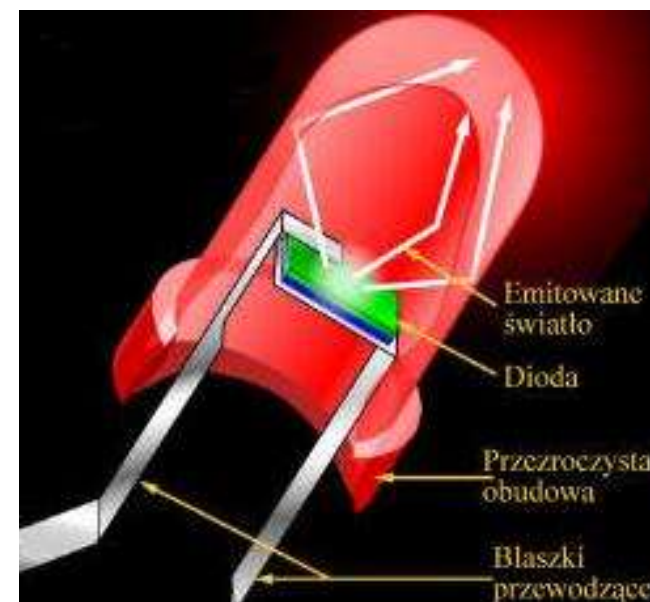
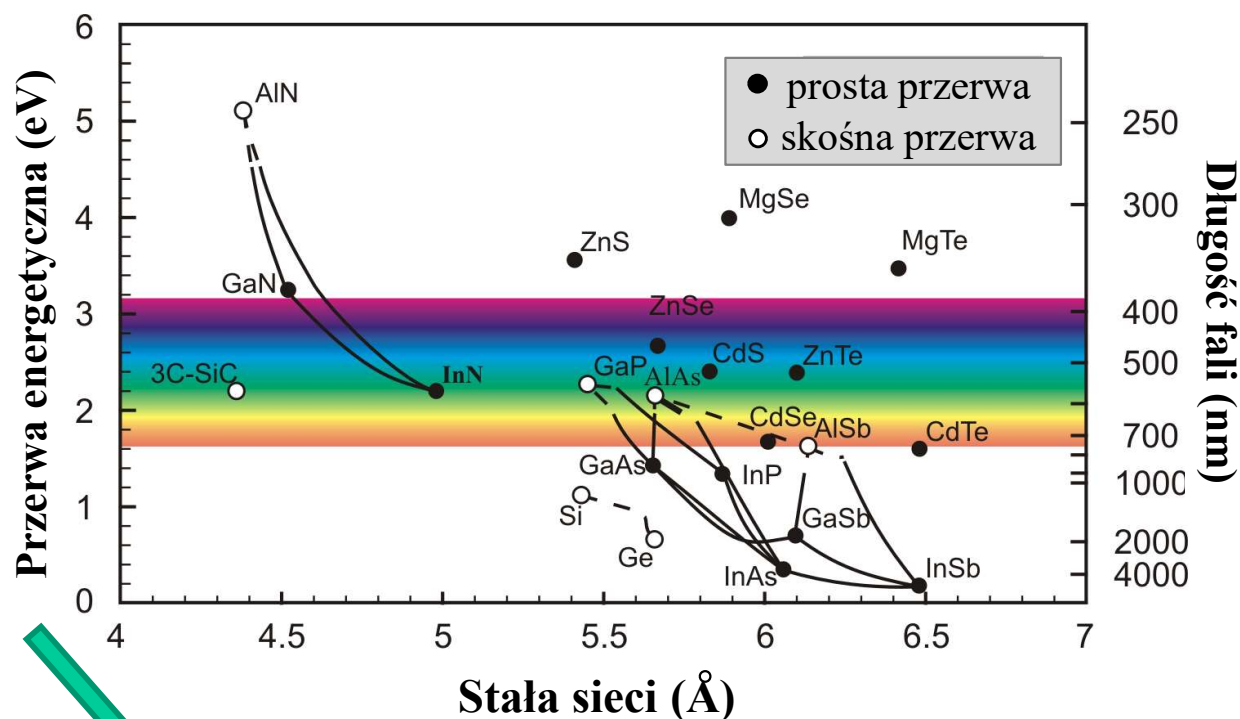


WYKŁAD 7

Dioda elektroluminescencyjna (LED)
Laser półprzewodnikowy

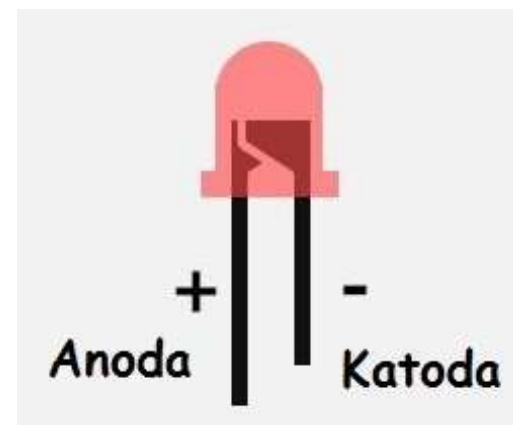
Dioda elektroluminescencyjna (LED)

Diody elektroluminescencyjne (ang. *light emitting diodes*, LED) – wykonywane są na bazie półprzewodnikowych złączy *p-n*. Działają w oparciu o zjawisko elektroluminescencji, tzn. przetwarzają energię elektryczną na energię promieniowania elektromagnetycznego. Barwa światła, które emitują diody LED, jak również długość fali, zależy od materiału półprzewodnikowego, z którego dioda jest wykonana.



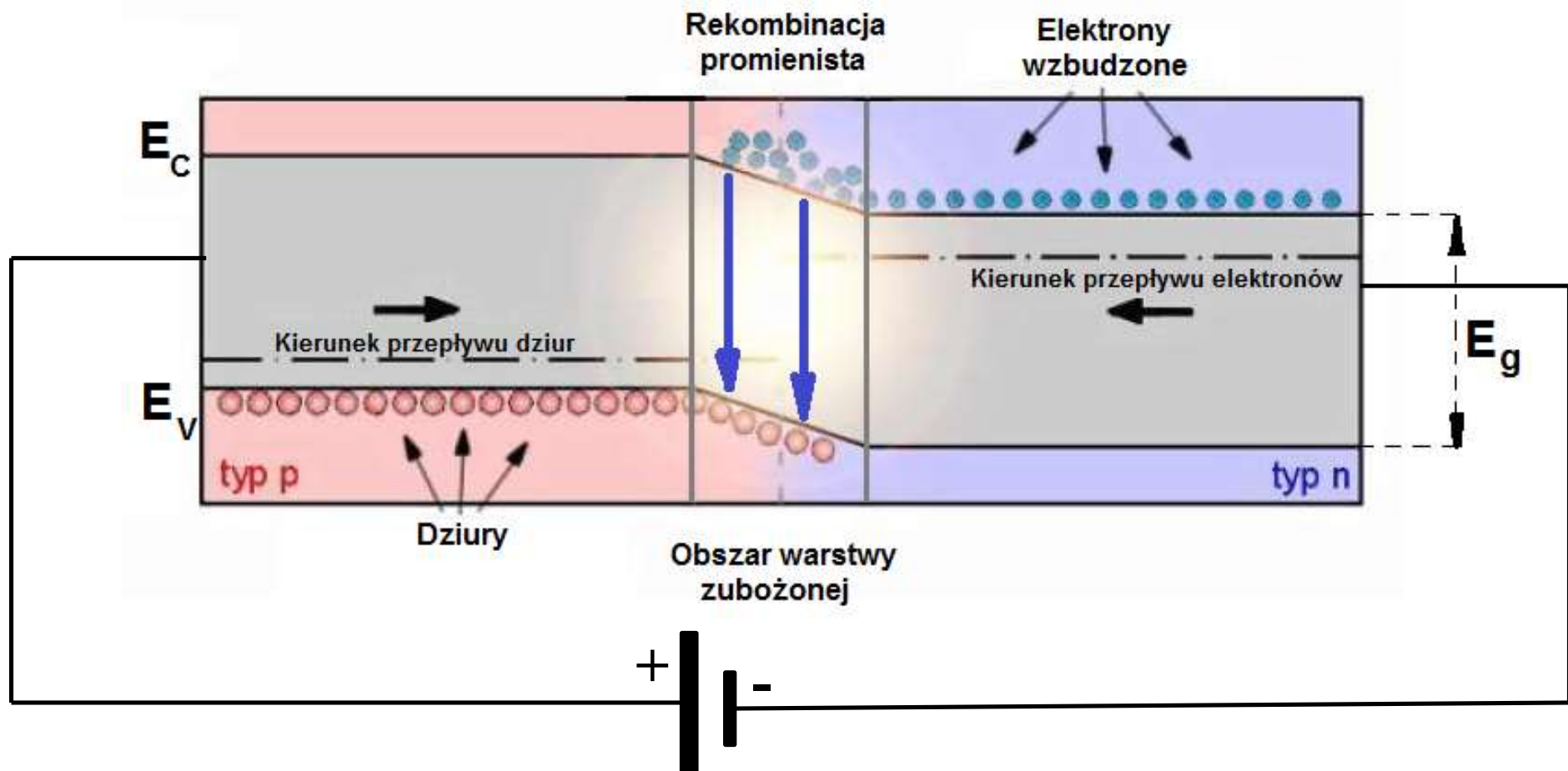
$$E_g = \frac{hc}{\lambda}$$

h – stała Plancka, c – prędkość światła, λ – długość fali

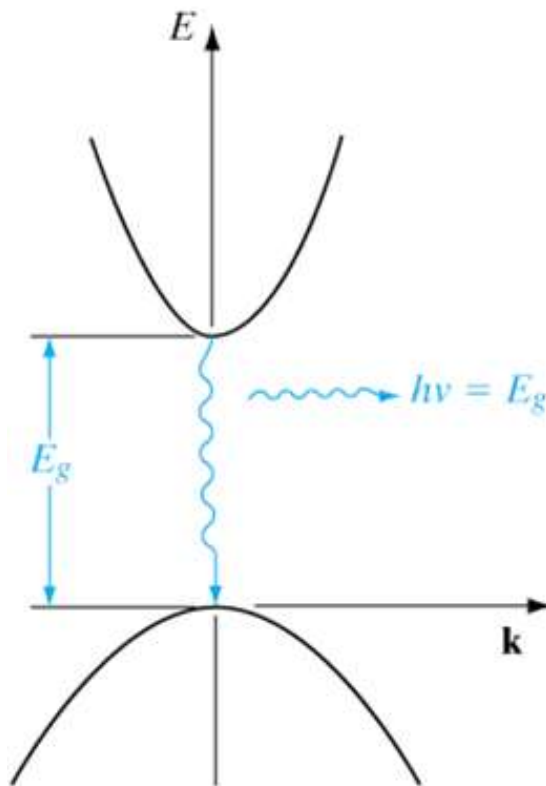


Dioda LED – zasada działania

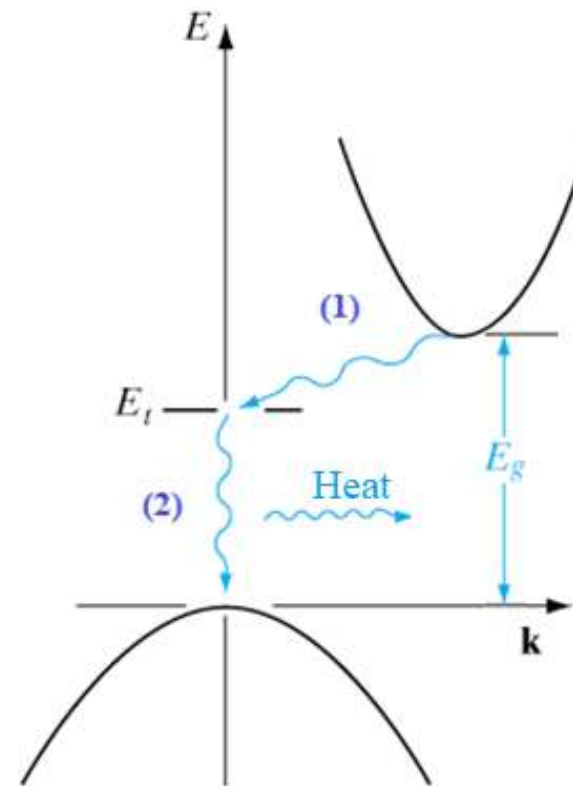
Zjawisko elektroluminescencji, w oparciu o które działają diody LED, polega na wytwarzaniu światła pod wpływem pola elektrycznego (napięcia polaryzacji w kierunku przewodzenia). Elektroluminescencja zachodzi w wyniku **rekombinacji promienistej dziur i elektronów w obszarze warstwy zubożonej** złącza *p-n*. Przejściom elektronów z wyższego poziomu energetycznego na niższy towarzyszy wydzielenie energii w postaci światła.



Rekombinacja promienista a niepromienista – prosta i skośna przerwa wzbroniona w półprzewodniku



(a) Direct



(b) Indirect

- (a) **Rekombinacja promienista** – zachodzi w półprzewodnikach z prostą przerwą energetyczną.
(b) **Rekombinacja niepromienista** – zachodzi w półprzewodnikach ze skośną przerwą energetyczną.

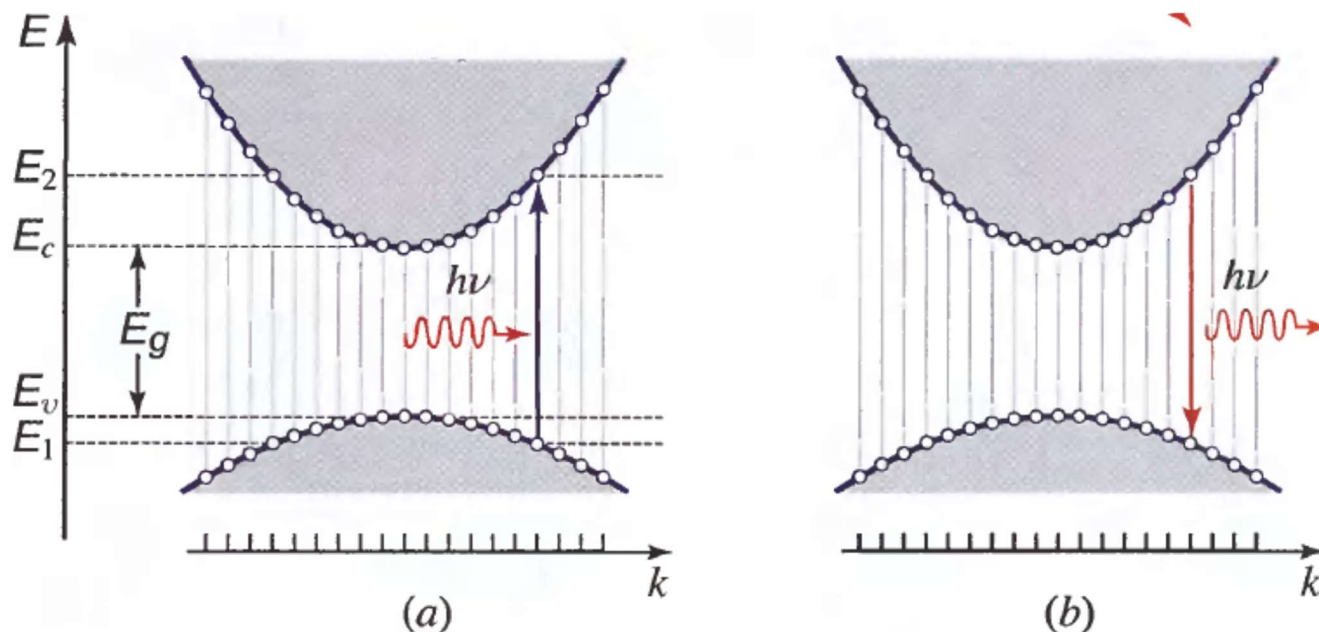
Szybkość rekombinacji

$$R = r np$$

r – stała rekombinacji, n – koncentracja elektronów,
 p – koncentracja dziur

Rekombinacja promienista pary elektron-dziura

Półprzewodnik z prostą przerwą



Prawdopodobieństwo rekombinacji promienistej (r_{sp}) zależy od:

1. Prawdopodobieństwa odpowiedniego obsadzenia stanów w pasmie przewodnictwa i w pasmie walencyjnym $f_e(\nu)$
2. Prawdopodobieństwa przejścia $\frac{1}{\tau_r}$, τ_r - czas życia na rekombinację promienistą
3. Łącznej gęstości stanów elektronowych i dziurowych $\rho(\nu)$

$$r_{sp} \cong \frac{1}{\tau_r} f_e(\nu) \rho(\nu)$$

Prawdopodobieństwo obsadzenia stanów w pasmie przewodnictwa

Koncentracja elektronów w pasmie przewodnictwa:

$$n_0 = \int_{E_c}^{\infty} f(E) N_c(E) dE$$

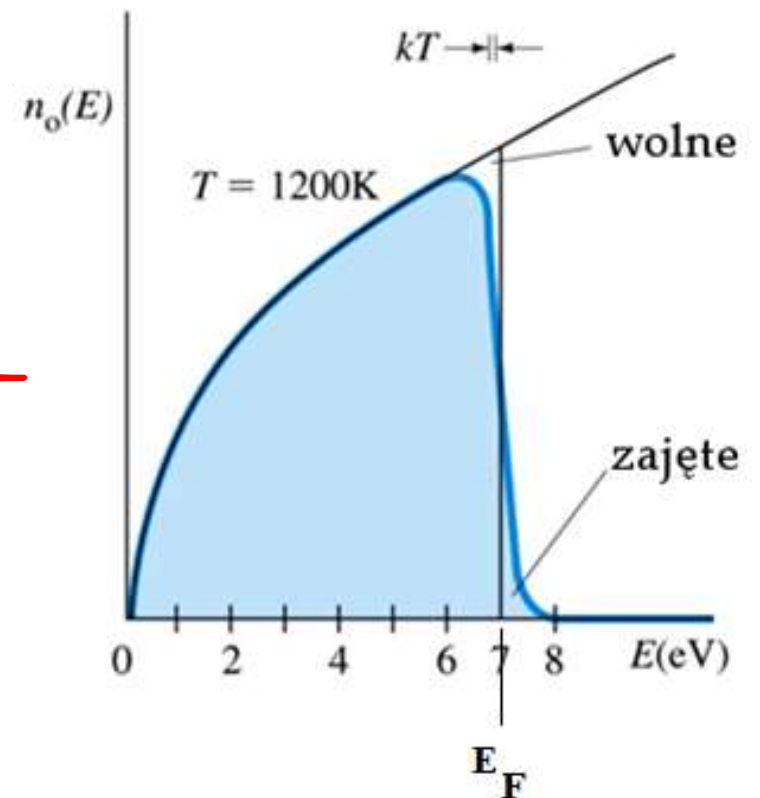
Prawdopodobieństwo obsadzenia stanu fermionem (statystyka Fermiego-Diraca):

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1}$$

Gęstość stanów w pobliżu krawędzi pasma:

$$N_c(E) = \frac{(2m_n^*)^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3} \sqrt{E - E_c}, \quad E \geq E_c$$

m_n^* - masa efektywna elektronów



Prawdopodobieństwo obsadzenia stanów w pasmie przewodnictwa

$$n_0 = N_C F_{1/2}\left(\frac{E_F - E_C}{kT}\right)$$

Całka Fermiego

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

efektywna gęstość stanów

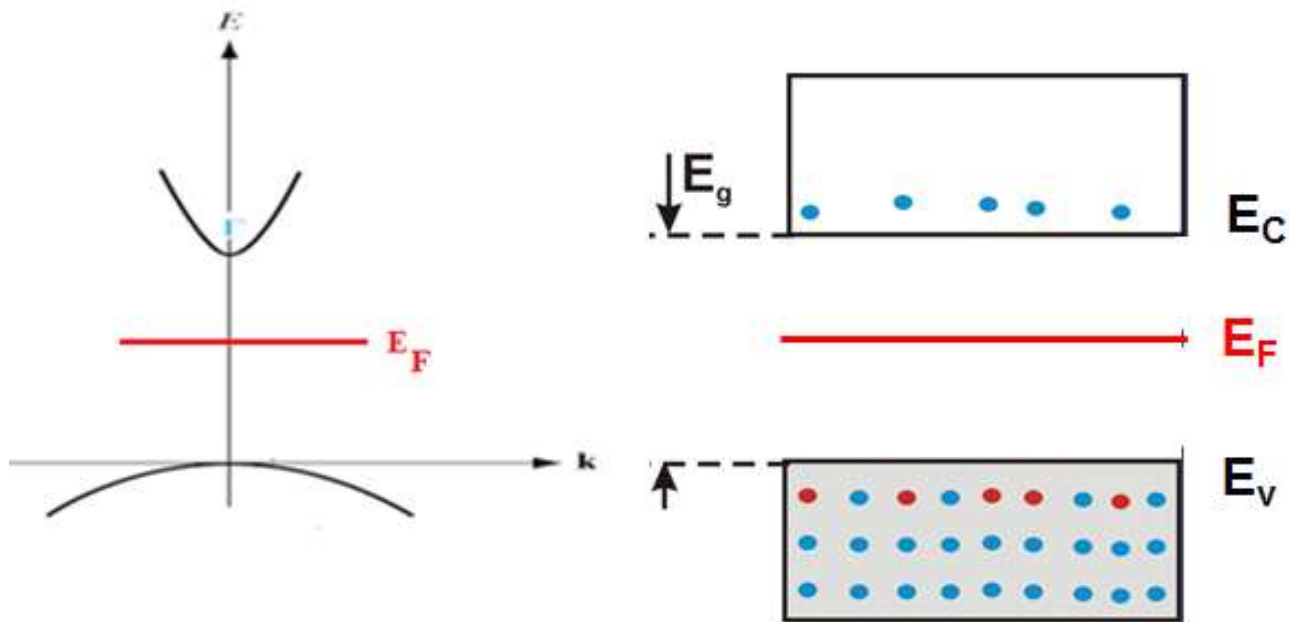
Dla półprzewodnika niezdegenerowanego:

$$n_0 = N_C f(E_C) = N_C e^{-(E_C - E_F)/kT}$$

Dla półprzewodnika zdegenerowanego:

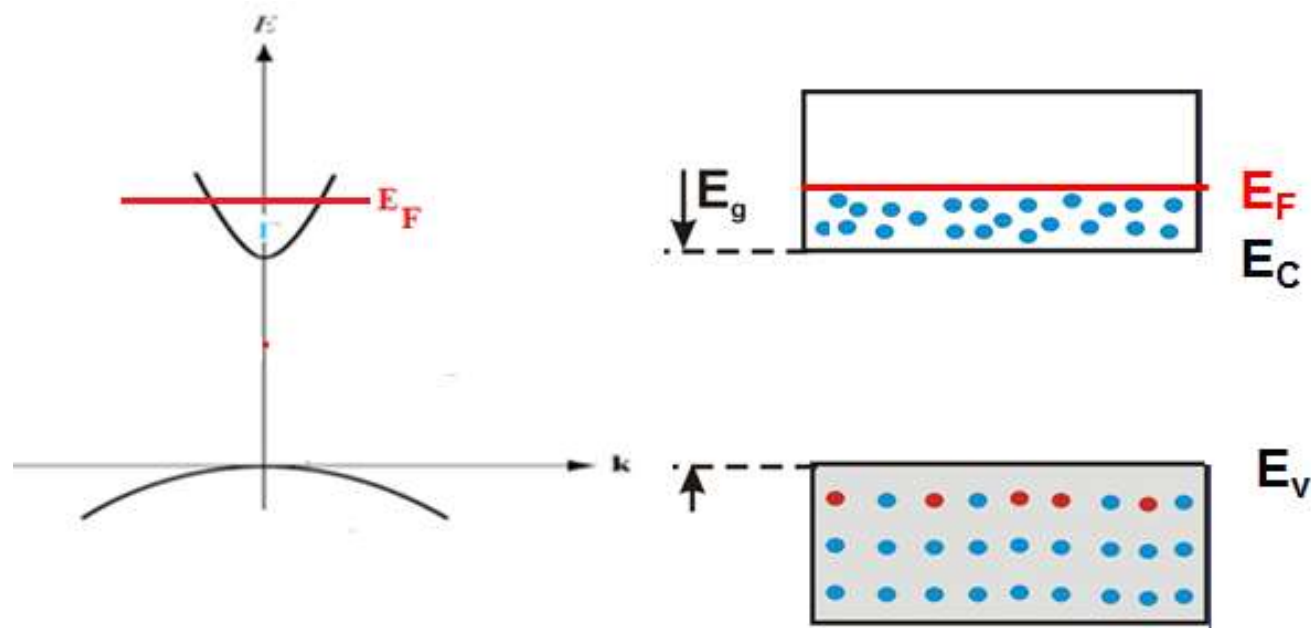
$$n_0 = \frac{1}{3\pi^2} \left(\frac{2m_n^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E_F - E_C)^{3/2}$$

Półprzewodnik niezdegenerowany



Poziom Fermiego znajduje się w obszarze przerwy wzbronionej

Półprzewodnik zdegenerowany typu n



Poziom Fermiego znajduje się w obszarze pasma przewodnictwa

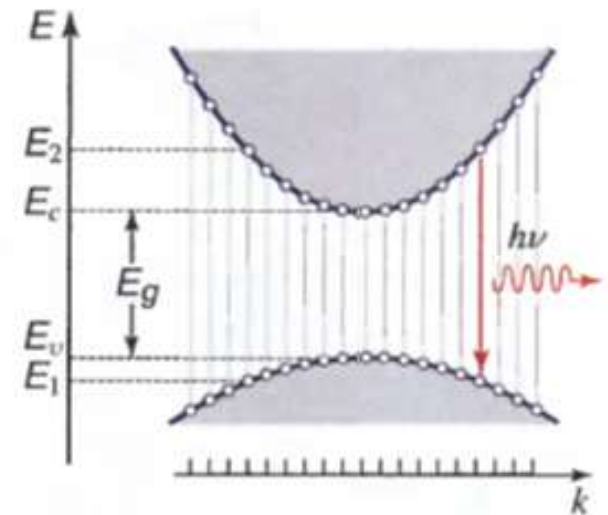
Łączna gęstość stanów elektronowych i dziurowych

Zamiast rozważać ruch elektronów i dziur oddzielnie, można opisać przejście elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa (lub w odwrotną stronę) jako przejście jednej cząstki o masie równej **masie zredukowanej m_r** :

$$\frac{1}{m_r} = \frac{1}{m_v} + \frac{1}{m_c}$$

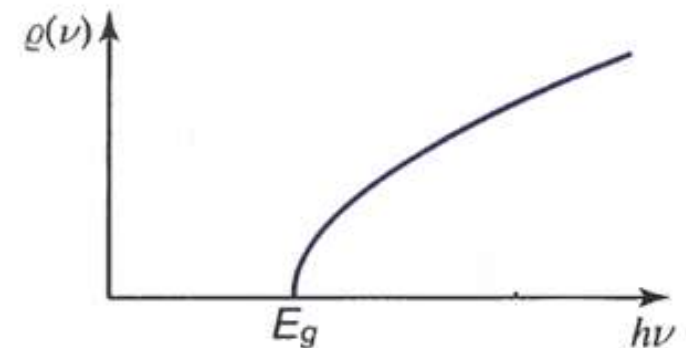
m_v – masa efektywna dziur w pasmie walencyjnym

m_c – masa efektywna elektronów w pasmie przewodnictwa



Łączna gęstość stanów elektronowych i dziurowych :

$$\varrho(\nu) = \frac{(2m_r)^{3/2}}{\pi \hbar^2} \sqrt{h\nu - E_g}, \quad h\nu \geq E_g$$



Rekombinacja promienista pary elektron-dziura

Intensywność rekombinacji jest proporcjonalna do iloczynu prawdopodobieństwa obsadzenia przez tę cząstkę stanu o energii E i gęstości stanów.

- Prawdopodobieństwo obsadzenia – czynnik Boltzmann $\sim e^{-\frac{h\nu - E_g}{kT}}$
- Gęstość stanów $\sim \sqrt{h\nu - E_g}$

Zatem prawdopodobieństwo wystąpienia rekombinacji promienistej:

$$r_{sp} \sim \sqrt{h\nu - E_g} e^{-\frac{h\nu - E_g}{kT}}$$

Rekombinacja promienista pary elektron-dziura

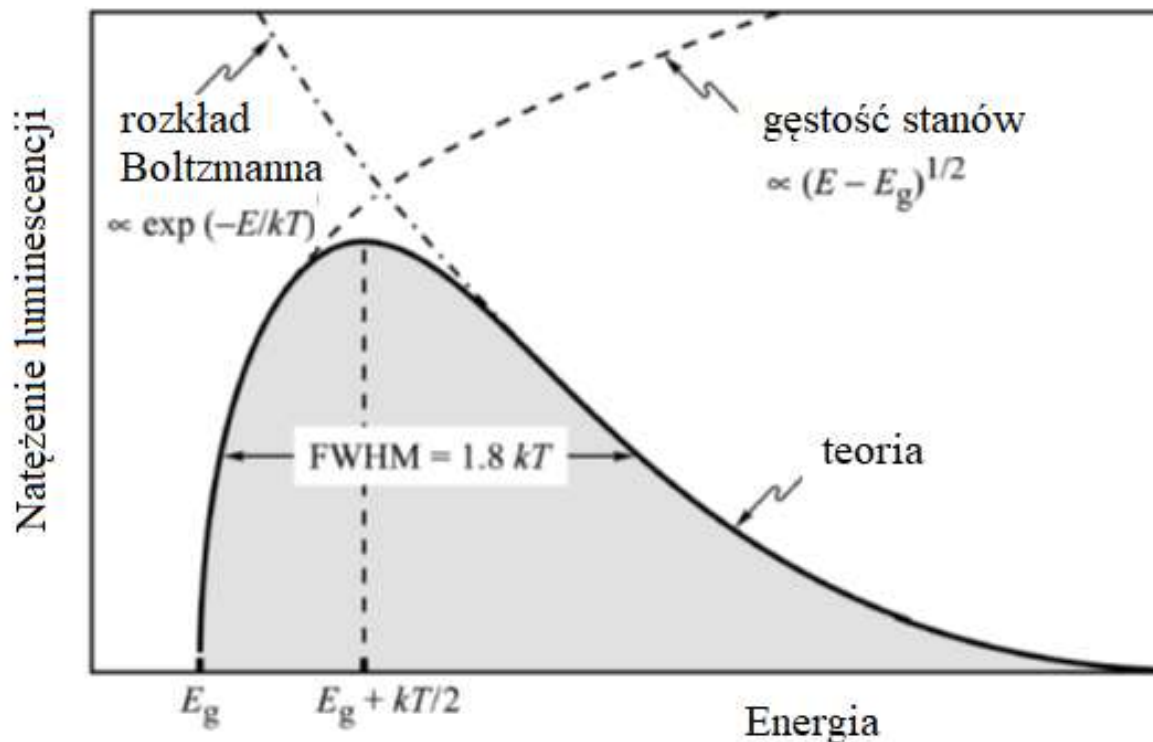
$$r_{\text{sp}}(\nu) = D \sqrt{h\nu - E_g} \exp\left(-\frac{h\nu - E_g}{kT}\right), \quad h\nu \geq E_g,$$

$$D = \frac{(2m_r)^{3/2}}{\pi \hbar^2 \tau_r} \exp\left(\frac{E_{f_c} - E_{f_v} - E_g}{kT}\right)$$

τ_r - czas życia na rekombinację promienistą
 E_{f_c} - poziom Fermiego w pasmie przewodnictwa

E_{f_v} - poziom Fermiego w pasmie walencyjnym

W stanie równowagi termodynamicznej



Maksimum luminescencji (pik):

$$h\nu_p = E_g + \frac{1}{2}kT$$

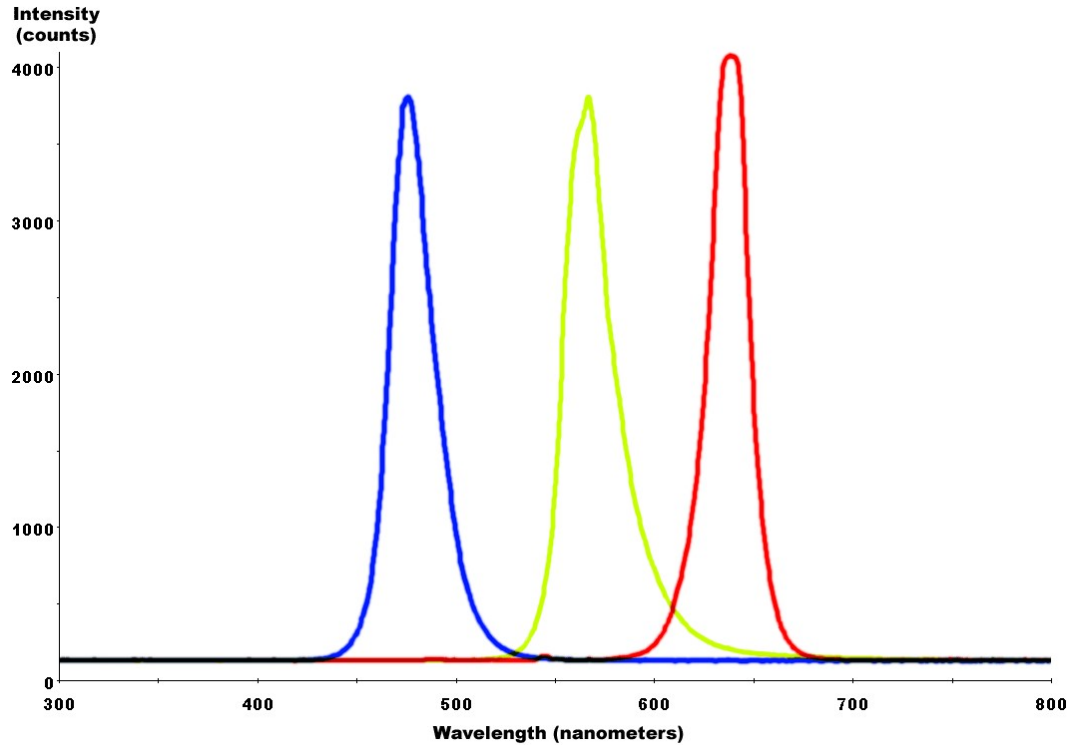
Szerokość połówkowa pasma:

$$\text{FWHM} = 1.8 kT$$

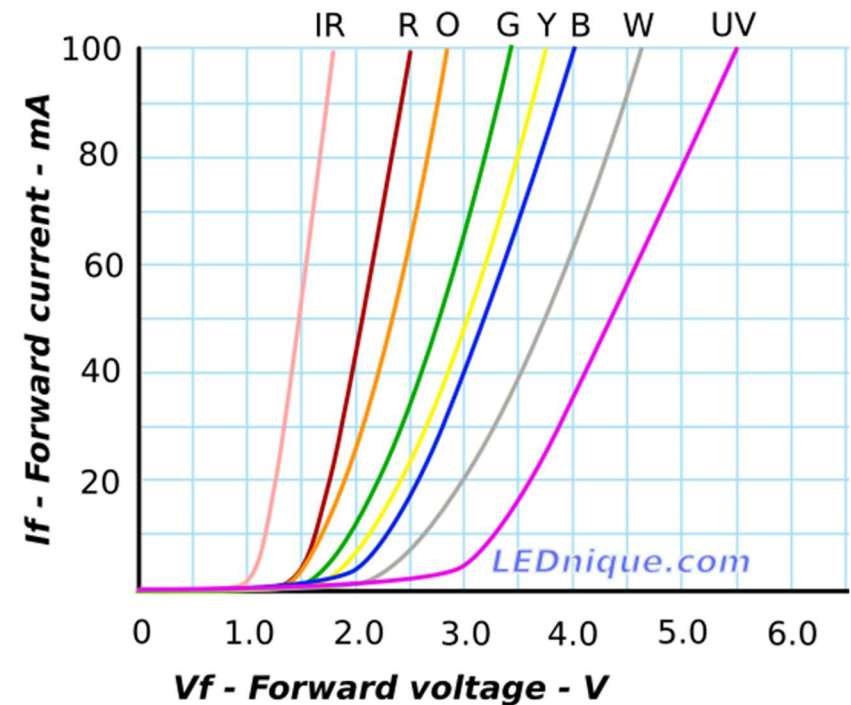
Zakres spektralny pasma luminescencji:

$$\Delta\lambda \approx 1.45 \lambda_p^2 kT$$

Widmo emisji LED i charakterystyki prądowo-napięciowe

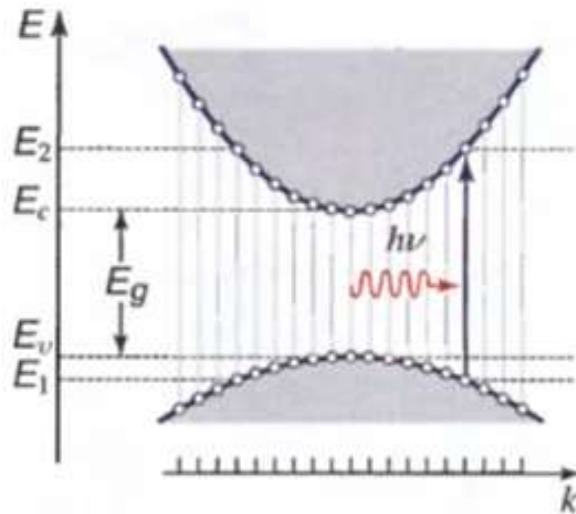


$$\lambda_p = \frac{hc}{E_g}$$



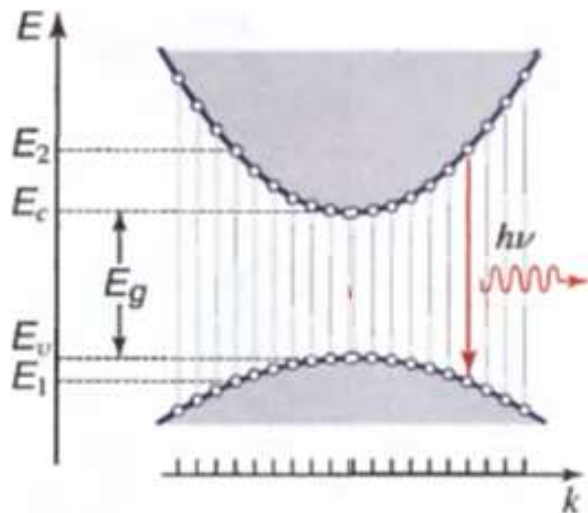
I_f – natężenie prądu w kierunku przewodzenia
 V_f – napięcie polaryzacji w kierunku przewodzenia

Warunek obsadzeń - absorpcja i emisja (w przypadku konstrukcji laserujących)



Prawdopodobieństwo na absorpcję

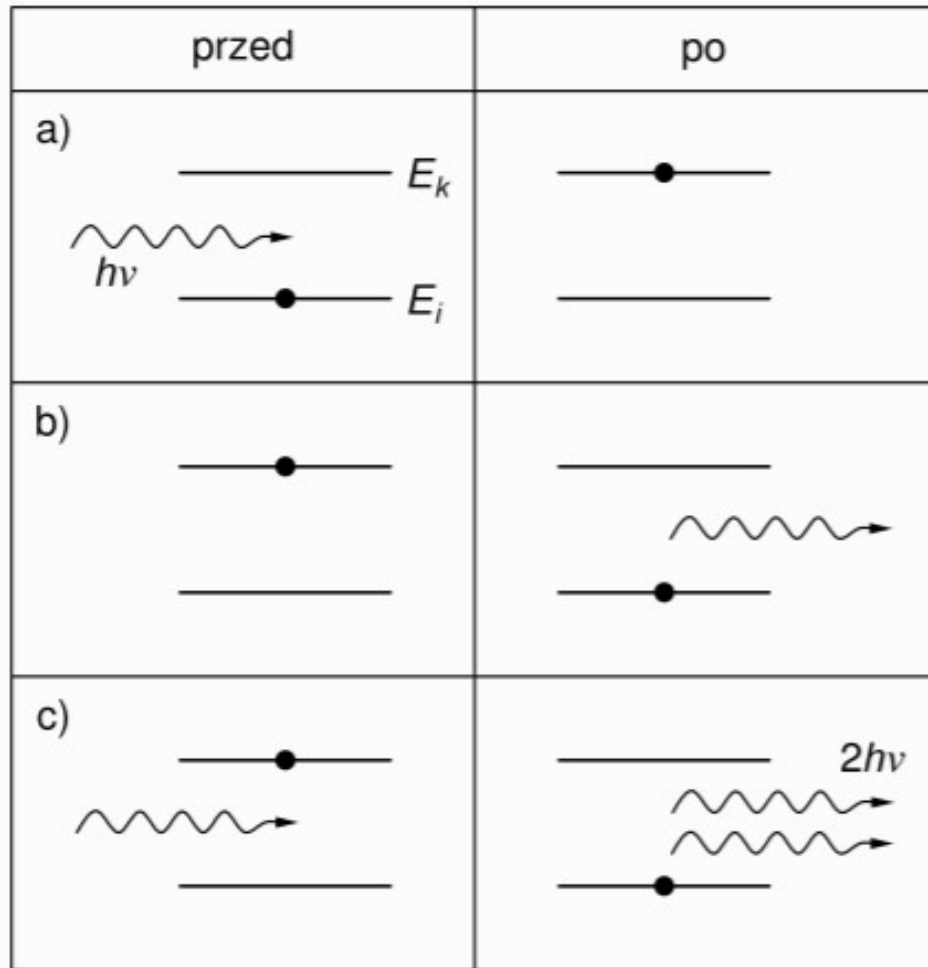
$$f_a(\nu) = [1 - f_c(E_2)] f_v(E_1)$$



Prawdopodobieństwo na emisję

$$f_e(\nu) = f_c(E_2) [1 - f_v(E_1)]$$

Laser – zasada działania



Rys. Trzy elementarne procesy opisujące oddziaływanie fotonu z układem kwantowym: a) absorpcja, b) emisja spontaniczna, c) emisja wymuszona. Symbole: E_i – poziom o niższej energii, E_k – poziom o wyższej energii.

W procesie **absorpcji** (rys. a) padający foton o energii $h\nu$ znika, a jego energia idzie na przeniesienie elektronu z poziomu niższego o energii E_i na wyższy E_k .

W procesie **emisji spontanicznej** (rys. b) elektron przechodzi z poziomu wyższego na niższy, a różnica energii jest wypromieniowana w formie fotonu.

Działanie lasera opiera się na zjawisku **emisji wymuszonej** (rys. c), w którym padający foton o energii $h\nu$ wymusza przejście układu kwantowego ze stanu o energii wyższej do niższej.

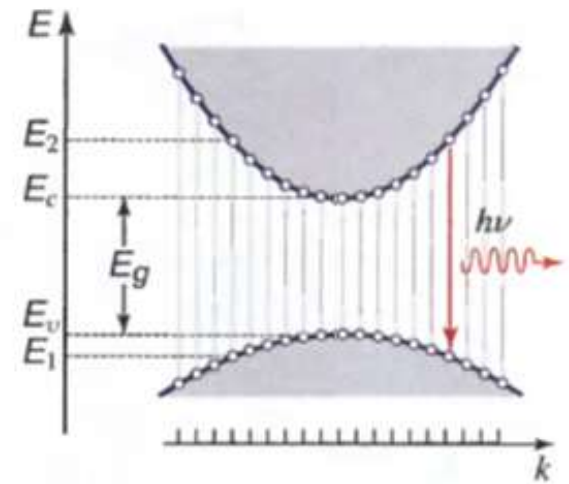
Warunek konieczny na wystąpienie akcji laserowej – **inwersja obsadzeń**, która mówi o tym, że **liczba elektronów w stanie o energii E_k musi być większa od liczby elektronów w stanie o energii E_i** . Uzyskanie stanu, dla którego zachodzi taka inwersja obsadzeń, jest możliwe kosztem energii dostarczonej z zewnątrz. Proces ten zwany jest potocznie **pompowaniem**.

Istnieją dwa rodzaje pompowania w układach laserujących: *elektryczne* i *optyczne*.

Wzmocnienie w półprzewodniku - warunek obsadzeń

Emisja $f_e(\nu) = f_c(E_2) [1 - f_v(E_1)]$

Absorpcja $f_a(\nu) = [1 - f_c(E_2)] f_v(E_1)$



$$f_c(E_2) = 1 / \{ \exp[(E_2 - E_{fc}) / kT] + 1 \}$$

$$f_v(E_1) = 1 / \{ \exp[(E_1 - E_{fv}) / kT] + 1 \}$$

Współczynnik inwersji Fermiego:

$$f_g(\nu) = f_e(\nu) - f_a(\nu) = f_c(E_2) - f_v(E_1)$$

Wzmocnienie, jeśli współczynnik inwersji $f_g(\nu) > 0$, stąd:

$$f_c(E_2) > f_v(E_1)$$

Wzmocnienie w półprzewodniku - warunek obsadzeń

Po przekształceniach otrzymujemy:

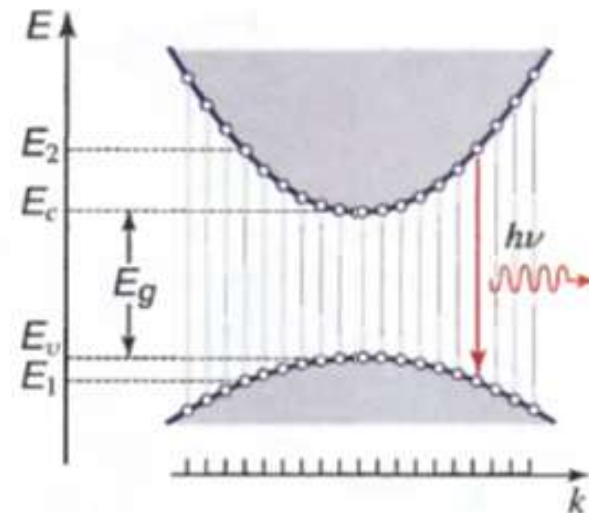
$$E_{fc} - E_{fv} > E_2 - E_1 = h\nu$$

Zatem inwersja jest możliwa tylko dla fotonów o energii mniejszej od $E_{fc} - E_{fv}$.

Z drugiej strony, żaden foton nie może mieć energii mniejszej od energii przerwy wzbronionej E_g .

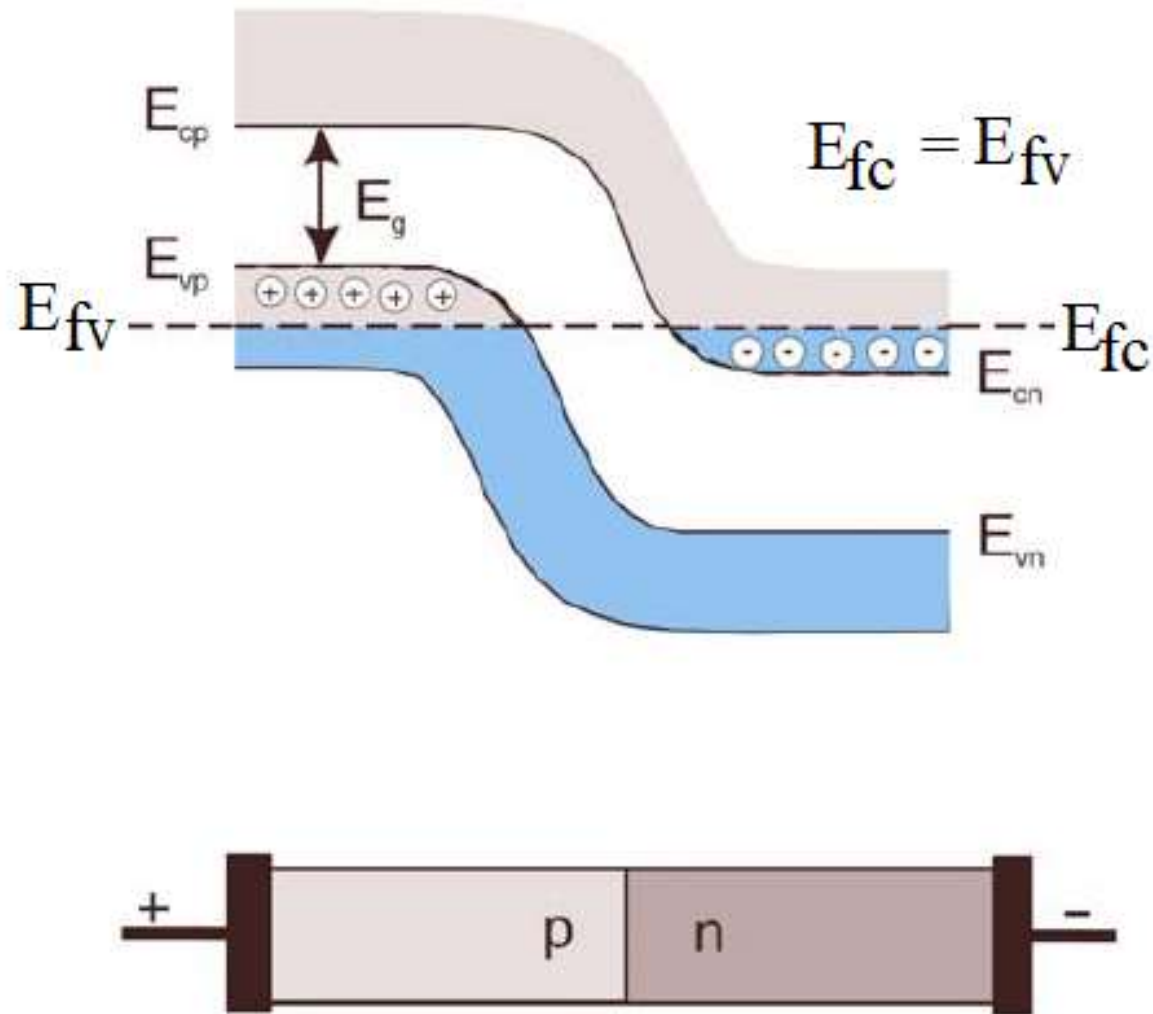
Stąd:

Warunek Bernarda - Durauffourga $\Rightarrow E_g < h\nu < E_{fc} - E_{fv}$

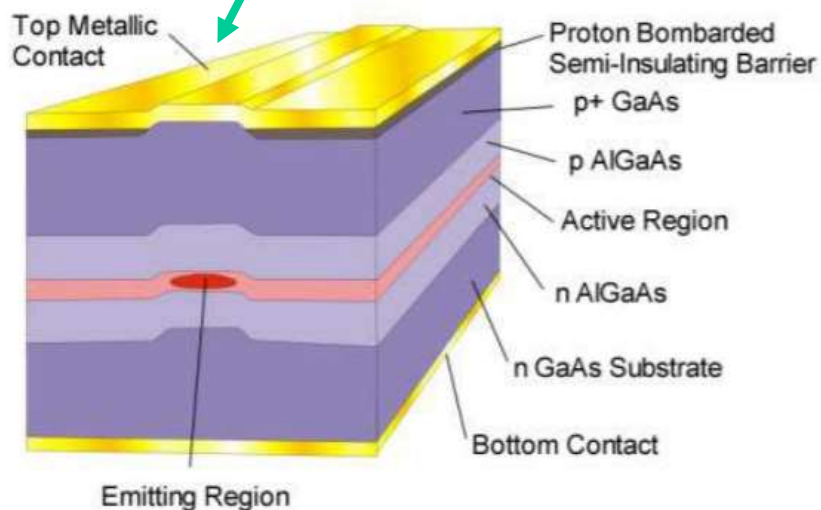
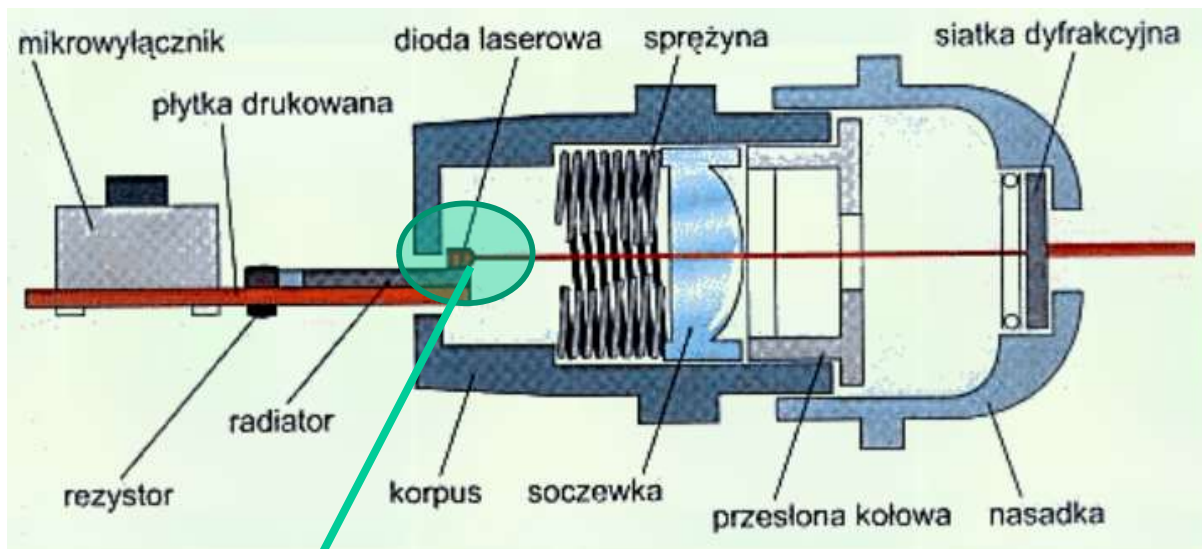


Tylko fotony o energii zawartej w przedziale pomiędzy E_g a $E_{fc} - E_{fv}$ są wzmacniane.

Konstrukcja złącza p-n, które zapewnia wzmocnienie w półprzewodniku

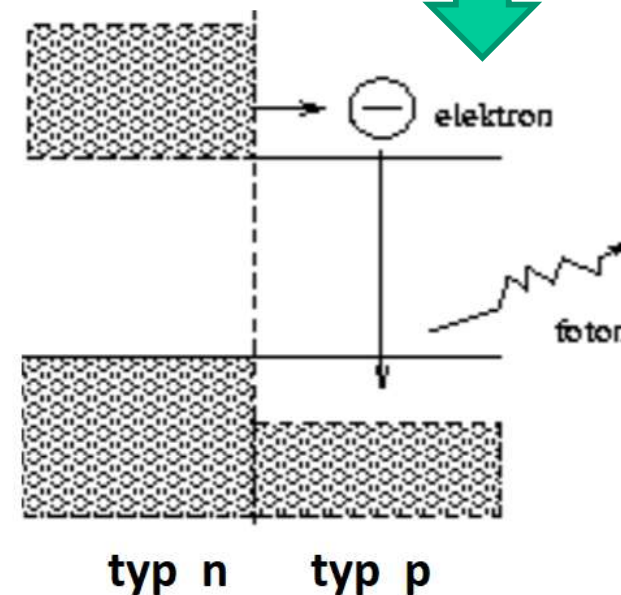


Laser półprzewodnikowy – konstrukcja



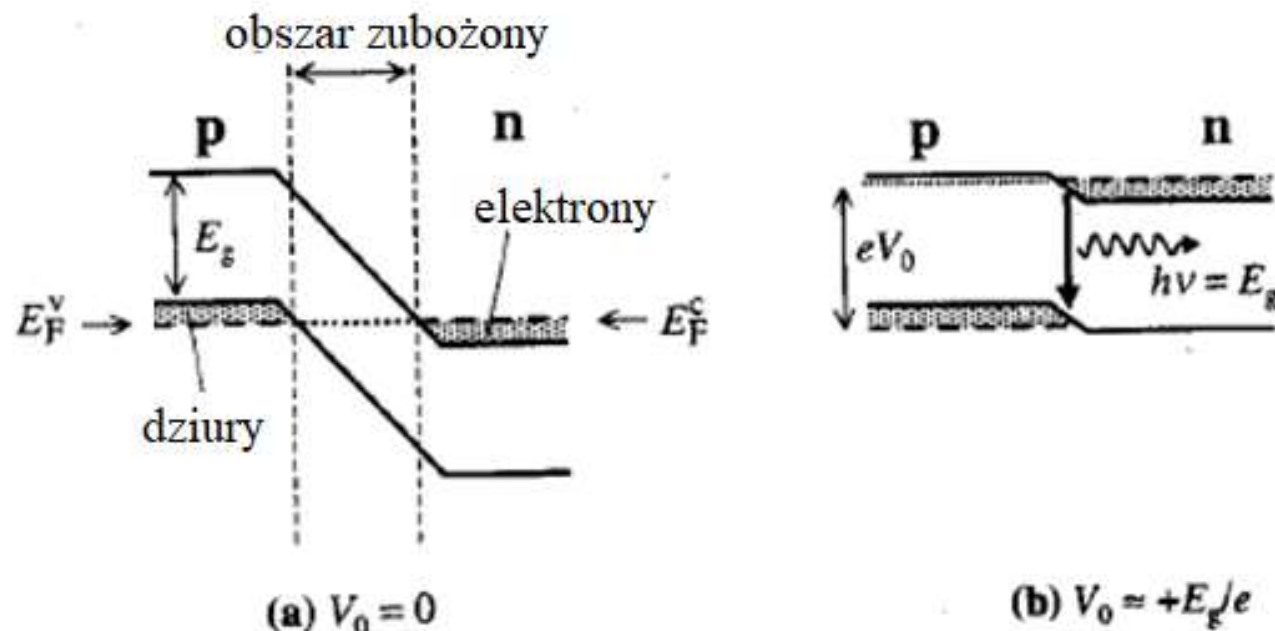
Rys. Przykład schematu budowy „medium” lasera półprzewodnikowego – tj. złącza p-n.

Inwersję obsadzeń poziomów energetycznych, uzyskuje się poprzez wstrzykiwanie mniejszościowych nośników ładunku do obszaru złącza p-n spolaryzowanego w kierunku przewodzenia.





Laser półprzewodnikowy - podsumowanie

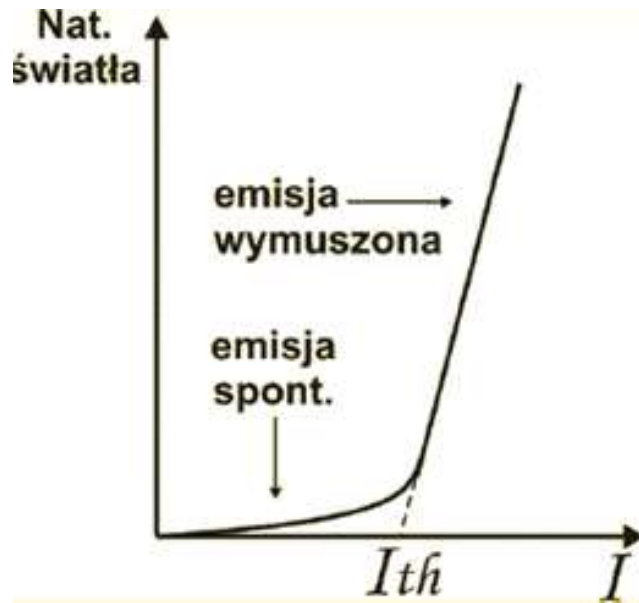


- Laser półprzewodnikowy $\rightarrow$ dioda (złącze p-n) bez polaryzacji
- Dioda spolaryzowana napięciem równym energii wzbronionej półprzewodnika.

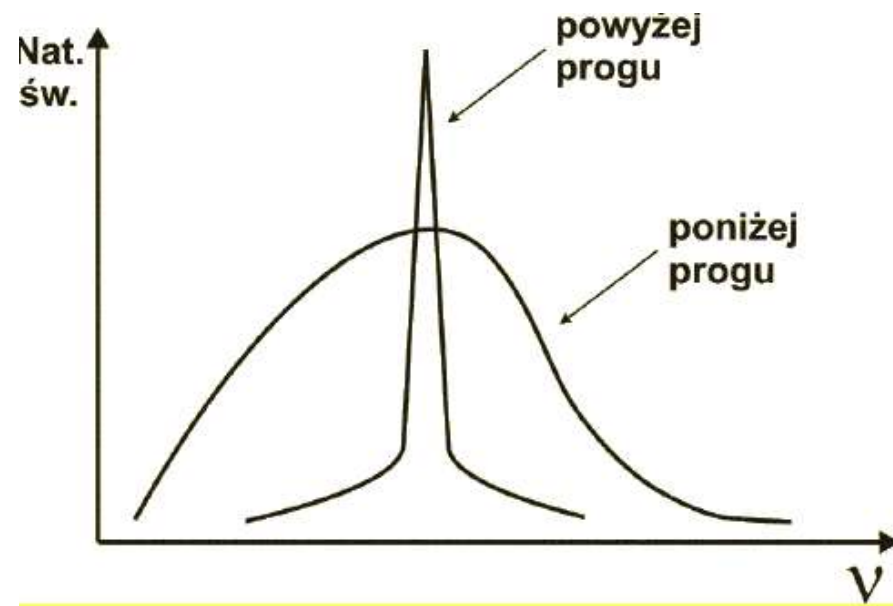
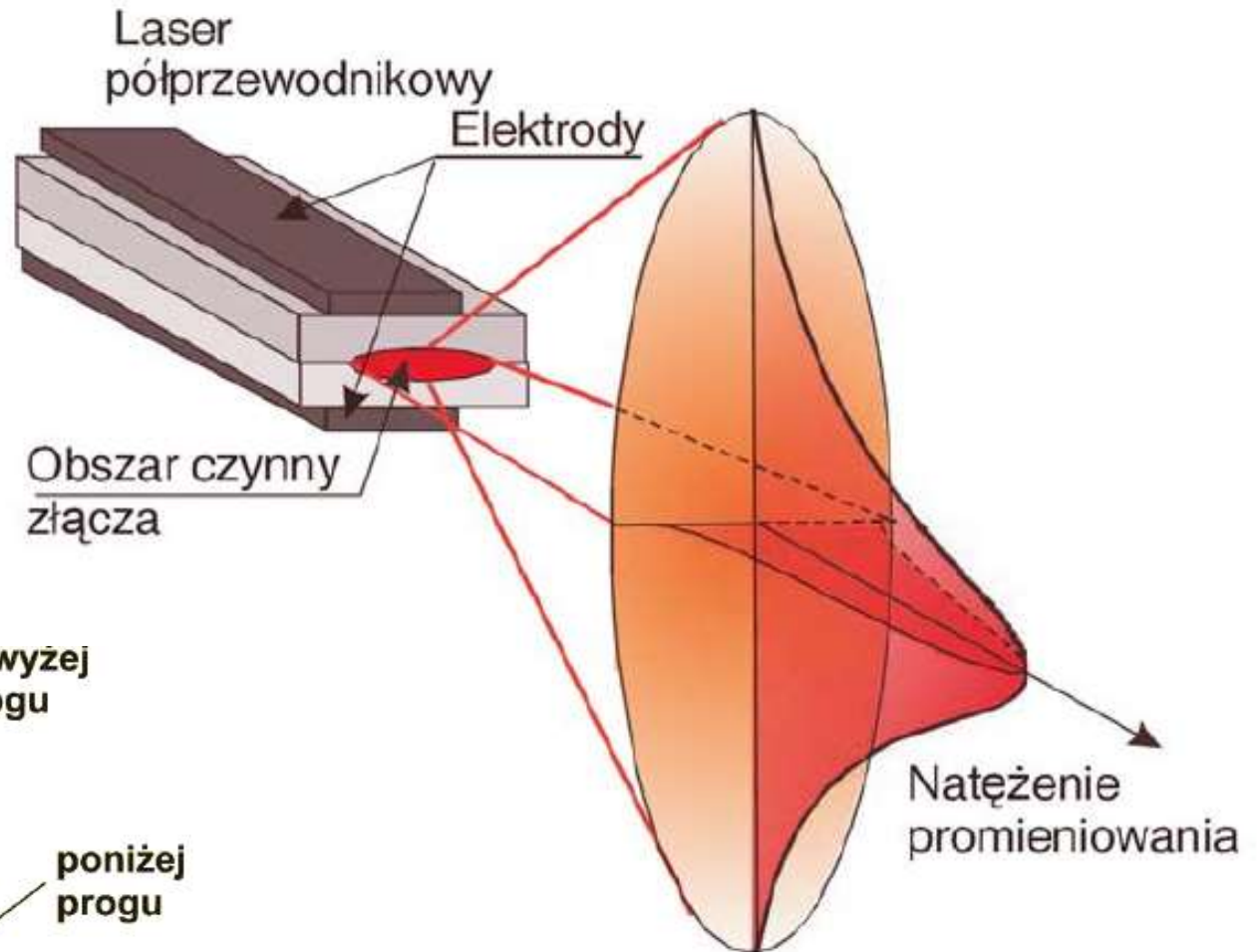
Warunek wystąpienia akcji laserowej: $E_{fc} - E_{fv} > E_g$

- półprzewodniki zdegenerowane
- napięcie polaryzujące równe $\sim$ przerwie wzbronionej (pompowanie)

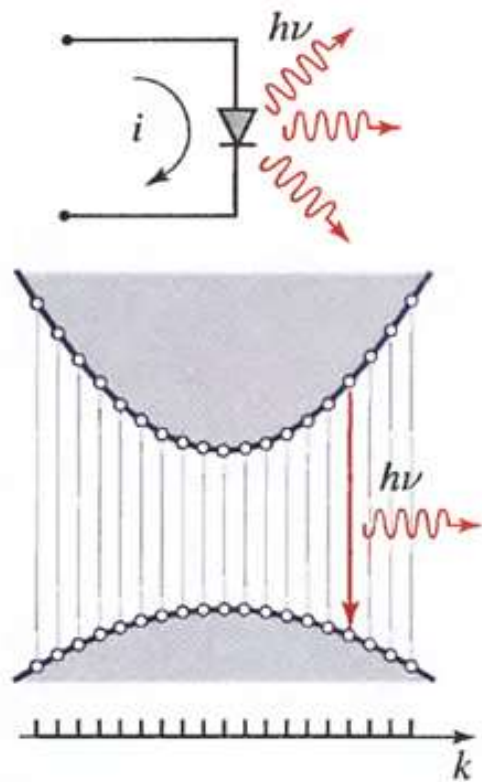
Właściwości prom. laserowego



I_{th} – prąd progowy

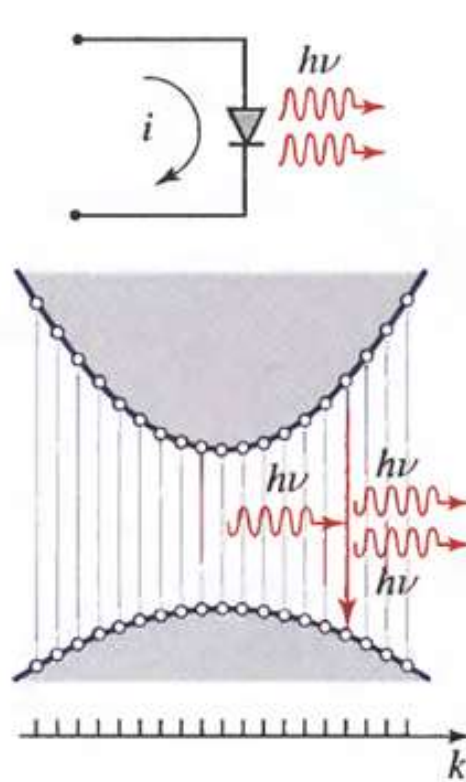


Porównanie zasady działania fotodiody, LED i lasera



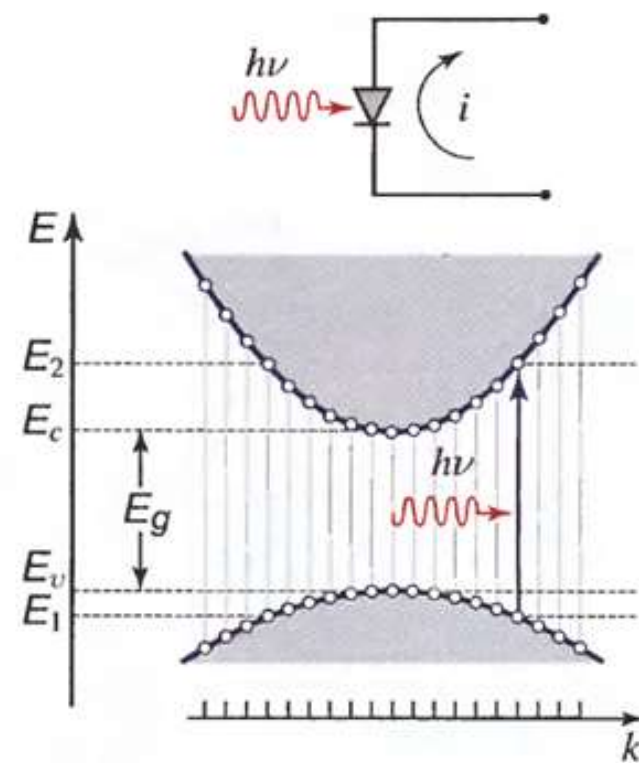
(a)

LED



(b)

laser



(c)

fotodioda