

# Wykład 7

**Dioda elektroluminescencyjna**  
**Laser półprzewodnikowy**

# Rekombinacja spontaniczna

- bezpromienista

*elektron + dziura* → *fonyony*

- promienista

*elektron + dziura* → *foton*

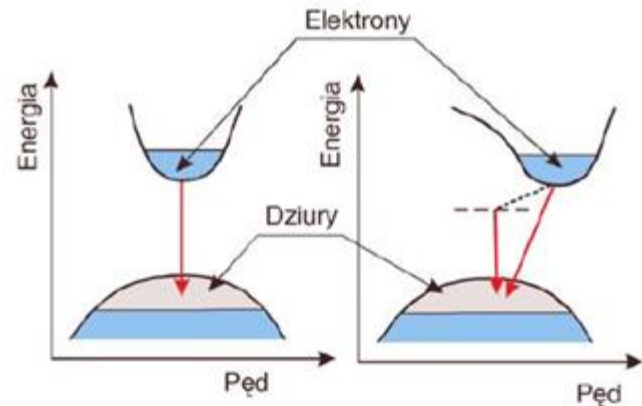
Przy przejściach prostych

$$\Delta \hbar \vec{k} = \hbar \vec{k}_p^e - \hbar \vec{k}_k^e \approx 0$$

Szybkość rekombinacji

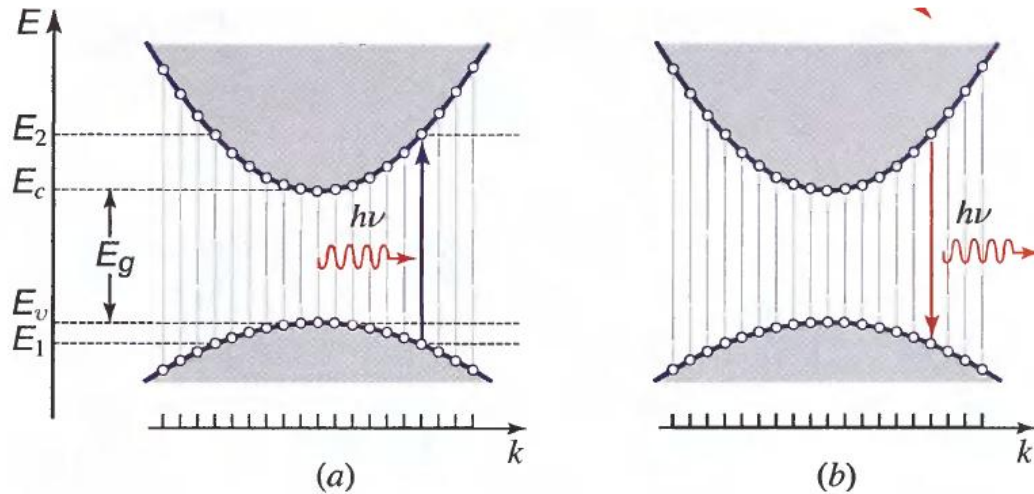
$$R = r np$$

$r$  – stała rekombinacji



# Rekombinacja promienista pary elektron-dziura

## Półprzewodnik z prostą przerwą



Prawdopodobieństwo rekombinacji promienistej zależy od:

1. Prawdopodobieństwa odpowiedniego obsadzenia stanów w pasmie przewodnictwa i w pasmie walencyjnym  $f_e(\nu)$
2. Prawdopodobieństwa przejścia  $\frac{1}{\tau_r}$
3. Łącznej gęstości stanów elektronowych i dziurowych  $\rho(\nu)$

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

# Rekombinacja promienista pary elektron-dziura

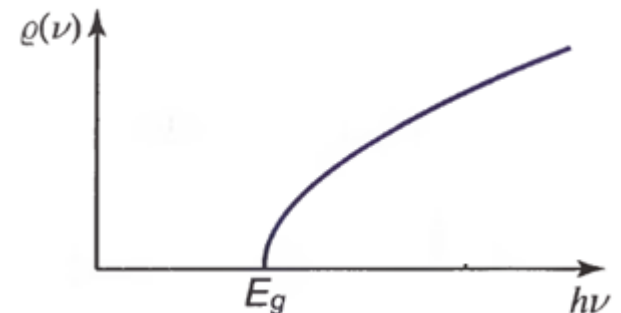
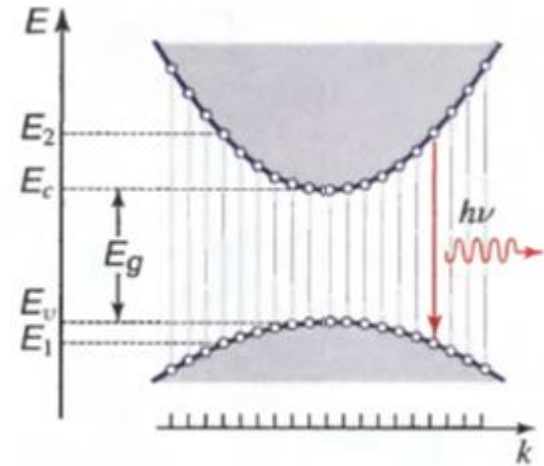
## 3. Łączna gęstość stanów

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  $m_r$ :

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

Łączna gęstość stanów:

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



# Rekombinacja promienista pary elektron-dziura

Wówczas intensywność przejścia będzie 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 intensywność przejścia:

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

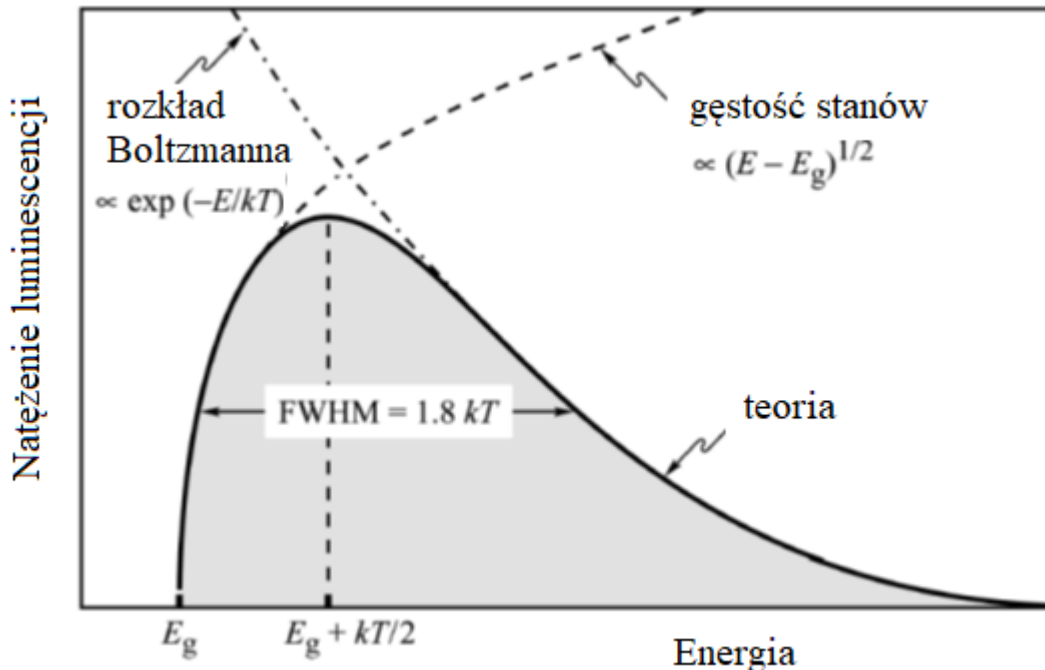
# Rekombinacja promienista pary elektron-dziura

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

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

$\tau_r$  - czas życia na rekombinację promienistą

W stanie równowagi termodynamicznej

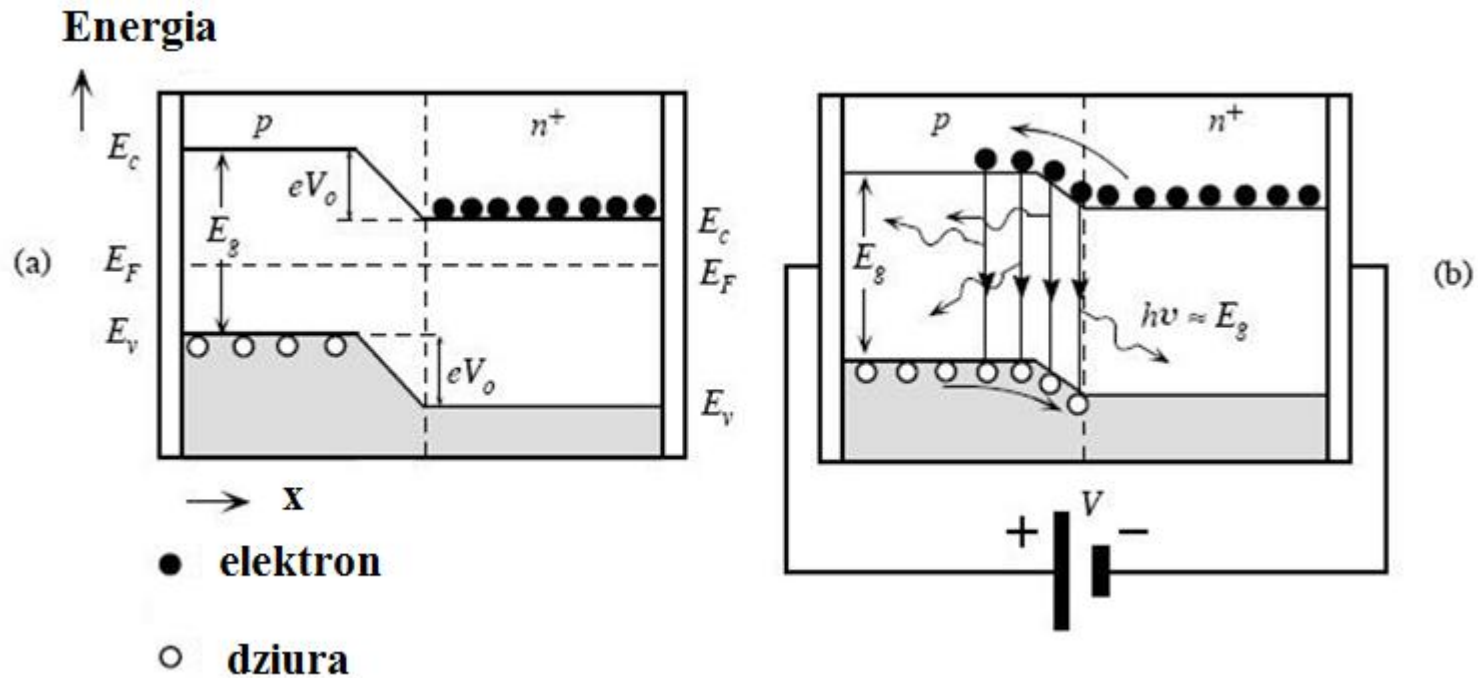


$$h\nu_p = E_g + \frac{1}{2}kT$$

$$\Delta\nu \approx 1.8 kT/h$$

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

# LED – diagram pasmowy

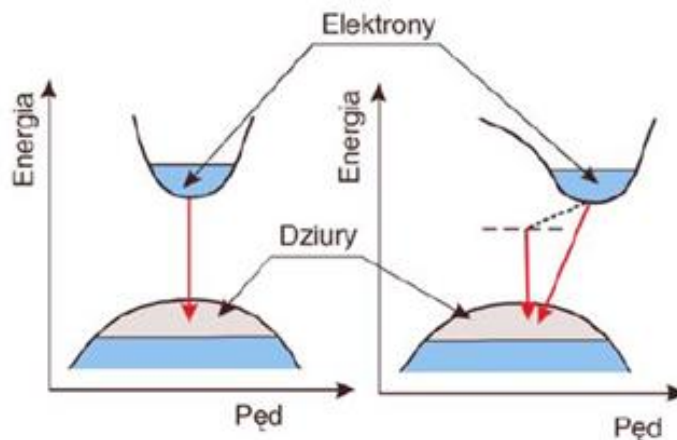


**Diagram pasmowy LED bez polaryzacji i po spolaryzowaniu w kierunku przewodzenia. Napięcie polaryzujące diodę zmniejsza barierę potencjału  $V_0$  i nośniki większościowe dyfundują do odpowiednich obszarów złącza, rekombinując w obszarze złącza.**

# Relacja dyspersji $E(k)$ i rekombinacja promienista

$$E_2 - E_1 = h\nu$$

$$p_{\text{fotonu}} \ll p_{\text{elektronu}}$$



**Przerwa prosta:**

$$p_2 - p_1 \cong 0$$

**Przerwa skośna:**

$$p_2 - p_1 \cong p_{\text{fononu}}$$

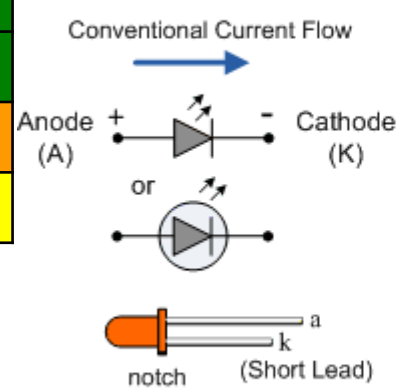
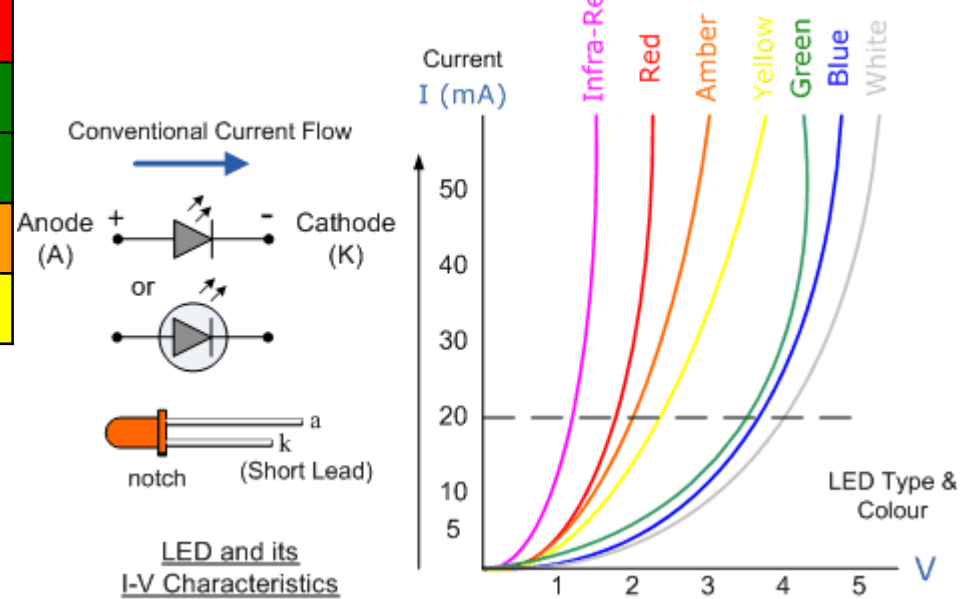
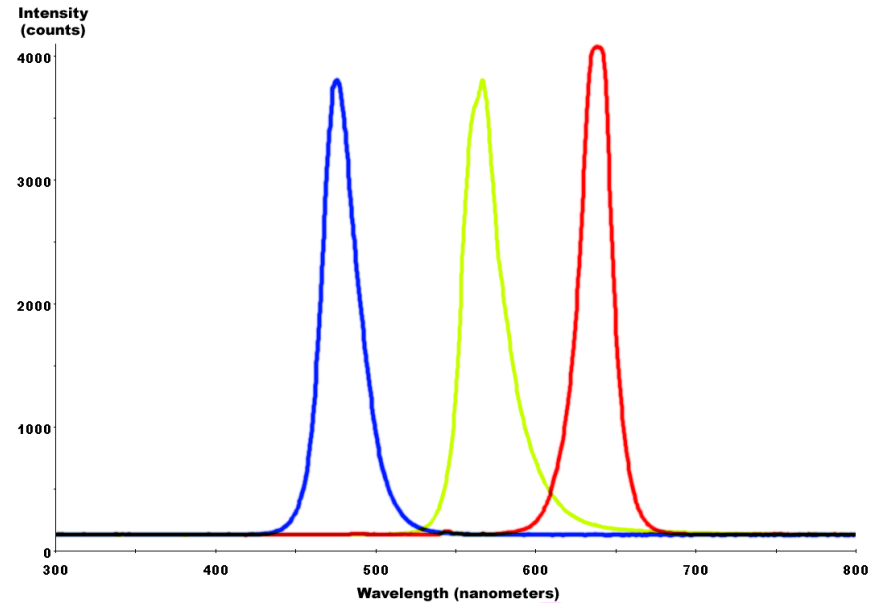
Aby mogła nastąpić emisja lub absorpcja światła, muszą zostać spełnione zasady zachowania energii i pędu (w kryształach tj. pseudopęd). Pęd fotonu jest do pominięcia w stosunku do pędu elektronu w ciele stałym. Dlatego emisja i absorpcja w półprzewodniku z prostą przerwą wzbronioną są dużo bardziej prawdopodobne niż w przypadku półprzewodnika ze skośną przerwą, gdzie w obydwu procesach musi wziąć udział trzecia cząstka – fonon. Inaczej nie zostanie spełniona zasada zachowania pędu.

# Widmo LED

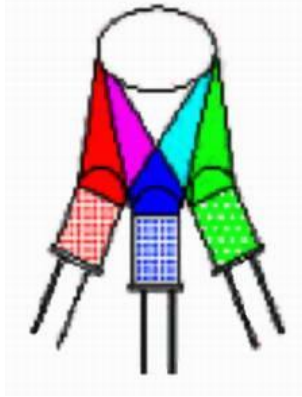
$$h\nu_p = E_g + \frac{1}{2}kT$$

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

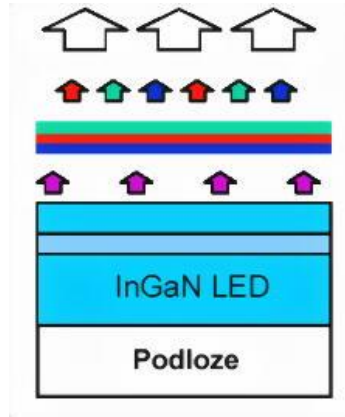
GaAsP / GaAs 655nm / czerwone
GaP 568nm / żółto-zielone
GaP 700nm / jasno czerwone
GaAsP / GaP 610nm / bursztynowe
GaP 555nm / czysta zieleń
GaAsP / GaP 655nm / czerwone o wysokiej wydajności
GaP 568nm / żółto-zielone
GaAlAs / GaAs 660nm / czerwone
InGaAlP 574nm / zielone
InGaAlP 574nm/zielone
InGaAlP 620nm / pomarańczowe
InGaAlP 595nm / żółte



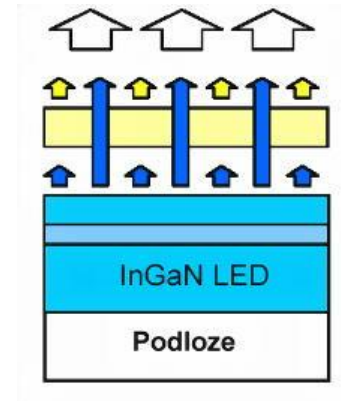
# Sposoby otrzymywania białych emiterów LED



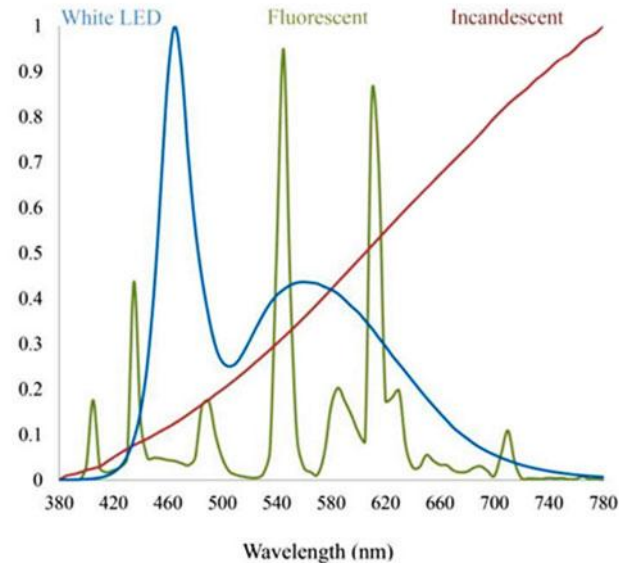
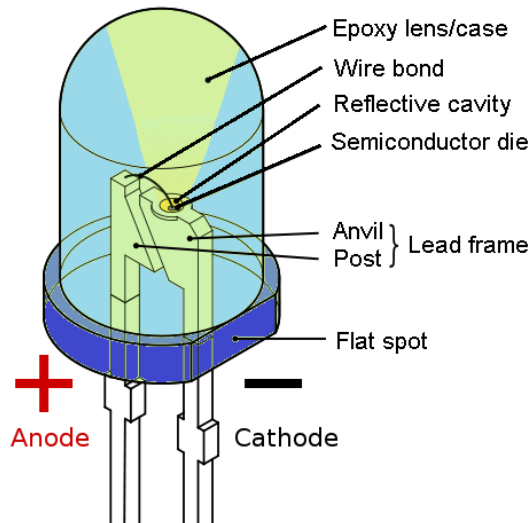
poprzez mieszanie trzech barw podstawowych



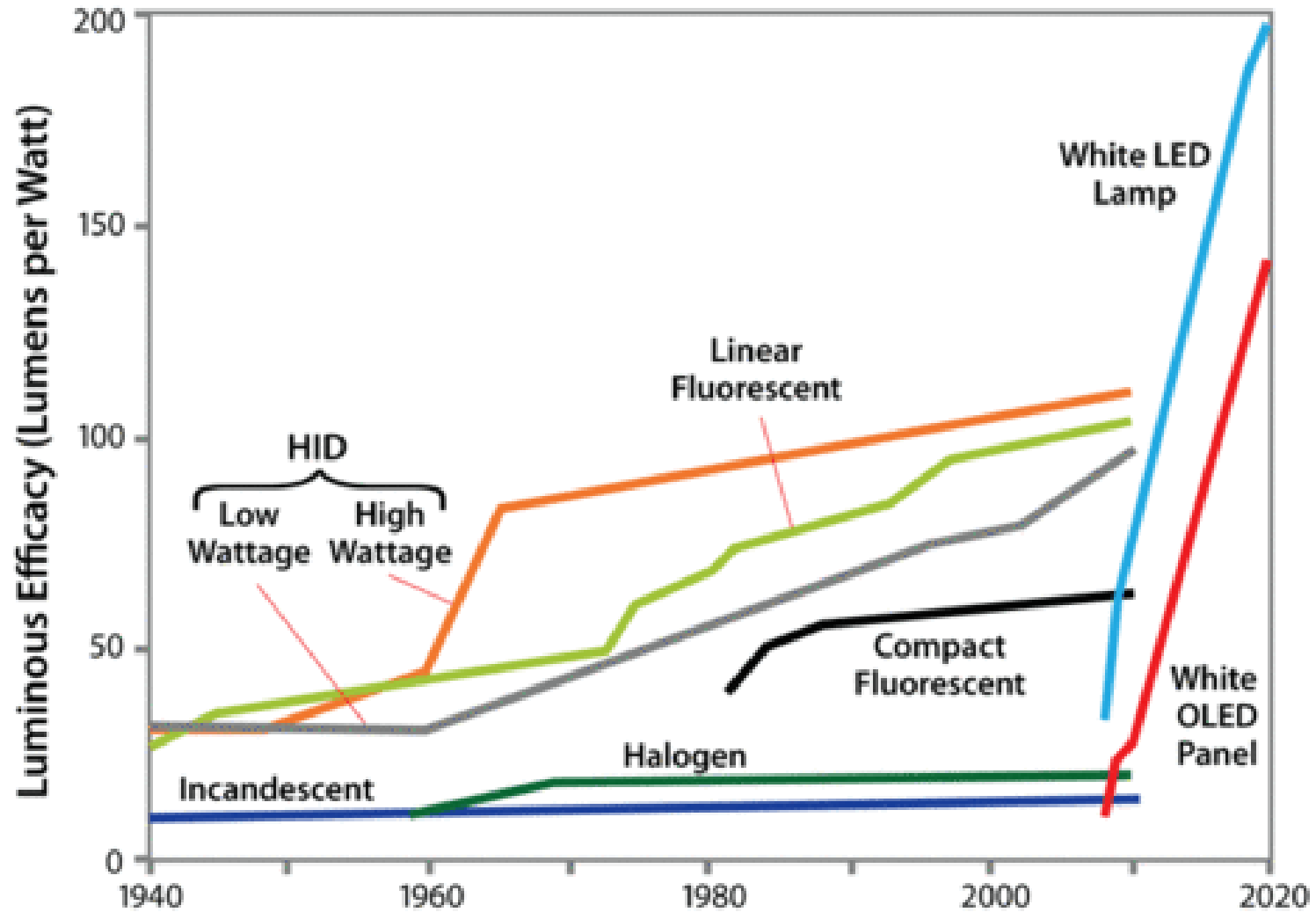
przez konwersję promieni UV w luminoforze RGB



przez częściową konwersję promieni niebieskich w luminoforze żółtym



# Wydajność świetlna LED

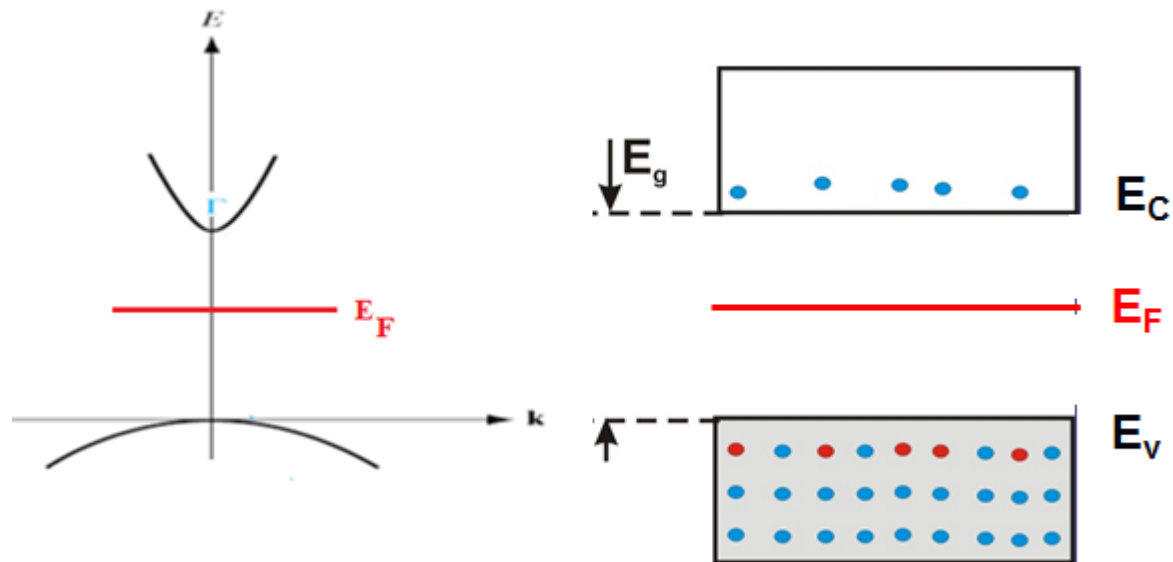


# How Many Lumens Do You Need? (240V)

Brightness	220+	400+	700+	900+	1300+
 <b>Standard</b>	25 W	40 W	60 W	75 W	100 W
 <b>Halogen</b>	18 W	28 W	42 W	53 W	70 W
 <b>CFL</b>	6 W	9 W	12 W	15 W	20 W
 <b>LED</b>	4 W	6 W	10 W	13 W	18 W

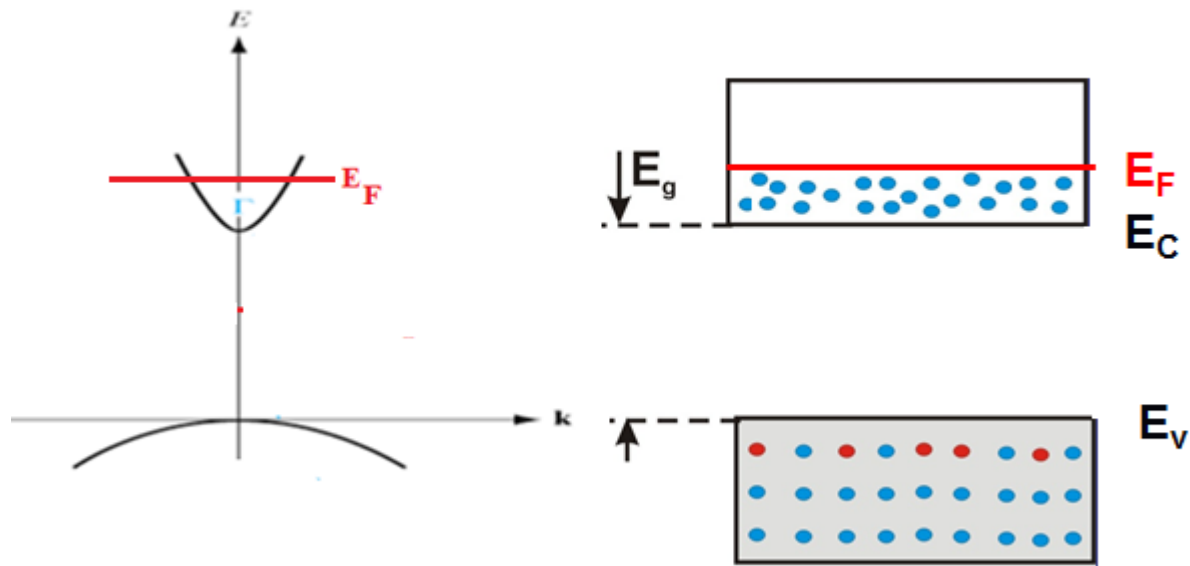
Sources: European Commission

## Półprzewodnik niezdegenerowany



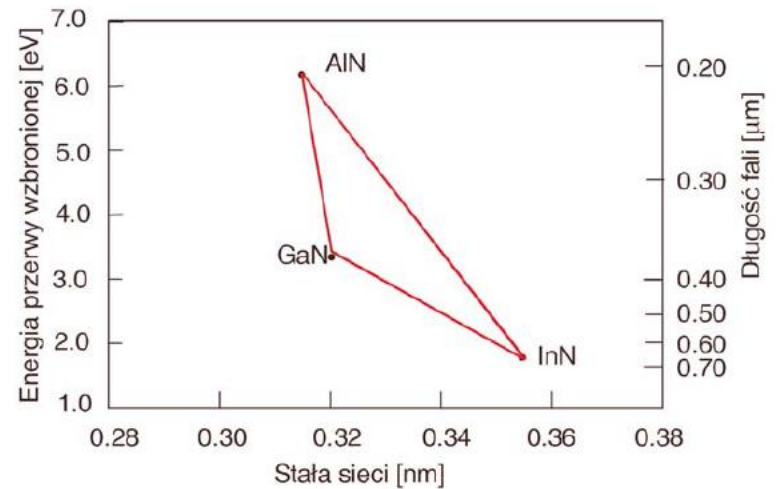
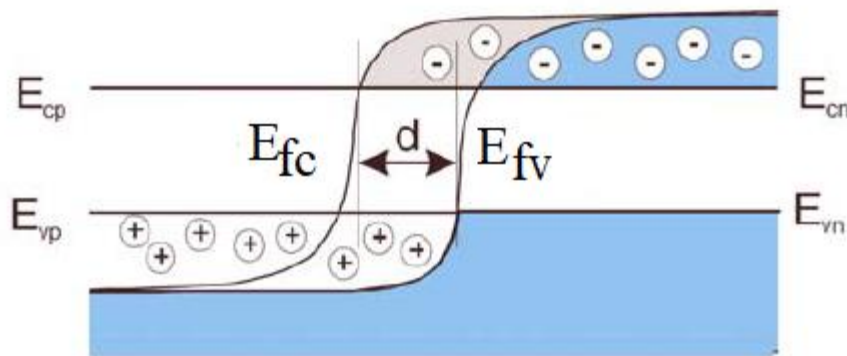
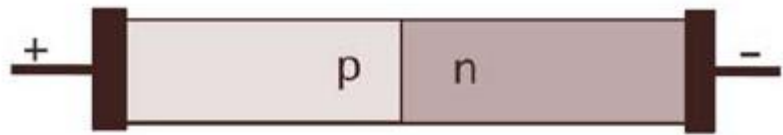
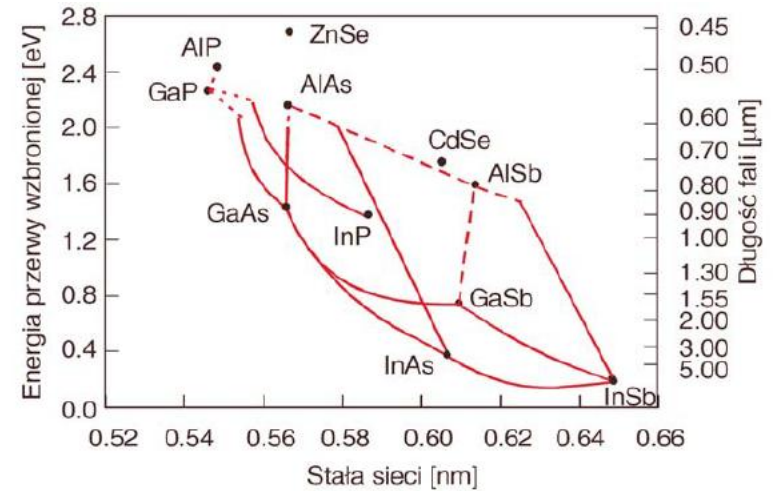
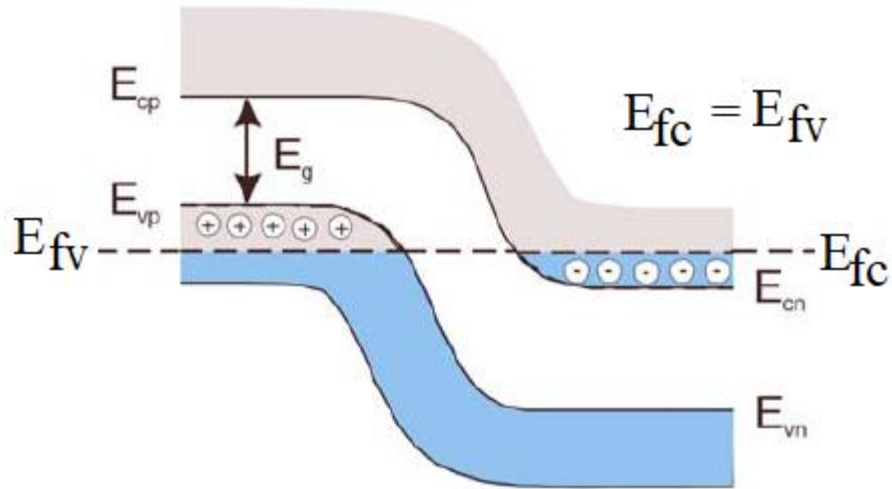
Poziom Fermiego znajduje się w obszarze przerwy wzbronionej

## Półprzewodnik zdegenerowany typu n



Poziom Fermiego znajduje się w obszarze pasma przewodnictwa

# Laser homozłączowy



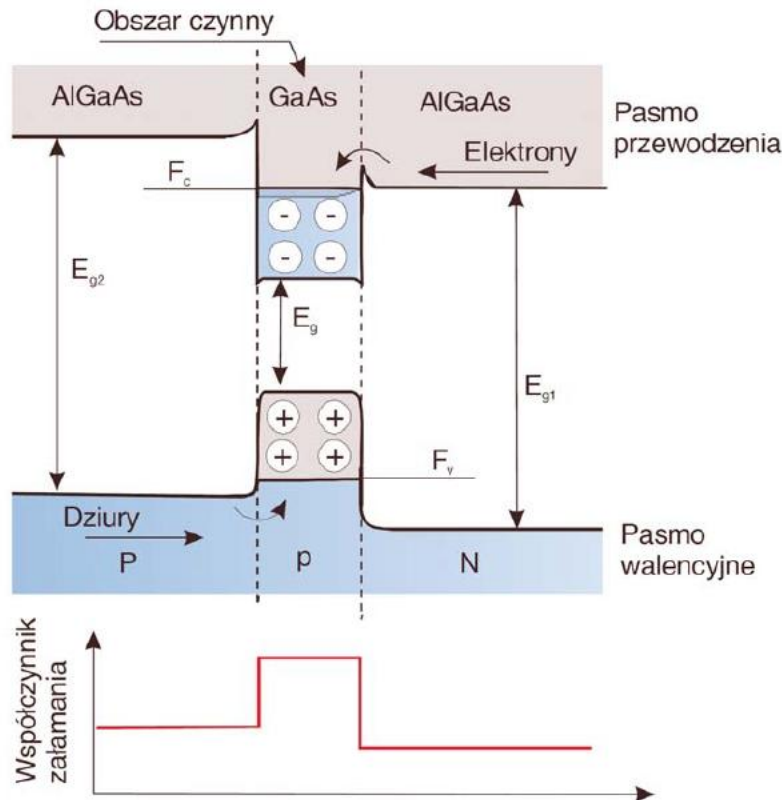
# Laser heterozłączowy

## Zalety:

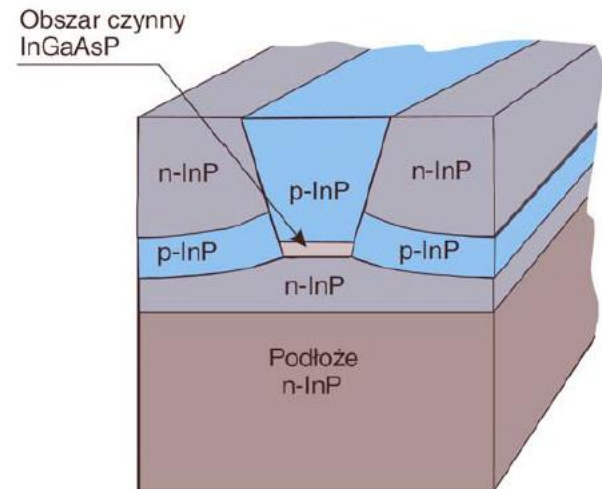
- niski i bardzo niski prąd progowy,
- ograniczony obszar dyfuzji nośników,
- duża gęstość fotonów (efekt światłowodowy)

## Wady:

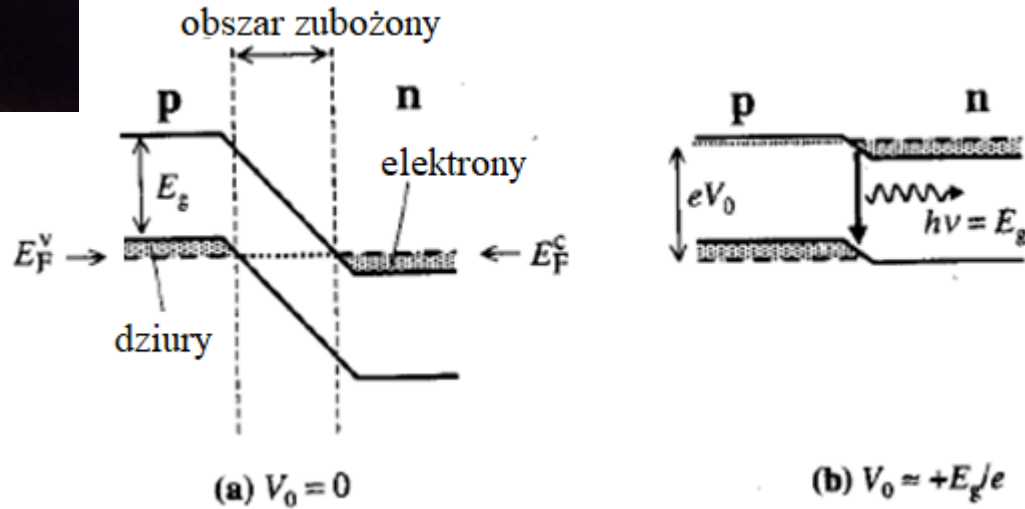
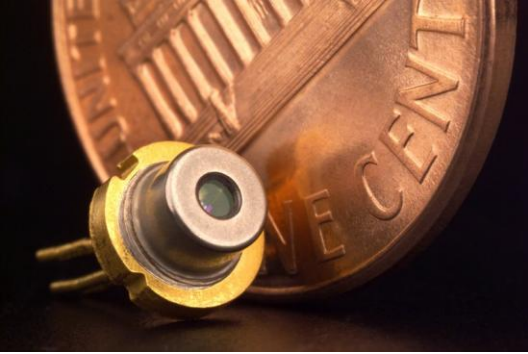
- defekty  
wynikające z różnic stałych sieci



## Przykład



# Laser półprzewodnikowy



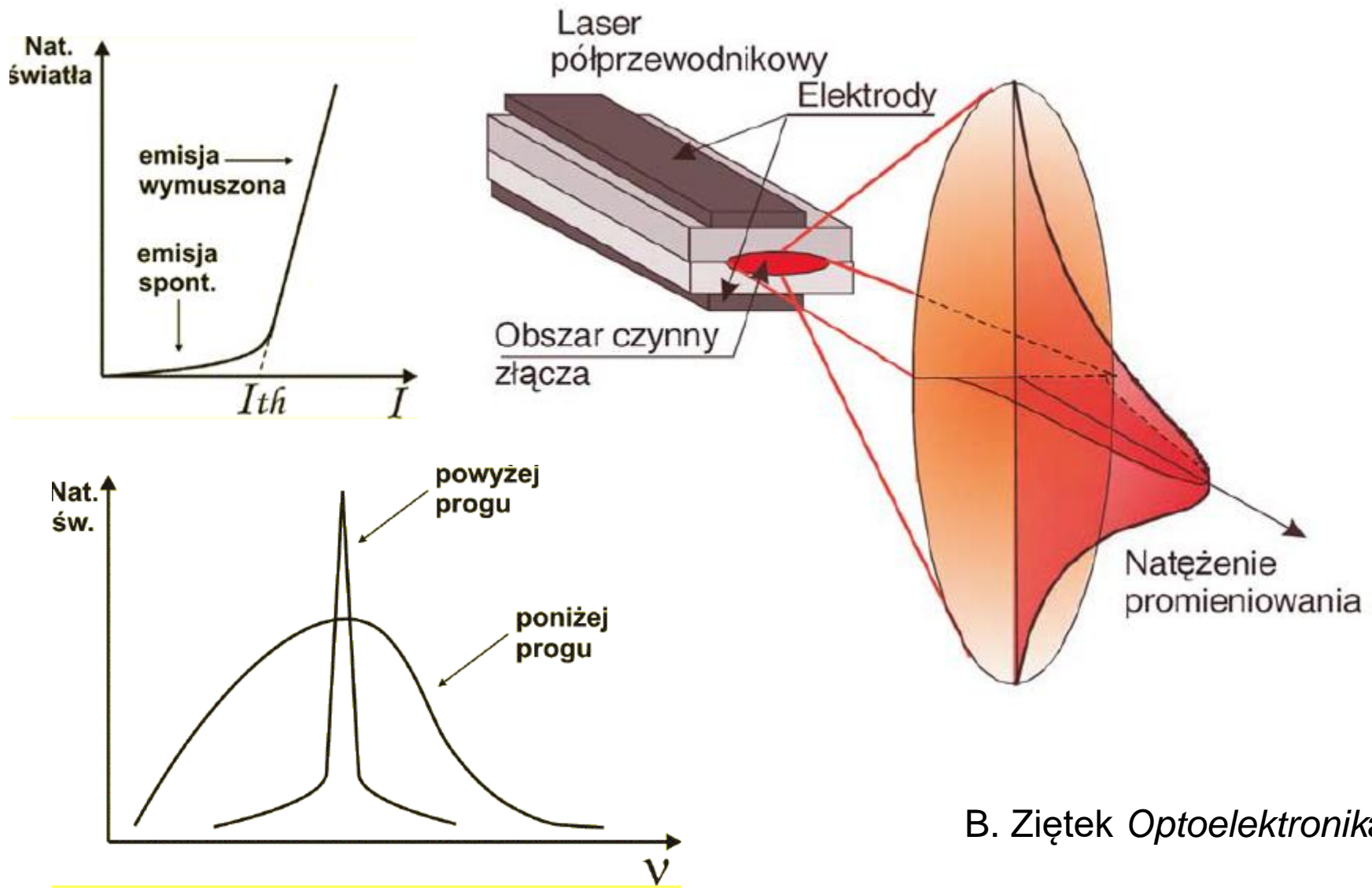
a) dioda bez polaryzacji

b) dioda spolaryzowana napięciem równym energii wzbronionej półprzewodnika.

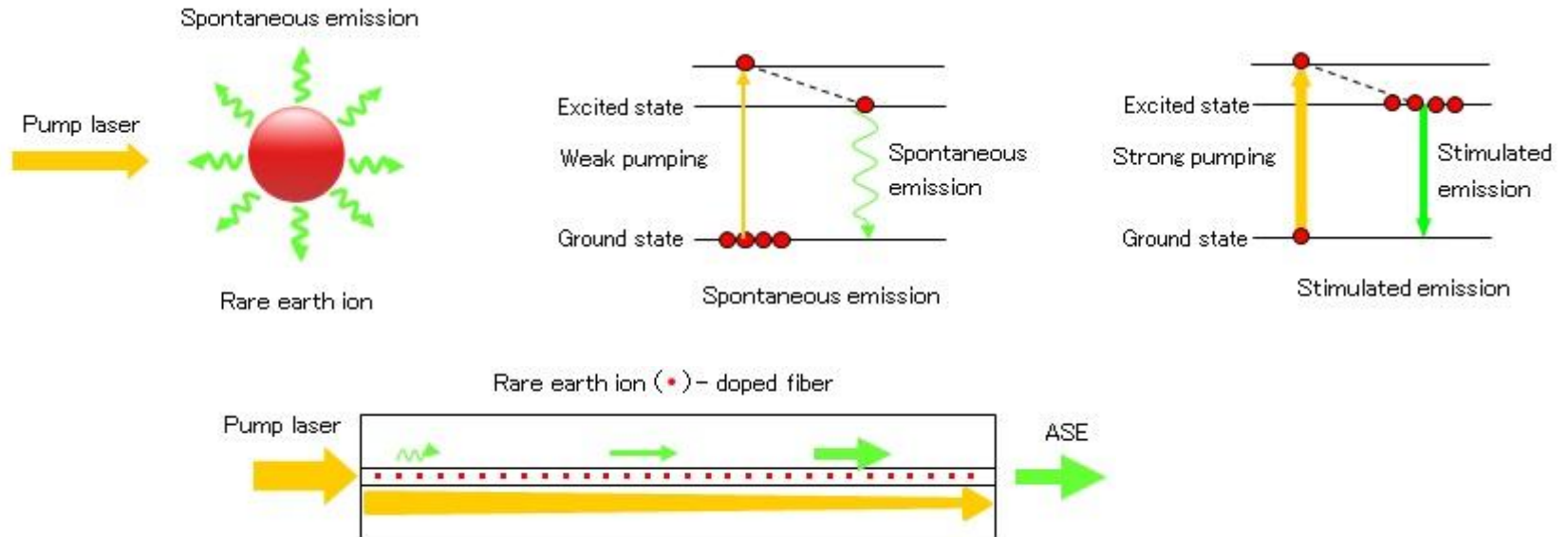
Warunek wystąpienia akcji laserowej:  $E_{fc} - E_{fv} > E_g$

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

# Właściwości prom. laserowego

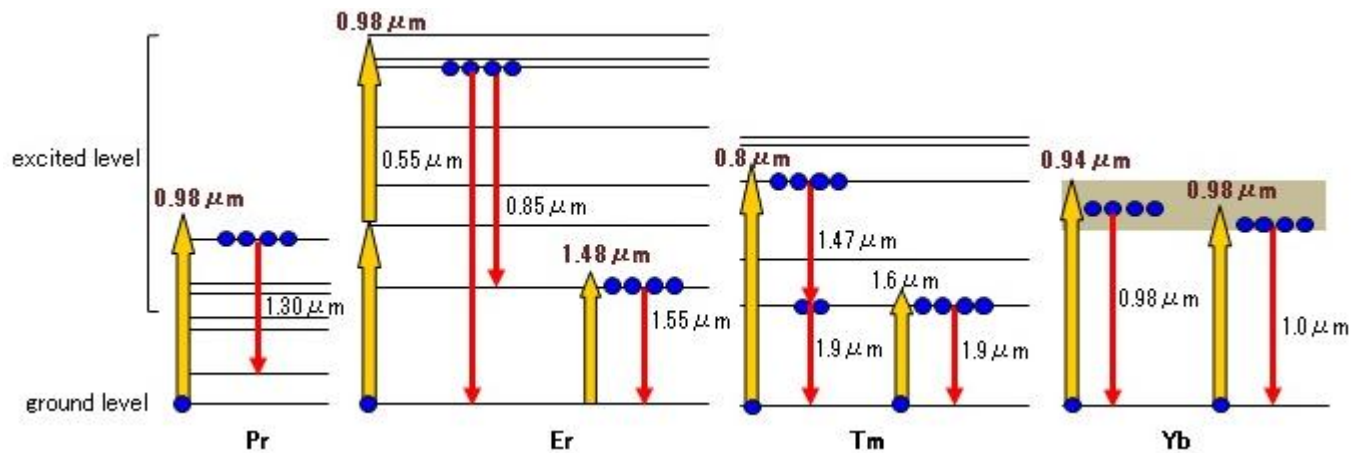
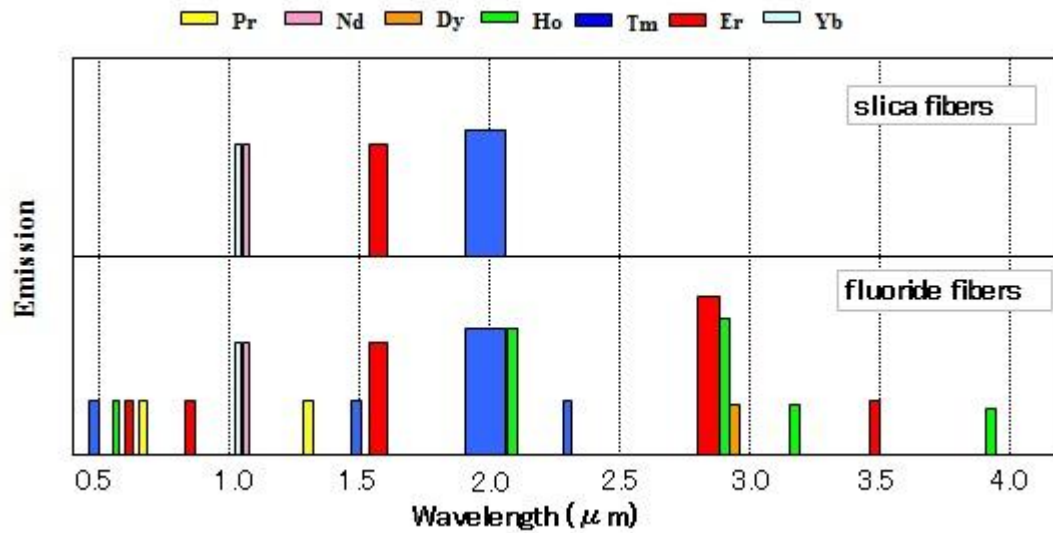


# Źródło ASE

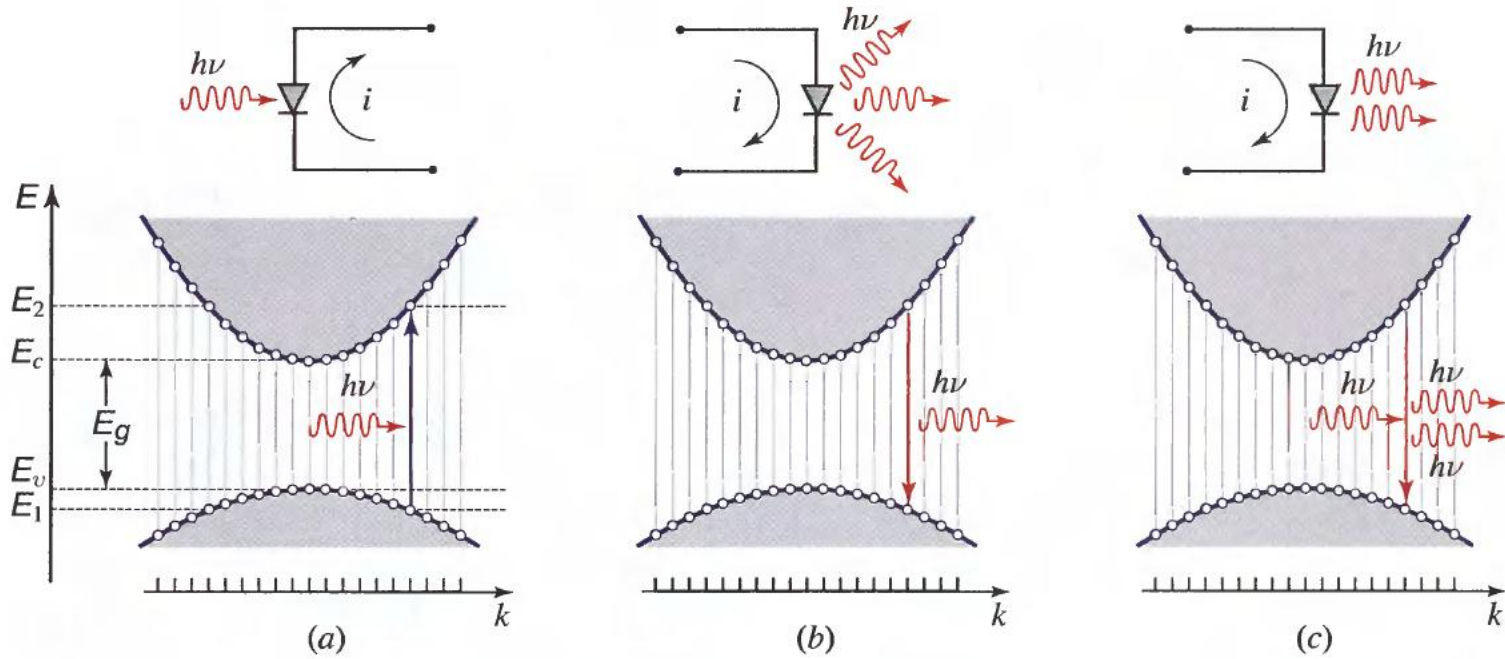


**Realizacja inwersji obsadzeń we włóknie światłowodowym domieszkowanym jonami ziem rzadkich (RE) jest łatwa, ponieważ „uwięzienie” fotonów we włóknie (zwykle  $<10\ \mu\text{m}$ ) a więc i intensywność pompowania w rdzeniu jest b. duża. Dlatego emisja wymuszona we włóknie domieszkowanym jonami ziem rzadkich jest bardzo wydajna. Stąd włókna są często używane jako źródła ASE, lasery światłowodowe i światłowodowe wzmacniacze optyczne.**

# Źródło ASE



# Złącze p-n w optoelektronice



fotodioda

LED

laser