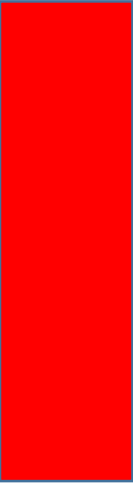


Materiały i przyrządy półprzewodnikowe



Wykład 10: Przyrządy optoelektroniki

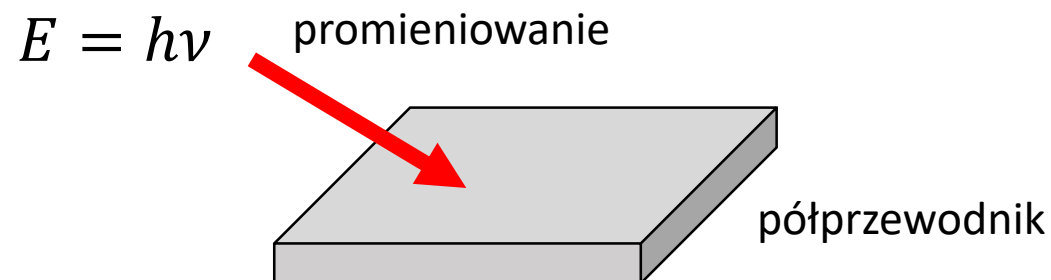
Paweł Wójcik



Plan wykładu:

1. Ogniwa słoneczne
2. Fotodetektory
3. Diody LED
4. Lasery półprzewodnikowe

Absorbpcja



Oddziaływanie promieniowania elektromagnetycznego z materiałem półprzewodnikowym:

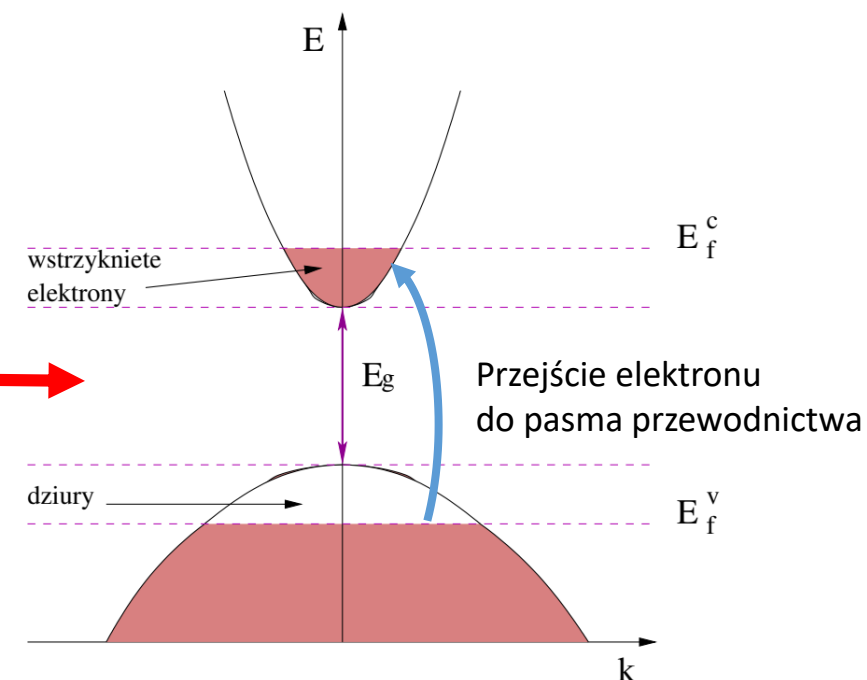
1. oddziaływanie fotonu z siecią krystaliczną – skutkuje powstaniem ciepła,
2. oddziaływanie fotonu z domieszkami i defektami sieci,
3. **oddziaływanie fotonu z elektronami walencyjnymi** – dla odpowiednich energii padającego elektronu $E > E_g$ dochodzi do wzbudzenia elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa – kreacja par elektron dziura.

energia elektronu w pasmie
przewodnictwa

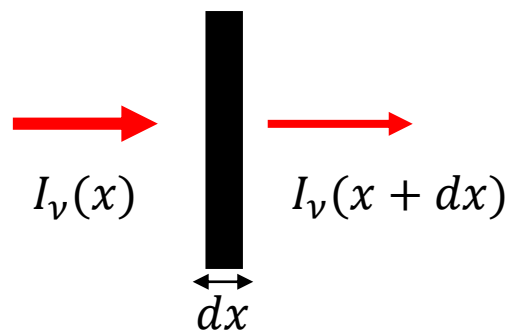
$$h\nu = E_1 - E_2$$

energia elektronu w pasmie
walencyjnym

$E = h\nu$



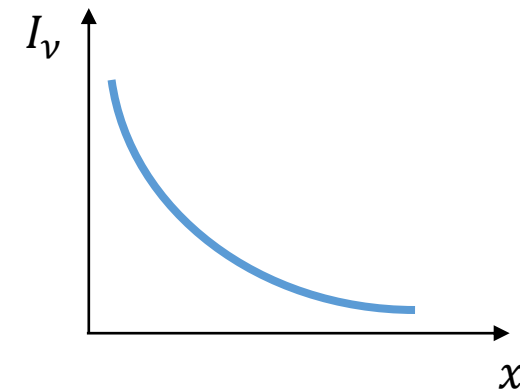
Absorbpcja



Zmiana strumienia fotonów o częstości ν w wyniku przejścia przez materiał półprzewodnikowy o grubości dx

$$I_v(x + dx) - I_v(x) = \frac{dI_v(x)}{dx} dx = -\alpha I_v(x) dx$$

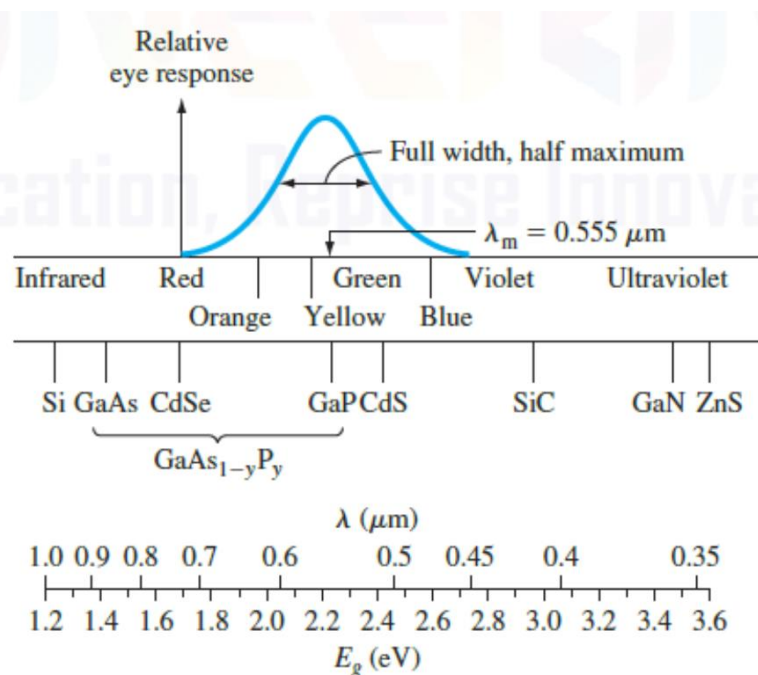
$$\frac{dI_v(x)}{dx} = -\alpha I_v(x) \longrightarrow I_v(x) = I_{v0} e^{-\alpha x}$$



gdzie α – współczynnik absorpcji.

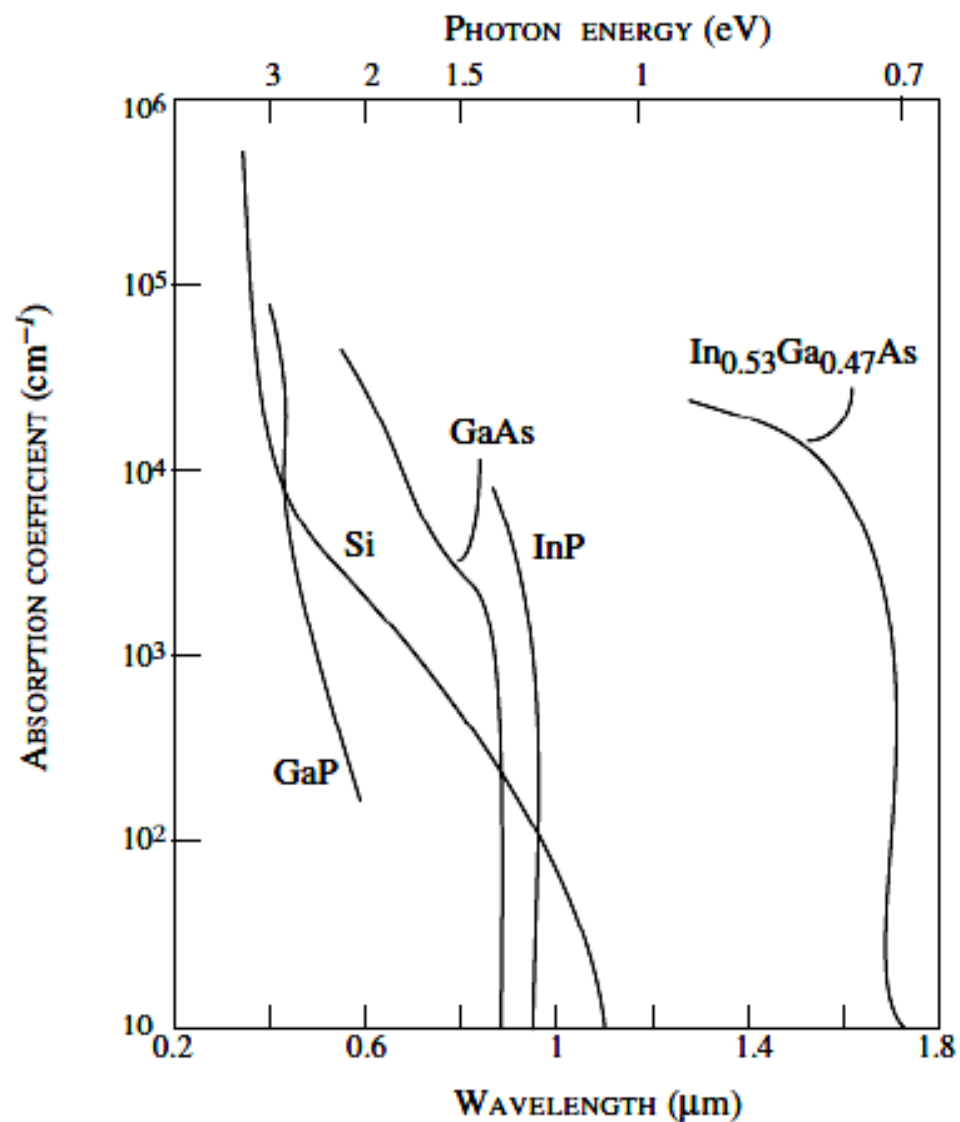
Jeżeli założymy, że jeden foton generuje jedną parę elektron-dziura, to częstość generacji par elektron dziura

$$g = \frac{\alpha I_v(x)}{h\nu}$$



- Krzem i german absorbują cały zakres światła widzialnego
- Fosforek galu jest przezroczysty dla światła czerwonego

Absorbpcja

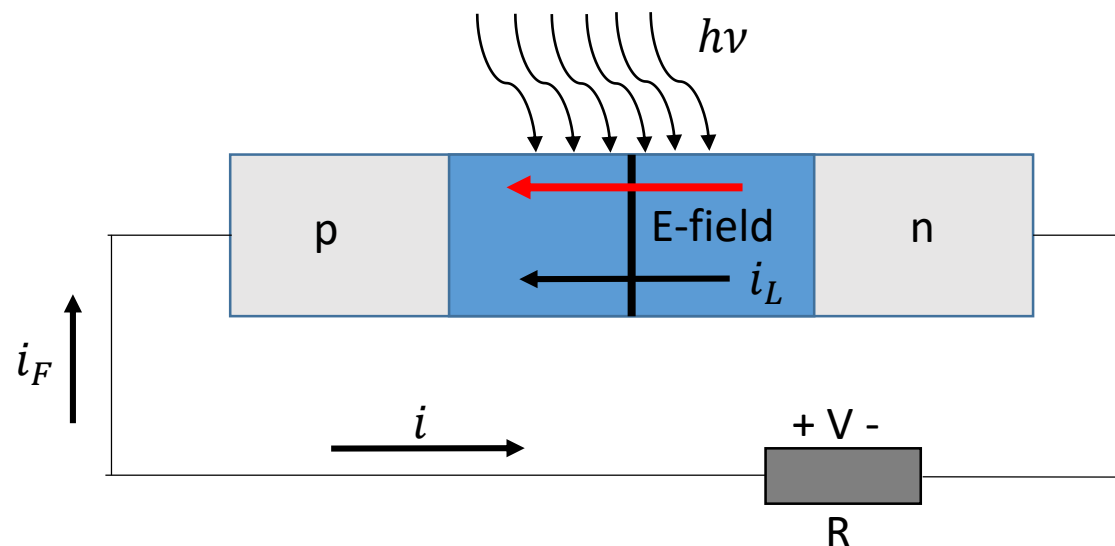


Współczynnik absorpcji w funkcji długości fali padającego promieniowania dla różnych materiałów półprzewodnikowych

- Współczynnik absorpcji silnie zależy od energii promieniowania
- Współczynnik absorpcji jest równy zero, dla energii padającego fotonu mniejszej od przerwy energetycznej.

Ogniwa słoneczne

Ogniwa słoneczne – w najprostszej formie złącze p-n dla $V_{bias} = 0$, które zamienia energię fotonu na energię elektryczną.

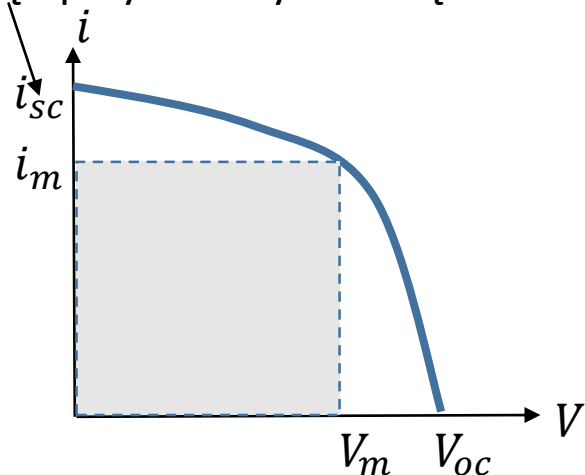


Promieniowanie padające na warstwę zubożoną tworzy w niej pary elektron-dziura, które przez wbudowane pole elektryczne są separowane wytwarzając fotoprąd o natężeniu I_L , płynący w kierunku zaporowym. Przepływ prądu I_L skutkuje spadkiem napięcia na rezystorze R , który polaryzuje złącze p-n w kierunku przewodzenia, co prowadzi do przepływu prądu I_F

$$i = i_L - i_F = i_L - i_s \left[\exp \left(\frac{eV}{k_B T} \right) - 1 \right]$$

Ogniwa słoneczne

Prąd przy zerowym obciążeniu



Napięcie przy nieskończonym obciążeniu

Moc dostarczona do obciążenia

$$P = i \cdot V = i_L V - i_S \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right] V$$

Napięcie, dla którego moc jest największa

$$\frac{dP}{dV} = 0 = i_L - i_S \left[\exp\left(\frac{eV_m}{k_B T}\right) - 1 \right] - i_S V_m \left(\frac{e}{k_B T} \right) \exp\left(\frac{eV_m}{k_B T}\right)$$

$$\left(1 + \frac{eV_m}{k_B T} \right) \exp\left(\frac{eV_m}{k_B T}\right) = 1 + \frac{i_L}{i_S}$$

Współczynnik konwersji – stosunek mocy elektrycznej na wyjściu do mocy światła na wejściu

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \times 100\% = \frac{i_m V_m}{P_{in}} \times 100\%$$

Współczynnik wypełnienia – pokazuje w jakim stopniu charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa jest zbliżona do idealnej, czyli do prostokąta (0.7-0.8)

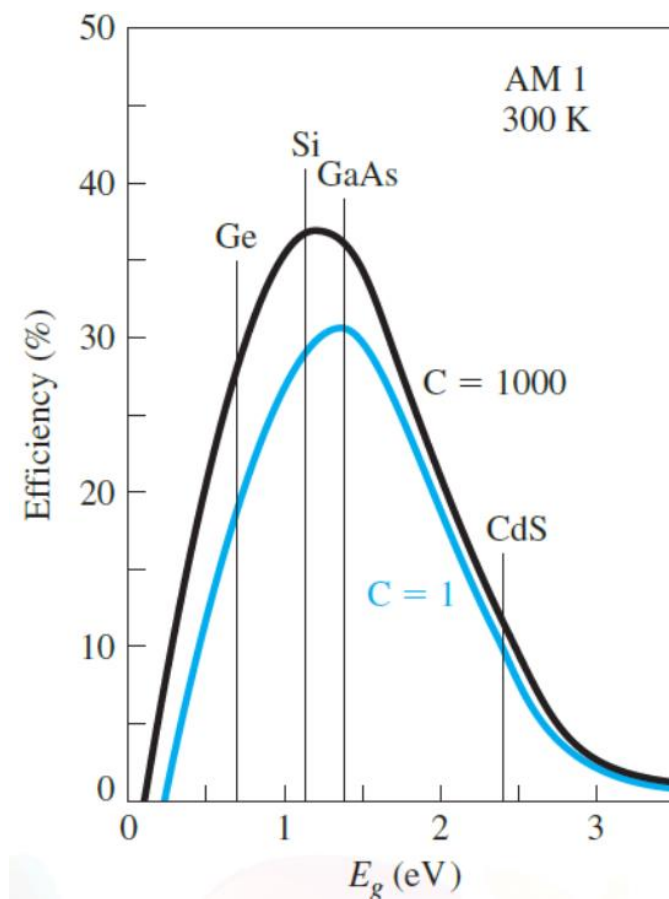
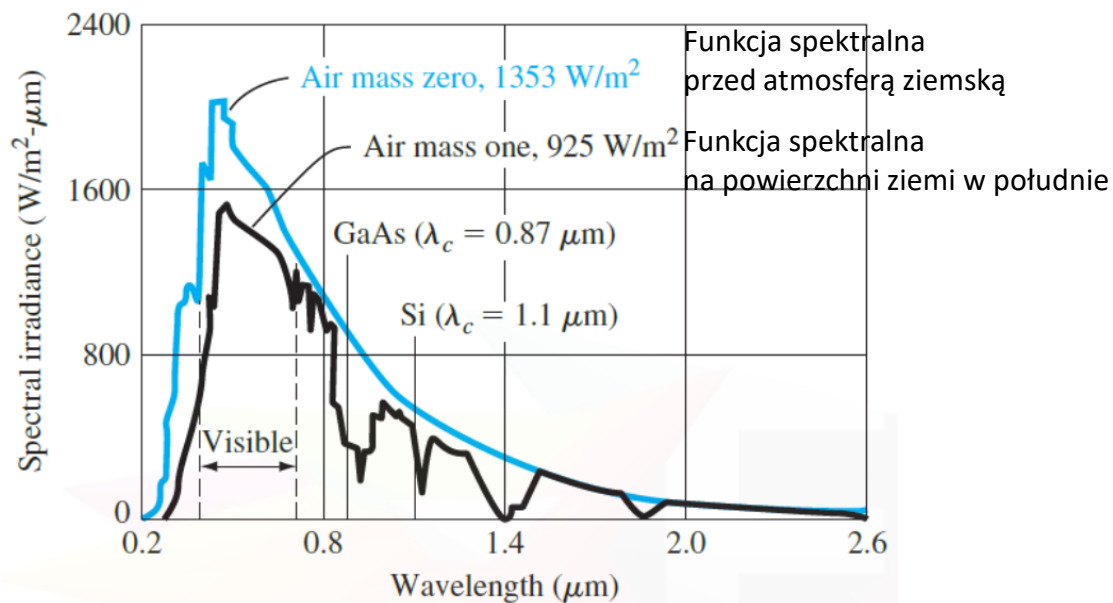
$$FF = \frac{i_m V_m}{i_{sc} V_{oc}} \times 100\%$$

Ogniwa słoneczne

- Maksymalna efektywność ogniw słonecznych opartych na Si wynosi 28%. Pozostałe efekty pasożytnicze tj. rezystancja, odbicie od powierzchni obniżają efektywność do 10-15 %.
- W rzeczywistych układach możemy stosować również soczewkowanie optyczne choć jak wynika z wykresu zwiększenie natężenia padającego promieniowania nie zwiększa istotnie efektywności ogniw słonecznych.

Inne architektury ogniw słonecznych:

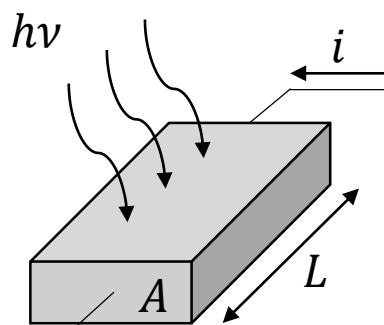
1. Ogniwa słoneczne oparte na heterozłączach
2. Ogniwa słoneczne z amorficznego Si – najbardziej popularne
3. Ogniwa słoneczne oparte na perowskitach.



Fotodetektory

Fotodetektory – służą do wykrywania fotonów (promieniowania) o określonej długości fali. Zamieniają sygnał optyczny na sygnał elektryczny. Do podstawowych fotodetektorów należą: fotorezystor, fotodioda, fototranzystor.

FOTOREZYSTOR



W wyniku promieniowania w półprzewodniku dochodzi do kreacji par elektron-dziura. Pojawiające nośniki nadmiarowe zmieniają przewodność półprzewodnika

W stanie równowagi

$$\sigma_0 = e(\mu_n n_0 + \mu_p p_0)$$

Po generacji nośników nadmiarowych

$$\sigma = e(\mu_n (n_0 + \delta n) + \mu_p (p_0 + \delta p))$$

Zakładając warunek neutralności ładunkowej $\delta n = \delta p$

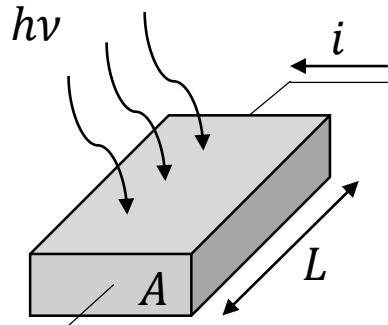
$$\sigma = e(\mu_n n_0 + \mu_p p_0) + e(\delta p)(\mu_n + \mu_p)$$

Stąd zmiana przewodności w wyniku oddziaływania z promieniowaniem

$$\Delta\sigma = e(\delta p)(\mu_n + \mu_p) \quad \text{gdzie} \quad \delta p = G_L \tau_p \leftarrow \begin{array}{l} \text{częstość generacji nośników} \\ \text{nadmiarowych} \end{array} \leftarrow \text{czas życia nośników nadmiarowych}$$

Fotodetektory

FOTOREZYSTOR



Całkowita gęstość prądu z praw Maxwella

$$j = j_0 + j_L = (\sigma_0 + \Delta\sigma)\mathcal{E}$$

Stąd fotoprąd

$$i_L = \Delta\sigma AE = eG_L\tau_p(\mu_n + \mu_p)AE$$

Czas potrzebny na przejście ładunku przez przewodnik

$$t_n = \frac{L}{V_g} = \frac{L}{\mu_n E} \longrightarrow I_L = eG_L \left(\frac{\tau_p}{t_n} \right) \left(1 + \frac{\mu_p}{\mu_n} \right) AL$$

Wzmocnienie – stosunek fotoprądu do prądu w przypadku idealnym

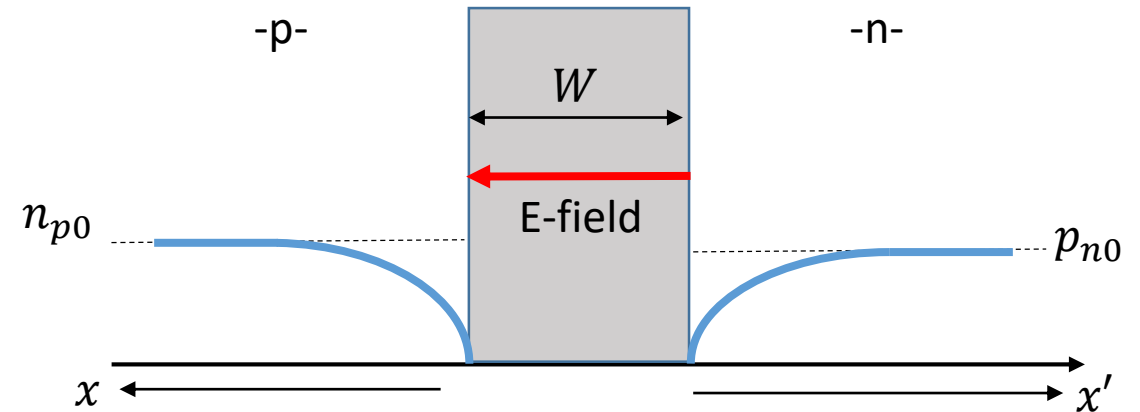
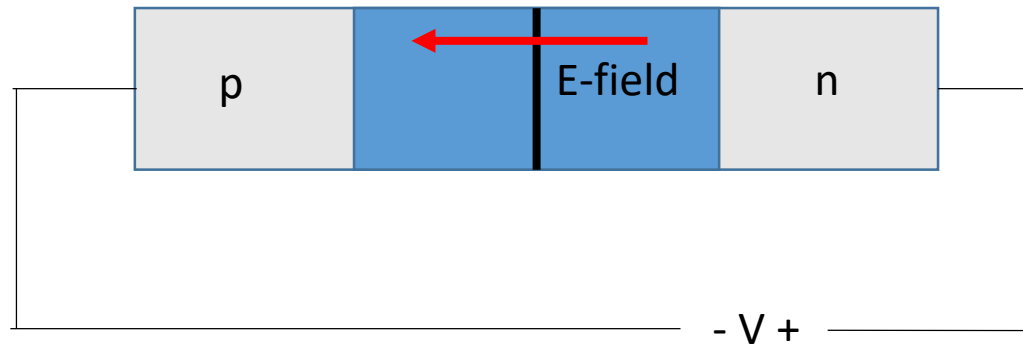
$$\Gamma_{ph} = \frac{i_L}{eG_L AL} = \left(\frac{\tau_p}{t_n} \right) \left(1 + \frac{\mu_p}{\mu_n} \right)$$

Opis działania:

- Foton o energii $h\nu > E_g$ wzbudza elektrony z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa.
- Elektrony nadmiarowe w pasmie przewodnictwa szybko wypływają przez elektrodę anody.
- Chcąc zachować neutralność ładunkową elektrony z katody rekompensują ubytek elektronów nadmiarowych, a zatem wypływają z katody i trafiają do anody.
- Przy pojedynczym wzbudzeniu, taki cykl trwa dopóki nie nastąpi rekombinacja nośników nadmiarowych, która zdeterminowana jest czasem życia tych nośników.

Fotodetektory

FOTODIODA – złącze p-n spolaryzowane w kierunku zaporowym



Rozkład nośników mniejszościowych dla złącza p-n spolaryzowanego w kierunku zaporowym

Opis działania:

- Foton o energii $h\nu > E_g$ wzbudza elektrony z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa.
- W warstwie zubożonej, pole elektryczne szybko odprowadza wzbudzone elektrony do półprzewodnika typu n oraz wzbudzone dziury do półprzewodnika typu p.
- Wzbudzenie par elektron-dziura następuje również w obszarach neutralnych n i p, w których zakłada się, że pole elektryczne jest równe zero.
- Korzystne jest, aby obszar czynny fotodiody (obszar zubożony) był jak największy – dioda PIN.
- Istnieją diody działające w zakresie jonizacji lawinowej.

Fotodetektory

FOTODIODA

Równanie dynamiki nośników nadmiarowych w obszarze poza warstwą zubożoną (pole elektryczne równe zero)

$$D_n \frac{\partial^2(\delta n_p)}{\partial x^2} + G_L - \frac{\delta n_p}{\tau_{n0}} = \frac{\partial(\delta n_p)}{\partial t}$$

W stanie ustalonym

$$\frac{\partial^2(\delta n_p)}{\partial x^2} - \frac{\delta n_p}{L_n^2} = -\frac{G_L}{D_n} \qquad L_n = D_n \tau_{n0}$$

Równanie różniczkowe niejednorodne II rzędu z rozwiązaniem ogólnym

$$\delta n_p = A e^{-x/L_n} + G_L \tau_{n0}$$

Warunki brzegowe

$$n_p(x=0) = 0 \rightarrow \delta n_p(x=0) = -n_{p0}$$

Stąd koncentracja nośników nadmiarowych

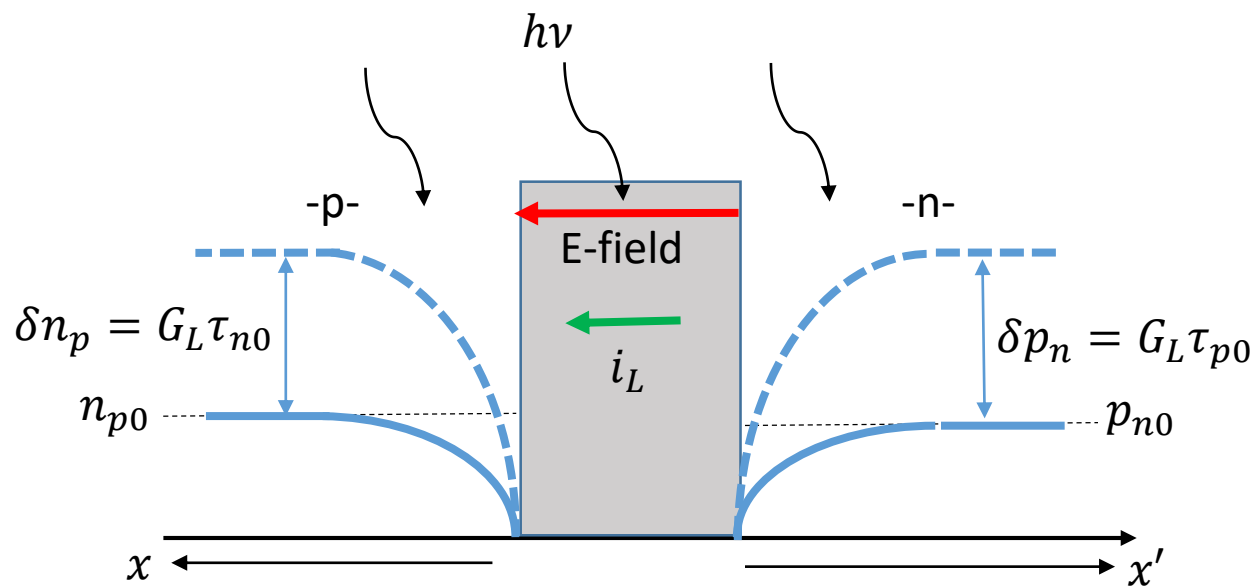
$$\delta n_p = -(G_L \tau_{n0} + n_{p0}) e^{-x/L_n} + G_L \tau_{n0}$$

$$\delta p_n = -(G_L \tau_{p0} + p_{n0}) e^{-x'/L_p} + G_L \tau_{p0}$$



Fotodetektory

FOTODIODA



Prąd dyfuzyjny

$$j_n = eD_n \frac{d(\delta n_p)}{dx} \Big|_{x=0} = \frac{eD_n}{L_n} (G_L \tau_{n0} + n_{p0}) = eG_L L_n + \frac{eD_n n_{p0}}{L_n}$$

$$j_p = eD_p \frac{d(\delta p_n)}{dx} \Big|_{x'=0} = \frac{eD_p}{L_p} (G_L \tau_{p0} + p_{n0}) = eG_L L_p + \frac{eD_p p_{n0}}{L_p}$$

prąd diody spolaryzowanej
w kierunku zaporowym

Całkowity fotoprąd

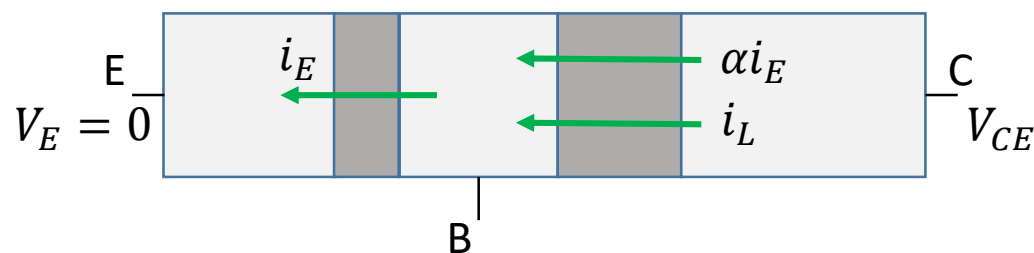
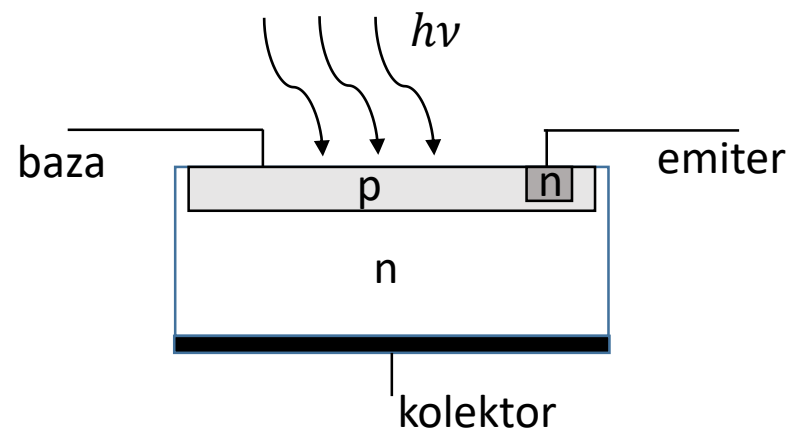
$$j_L = eG_L W + eG_L L_n + eG_L L_p = e(W + L_n + L_p)G_L$$



Prąd powstały w warstwie zubożonej o szerokości W, $I_L = e \int G_L dx$

Fotodetektory

FOTOTRANZYSTOR



Opis działania:

- Tranzystor ma duży obszar złącza B-C (obszar czynny) spolaryzowanego w kierunku zaporowym i zazwyczaj działa w układzie otwartej bramki.
- W obszarze czynnym dochodzi do generacji par elektron-dziura, które są przemieszczane przez pole elektryczne do bazy (dziury) i kolektora (elektrony).
- Dla założonej konfiguracji elektrony nadal płyną z obszaru emitera do obszaru bramki przez złącze B-E

$$i_E = \alpha i_E + i_L$$

Dla konfiguracji otwartej bramki $i_E = i_C$

$$i_C = \frac{i_L}{1 - \alpha} = (1 + \beta)i_L$$

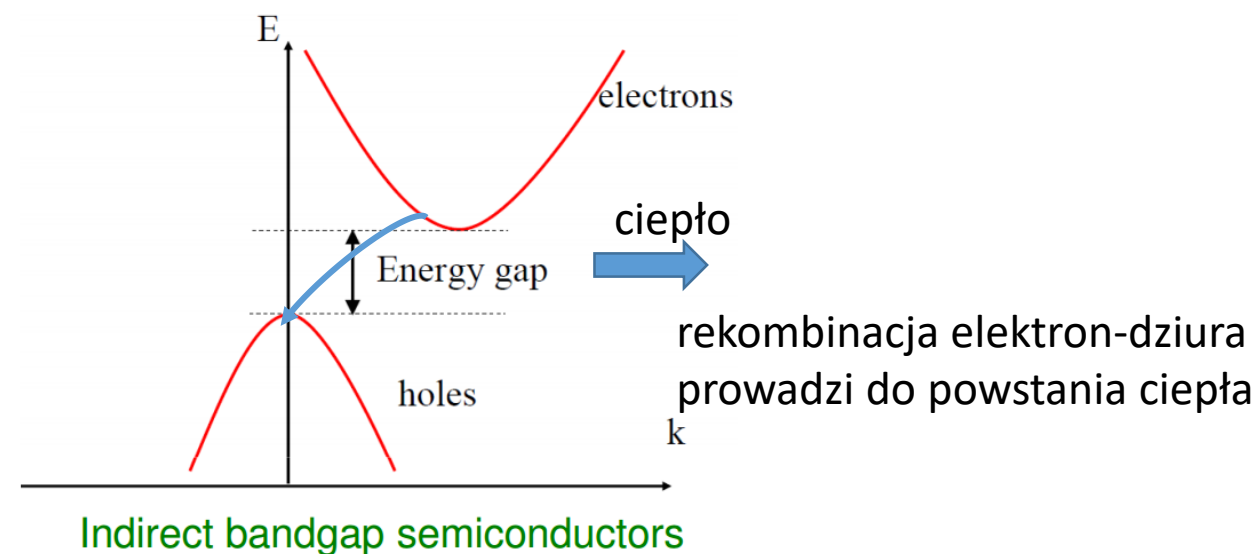
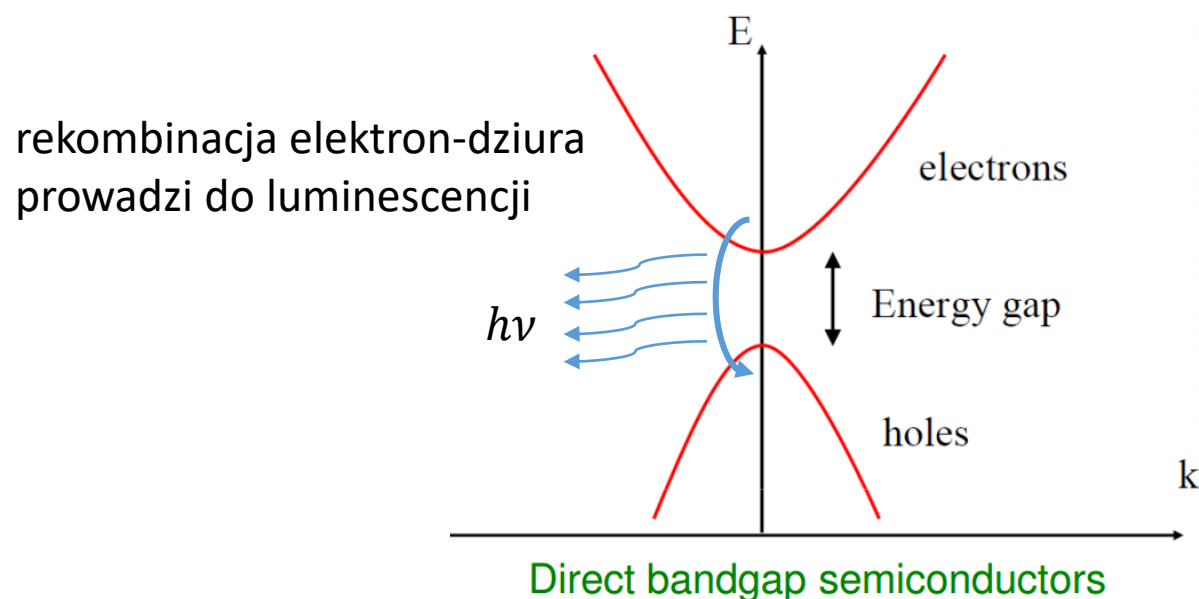
Wzmocnienie fotoprądu o czynnik $(1 + \beta)$

Fotoluminescencja i elektroluminescencja

Luminescencja – zjawisko emisji fotonu w wyniku przejścia elektronu ze stanu wzbudzonego do stanu podstawowego.

- Jeżeli wzbudzenie elektronu nastąpiło w wyniku absorpcji innego fotonu to zjawisko takie nazywamy **fotoluminescencją**.
- Jeżeli wzbudzenie elektronu nastąpiło w wyniku oddziaływania z polem elektrycznym zjawisko to nosi nazwę **elektroluminescencji**.

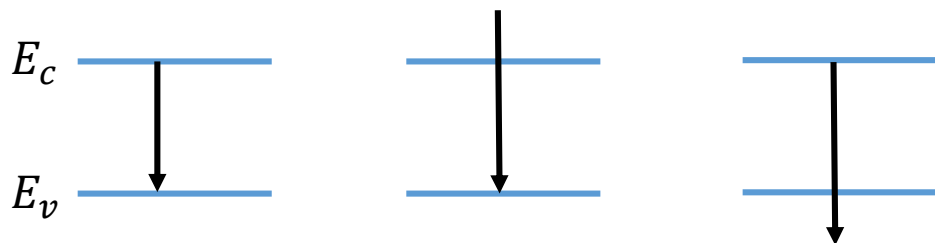
Dla półprzewodników w przerwą prostą, rekombinacja elektron-dziura prowadzi do emisji fotonu – luminescencja.



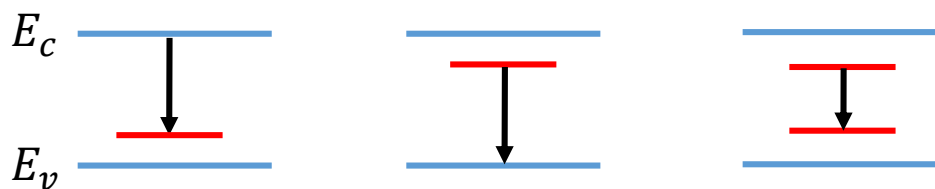


Fotoluminescencja i elektroluminescencja

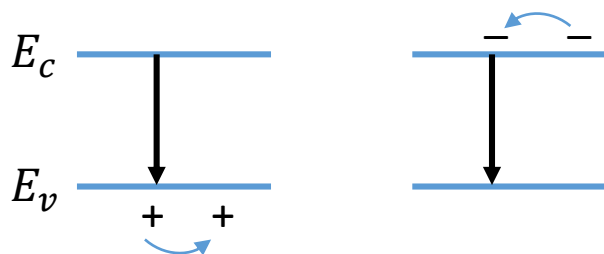
Podstawowe przejścia międzypasmowe



Przejścia międzypasmowe pomiędzy stanami domieszek

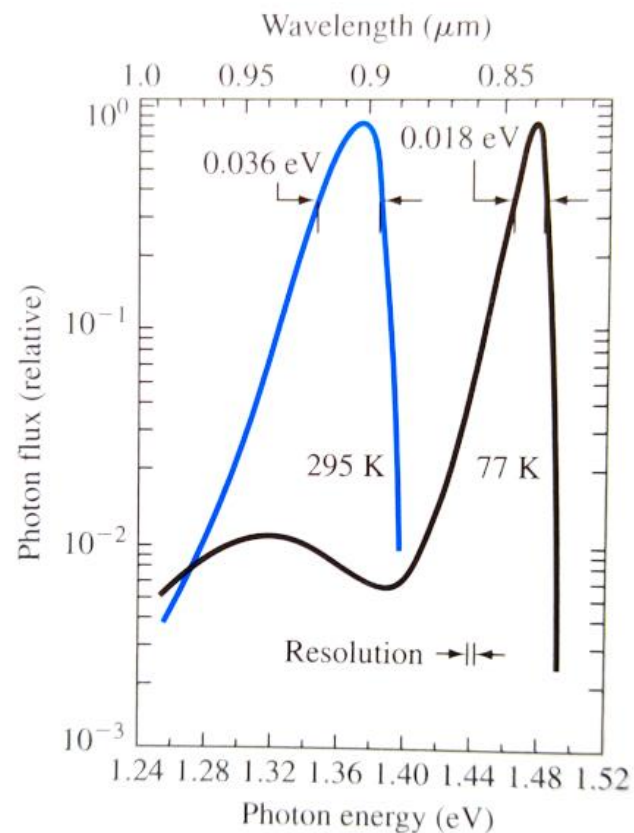


Rekombinacja Augera – bez emisji fotonu



Częstość emisji spontanicznej

$$I(\nu) \sim \nu^2 (h\nu - E_g)^{1/2} \exp \left[\frac{-(h\nu - E_g)}{k_B T} \right]$$

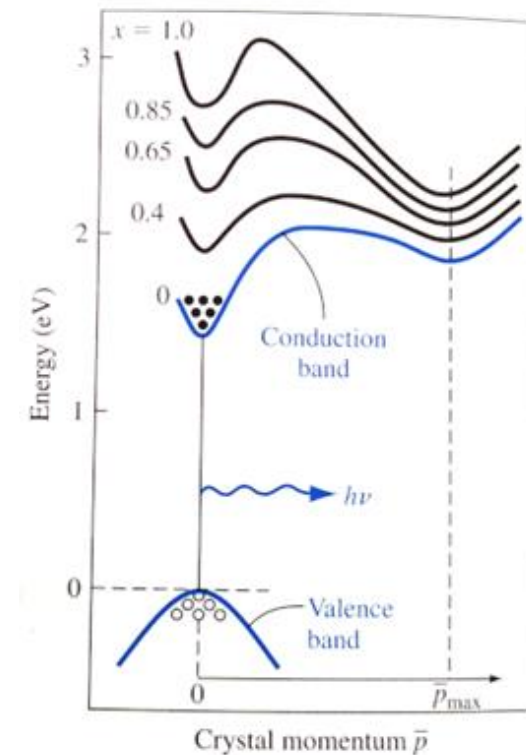
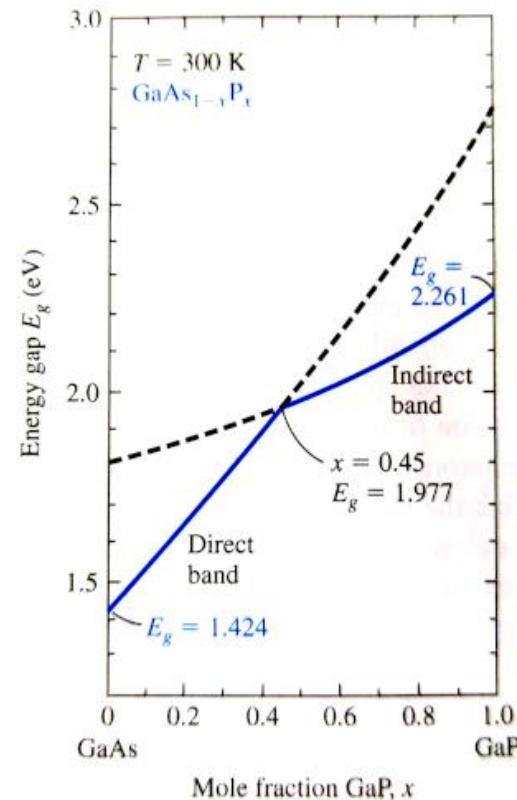
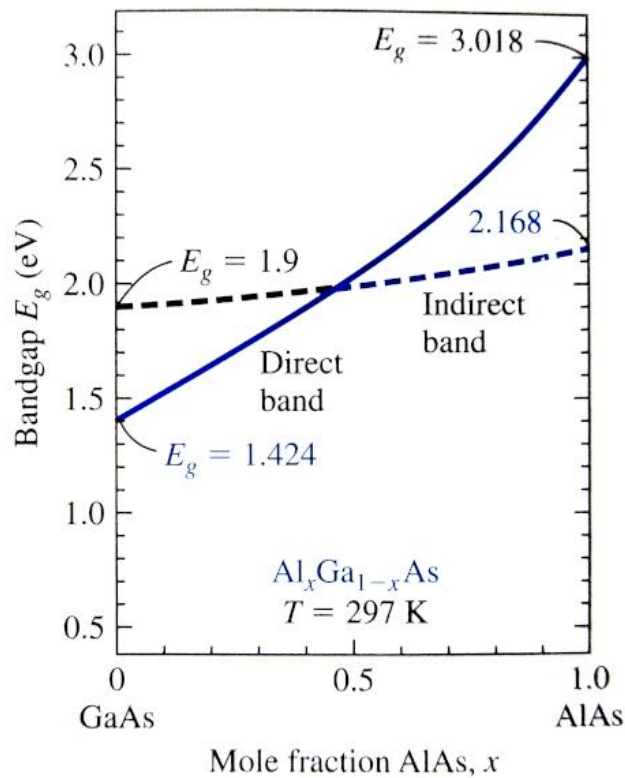


Spektrum dla diody GaAs w dwóch temperaturach. Przesunięcie maksimum odpowiada zmianie przerwy pod wpływem temperatury.

Fotoluminescencja i elektroluminescencja

Efektywność luminescencji – ponieważ nie każda rekombinacja powoduje generację fotonu definiuje się w kwantową efektywność luminescencji, jako stosunek częstości rekombinacji w emisję fotonu do całkowitej częstości procesów rekombinacji

$$\eta_q = \frac{R_r}{R} = \frac{\tau_{nr}}{\tau_{nr} + \tau_r}$$



LED

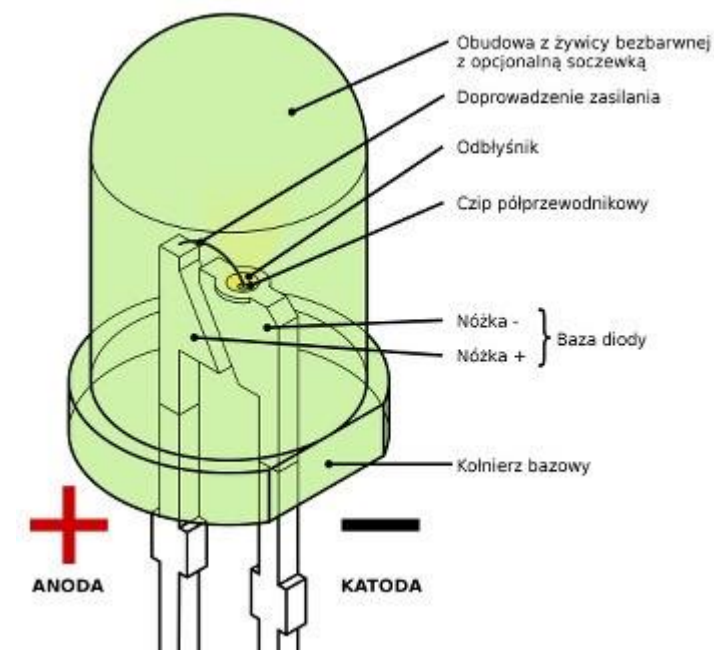
LED – (light emitting diode) złącze p-n spolaryzowane w kierunku przewodzenia, w którym dochodzi do zamiany energii elektrycznej na energię promieniowania elektromagnetycznego w procesie elektroluminescencji.



Opis działania:

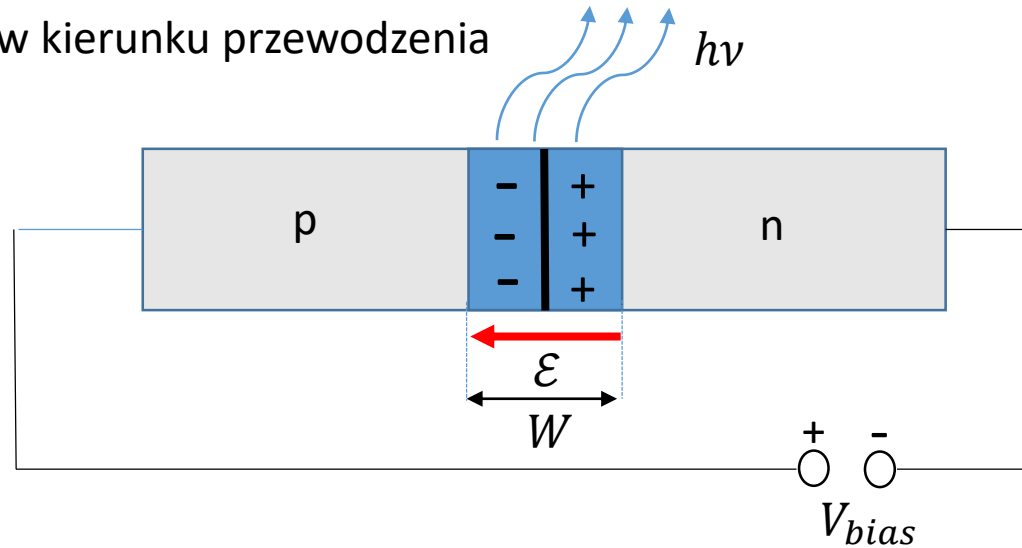
Kiedy do złącza p-n przyłożymy napięcie w kierunku przewodzenia elektrony z półprzewodnika typu n i dziury z półprzewodnika typu p są wstrzykiwane do warstwy odpowiednio p i n, gdzie stają się nośnikami mniejszościowymi. Rekombinują one ze znajdującymi się tam nośnikami większościowymi.

Jeżeli w układzie zachodzą przejścia proste, rekombinacja par elektron-dziura związana jest z emisją fotonu. W układzie wytwarza się światło w zakresie promieniowania widzialnego.



LED

Dioda p-n spolaryzowana w kierunku przewodzenia



- Rekombinacja par elektron-dziura w obszarze zubożonym nie jest bezpośrednia i zachodzi zazwyczaj przez stany w środku przerwy – nie powoduje ona zjawiska luminescencji. Luminescencja wiązana jest z rekombinacją w warstwach neutralnych
- Prądy w układzie diody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia

Prąd dyfuzyjny nośników mniejszościowych

$$j_n = \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right]$$

$$j_p = \frac{eD_p p_0}{L_p} \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right]$$

Prąd rekombinacyjny w warstwie zubożonej

$$j_R = \frac{en_i W}{2\tau_0} \left[\exp\left(\frac{eV}{2k_B T}\right) - 1 \right]$$



LED

Efektywność wstrzykiwania elektronów przez warstwę zubożoną.

$$\gamma = \frac{j_n}{j_n + j_p + j_R}$$

Częstość rekombinacji z emisją fotonu oraz bez emisji fotonu

$$R_r = \frac{\delta n}{\tau_r} \quad R_{nr} = \frac{\delta n}{\tau_{nr}} \quad \longrightarrow \quad R = R_r + R_{nr} = \frac{\delta n}{\tau_{nr}} + \frac{\delta n}{\tau_r}$$

Efektywność rekombinacji promienistej

$$\eta = \frac{R_r}{R_r + R_{nr}} = \frac{\frac{1}{\tau_r}}{\frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}} = \frac{\tau}{\tau_r}$$

Wewnętrzna sprawność kwantowa diody LED

$$\eta_i = \gamma\eta$$

Częstość rekombinacji z emisją fotonu zależy od koncentracji domieszek w półprzewodniku typu p, ale wraz ze wzrostem domieszkowania spada efektywność wstrzykiwania. Istnieje zatem pewien optymalny poziom domieszkowania obu obszarów złącza p-n, tak aby kwantowa efektywność wewnętrzna diody LED była jak największa.

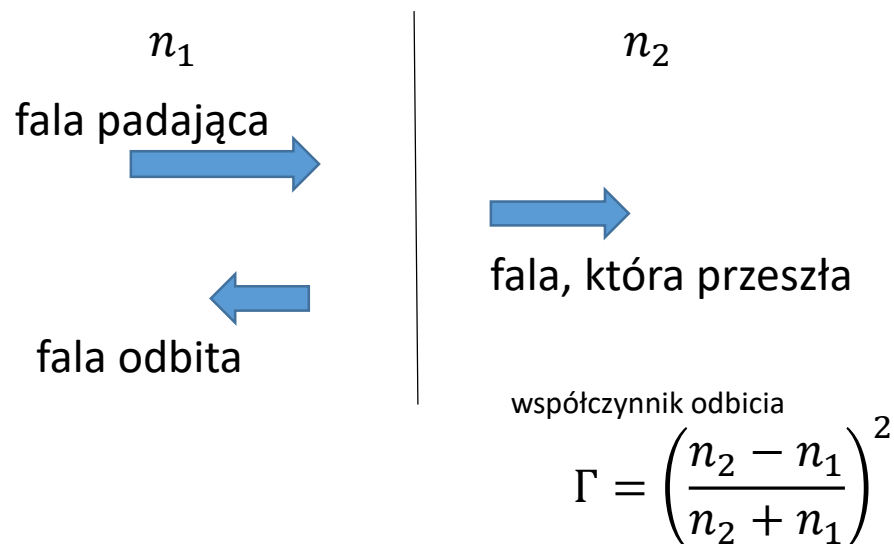
LED

Zewnętrzna sprawność kwantowa diody LED – stosunek liczby fotonów wygenerowanych w diodzie LED do liczby fotonów, które opuściły diode. Wielkość ta jest zazwyczaj znacznie mniejsza od sprawności wewnętrznej.

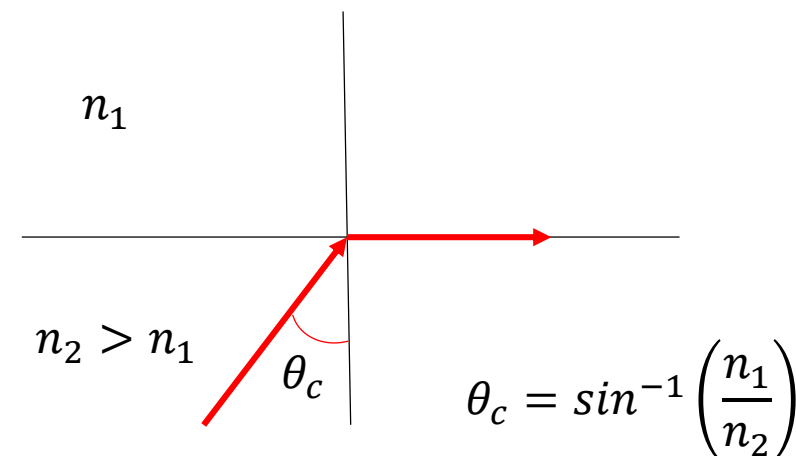
Nie wszystkie fotony wytworzone w diodzie p-n opuszczają diode LED. Niektóre z nich zostają utracone na skutek jednego z trzech procesów:

- absorpcji fotonu,
- efektu Fresnela,
- całkowitego wewnętrznego odbicia.

Efekt Fresnela



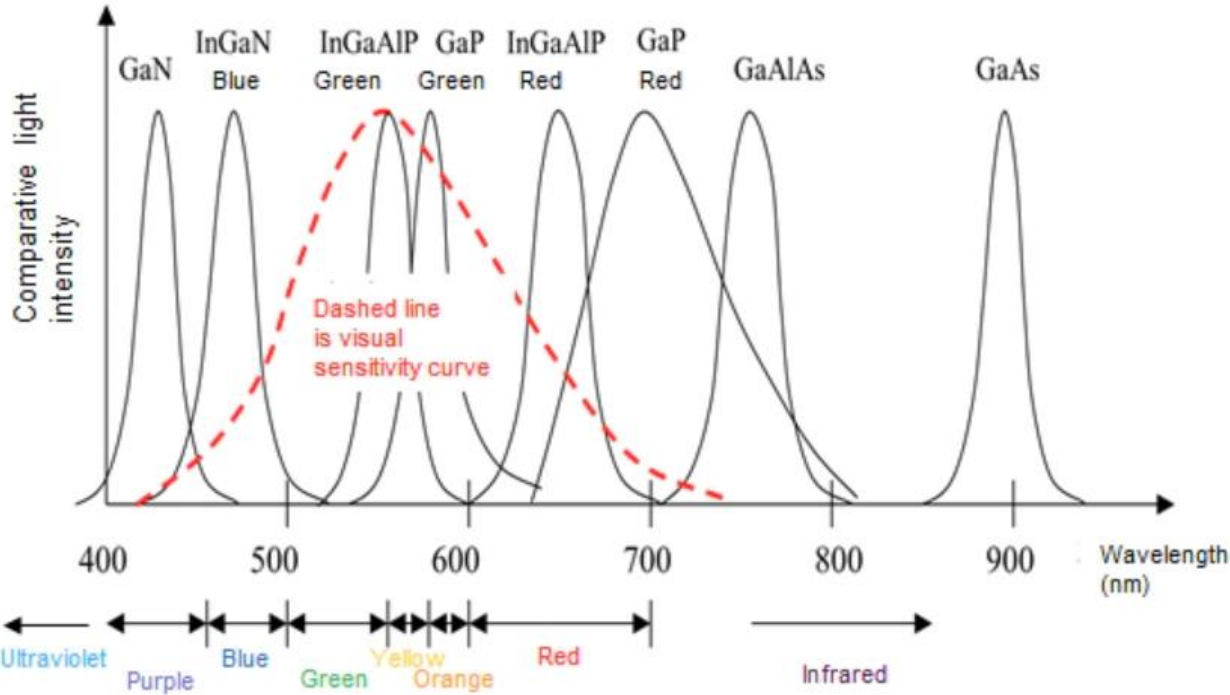
Całkowite wewnętrzne odbicie





LED

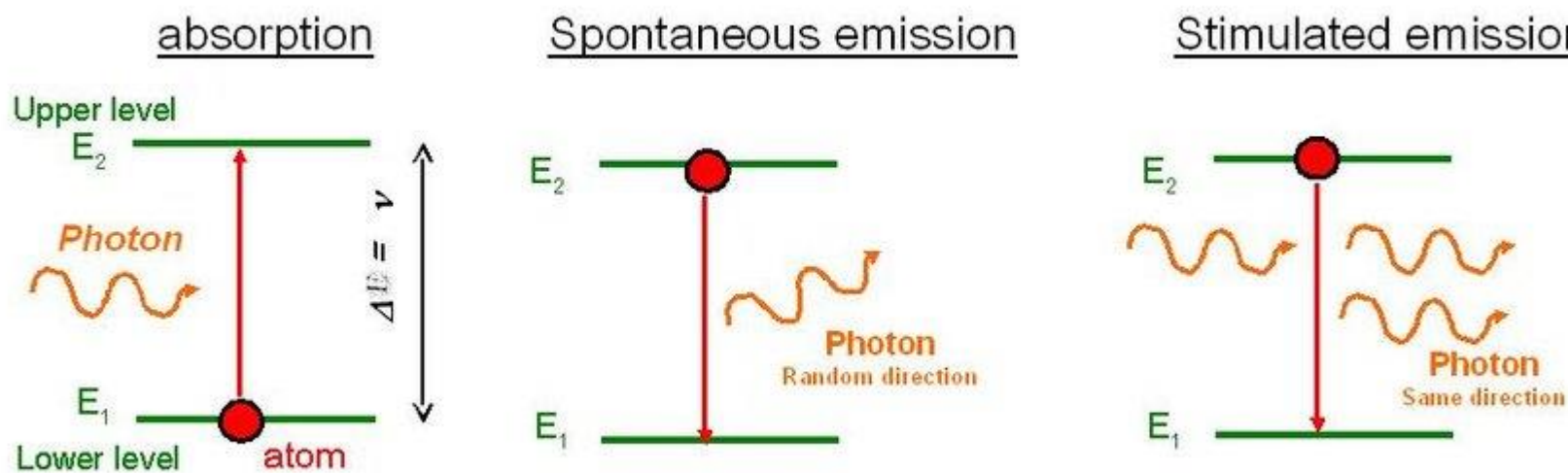
	Color	Wavelength [nm]	Semiconductor material
	Infrared	$\lambda > 760$	Gallium arsenide (GaAs) Aluminium gallium arsenide (AlGaAs)
	Red	$610 < \lambda < 760$	Aluminium gallium arsenide (AlGaAs) Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
	Orange	$590 < \lambda < 610$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
	Yellow	$570 < \lambda < 590$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
	Green	$500 < \lambda < 570$	Traditional green: Gallium(III) phosphide (GaP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Aluminium gallium phosphide (AlGaP) Pure green: Indium gallium nitride (InGaN) / Gallium(III) nitride (GaN)
	Blue	$450 < \lambda < 500$	Zinc selenide (ZnSe) Indium gallium nitride (InGaN) Silicon carbide (SiC) as substrate Silicon (Si) as substrate—under development
	Violet	$400 < \lambda < 450$	Indium gallium nitride (InGaN)
	Purple	multiple types	Dual blue/red LEDs, blue with red phosphor, or white with purple plastic
	Ultraviolet	$\lambda < 400$	Diamond (235 nm) Boron nitride (215 nm) Aluminium nitride (AlN) (210 nm) Aluminium gallium nitride (AlGaN) Aluminium gallium indium nitride (AlGaInN)—down to 210 nm
	Pink	multiple types	Blue with one or two phosphor layers: yellow with red, orange or pink phosphor added afterwards, or white with pink pigment or dye.
	White	Broad spectrum	Blue/UV diode with yellow phosphor



LASER

LASER - (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) urządzenie emitujące promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu światła widzialnego, ultrafioletu i podczerwieni, wykorzystujące zjawisko emisji wymuszonej.

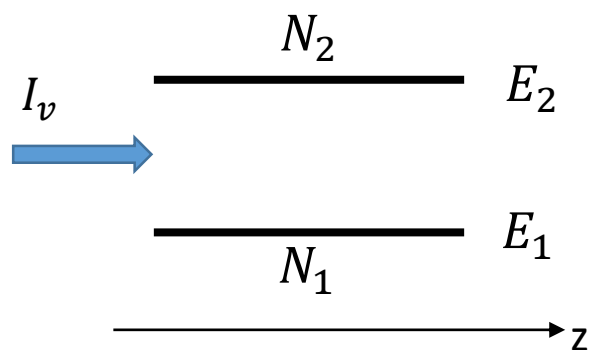
Emisja wymuszona (*stymulowana, indukowana*) – proces emisji fotonów przez materię w wyniku oddziaływania z fotonem inicjującym. Warunkiem do tego, aby emisja wymuszona nastąpiła, jest równość energii fotonu z energią wzbudzenia atomu. Foton inicjujący emisję nie jest pochłaniany przez materię – pełni tylko rolę wyzwalamą proces. Foton emitowany przez atom ma częstotliwość (a więc również energię), fazę i polaryzację taką samą jak foton wywołujący emisję. Kierunek ruchu obu fotonów również jest ten sam. Światło złożone z takich identycznych fotonów nazywa się światłem spójnym.





LASER

W stanie równowagi termodynamicznej $N_2 < N_1$



$$\frac{N_2}{N_1} = \exp \left[\frac{-(E_2 - E_1)}{k_B T} \right]$$

- W stanie równowagi prawdopodobieństwo absorpcji jest równe prawdopodobieństwu emisji fotonu
- Liczba zaabsorbowanych fotonów jest proporcjonalna do liczby N_1
- Liczba wyemitowanych fotonów jest proporcjonalna do liczby N_2

Zmiana natężenia promieniowania w wyniku procesów absorpcji i emisji

$$\frac{dI_v}{dz} = N_2 P_i h\nu - N_1 P_i h\nu$$

$$\frac{dI_v}{dz} = \gamma_v I_v \quad \longrightarrow \quad I_v = I_v(0) e^{\gamma_v z}$$

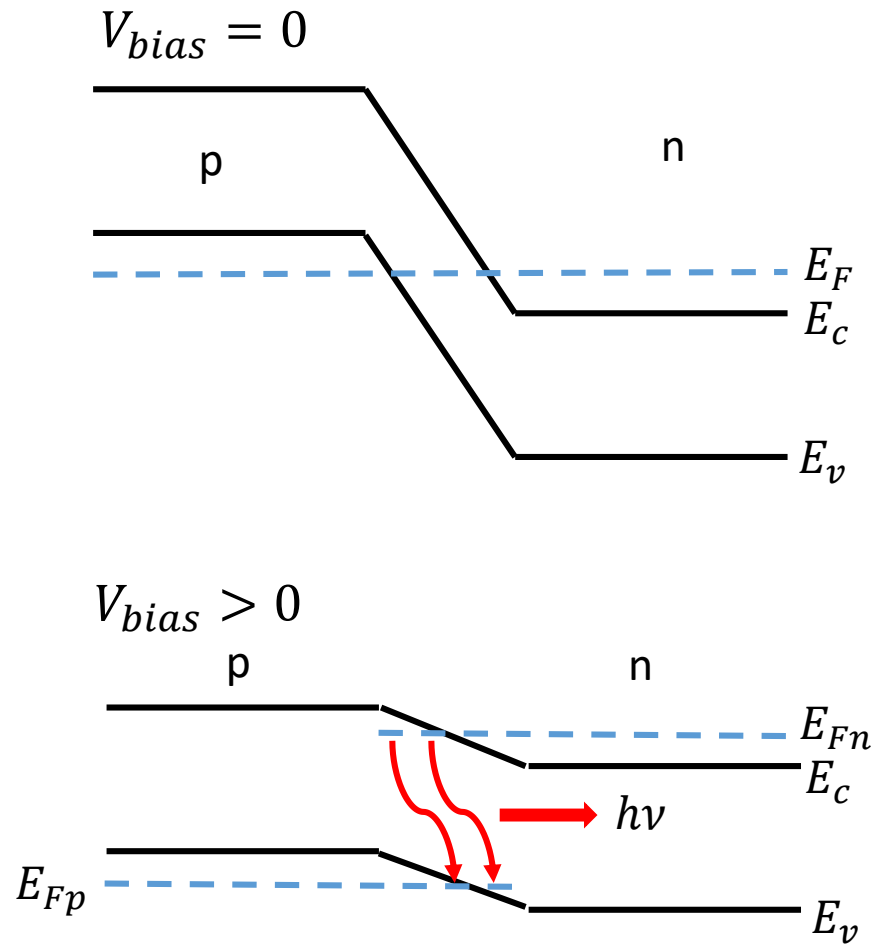
Współczynnik wzmocnienia

$$\gamma_v \propto (N_2 - N_1)$$

Aby nastąpiło wzmocnienie $N_2 > N_1$, a zatem musi nastąpić **inwersja pasm**.

LASER

Laser półprzewodnikowy – złącze p-n zbudowane z silnie zdegenerowanych półprzewodników.



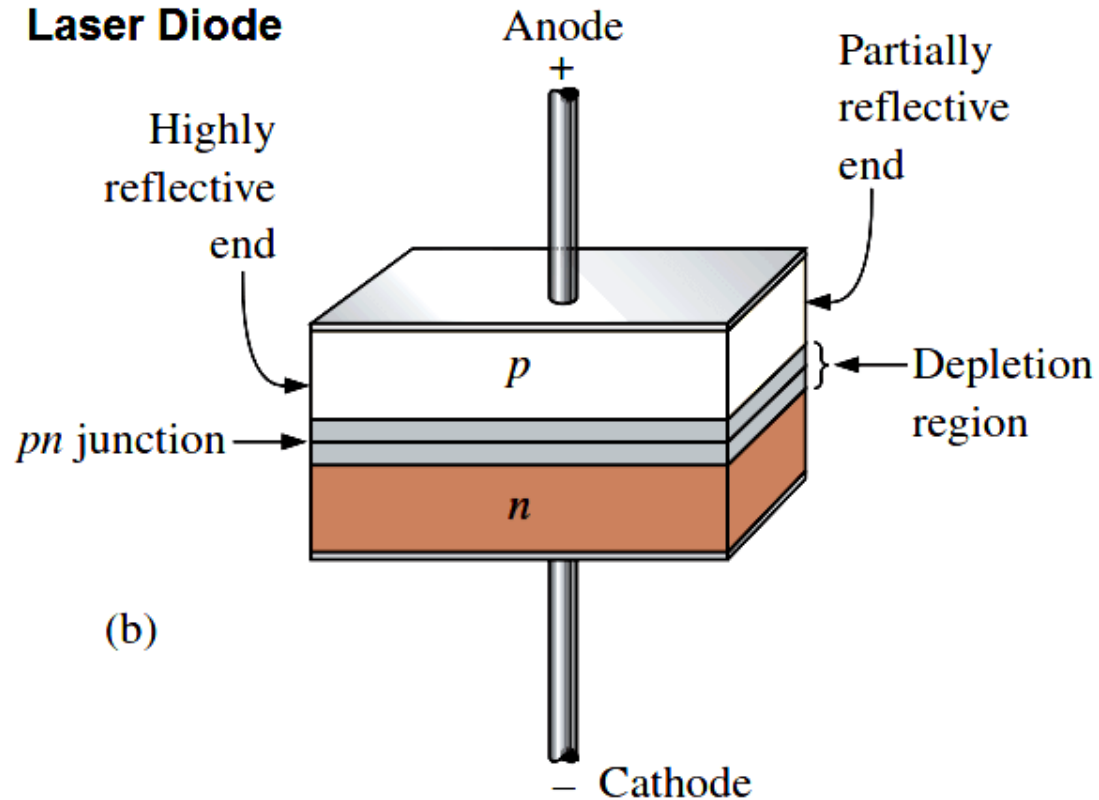
- Energia Fermiego w półprzewodniku typu n leży w pasmie przewodnictwa, podobnie energia Fermiego w półprzewodniku typu p leży w pasmie walencyjnym (półprzewodniki silnie zdegenerowane).
- Współczynnik wzmocnienia dany jest równaniem

$$\gamma_v \propto \left\{ 1 - \exp \left[\frac{h\nu - (E_{Fn} - E_{Fp})}{k_B T} \right] \right\}$$

- Aby $\gamma_v > 0$ to $h\nu < E_{Fn} - E_{Fp}$, ale jednocześnie $h\nu > E_g$. Warunek Bernarda – Durauffourga.
- Polaryzacja złącza w kierunku przewodzenia powoduje, że w bliskiej odległości od złącza liczba elektronów w półprzewodniku typu p w pasmie przewodnictwa jest większa niż liczba elektronów w pasmie walencyjnym. Mamy do czynienia z inwersją obsadzeń (pompowanie), która generuje akcję laserową.

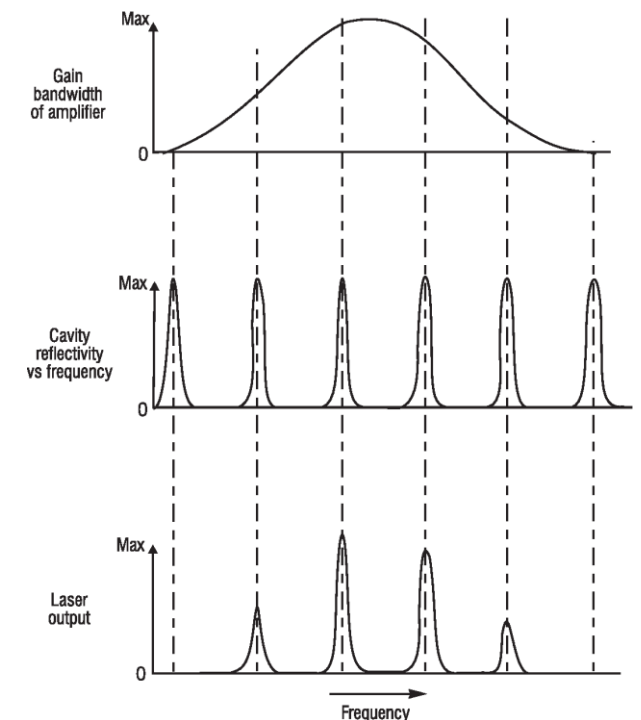
LASER

Laser Diode



Koherentna emisja promieniowania jest możliwa dzięki zastosowaniu optycznej wnęki rezonansowej Fabry-Perota, którą uzyskuje się poprzez odpowiednie wypolerowanie warstwy GaAs w płaszczyźnie (110). Warunek rezonansu dla wnęki

$$N \frac{\lambda}{2} = L$$



Poniżej prądu progowego nie występuje wzmocnienie związane z emisją wymuszoną. Powyżej prądu progowego następuje inwersja obsadzeń i wzmocnienie optyczne. Wzmocnieniu ulegają stany rezonansowe wnęki, gdyż one przechodzą wielokrotnie przez wnękę rezonansową. Wszystkie pozostałe mody optyczne są tracone na skutek innych efektów, w tym ponownej absorpcji.



Najważniejsze informacje z wykładu

- Materiały półprzewodnikowe są wykorzystywane do konstrukcji urządzeń optoelektroniki, w tym paneli słonecznych, fotodetektorów, diod LED i laserów.
- Działanie tych urządzeń oparte jest głównie na zjawisku absorpcji i emisji fotonu, która wiąże się z generacją i rekombinacją par elektron dziura.
- Emisja fotonu w materiałach półprzewodnikowych ma miejsce jedynie dla przejść prostych (bez zmiany wektora k), dlatego idealnymi materiałami w optoelektronice są półprzewodniki o prostej przerwie energetycznej tj. GaAs, GaP
- Działanie lasera opiera się na zjawisku emisji wymuszonej, która polega na emisji fotonu w skutek oddziaływania z innym fotonem.