



Proszę o uwagę

34. Półprzewodniki

Pasmowa teoria przewodnictwa:

- koncentracja i ruchliwość nośników,
- poziom Fermiego,
- złącze p-n – dioda, baterie słoneczne.

Kwantowe generatory promieniowania:

- źródła promieniowania,
- absorpcja,
- emisja spontaniczna,
- emisja wymuszona,
- budowa i działanie laserów,
- właściwości promieniowania koherentnego.



Parametry materiałów półprzewodnikowych

Jednym z podstawowych parametrów określających właściwości materiału półprzewodnikowego jest **koncentracja swobodnych nośników ładunku**, czyli tych, które mogą brać udział w przewodzeniu prądu elektrycznego.

z prawa Ohma $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ gdzie $\sigma = e(n\mu_e + p\mu_h)$ to przewodnictwo elektryczne.

Aby można było określić **koncentrację elektronów i dziur** w półprzewodniku należy znać:

- położenie **poziomu Fermiego**, oznaczane jako E_F ,
- prawdopodobieństwo obsadzenie przez elektron danego poziomu o energii E oraz
- rozkład gęstości stanów, tzn. poziomów energetycznych, które mogą być przez elektrony obsadzone w paśmie przewodnictwa i paśmie walencyjnym.

Funkcja gęstości stanów $g(E)$ i funkcji prawdopodobieństwa obsadzenia przez elektrony tych stanów $f(E)$ tzw. **funkcję rozkładu** dają w wyniku **funkcję rozkładu koncentracji elektronów** $N(E)$ w paśmie przewodnictwa i paśmie walencyjnym.

Do wyznaczenia tych funkcji konieczny jest statystyczny opis obiektów kwantowych.

Całkowita funkcja rozkładu

Iloczyn gęstości stanów $g(E)$ i prawdopodobieństwa ich obsadzenia daje informację o liczbie cząstek o danej energii

$$N(E) = g(E) \cdot f_{FD}(E)$$

W przypadku półprzewodników, gdy funkcję rozkładu FD można przybliżyć funkcją MB, tj. $f(E) \approx \exp\left(-\frac{E-E_F}{k_B T}\right)$ wyrażenie na równowagową koncentrację elektronów ($n = N/V$) można zapisać w postaci:

$$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{k_B T}\right)$$

gdzie N_C jest tzw. efektywną koncentracją stanów w paśmie przewodnictwa

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2} \right)^{3/2}$$

m_e^* oznacza masę efektywną elektronu w paśmie przewodnictwa

Koncentracja dziur

Analogicznie, równowagowa koncentracja dziur określona jest jako

$$p = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right)$$

koncentracja nośników jest ściśle związana z położeniem E_F

gdzie N_V jest efektywną koncentracją stanów w paśmie walencyjnym

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* k_B T}{h^2} \right)^{3/2}$$

Półprzewodniki, w których spełniony jest warunek, że poziom Fermiego nie zbliży się do dna pasma przewodnictwa lub wierzchołka pasma walencyjnego na odległość mniejszą niż $2kT$, są nazywane półprzewodnikami **niezdegenerowanymi**.

Mnożąc oba równania na koncentracje otrzymuje się wyrażenie

$$\left. \begin{aligned} n &= N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{k_B T}\right) \\ p &= N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right) \end{aligned} \right\} np = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right)$$

Koncentracja samoistna

Pokazaliśmy, że iloczyn koncentracji równowagowych elektronów i dziur wynosi:

$$np = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right)$$

W półprzewodniku samoistnym, jak to wynika z mechanizmu generacji i rekombinacji nośników, koncentracje te są sobie równe $n = p = n_i$

Koncentrację samoistną można więc przedstawić jako $np = n_i^2$

Stąd

$$n_i = (N_C N_V)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) \quad \text{lub} \quad n_i = \frac{2(2\pi k_B T)^{3/2}}{h^3} (m_e^* m_h^*)^{3/4} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right)$$

Koncentracja równowagowa w półprzewodniku samoistnym określona jest przez szerokość pasma zabronionego i temperaturę półprzewodnika

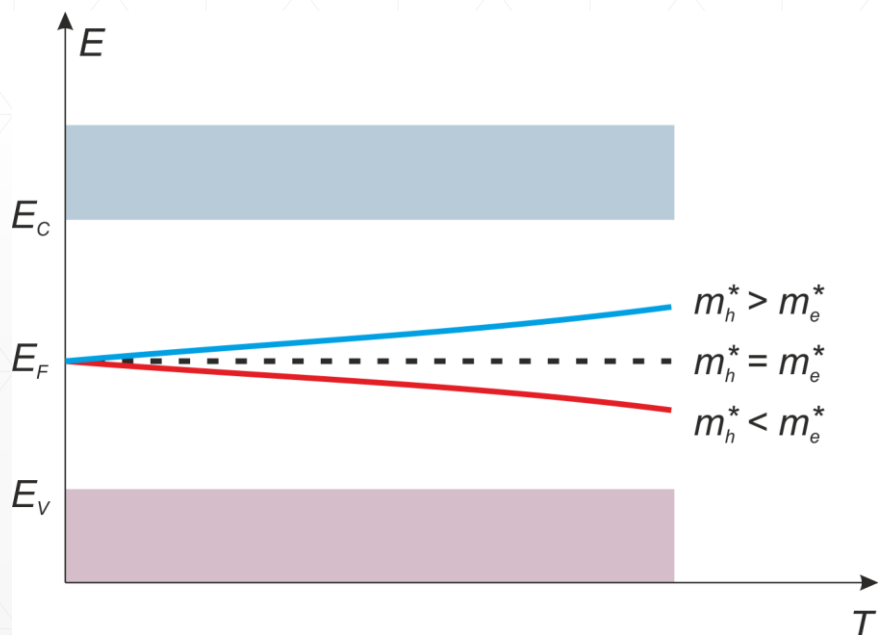
Półprzewodnik	Si	Ge	Sn
E_g (eV)	1,12	0,67	0,08
n_i (m ⁻³)	$2 \cdot 10^{16}$	$3 \cdot 10^{19}$	$1 \cdot 10^{24}$

Położenie poziomu Fermiego

Położenie poziomu Fermiego w warunkach równowagi termodynamicznej określone jest związkiem

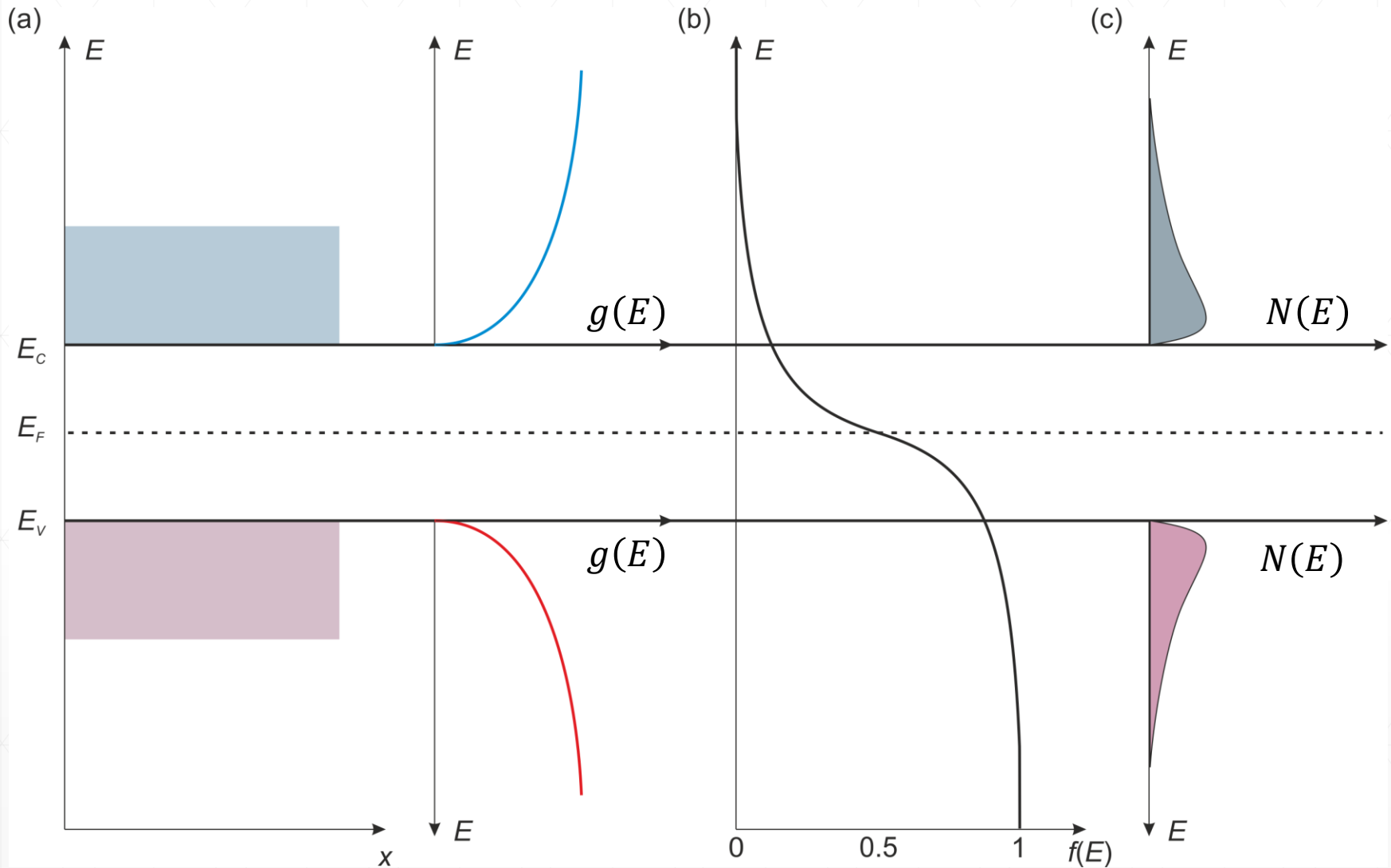
$$E_F = \frac{-E_g}{2} + \frac{3}{4} k_B T \ln \frac{m_e^*}{m_h^*}$$

Ze względu na to, że $m_e^* \neq m_h^*$, położenie poziomu Fermiego w półprzewodniku samoistnym może być nieznacznie przesunięte względem środka pasma zabronionego.



Dla większości półprzewodników samoistnych w temperaturach pokojowych przesunięcie poziomu Fermiego można zaniedbać, czyli $E_F = \frac{-E_g}{2}$.

Rozkład koncentracji elektronów



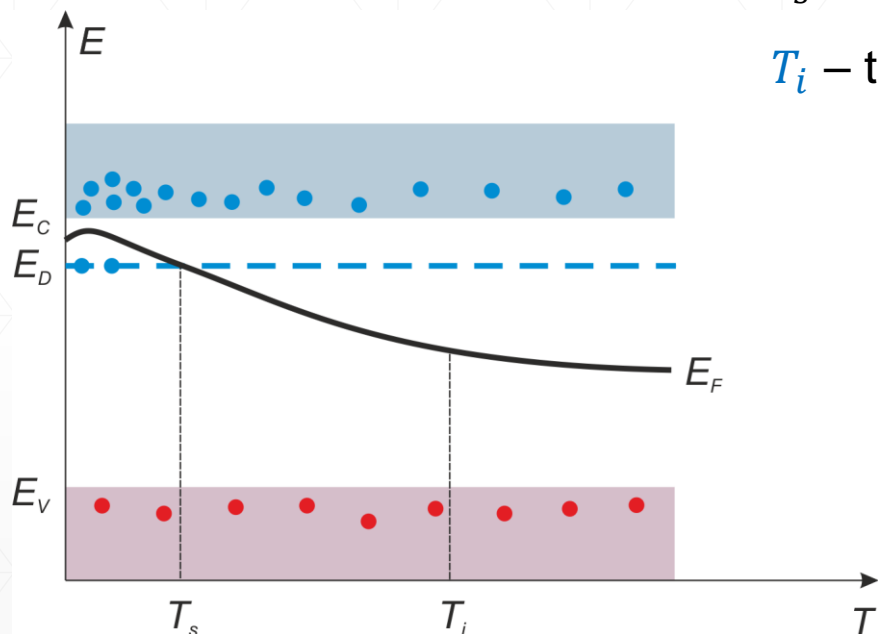
Rozkłady: (a) gęstości stanów w paśmie przewodnictwa i walencyjnym, (b) prawdopodobieństwa obsadzenia tych stanów, (c) koncentracji elektronów i dziur w pasmach przewodnictwa i walencyjnym półprzewodnika samoistnego.

Półprzewodniki domieszkowane

Domieszki donorowe przesuwają położenie poziomu Fermiego w kierunku dna pasma przewodnictwa, a domieszki akceptorowe – w kierunku wierzchołka pasma walencyjnego.

T_s – temperatura całkowitej jonizacji domieszki

T_i – temperatura samoistna



$T < T_s$ – jonizacja domieszki

$T_s < T < T_i$ – wyczerpanie domieszki

$T > T_i$ – koncentracja samoistna

Położenie poziomu Fermiego
w zależności od temperatury.

Półprzewodnik domieszkowany typu n

$T < T_s$ – jonizacja domieszki

• koncentracja nośników większościowych:

$$n = \left(\frac{N_C N_D}{2} \right)^{1/2} \exp \left(- \frac{E_D}{2k_B T} \right)$$

mniejszościowych:

$$p = \frac{n_i^2}{n}$$

$T_s < T < T_i$ – wyczerpanie domieszki

$$N_D \gg n_i \quad n = N_D ; \quad p = \frac{n_i^2}{N_D}$$

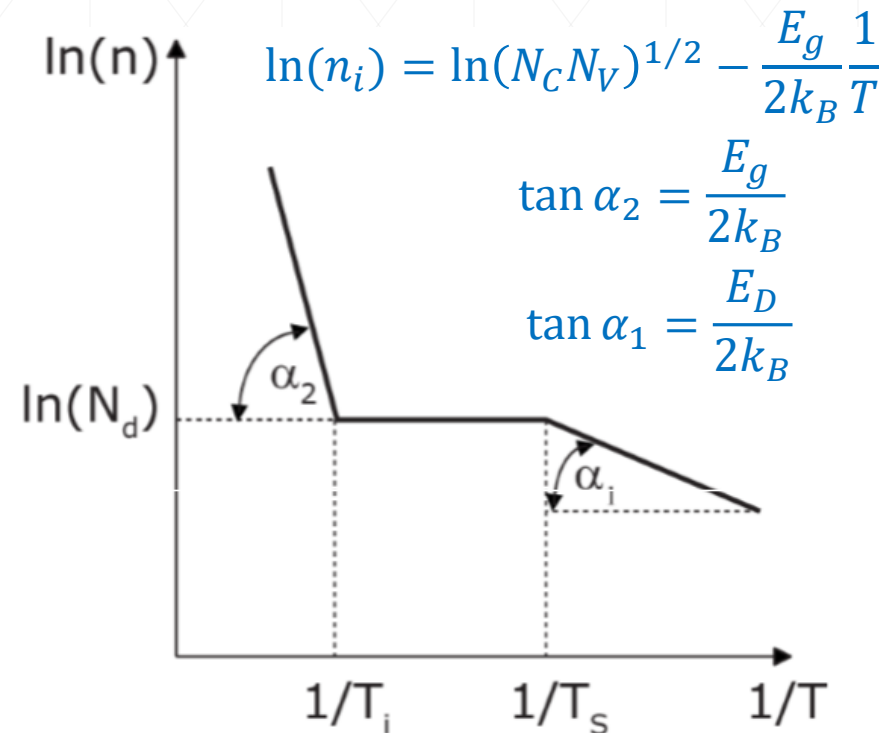
lub

$$\begin{cases} n = N_D + p \\ np = n_i^2 \end{cases}$$

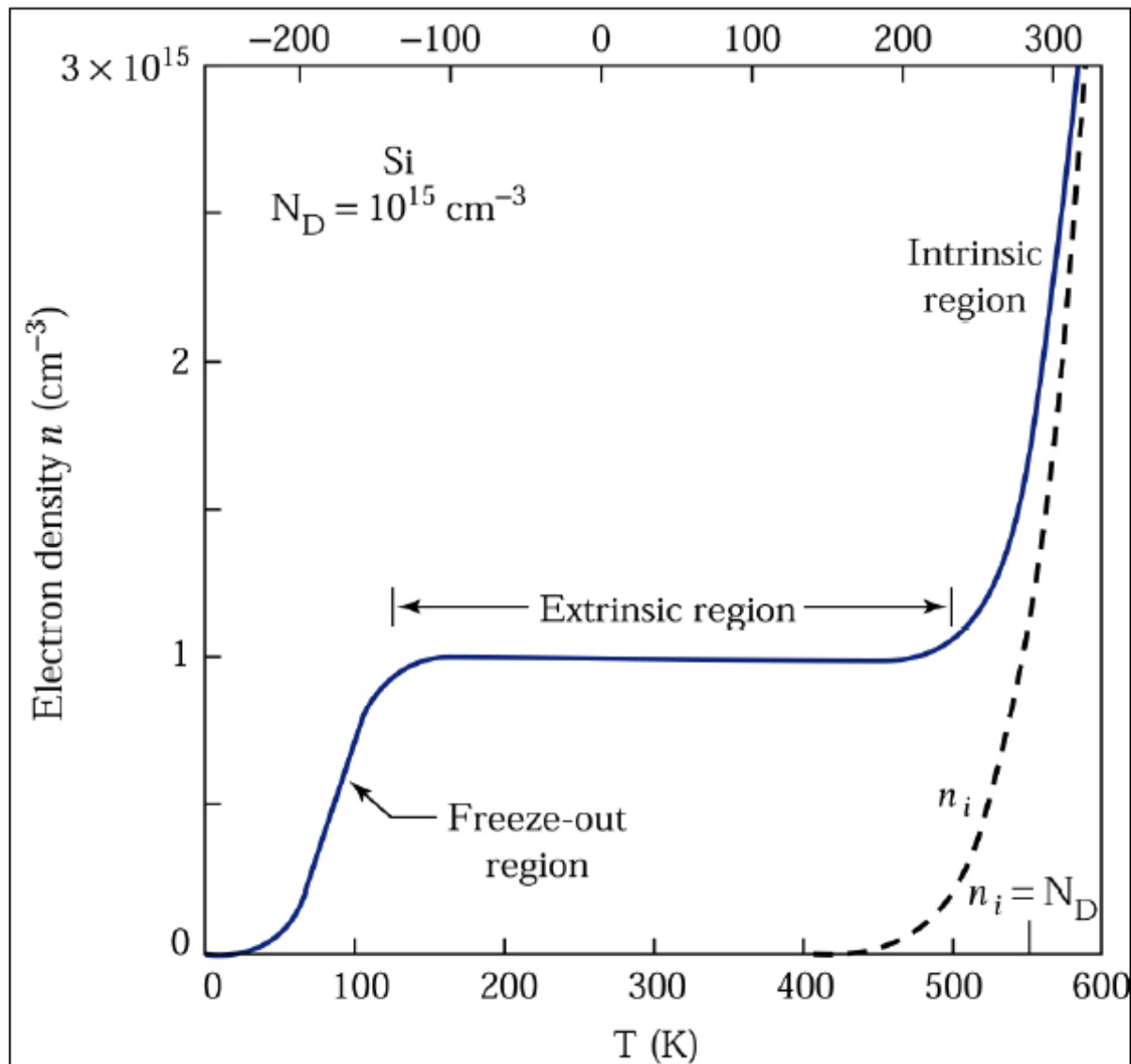
$T > T_i$ – koncentracja samoistna

$$n = p = n_i$$

$$n_i = (N_C N_V)^{1/2} \exp \left(- \frac{E_g}{2k_B T} \right)$$



Koncentracja elektronów w paśmie przewodnictwa półprzewodnika domieszkowanego typu n



Ruchliwość nośników

Ruchliwość nośników to średnia prędkość unoszenia (dryftu) przy jednostkowym natężeniu zewnętrznego pola elektrycznego

$$\mu = \frac{v_d}{E}$$

Ustalona wartość ruchliwości jest wynikiem zderzeń nośników z fononami i domieszkami sieci.

Średnia prędkość dryftu zależy od natężenia pola elektrycznego i czasu pomiędzy zderzeniami (czas relaksacji zderzeniowej τ)

$$v_d = \frac{eE}{m_e^*} \tau \quad \text{stąd} \quad \mu = \frac{e}{m_e^*} \tau$$

Ruchliwość nie zależy od czynników zewnętrznych, a jedynie od właściwości ciała stałego – wartość średniej drogi swobodnej uwarunkowanej mechanizmami rozpraszania nośników:

- **rozpraszanie na fononach**: odgrywa decydującą rolę w temperaturach powyżej 100–150 K, kiedy koncentracja fononów jest duża,
- **rozpraszanie na zjonizowanych domieszkach** – dominuje w temperaturach niskich.

Przewodnictwo półprzewodników

prędkość dryftu określa gęstość prądu

$$\vec{j} = -en\vec{v}_d = \frac{e^2}{m_e^*} n\tau\vec{E}$$

porównując z prawem
Ohma

$$\vec{j} = \sigma\vec{E}$$

$$\sigma = \frac{e^2 n\tau}{m_e^*}$$

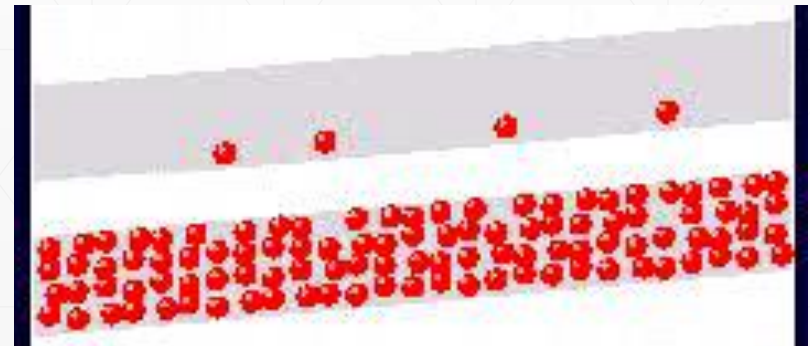
$$\mu_e = \frac{e\tau}{m_e^*}$$

$$\sigma_e = en\mu_e$$

$$\sigma_h = ep\mu_h$$

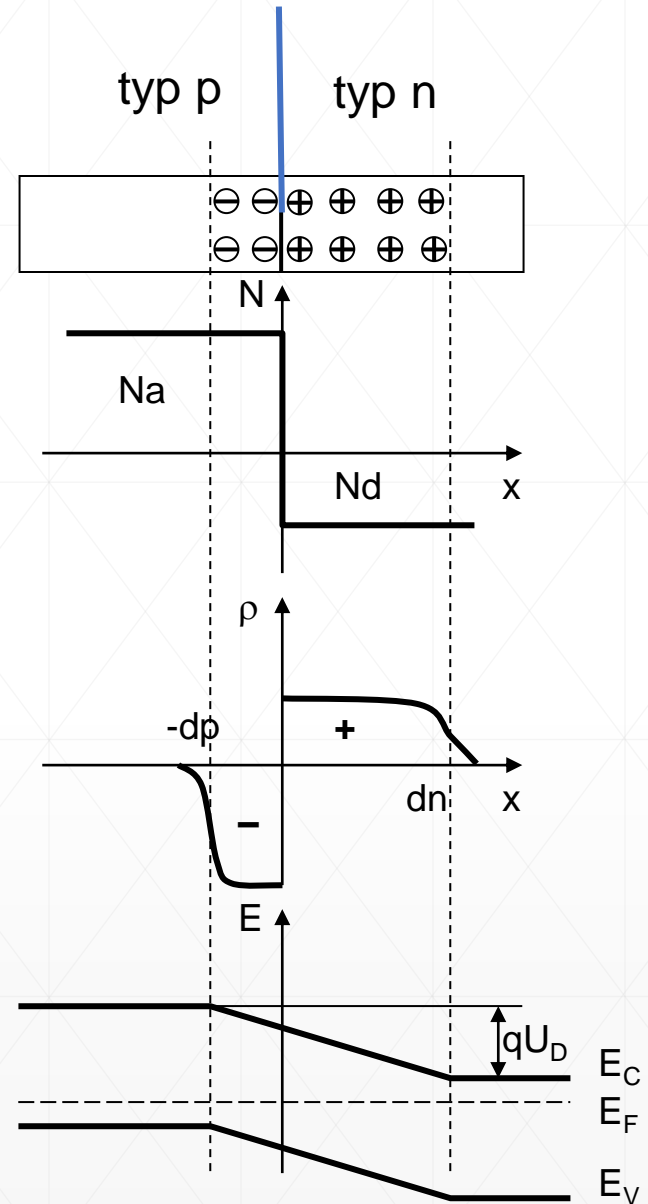
w półprzewodnikach transport ładunku jest spowodowany zarówno elektronami, jak i dziurami, konduktywność (przewodnictwo elektryczne właściwe) wyraża się wzorem:

$$\sigma = e(n\mu_e + p\mu_h)$$



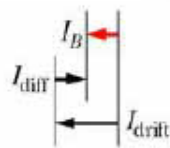
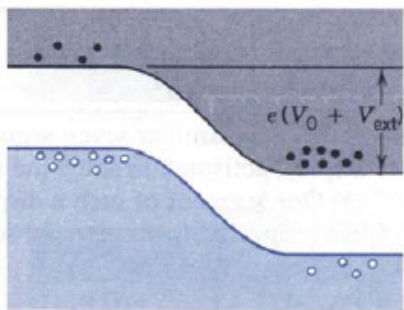
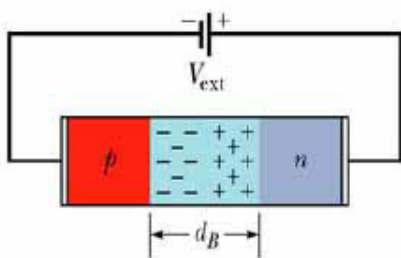
Złącze p-n

- selektywnie domieszkowany kryształ półprzewodnikowy z obszarami typu n i typu p rozdzielonymi **płaszczyzną złącza**
- nośniki większościowe dyfundują przez płaszczyznę złącza, tworząc **prąd dyfuzji**
- nośniki mniejszościowe są przeciągane przez płaszczyznę złącza i tworzą **prąd unoszenia**
- w warunkach równowagi oba te prądy mają jednakową wartość i prąd wypadkowy płynący przez płaszczyznę złącza jest równy zero
- po obu stronach złącza powstaje **obszar zubożony** w swobodne nośniki ładunku (znajdują się w nim zjonizowane atomy domieszek)
- w obszarze zubożonym powstaje **kontaktowa różnica potencjałów U_D**

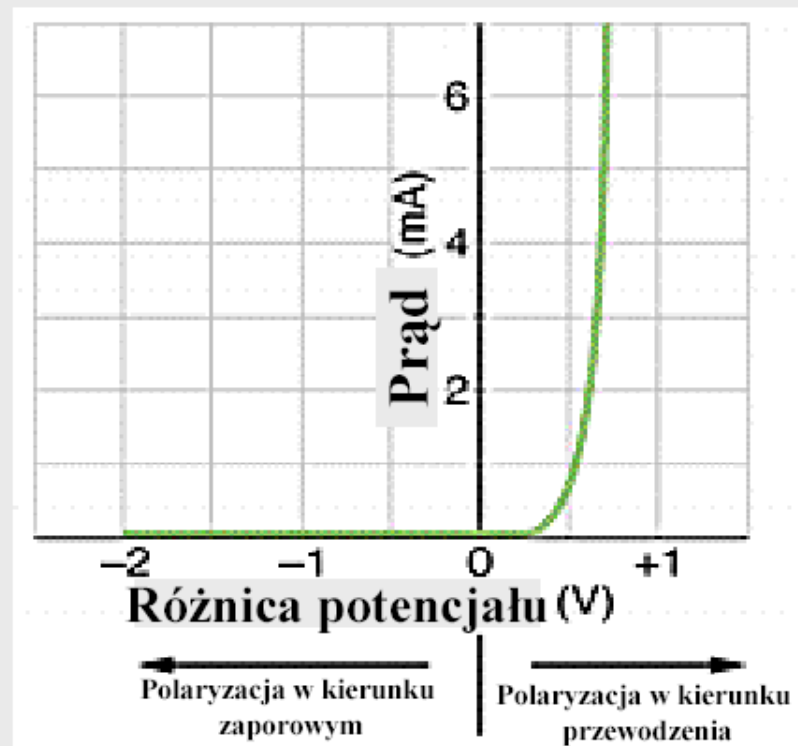
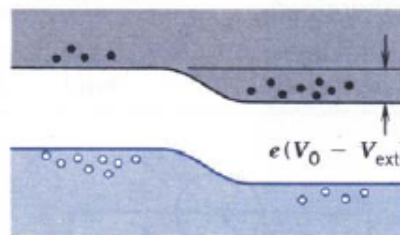
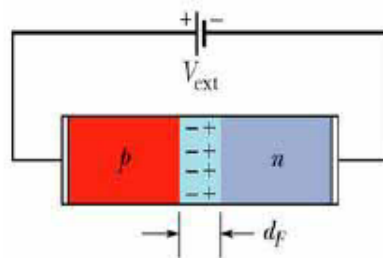


Złącze p-n jako prostownik

Polaryzacja w kierunku zaporowym



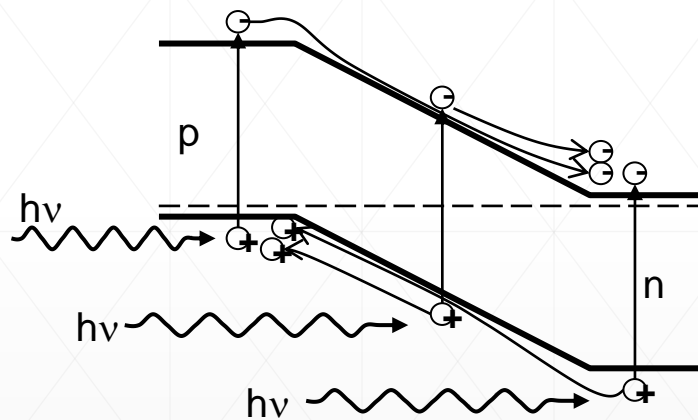
Polaryzacja w kierunku przewodzenia



Fotoogniwa ze złączem p-n

Fotoogniwem nazywa się element półprzewodnikowy ze złączem p-n w którym pod wpływem oświetlenia wytwarzana jest siła elektromotoryczna

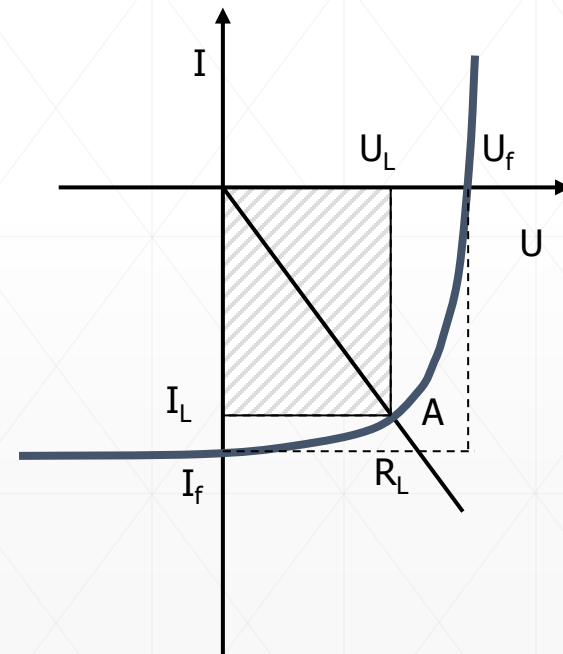
Fotoogniwa działają w oparciu o wewnętrzne zjawisko fotoelektryczne, które polega na generacji w wyniku padającego promieniowania swobodnych nośników prądu (elektronów i dziur) i ich rozdzielania przez pole elektryczne warstwy ładunku przestrzennego złącza p-n.



Punkt pracy A wyznacza się nanosząc prostą obciążenia na charakterystyki I-V.

Najważniejszym parametrem charakteryzującym fotoogniwo jest sprawność energetyczna $\eta = \frac{I_L U_L}{P_\lambda}$

gdzie P_λ to moc padającego promieniowania.



Układy fotoogniw czułych na widmo promieniowania słonecznego tworzą baterie słoneczne

Źródła promieniowania

- promieniowanie termiczne – słońce, żarówki, ciała doskonale czarne
- promieniowanie optyczne wzbudzonych atomów – lampy sodowe, neonowe, świetlówki
- źródła półprzewodnikowe – diody elektroluminescencyjne
- promieniowanie spójne - lasery

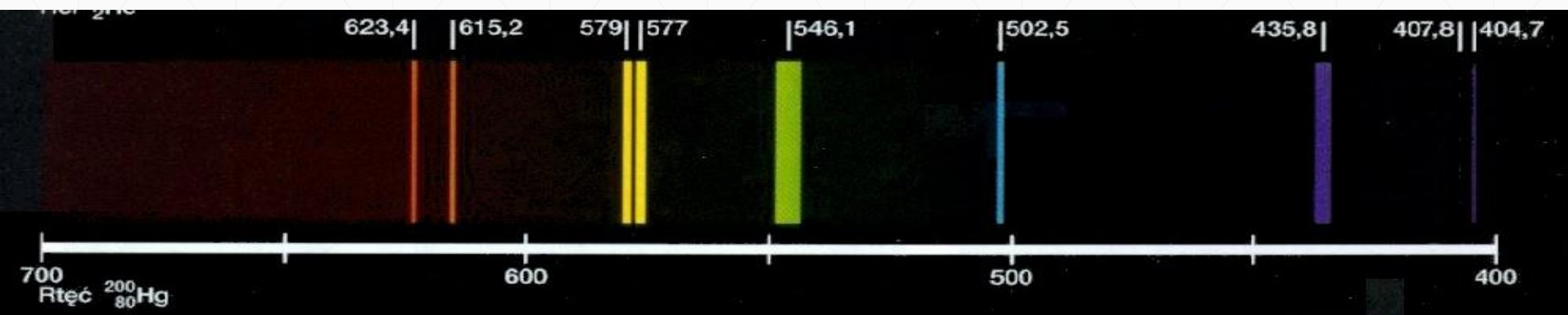
Widma optyczne

- wzbudzenie atomu, czyli przejście elektronów walencyjnych na wyższe poziomy energetyczne zachodzi pod wpływem:
 - ogrzewania
 - wyładowania elektrycznego
 - oświetlenia promieniowaniem widzialnym i nadfioletowym
 - reakcji chemicznej
 - wstrzykiwania nośników w złączu p-n
- wzbudzone atomy przechodzą do stanu niższego promieniując energię w postaci kwantów promieniowania o częstości ν_{nm} równej

$$\nu_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h}$$

gdzie E_n i E_m – energia elektronu odpowiednio na wyższym i niższym poziomie energetycznym

- każdy pierwiastek ma charakterystyczny układ linii emisyjnych



Widma optyczne

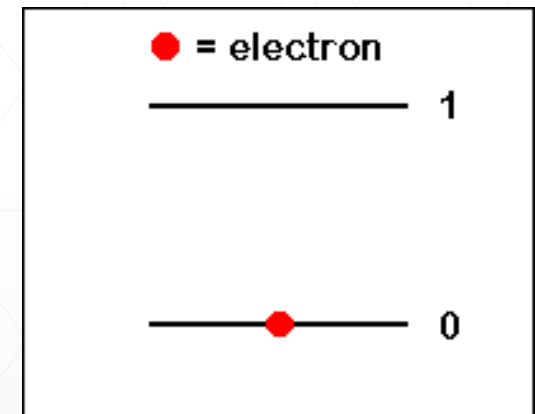
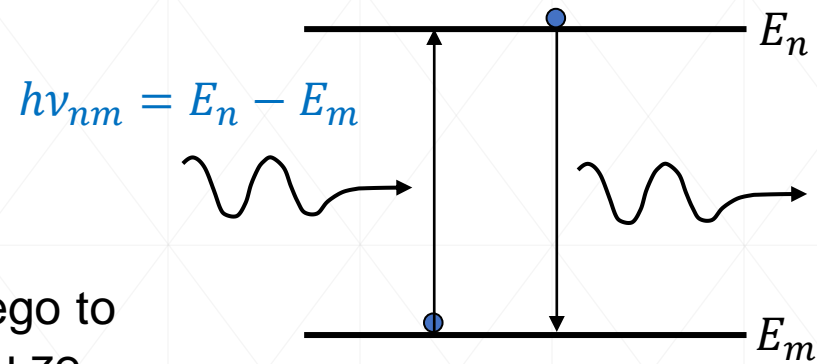
- zmiana stanu kwantowego atomu musi więc wiązać się albo z wydzieleniem (emisją) pewnej części energii, albo z jej pochłonięciem, czyli absorpcją.
- zarówno procesami emisji jak i absorpcji rządzą określone prawa fizyczne, które w 1917 roku sformułował Einstein.
- Einstein założył, że istnieją trzy różne procesy, które mogą doprowadzić do zmiany stanu energetycznego atomu. Procesy te to:
 - absorpcja,
 - emisja spontaniczna,
 - emisja wymuszona.

Absorpcja i emisja promieniowania

Absorpcja promieniowania elektromagnetycznego to proces pochłaniania fali poprzez przejście atomu ze stanu podstawowego o energii E_m do stanu wzbudzonego o energii E_n . Liczba przejść absorpcyjnych jest proporcjonalna do gęstości widmowej promieniowania $u(\nu_{nm}) \rightarrow dN_m = B_{mn}u(\nu_{nm})N_m dt$ gdzie B_{mn} jest **współczynnikiem absorpcji**.

Emisję kwantu promieniowania przy samoistnym przejściu atomu ze stanu wzbudzonego do stanu niższego energetycznie nazywamy **emisją spontaniczną**. Liczba przejść spontanicznych w czasie dt jest proporcjonalna do $N_n(t)dt \rightarrow dN_n = A_{nm}N_n dt$ gdzie A_{nm} to współczynnik emisji spontanicznej.

Współczynnik ten jest równy odwrotności średniego czasu życia atomów w stanie wzbudzonym i określa prawdopodobieństwo przejścia spontanicznego w jednostce czasu do stanu o niższej energii. Teoretyczne wyliczenia średniego czasu życia atomu w stanie wzbudzonym dają wartość około 10^{-8} s.



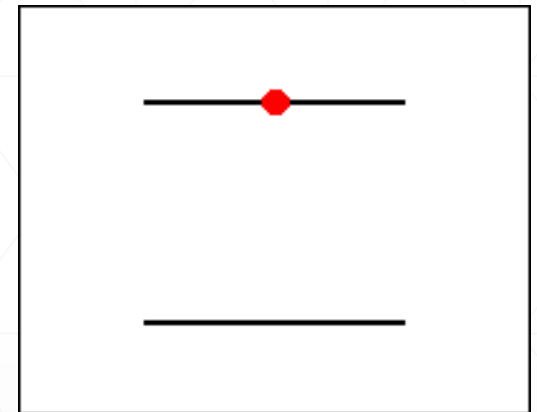
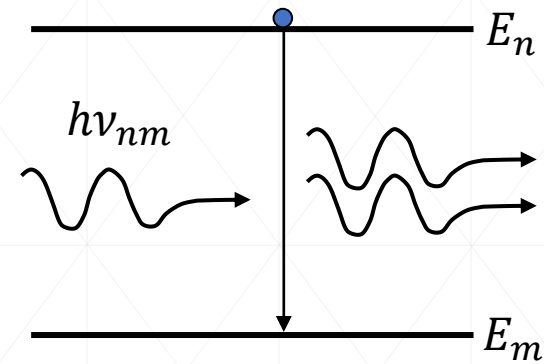
Emisja wymuszona

Zderzenia atomów z kwantami energii promieniowania elektromagnetycznego mogą doprowadzić nie tylko do pochłonięcia kwantu, ale i do emisji kwantu energii i do przejścia atomu do stanu niższego energetycznie. Emisję pod wpływem promieniowania o tej samej częstotliwości nazywamy **emisją wymuszoną**. Liczba przejść wymuszonych w czasie dt jest proporcjonalna do liczby wzbudzonych atomów $N_n(t)dt$ i gęstości widmowej promieniowania $u(\nu_{nm}) \rightarrow dN_n = B_{nm}u(\nu_{nm})N_n dt$ gdzie B_{nm} to współczynnik emisji wymuszonej.

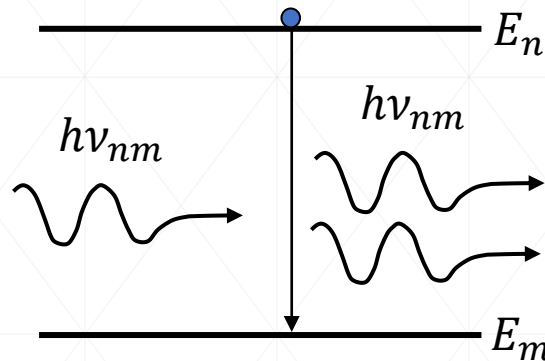
Współczynniki A_{nm} , B_{nm} i B_{mn} charakteryzujące procesy emisji spontanicznej, emisji wymuszonej i absorpcji nazywamy także współczynnikami Einsteina.

W warunkach równowagi termodynamicznej, w określonej temperaturze T , liczba przejść z poziomu wyższego na niższy musi być taka sama jak z niższego na wyższy. Możemy więc zapisać:

$$A_{nm}N_n dt + B_{nm}u(\nu_{nm})N_n dt = B_{mn}u(\nu_{nm})N_n dt$$



Emisja wymuszona



W procesie emisji wymuszonej kwant promieniowania o odpowiedniej częstotliwości przechodząc obok atomu wzbudzonego **wyzwała nowy kwant, nie tracąc przy tym na działanie wymuszające nic ze swej energii.** Zamiast jednego kwantu wchodzącego do układu mamy więc na jego wyjściu dwa jednakowe kwanty, co oznacza wzmocnienie promieniowania.

Częstotliwość promieniowania pochodzącego od emisji wymuszonej jest identyczna z częstotliwością promieniowania wymuszającego, a ich fazy są ze sobą ściśle powiązane.

Poza tym emisja wymuszona odbywa się w tym samym kierunku, w którym porusza się kwant wymuszający.

Inwersja obsadzeń

Z teorii Einsteina wynika, że:

1. Prawdopodobieństwo emisji wymuszonej jest równe prawdopodobieństwu absorpcji;
2. W emisji z poziomu E_n udział emisji spontanicznej rośnie proporcjonalnie do trzeciej potęgi częstotliwości promieniowania emitowanego w stanie równowagi termodynamicznej.

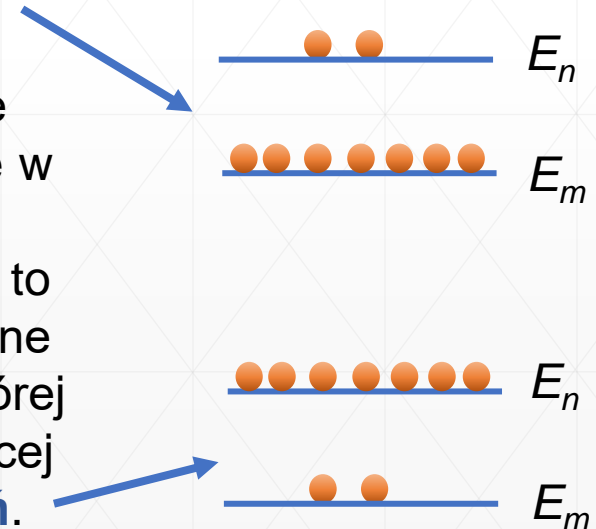
$$\frac{B_{nm}}{B_{mn}} = 1$$

$$\frac{A_{nm}}{B_{nm}} = \frac{8\pi h\nu_{nm}^3}{c^3}$$

Z rozkładu Boltzmana wynika, że w stanie równowagi termodynamicznej $N_n \ll N_m$. Oznacza to, że absorpcja zdecydowanie przewyższa emisję wymuszoną, czyli że promieniowanie elektromagnetyczne jest absorbowane w układzie.

Gdyby jednak doprowadzić do sytuacji w której $N_n > N_m$, to wówczas promieniowanie będzie w układzie wzmacniane – przeważać będzie emisja wymuszona. Sytuację w której na wyższym poziomie energetycznym znajduje się więcej atomów niż na niższym nazywamy **inwersją obsadzeń**.

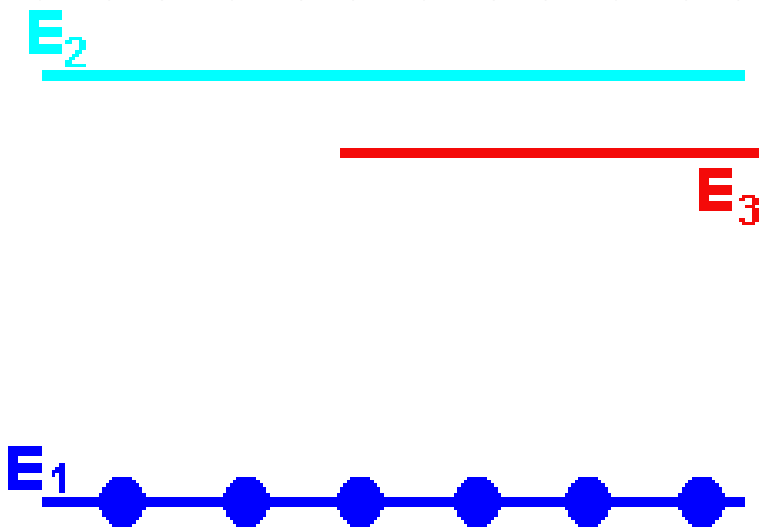
Można ją osiągnąć w warunkach nierównowagowych przy pomocy oddziaływań zewnętrznych.



Inwersja obsadzeń

W układach dwupoziomowych nigdy nie uzyskamy inwersji obsadzeni.

Do wytworzenia inwersji obsadzeni stosowane są układy trypoziomowe. Jeżeli atom jest wzbudzony do wyższego stanu z którego może powrócić do stanu niżej położonego na drodze mało prawdopodobnego przejścia, to może on pozostać w tym stanie przez bardzo długi okres czasu. **Poziom taki nazywamy metatrwałym (metastabilnym)**. O ile typowy czas życia atomu w stanie wzbudzonym wynosi około 10^{-8} s, to poziomy metatrwałe charakteryzują się czasami życia rzędu 10^{-2} s, tzn. ich czasy życia są miliony razy dłuższe.



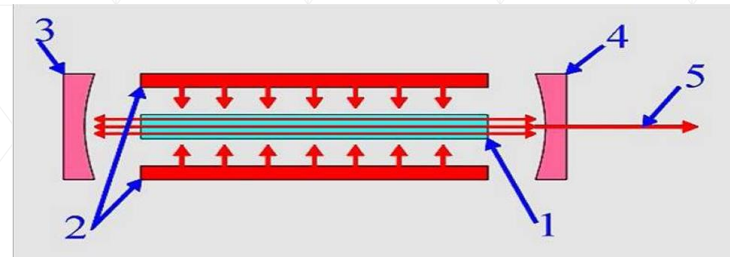
Przejścia $E_2 > E_1$ i $E_2 > E_3$ są stabilne $t=10^{-8}$ s

Poziom E_3 jest metastabilny czas życia $t=10^{-2}$ s

Czyli na tym poziomie mogą się „gromadzić” elementy wzbudzone – „czekając” na kwant, który wywoła emisję wymuszoną >> powstaje inwersja obsadzeń

Zasada działania lasera

Słowo **LASER** pochodzi od pierwszych liter określenia angielskiego: **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation** czyli: **wzmocnienie światła przez wymuszoną emisję promieniowania**.



Główne elementy lasera to:

- ośrodek czynny (1), w którym zachodzą procesy emisji wymuszonej,
- źródło wywoływania inwersji obsadzeni (2) (pompowania energii do układu),
- rezonator optyczny (3,4) w którym powstaje i powiększa się lawina fotonów.

Ośrodkiem czynnym może być gaz, ciecz lub ciało stałe posiadające najbardziej odpowiednią strukturę poziomów energetycznych, tzn. zawierające atomy domieszki wytwarzające poziomy metastabilne.

Inwersji obsadzeń dokonuje się poprzez pompowanie optyczne za pomocą:

- odpowiednich lamp błyskowych,
- wyładowania jarzeniowego w gazach,
- reakcji chemicznych w gazach i cieczach, lub
- przepływu prądu elektrycznego w ośrodkach półprzewodnikowych.

Rezonator optyczny stanowi interferometr utworzony najczęściej z komory i dwóch zwierciadeł ustawionych prostopadle do osi komory.

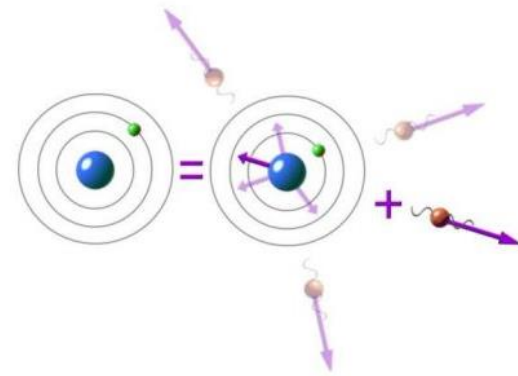
Cechy promieniowania laserowego

Światło laserowe a zwykłe

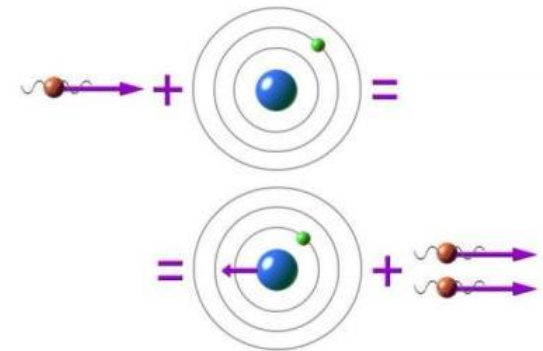
Zwykłe światło powstaje dzięki spontanicznej emisji promieniowania, charakteryzującej się zupełną przypadkowością poszczególnych aktów emisyjnych i brakiem między nimi jakiegokolwiek powiązania fazowego. Promieniowanie to stanowi nieuporządkowany zbiór niezależnych od siebie fal elektromagnetycznych.

Światło laserowe jest wytwarzane w sposób zorganizowany, dzięki procesom wymuszonej emisji promieniowania. Foton wymuszający powoduje wypromieniowanie nowego fotonu o identycznych właściwościach, który z kolei może uczestniczyć w następnych aktach emisji wymuszonej. Otrzymuje się w rezultacie zbiór uporządkowanych ciągów fal elektromagnetycznych, stanowiący wypadkową synchronicznych, zgodnych w fazie i jednokierunkowych promieni emitowanych przez poszczególne elementy ośrodka ciągłego.

Emisja



Emisja wymuszona



Cechy promieniowania laserowego

- **monochromatyczność** – oznacza, że promieniowanie laserowe ma prawie **jednakową** długość fali. Wszystkie fotony opuszczające rezonator optyczny mają prawie dokładnie tę samą częstotliwość (kolor). Zakres widmowy, czyli odchylenie częstotliwości poszczególnych fotonów w wiązce, jest zawężony.
- **spójność** – jest najistotniejszą cechą promieniowania laserowego. Wynika z określonej zależności fazowej między promieniami wychodzącymi z różnych punktów źródła promieniowania oraz między dowolnymi punktami jednego promienia. Zależność fazową występującą między różnymi punktami źródła promieniowania nazywa się spójnością przestrzenną, natomiast dotyczącą jednego punktu w różnych momentach czasu – spójnością czasową. Innymi słowy: fotony przemieszczając się w wiązce bardzo długo zachowują tę samą fazę.
- **równoległość** – cecha ta wynika bezpośrednio z mechanizmu powstawania promieniowania laserowego i polega na równoległości promieni tworzących wiązkę. Laser jako źródło emituje wiązkę już równoległą. Kąt rozbieżności wiązki laserowej jest bardzo mały i może być zmniejszony nawet do jednej sekundy kątowej (wiązka w odległości 1 km od źródła rozszerza się jedynie o 5 mm).
- **intensywność** – wynika z pozostałych trzech cech. Jest to możliwość wytwarzania impulsu promieniowania o bardzo krótkim czasie trwania, nawet do ułamków femtosekundy. Pozwala to uzyskać ogromną gęstość energii promieniowania rzędu 10^7 J/cm².

Należy jednak zaznaczyć, że każda z tych cech nie występuje w postaci doskonałej.

LASER

Zasadnicze efekty fizyczne w oparciu o które możemy opisać pracę lasera to:

> pompowanie

> inwersja obsadzeń

> emisja spontaniczna (pojedyncze akty)

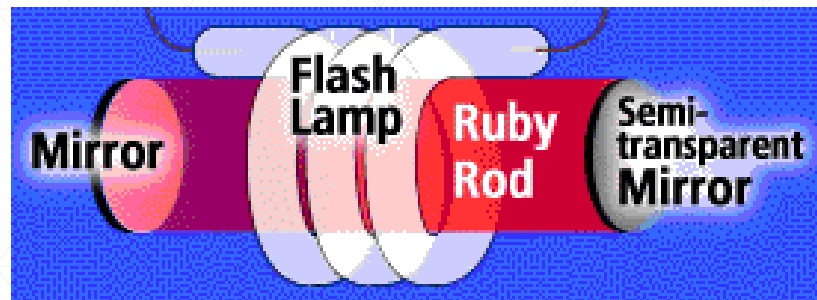
> emisja wymuszona

>> akcja laserowa

Podział laserów w zależności od ośrodka czynnego:

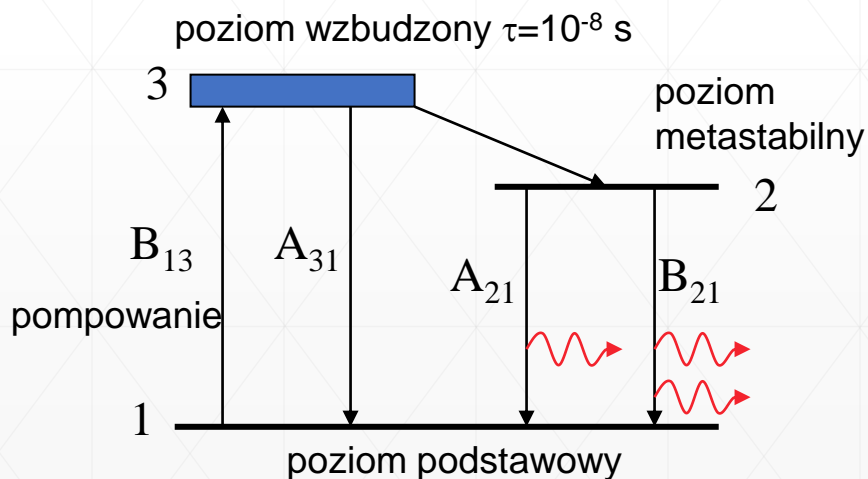
- lasery gazowe – np. helowo-neodynowy (543 nm), CO₂ (10,6 μm);
- lasery na ciele stałym – rubinowy (694,3 nm), neodymowy Nd:YAG (1,06 μm);
- lasery na cieczy – barwnikowe;
- lasery półprzewodnikowe – złączone (diody laserowe), kaskadowe.

Laser rubinowy

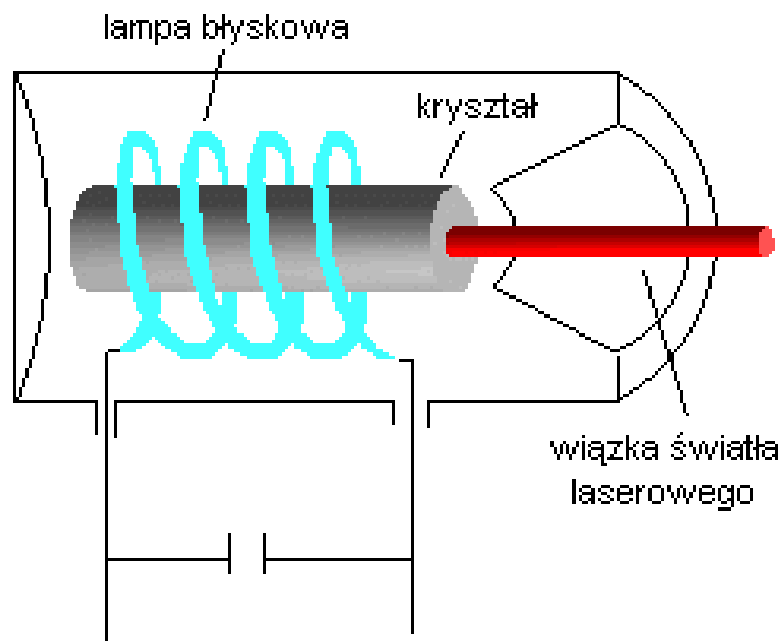


absorbując światło lampy błyskowej atomy chromu przechodzą do stanu wzbudzonego 3 skąd większość przejdzie do stanu metastabilnego 2 tworząc inwersję obsadzeń. Spontaniczne przejście A_{21} wywołuje emisję wymuszoną B_{21}

praca impulsowa



schemat poziomów jonu chromu



laser rubinowy z domieszką Cr

Podsumowanie

- **Półprzewodniki** – koncentracja nośników samoistna i domieszkowa, od czego zależy przewodnictwo półprzewodników
- **Złącze p-n** – element prostujący (dioda) i fotowoltaiczny (baterie słoneczne)
- **Źródła promieniowania** – emisja spontaniczna i wymuszona
- **Lasery** – budowa i zasada działania



Dziękuję za uwagę