

Wykład IV

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)

Historia

1917 – Einstein objaśnia emisję wymuszoną

1954 – maser amoniakalny: Townes, Basow, Prochorow
(1964 – nagroda Nobla z fizyki)

1960 – Maiman, laser rubinowy

1962 – laser półprzewodnikowy

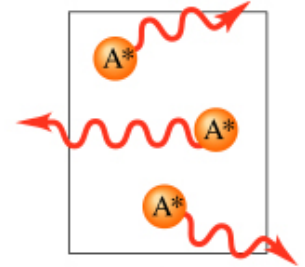
1966 – Nobel dla A. Kastlera za teorię pompowania optycznego

1970 – laser półprzewodnikowy w obszarze widzialnym
(Z. I. Alferov i H. Kroemer – Nobel 2000)

Emisja spontaniczna i wymuszona

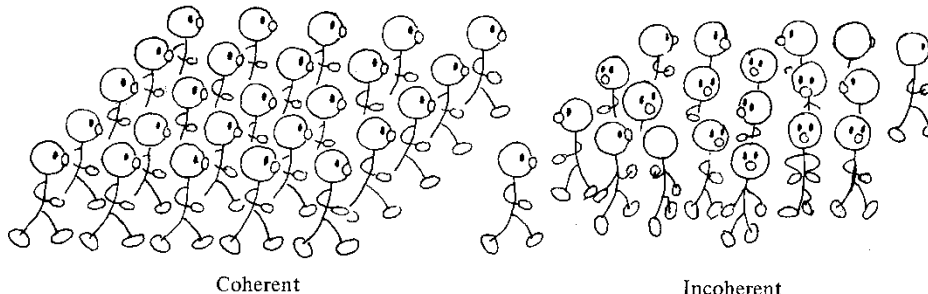
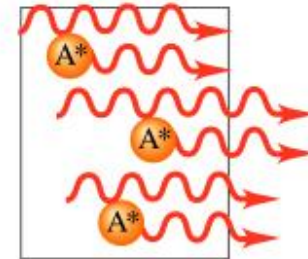
Emisja spontaniczna – źródła termiczne, dioda elektroluminescencyjna (LED)

- Fotony emitowane są we wszystkich kierunkach z jednakowym prawdopodobieństwem w przypadkowych chwilach.
- Emitowana fala elektromagnetyczna nie jest spójna.



Emisja wymuszona – laser

- Wymuszający i emitowany foton mają takie same :
 - częstotliwość
 - kierunek
 - fazę
- Emitowana fala jest spójna



Inwersja obsadzeń

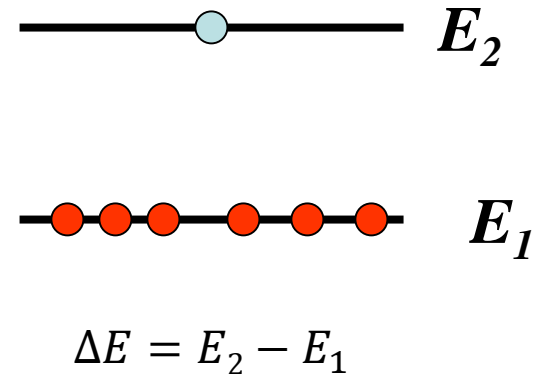
Rozważmy układ dwóch poziomów energetycznych atomu. Prawdopodobieństwo obsadzenia poziomu o energii E jest opisane rozkładem Boltzmann'a. Liczba cząstek w stanie o energii E jest dana wzorem:

$$n = C e^{\frac{-E}{kT}}$$

Ilość cząstek w stanie o energii E_1 lub E_2 :

$$n_1 = C e^{\frac{-E_1}{kT}} \quad n_2 = C e^{\frac{-E_2}{kT}} \quad \Rightarrow$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \exp\left(\frac{-(E_2 - E_1)}{kT}\right)$$



W stanie równowagi termodynamicznej zawsze $n_2 < n_1$ ponieważ $E_2 > E_1$.

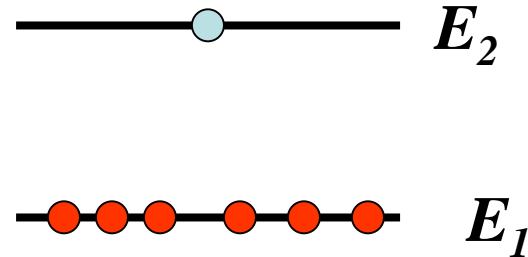
EINSTEIN: Aby zaszła akcja laserowa konieczne jest inwersja obsadzeń, czyli musi być spełniona równość:

$$n_2 > n_1$$

Przykład

Z równania Boltzmana

$$\frac{n_2}{n_1} = \exp\left(\frac{-(E_2 - E_1)}{kT}\right)$$



n_1 - ilość elektronów na poziomie E_1 ; n_2 - ilość elektronów na poziomie E_2

Załóżmy, że $T = 300\text{ K}$ i $E_2 - E_1 = 2\text{ eV}$ \Rightarrow $\frac{n_2}{n_1} = 4.4 \times 10^{-4}$

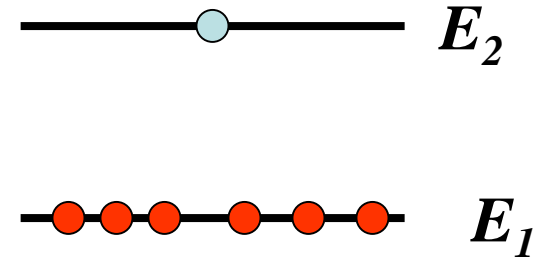
W stanie równowagi termodynamicznej zawsze $n_2 < n_1$ ponieważ $E_2 > E_1$. Aby doszło do akcji laserowej konieczne jest spełnienie warunku $n_2 > n_1$, czyli aby doszło do inwersji obsadzeń.

Inwersja obsadzeń

W stanie równowagi termodynamicznej zawsze $n_1 > n_2$

EINSTEIN: Aby zaszła akcja laserowa konieczne jest inwersja obsadzeń:

$$n_2 > n_1$$

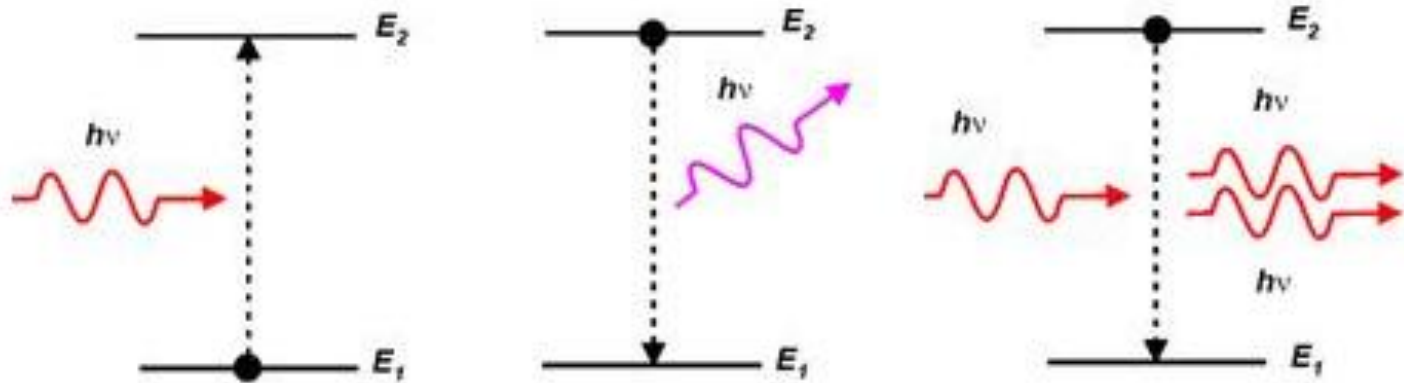


W celu uzyskania inwersji obsadzeń układ musi być „pompowany”

Podstawowe metody pompowania:

- wyładowania elektryczne
- pobudzanie optyczne
- wstrzykiwanie nośników (złącze p-n).

Absorpcja, emisja spontaniczna i wymuszona



absorpcja

emisja spontaniczna

emisja wymuszona

Współczynniki Einsteina A_{2-1} , B_{1-2} , B_{2-1}

- $\rho(\nu)B_{1-2}$ - prawdopodobieństwo absorpcji (wymuszonej)
- $\rho(\nu)B_{2-1}$ - prawdopodobieństwo emisji wymuszonej
- A_{2-1} - prawdopodobieństwo emisji spontanicznej

$\rho(\nu)$ – gęstość widmowa promieniowania CDC

Współczynniki Einsteina

Prawdopodobieństwo absorpcji wymuszonej R_{1-2}



$$R_{1-2} = \rho(\nu) B_{1-2}$$



Proces emisji:

$$R_{2-1} = \rho(\nu) B_{2-1} + A_{2-1}$$

A_{2-1} – prawdopodobieństwo emisji spontanicznej

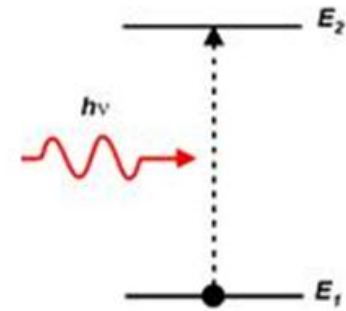
Zał: n_1 atomów w stanie E_1 i n_2 atomów w stanie E_2 jest w równowadze w temperaturze T z polem promieniowania o gęstości $\rho(\nu)$:

$$n_1 R_{1-2} = n_2 R_{2-1} \quad n_1 \rho(\nu) B_{1-2} = n_2 (\rho(\nu) B_{2-1} + A_{2-1})$$

Stąd $\rho(\nu)$

$$\rho(\nu) = \frac{A_{2-1} / B_{2-1}}{\frac{n_1}{n_2} \frac{B_{1-2}}{B_{2-1}} - 1}$$

Współczynniki Einsteina



Względna liczba cząstek na dany stan:

$$\frac{n_2}{n_1} = \exp\left(\frac{-(E_2 - E_1)}{kT}\right) \quad \frac{n_1}{n_2} = \exp(E_2 - E_1) / kT = \exp(h\nu / kT)$$

$$\rho(\nu) = \frac{A_{2-1} / B_{2-1}}{\frac{B_{1-2}}{B_{2-1}} \exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} = \frac{8\pi h \nu^3 / c^3}{\exp(h\nu / kT) - 1}$$

gęstość widmowa
promieniowania CDC
(prawo Plancka)



$$\frac{B_{1-2}}{B_{2-1}} = \mathbf{1}$$

$$\frac{A_{2-1}}{B_{2-1}} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3}$$

Stosunek A_{2-1} prawdopodobieństwa emisji spontanicznej do prawdopodobieństwa emisji wymuszonej $B_{2-1}\rho(\nu)$:

$$\frac{A_{2-1}}{B_{2-1}\rho(\nu)} = \exp(h\nu/kT) - 1$$

- **Energia $h\nu$ fotonów światła widzialnego - 1.6eV – 3.1eV.**
- **kT w temperaturze 300K ~ 0.025eV – dominuje emisja spontaniczna**
- **Dopiero gdy $h\nu/kT \ll 1$ emisja wymuszona może być dominująca. I tak np. w zakresie mikrofalowym $h\nu < 0.0015\text{eV}$.**

W ogólności częstość emisji do częstości absorpcji x jest dana wzorem:

$$x = \frac{n_2 A_{2-1} + n_2 B_{2-1} \rho(\nu)}{n_1 B_{1-2} \rho(\nu)} = \left[1 + \frac{A_{2-1}}{B_{2-1} \rho(\nu)} \right] \frac{n_2}{n_1} \approx \frac{n_2}{n_1}$$

jeśli $h\nu/kT \ll 1$.

$$x \sim n_2/n_1$$

Inwersja obsadzeń

W ogólności częstość emisji do częstości absorpcji x jest dana wzorem:

$$x = \frac{n_2 A_{2-1} + n_2 B_{2-1} \rho(\nu)}{n_1 B_{1-2} \rho(\nu)} = \left[1 + \frac{A_{2-1}}{B_{2-1} \rho(\nu)} \right] \frac{n_2}{n_1} \approx \frac{n_2}{n_1}$$

$$\frac{A_{2-1}}{B_{2-1} \rho(\nu)} = \exp(h\nu / kT) - 1$$

i jeśli $h\nu / kT \ll 1$ to

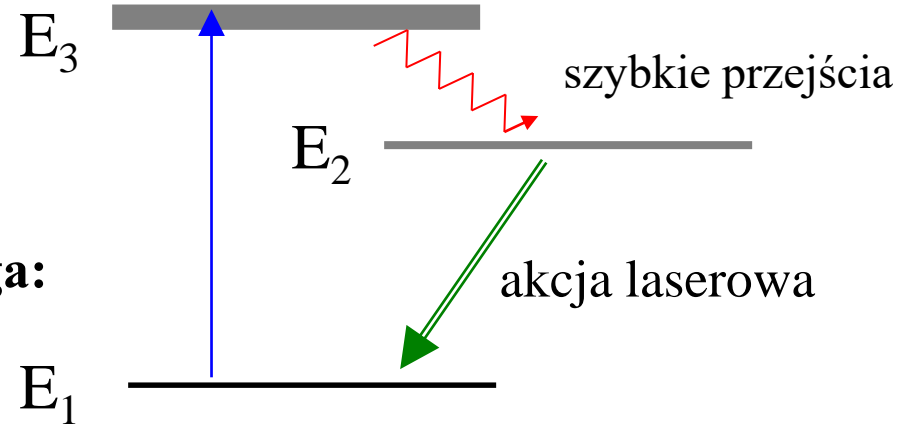
$$\mathbf{x \sim n_2 / n_1}$$

Inwersja obsadzeń

Przebieg akcji laserowej

Relacja nieoznaczoności Heisenberga:

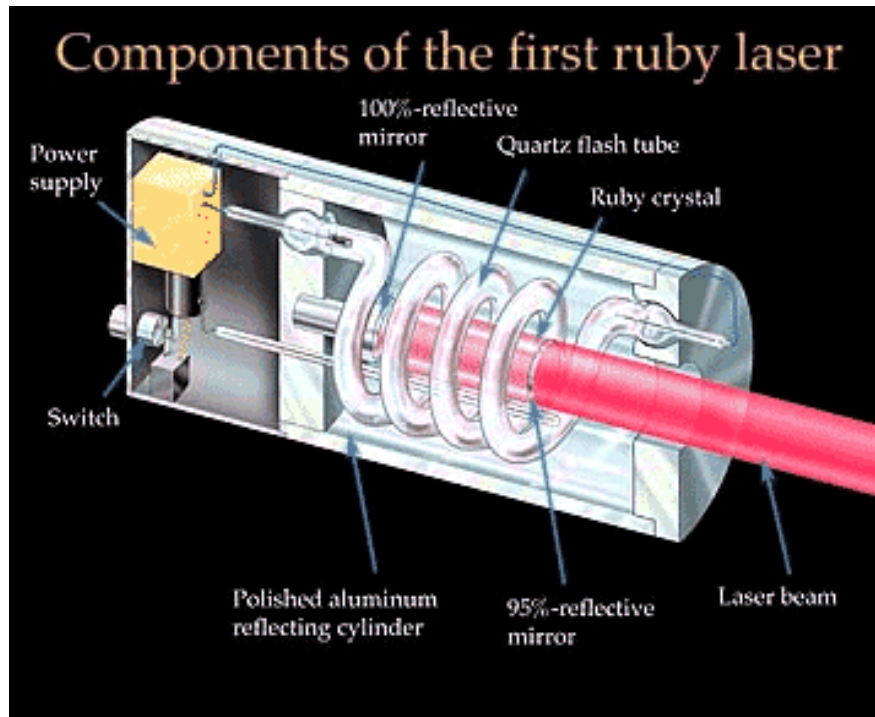
$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$



- **Pompowanie optyczne obsadza szeroki poziom E_3 o krótkim czasie życia, rzędu 10^{-8} s; poziomy: metastabilny i podstawowy są wąskie**
- **Elektrony przechodzą z pasma wzbudzonego na poziom metastabilny i gromadzą się: inwersja obsadzeń.**
- **Emisja wymuszona. (Wystarczy aby jeden elektron opuścił stan metastabilny w procesie emisji spontanicznej. Powstający foton zapoczątkuje emisję wymuszoną.)**
- **Wiązka fotonów porusza się prostopadle do luster - powstaje fala stojąca –drugi bardzo ważny warunek aby wystąpiła akcja laserowa.**

Laser rubinowy

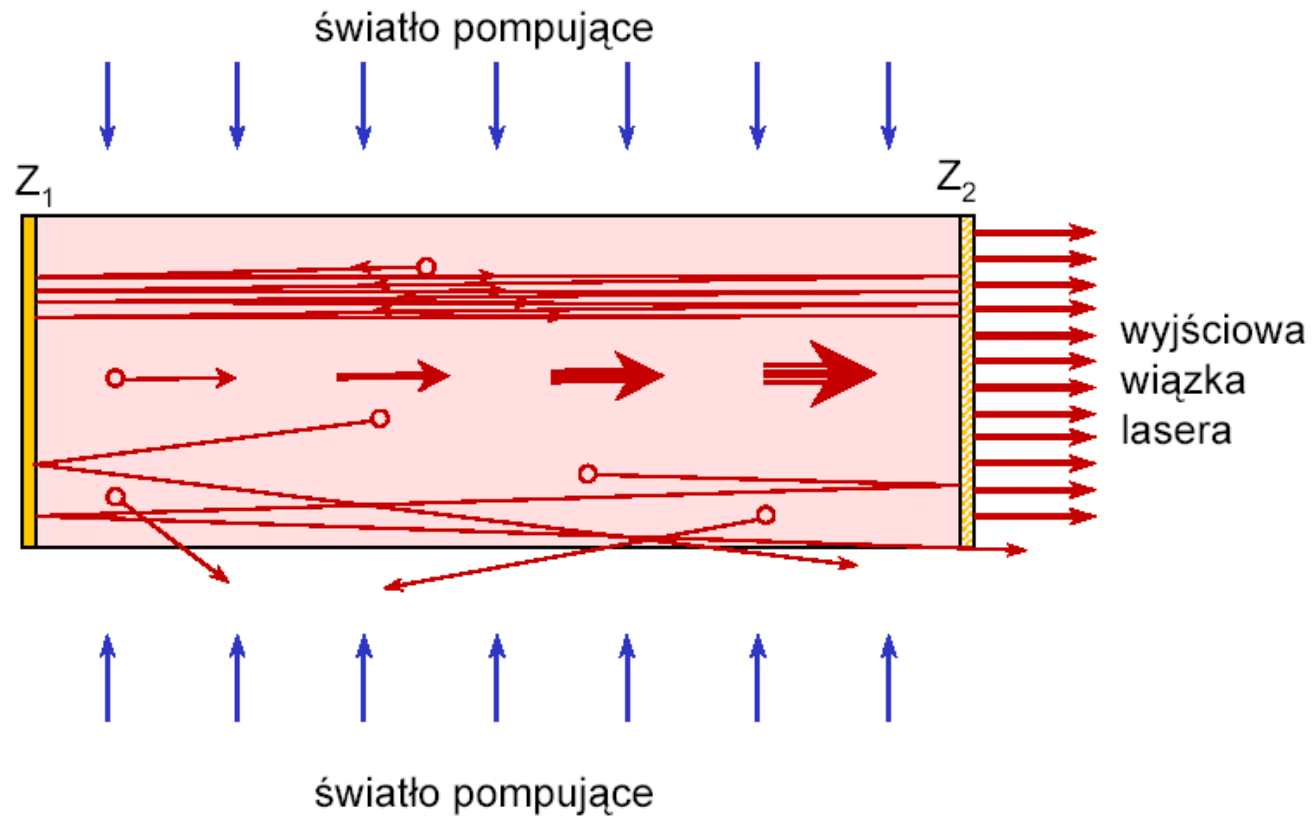
- Wynaleziony w latach 60-tych.
- Czynnik roboczy: monokryształ rubinu czyli Al_2O_3 domieszkowany Cr. Chrom ma tę samą wartościowość co glin (+3) i nadaje kryształowi różową barwę.



- Pompowanie optyczne poprzez nawiniętą spiralnie lampę błyskową
- Lustro na obu końcach kryształu.
- Laser światła czerwonego (694,3 nm)

Laser rubinowy

Optyczne sprzężenie zwrotne - rezonator Fabry-Perota



Lasery

Lasery można klasyfikować w zależności od rodzaju ośrodka czynnego lub długości fali emitowanego promieniowania. Najbardziej ogólny podział ze względu na pierwsze kryterium to lasery gazowe, ciekłe i na ciele stałym.

Lasery gazowe

- a) laser CO₂ (10,4 μm) (bliska podczerwień),
- b) laser CO (5 - 6,5 μm) (bliska podczerwień),
- c) laser N₂O (10,6 μm),
- d) molekularne lasery gazowe (CH₃OH, C₂H₂F₂, CH₃F) (40 μm - 1 mm) (daleka podczerwień),
- e) lasery chemiczne (w których jednym z produktów reakcji jest: I, HF, HCl, HBr, CO, CO₂) emitujące w bliskiej podczerwieni (1,3 - 11 μm),
- f) jonowy laser argonowy (476,5 - 514,5 nm) (zakres widzialny),
- g) laser kryptonowy (503,9 - 752,5 nm) (zakres widzialny),
- h) laser helowo - neonowy (632,8 nm) (zakres widzialny),
- i) lasery ekscimerowe, takie jak: ArF, XeCl, KrF, emitujące promieniowanie o długości fal 193, 248, 308 nm (UV),
- j) laser azotowy N₂ (337 nm) (UV).

Lasery ekscimerowe

Lasery ekscimerowe emitują promieniowanie o impulsach trwających od kilku nanosekund do setek nanosekund. Ośrodkiem czynnym jest mieszanina gazów szlachetnych (Ar, Kr, Xe) i halogenów (F, Cl), które tworzą krótko żyjące, niestabilne w stanie podstawowym halogenki gazów szlachetnych, np.: ArF, KrF, XeF, XeCl. Ekscimer jest skrótem od angielskiego wyrażenia excited dimer czyli sztuczna molekula, która istnieje tylko w stanie wzbudzonym o energii E^1 , a nie istnieje w stanie podstawowym o energii E^0 . Taka molekula może zostać utworzona podczas wyładowania elektrycznego. Przejścia laserowe zachodzące między stanem wzbudzonym ekscimera E^1 i stanem podstawowym E^0 , w którym cząsteczka przestaje istnieć, powodują jednocześnie zmniejszanie liczby obsadzeń niższego poziomu, czyli zwiększają inwersję obsadzeń między stanami E^1 i E^0 , co prowadzi do akcji laserowej.

Fluor i chlor są toksyczne i powodują korozję (zwłaszcza w kontakcie z wilgocią). Dlatego wymagają specjalnych środków w zakresie dostarczania gazu i pozbywania się zużytego gazu.

Lasery ciekłe

Lasery-rodzaje cd.

Do najczęściej używanych laserów ciekłych należą lasery barwnikowe, emitujące światło w zakresie widzialnym. Cząsteczki barwnika są wzbudzane optycznie za pomocą lamp błyskowych, lamp łukowych lub laserów impulsowych i ciągłych: neodymowego Nd:YAG (druga harmoniczna), argonowego, ekscimerowego, azotowego.

Lasery na ciele stałym

- a) laser rubinowy (694,3 nm) (zakres widzialny),
- b) laser Nd:YAG, w którym matrycą jest granat itrowo-glinowy, a domieszką neodym (1064nm), ($Y_3Al_5O_{12}$ - granat itrowo-glinowy)
- c) laser tytanowo-szafirowy (690 - 1080 nm) i inne lasery przestrajalne na ciele stałym,
- d) lasery na pierwiastkach ziem rzadkich (holmowy, erbowy, tulowy) emitujące promieniowanie o długości fal około 2 μm w zależności od rodzaju matrycy oraz od rodzaju domieszki,
- e) lasery półprzewodnikowe emitujące w szerokim zakresie widmowym, począwszy od zakresu widzialnego do podczerwieni.