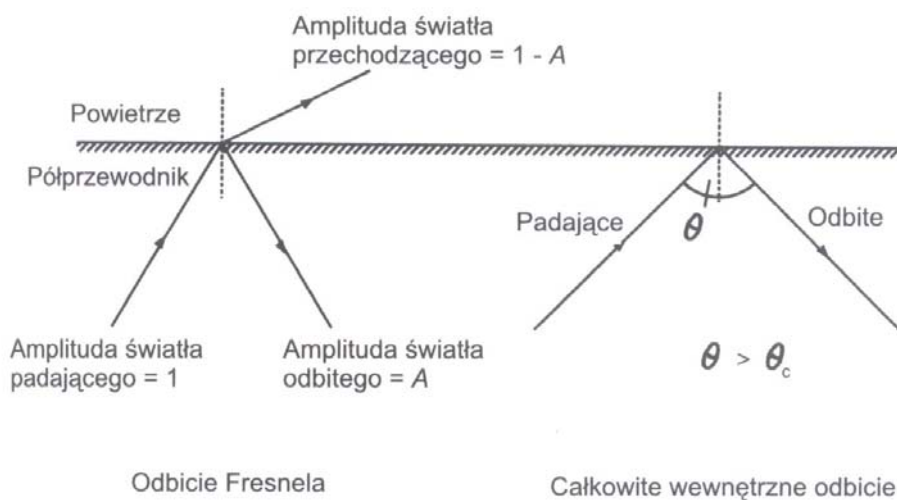
Rekombinacja nośników może być promienista lub bezpromienista (zamiana energii w ciepło):

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

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

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  $A^2$  (przyp. tłum.)

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

Policz R dla  $n_1=3.6$  ( $\sim 0.32$ )

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

Jeśli rozważyć oba mechanizmy straty światła łącznie:

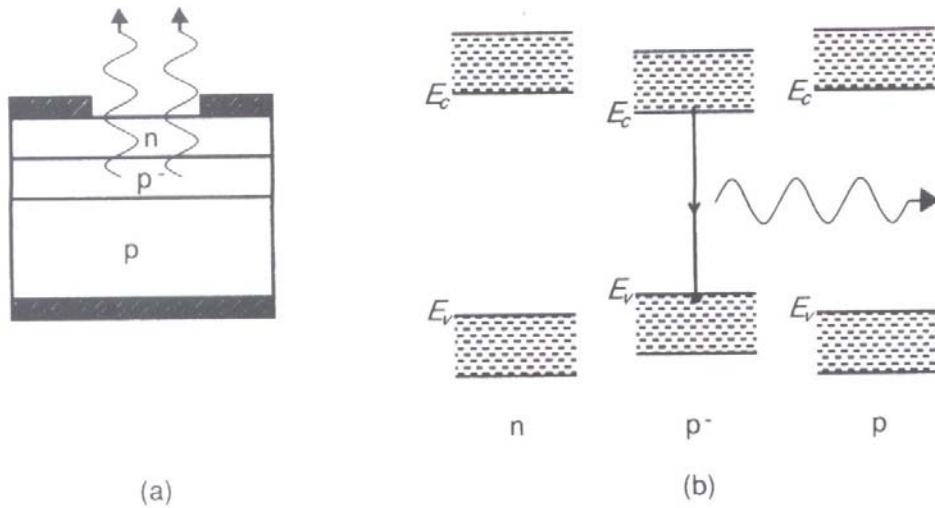
$$F \approx \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 \left[ 1 - \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \right]$$

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.

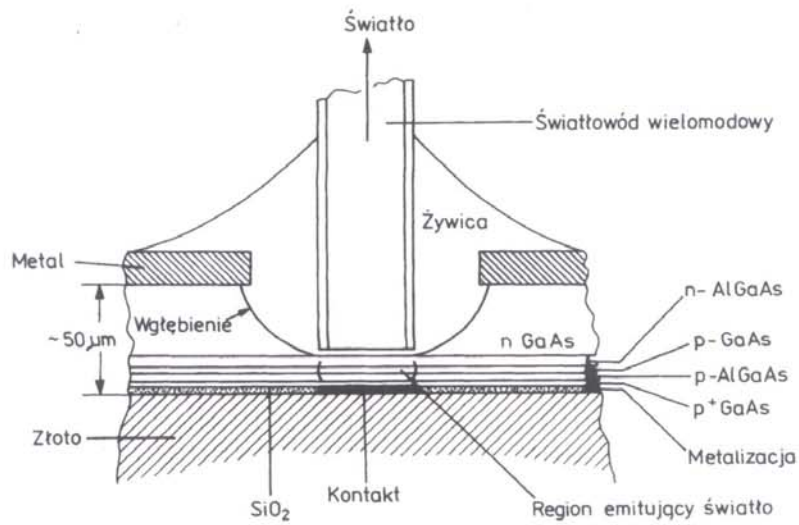
Warstwa emitująca diody powinna być cienka, aby ograniczyć ponowną absorpcję światła. Problem stanu powierzchni zakłócającego proces rekombinacji rozwiązano stosując strukturę heterozłączową, w której słabo domieszkowany obszar  $p^-$  jest umieszczony między dwoma obszarami p i n normalnie domieszkowanymi.



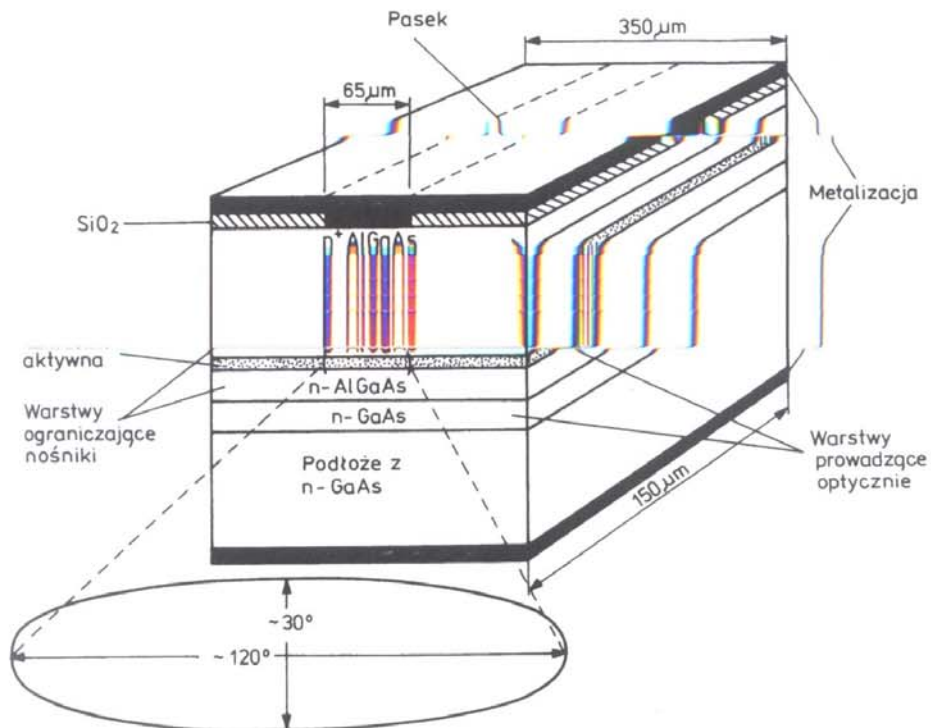
Heterozłączowa dioda elektroluminescencyjna  
a — struktura, b — poziomy energetyczne

Obszar  $p^-$  - obszar aktywny diody





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

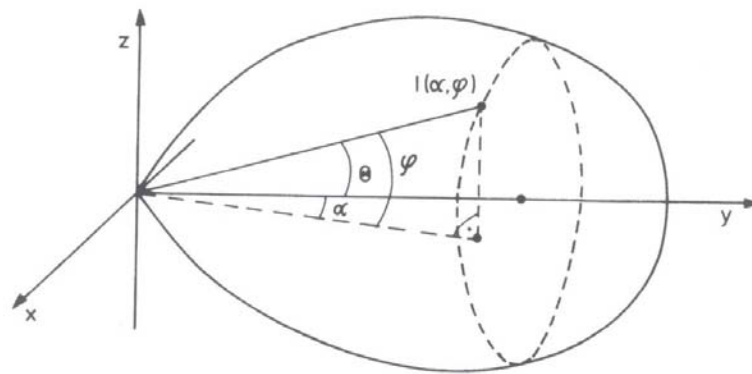


Struktura krawędziowej diody elektroluminescencyjnej o geometrii paskowej. Na podstawie [1]

## 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

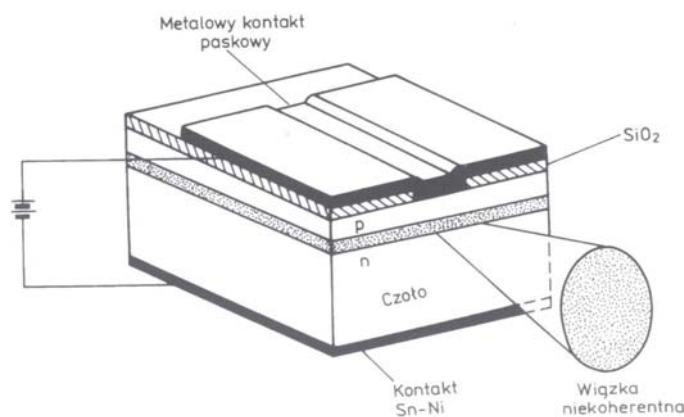
Struktura Burrusa niezbyt dobrze ogranicza obszar, w którym płynie prąd – niekorzystne zmniejszenie gęstości prądu i powiększenie obszaru, z którego emitowane jest światło.

## 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

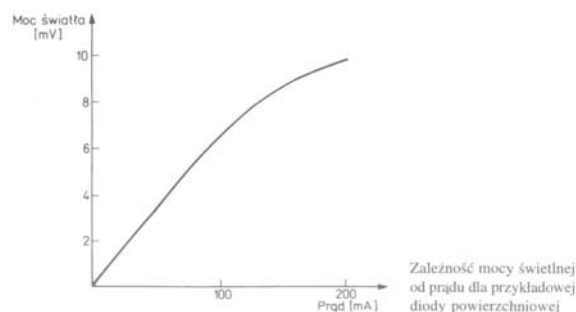
Podobna do lasera półprzewodnikowego – jeden z jej końców ma duże straty optyczne zapobiegające odbiciom i w konsekwencji akcji laserowej. Światło zostaje jednak wzmocnione – osiągane moce świetlne są większe. Światło wychodzące z takiej diody skupiane jest w małym kącie. W skutek emisji wymuszonej zmniejsza 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.



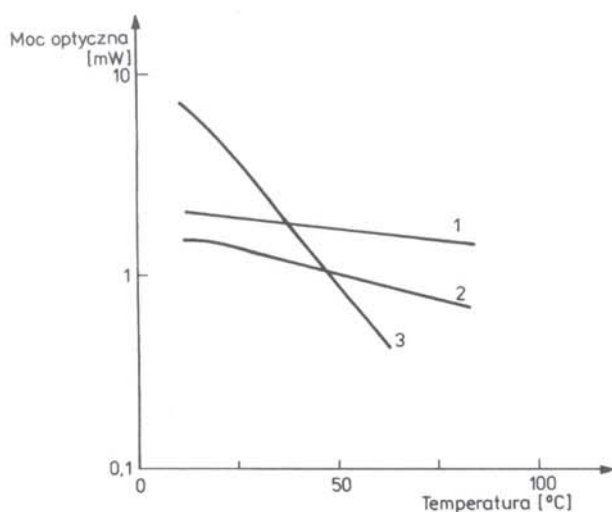
Struktura diody superluminescencyjnej. Na podstawie [9]

## 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.

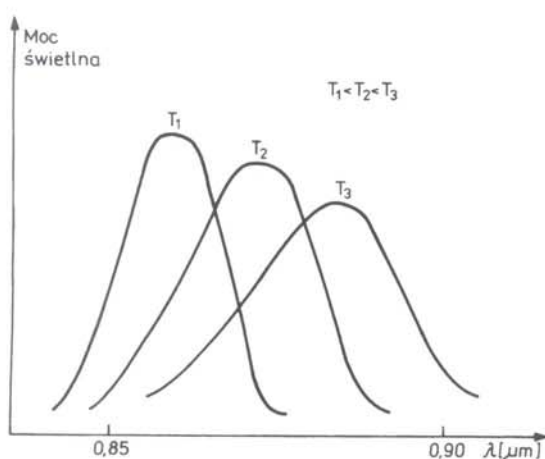


B). Szerokość linii widmowej. Ze wzrostem temperatury widmo ulega rozszerzeniu, a jego maksimum przesuwają się w stronę fal dłuższych (zmiany w rozkładach energii nośników)



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 przesunąć 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  $850 \text{ nm}$  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:  $\tau_c$

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 :

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

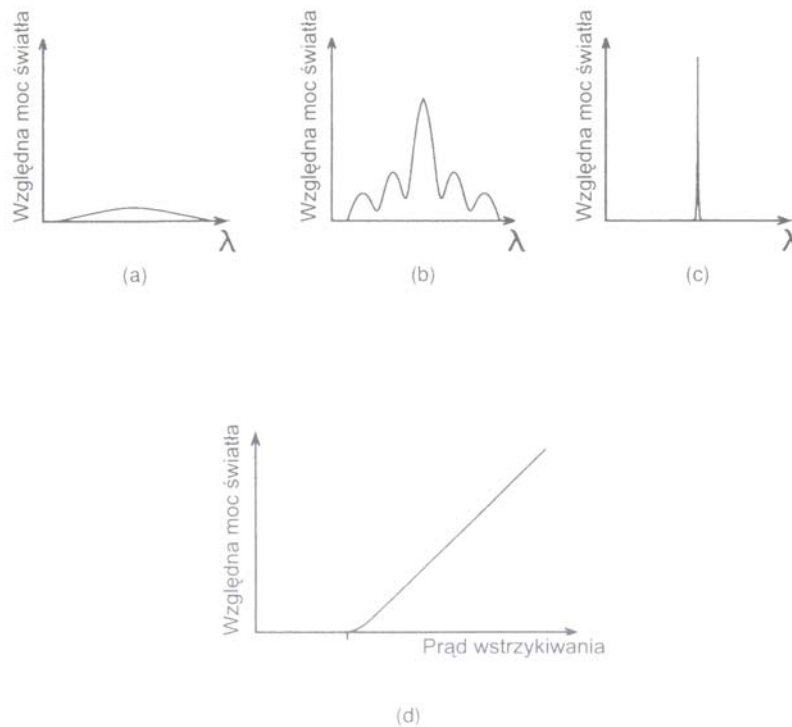
$DP$  – moc wypromieniowywana przez diodę w małym kącie bryłowym  $d\Omega$ , którego położenie w przestrzeni określają kąty  $\alpha$  i  $\Phi$ .

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./cm<sup>3</sup>).

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.

