

Podstawy fizyki kwantowej i budowy materii

prof. dr hab. Aleksander Filip Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych
Instytut Fizyki Doświadczalnej



Wykład 14
15 stycznia 2018

- 1 Emisja wymuszona
- 2 Maser
- 3 Laser
- 4 Laser na swobodnych elektronach

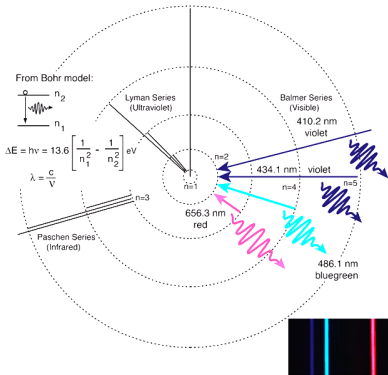
- 1 Emisja wymuszona
- 2 Maser
- 3 Laser
- 4 Laser na swobodnych elektronach

Widmo emisyjne

Kwantowy model atomu pozwolił na opisanie obserwowanych widm emisyjnych pierwiastków. Częstość emitowanego związana jest z różnicą energii między stanami początkowym (i) i końcowym (f)

$$h\nu = E^{(i)} - E^{(f)}$$

Warunkiem emisji jest wcześniejsze wzbudzenie atomu!



<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hyde.html>

Widmo absorpcyjne

Atomy w stanie podstawowym nie mogą emitować promieniowania. Ale mogą absorbować promieniowanie o częstościach odpowiadającym dozwolonym przejściom ze stanu podstawowego (i) do wzbudzonego (f)

$$h\nu = E^{(f)} - E^{(i)}$$

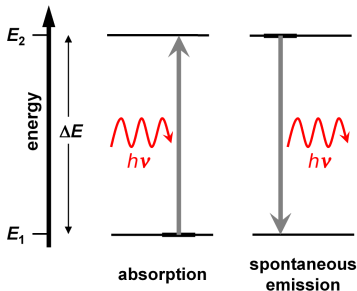
Częstości te odpowiadają dokładnie liniom emisyjnym!

Przykład: linie absorpcyjne w widmie słonecznym (linie Fraunhofera)



Przewidywania teoretyczne

W roku 1917 A.Einstein zasugerował, że oprócz **absorpcji promieniowania** i jego **spontanicznej emisji** przez wzbudzony atom istnieje jeszcze trzeci rodzaj przejścia.

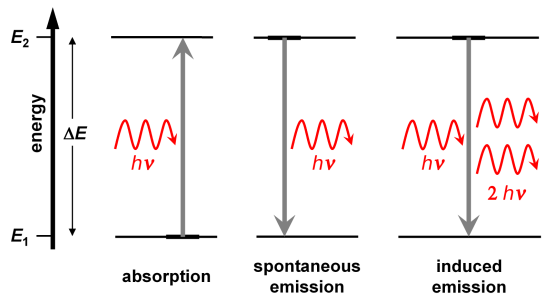


Emisja wymuszona

Przewidywania teoretyczne

W roku 1917 A.Einstein zasugerował, że oprócz absorpcji promieniowania i jego spontanicznej emisji przez wzbudzony atom istnieje jeszcze trzeci rodzaj przejścia.

Wzbudzony atom możemy "zachęcić" do emisji promieniowania przez oświetlenie go światłem o oczekiwanej częstotliwości \Rightarrow emisja wymuszona



Foton z emisji wymuszonej ma ten sam kierunek co fotonem wyzwalający

Przewidywania teoretyczne

Dlaczego w “normalnych” warunkach emisja wymuszona nie jest obserwowana?

W temperaturze pokojowej ($T \sim 300K$) liczba atomów w stanie wzbudzonym, N^* (przyjmujemy $\Delta E \sim 1eV$), jest dużo niższa niż atomów w stanie podstawowym, N_0 :

$$N^* = N_0 e^{-\frac{\Delta E}{kT}} \sim 10^{-17} N_0 \quad k \approx 8.6 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$$

Ponieważ prawdopodobieństwo emisji wymuszonej w stanie wzbudzonym jest takie samo jak prawdopodobieństwo absorpcji w stanie podstawowym \Rightarrow dominującym efektem będzie absorpcja promieniowania!

Przewidywania teoretyczne

Dlaczego w “normalnych” warunkach emisja wymuszona nie jest obserwowana?

W temperaturze pokojowej ($T \sim 300K$) liczba atomów w stanie wzbudzonym, N^* (przyjmujemy $\Delta E \sim 1eV$), jest dużo niższa niż atomów w stanie podstawowym, N_0 :

$$N^* = N_0 e^{-\frac{\Delta E}{kT}} \sim 10^{-17} N_0 \quad k \approx 8.6 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$$

Ponieważ prawdopodobieństwo emisji wymuszonej w stanie wzbudzonym jest takie samo jak prawdopodobieństwo absorpcji w stanie podstawowym \Rightarrow dominującym efektem będzie absorpcja promieniowania!

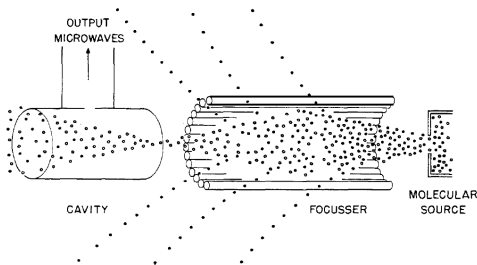
Żeby emisja wymuszona mogła prowadzić do wzmocnienia promieniowania, musimy doprowadzić do tzw. **inwersji obsadzeń**, sytuacji gdy $N^* > N_0$!

- 1 Emisja wymuszona
- 2 Maser
- 3 Laser
- 4 Laser na swobodnych elektronach

Idea

W kwietniu 1951 Charles Townes wpadł na pomysł budowy MASER'a (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

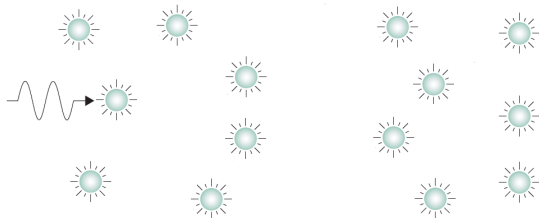
Pomysł był "prosty": dokonać selekcji cząsteczek w stanie wzbudzonym. Do wybrania wzbudzonych cząsteczek z wiązki można było wykorzystać odpowiednio ukształtowane pole magnetyczne.



Wzbudzone cząsteczki wprowadzane były do wnęki rezonansowej, w której pojedyncza emisja spontaniczna mogła zainicjować "reakcję łańcuchową"

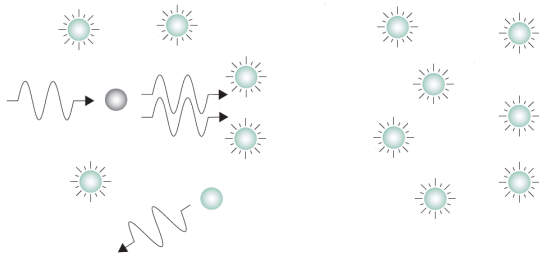
Zasada działania

Jeśli w ośrodku przeważają cząsteczki w stanie wzbudzonym, już pierwszy foton wyemitowany spontanicznie inicjuje reakcję “powielania”



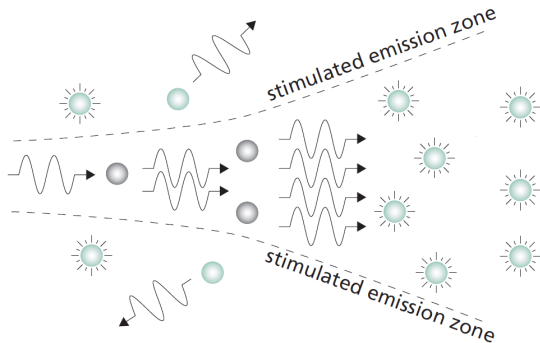
Zasada działania

Jeśli w ośrodku przeważają cząsteczki w stanie wzbudzonym, już pierwszy foton wyemitowany spontanicznie inicjuje reakcję “powielania”



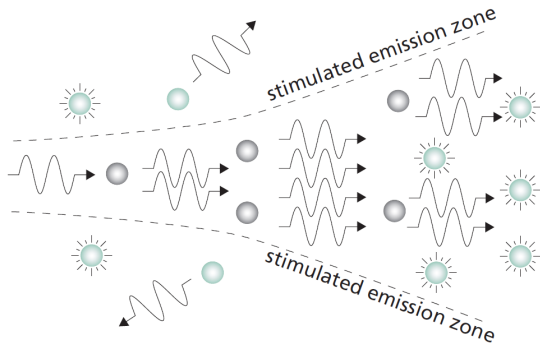
Zasada działania

Jeśli w ośrodku przeważają cząsteczki w stanie wzbudzonym, już pierwszy foton wyemitowany spontanicznie inicjuje reakcję “powielania”



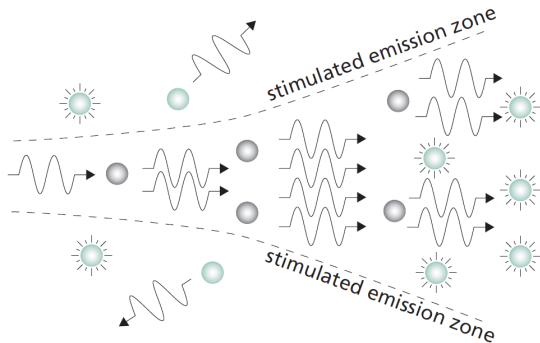
Zasada działania

Jeśli w ośrodku przeważają cząsteczki w stanie wzbudzonym, już pierwszy foton wyemitowany spontanicznie inicjuje reakcję “powielania”



Zasada działania

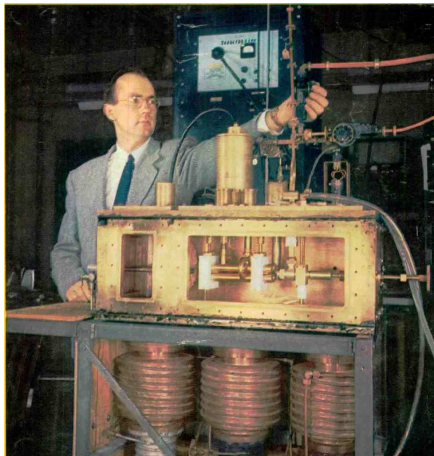
Jeśli w ośrodku przeważają cząsteczki w stanie wzbudzonym, już pierwszy foton wyemitowany spontanicznie inicjuje reakcję “powielania”



Aby uzyskać użyteczne źródło promieniowania, wzmocnienie przez emisję spontaniczną musi być większe niż straty na absorpcję i ucieczkę fotonów

Maser

Pierwsze działające urządzenie powstało w roku 1954. Promieniowanie mikrofalowe cząsteczek amoniaku ($\lambda \sim 1$ cm) miało moc zaledwie ok. 10nW



Charles Townes ze swoim pierwszym maserem

- 1 Emisja wymuszona
- 2 Maser
- 3 Laser**
- 4 Laser na swobodnych elektronach

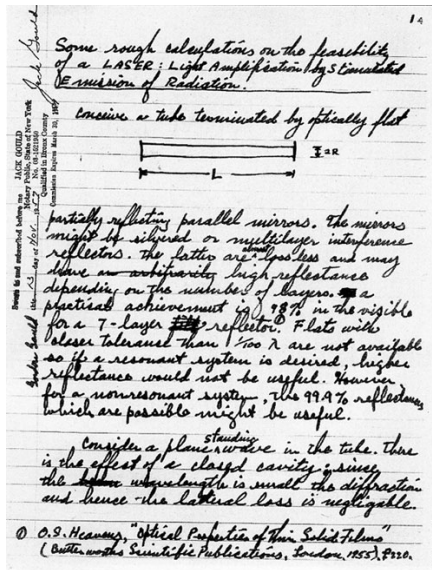
Koncepcja lasera

W listopadzie 1957 roku Gordon Gould po raz pierwszy użył skrótu LASER w notatce opisującej koncepcję jego budowy.

Zauważył, że do uzyskania wydajnej emisji konieczne jest zastosowanie optycznej **wnęki rezonansowej**

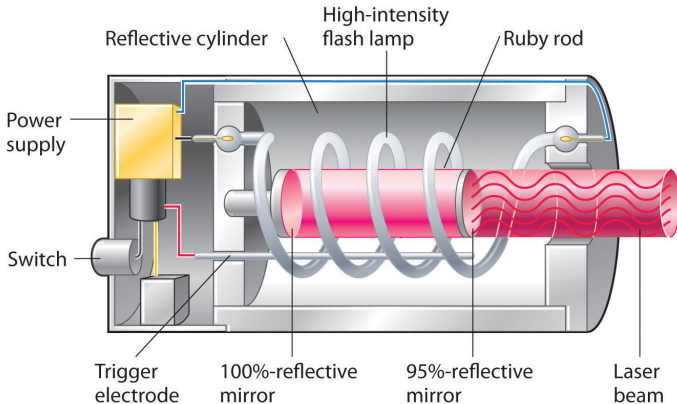
W 1958 roku Charles Townes i Arthur Schawlow publikują artykuł opisujący koncepcję lasera

Gould 30 lat walczył o uznanie jego pierszeństwa (i wpływy patentowe)



Laser rubinowy

Pierwszy LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) zbudowany został w maju 1960 przez Theodora Maimana.



Błyski lampy pozwalały uzyskać inwersję obsadzeń w jonach chromu...

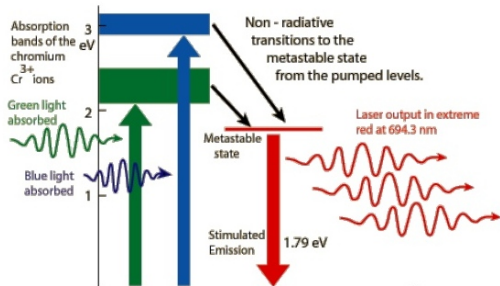
Inwersja obsadzeń

Nie jest możliwe uzyskanie inwersji obsadzeń w układzie dwóch poziomów.

Poziom, na którym chcemy uzyskać inwersję powinien być metastabilny, bezpośrednie przejście z poziomu podstawowego jest mało prawdopodobne.

Musimy wprowadzać elektrony na ten poziom drogą pośrednią...

W laserze rubinowym wykorzystujemy nieradiacyjne przejścia z wyżej położonych poziomów wzbudzonych.

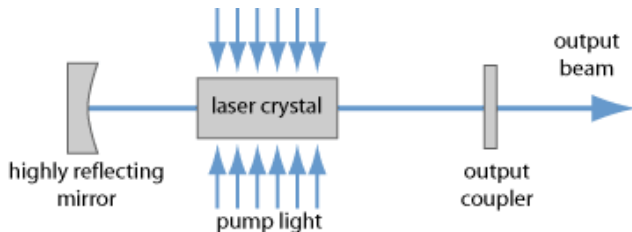


Silny błysk lampy błyskowej powoduje wzbudzenie większości jonów chromu, przechodzą one następnie do stanu metastabilnego

Wnęka rezonansowa

Inwersja obsadzeń nie wystarcza! Aby możliwe było uzyskanie “akcji laserowej” trzeba zwiększyć prawdopodobieństwo emisji wymuszonej.

Można to uzyskać umieszczając ośrodek aktywny we wnęce rezonansowej.



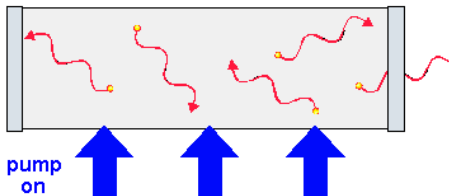
Wnęka rezonansowa

Inwersja obsadzeń nie wystarcza! Aby możliwe było uzyskanie “akcji laserowej” trzeba zwiększyć prawdopodobieństwo emisji wymuszonej.

Można to uzyskać umieszczając ośrodek aktywny we wnęce rezonansowej.

Tuż po pobudzeniu ośrodka dominuje emisja spontaniczna.

Fotony emitowane są we wszystkich kierunkach

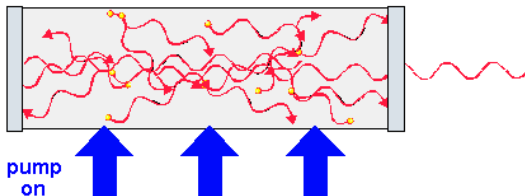


Wnęka rezonansowa

Inwersja obsadzeń nie wystarcza! Aby możliwe było uzyskanie “akcji laserowej” trzeba zwiększyć prawdopodobieństwo emisji wymuszonej.

Można to uzyskać umieszczając ośrodek aktywny we wnęce rezonansowej.

Fotony wyemitowane spontanicznie wzdłuż osi wnęki mają najdłuższą drogę w ośrodku - największą szansę na wymuszenie wtórej emisji

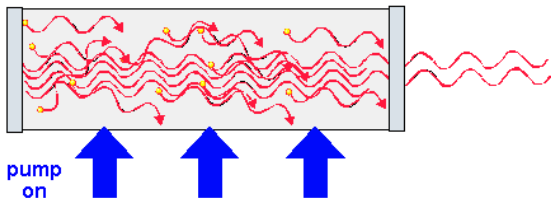


Wnęka rezonansowa

Inwersja obsadzeń nie wystarcza! Aby możliwe było uzyskanie “akcji laserowej” trzeba zwiększyć prawdopodobieństwo emisji wymuszonej.

Można to uzyskać umieszczając ośrodek aktywny we wnęce rezonansowej.

Dzięki zastosowaniu wnęki droga w ośrodku ulega zwielokrotnieniu
⇒ powielanie fotonu jest bardziej prawdopodobne niż jego “ucieczka”

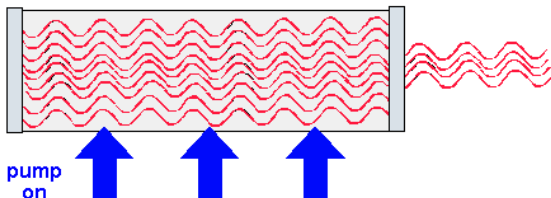


Wnęka rezonansowa

Inwersja obsadzeń nie wystarcza! Aby możliwe było uzyskanie “akcji laserowej” trzeba zwiększyć prawdopodobieństwo emisji wymuszonej.

Można to uzyskać umieszczając ośrodek aktywny we wnęce rezonansowej.

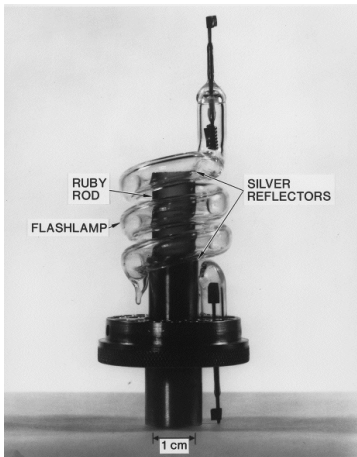
Fotony emitowane wzdłuż osi wnęki wielokrotnie przelatują przez ośrodek co umożliwia ich lawinowe powielanie \Rightarrow akcja laserowa



Oś wnęki rezonansowej definiuje nam jednocześnie kierunek emisji wiązki...

Laser rubinowy

Pierwszy LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) zbudowany został w maju 1960 przez Theodora Maimana.



Jeff Hecht, Opt. Eng. 49 (2010) 091002

Laser hel-neon grudzień 1960

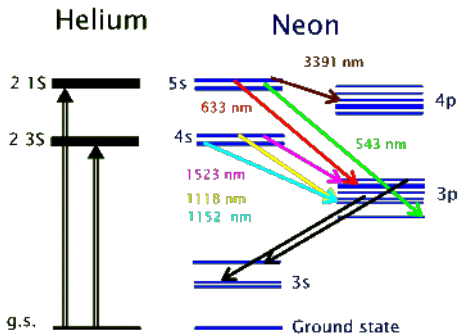
Wadą lasera rubinowego było m.in. to, że pracował impulsowo

Pierwszym laserem, w którym uzyskano ciągłą wiązkę był laser He-Ne

Inwersję obsadzeń pomiędzy stanami 5s i 3p w neonie uzyskujemy poprzez wyładowania elektryczne w gazie: mieszanie neonu i helu

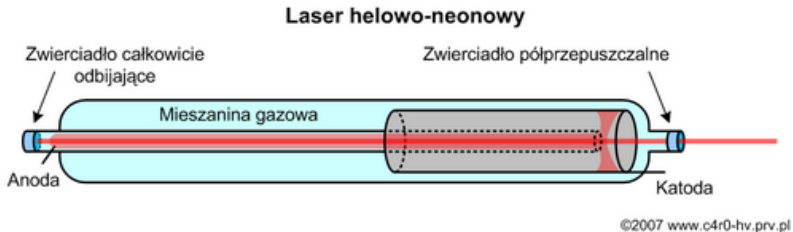
Wzbudzone w wyniku wyładowania atomy helu przekazują energię zderzając się z atomami neonu

Inwersję obsadzeń uzyskujemy nawet przy słabym pobudzeniu, gdyż stan 3p nie jest normalnie obsadzony



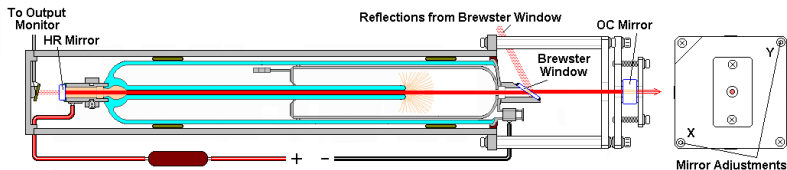
Laser hel-neon

Schemat budowy lasera hel-neon:



Laser hel-neon

Schemat budowy lasera hel-neon:



HeNe Laser Tube with Internal HR and Brewster Window with External OC

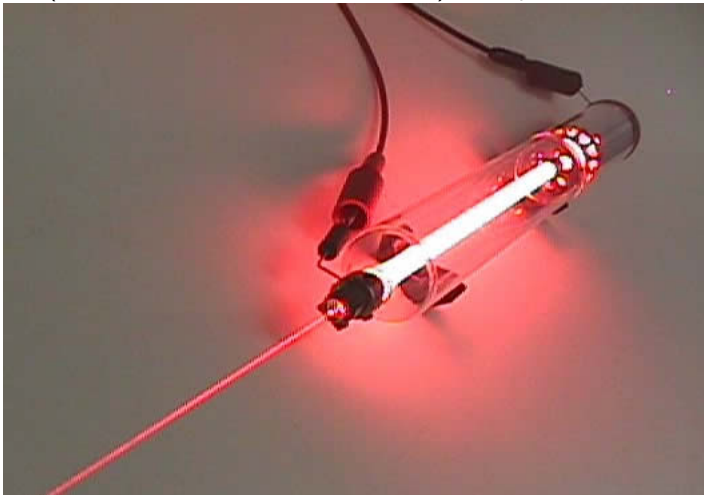
Wnękę rezonansową możemy dostroić do wybranej długości fali
 “Okienko Brewstera” pozwala uzyskać spolaryzowaną wiązkę laserową

Lasery hel-neon pracują pod ciśnieniem ok. 10^{-3} atm

Napięcie pracy 1 do 3 kV, napięcie startowe (“zapłonu”) 5 do 12 kV

Laser hel-neon

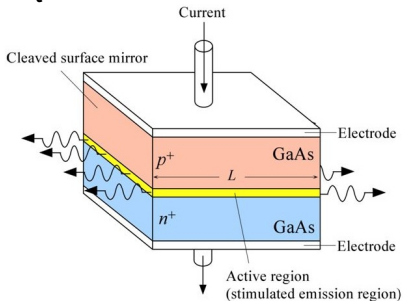
Rura lasera (z zintegrowanymi zwierciadłami) podłączona do zasilania



Laser półprzewodnikowy

Przy przepływie prądu przez złącze $p - n$ rekombinacja par elektron-dziura w obszarze złącza może prowadzić do emisji fotonów (np. w diodach LED)

Jeśli zapewnimy odpowiednie warunki, możemy uzyskać efekt wzmocnienia przez emisję wymuszoną fotonów \Rightarrow dioda laserowa



Pierwszy laser półprzewodnikowy został zbudowany już w 1962 roku, ale pracował w temperaturze ciekłego azotu...

Podsumowanie

Kluczowe elementy, które warunkują działanie lasera:

- emisja wymuszona - umożliwia "powielanie" fotonów
- inwersja obsadzeń - umożliwia uzyskanie "netto" wzmocnienia strumienia fotonów
- wnęka rezonansowa - zwiększa prawdopodobieństwo emisji wymuszonej, ustala mod pracy lasera

Podsumowanie

Kluczowe elementy, które warunkują działanie lasera:

- emisja wymuszona - umożliwia “powielanie” fotonów
- inwersja obsadzeń - umożliwia uzyskanie “netto” wzmocnienia strumienia fotonów
- wnęka rezonansowa - zwiększa prawdopodobieństwo emisji wymuszonej, ustala mod pracy lasera

Najważniejsze cechy światła laserowego:

- monochromatyczne
- spójne
- skolimowane - może być skupione na bardzo małej powierzchni

Historia

- 1917 – Albert Einstein wskazuje na proces emisji wymuszonej
- 1954 – pierwsza obserwacja wzmocnienia - maser mikrofalowy
- 1957 – idea lasera optycznego (Gordon Gould)
- 1960 – laser rubinowy
- 1962 – laser He-Ne, laser półprzewodnikowy
- 1964 – laser CO_2
- 1966 – laser barwnikowy

Historia

- 1917 – Albert Einstein wskazuje na proces emisji wymuszonej
- 1954 – pierwsza obserwacja wzmocnienia - maser mikrofalowy
- 1957 – idea lasera optycznego (Gordon Gould)
- 1960 – laser rubinowy
- 1962 – laser He-Ne, laser półprzewodnikowy
- 1964 – laser CO_2
- 1966 – laser barwnikowy
- 1968 – pierwsze zastosowanie medyczne (zwyrodnienie siatkówki)
- 1970 – dioda laserowa pracująca w temperaturze pokojowej
- 1970 – początki telekomunikacji światłowodowej
- 1974 – pierwszy czytnik kodów paskowych
- 1976 – pierwszy laser na swobodnych elektronach (FEL)
- 1982 – pierwsze płyty i odtwarzacze CD
- 2010 – impuls lasera osiąga 1 MJ (National Ignition Facility, NIF, USA)

Zastosowania

Przykłady wykorzystania laserów

- skanery, czytniki CD/DVD/B-R, wskaźniki laserowe
- łącza światłowodowe (telekomunikacja, sieci komputerowe)
- cięcie materiałów, spawanie (głównie lasery CO_2)
- fotolitografia (podstawa współczesnej elektroniki)
- holografia
- interferometria (niesłychanie precyzyjny pomiar odległości)
- badanie zanieczyszczeń atmosfery (LIDAR)
- chirurgia i mikrochirurgia

Zastosowania

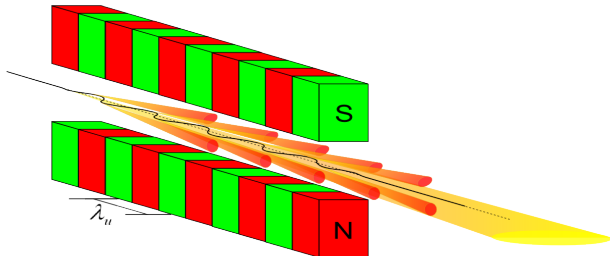
Przykłady wykorzystania laserów

- skanery, czytniki CD/DVD/B-R, wskaźniki laserowe
- łącza światłowodowe (telekomunikacja, sieci komputerowe)
- cięcie materiałów, spawanie (głównie lasery CO_2)
- fotolitografia (podstawa współczesnej elektroniki)
- holografia
- interferometria (niesłychanie precyzyjny pomiar odległości)
- badanie zanieczyszczeń atmosfery (LIDAR)
- chirurgia i mikrochirurgia
- badania podstawowe
 - femtochemia
 - czasowo-rozdzielcza spektroskopia
 - mikroskopia konfokalna
 - ...

- 1 Emisja wymuszona
- 2 Maser
- 3 Laser
- 4 Laser na swobodnych elektronach

Promieniowanie synchrotronowe

Intensywność promieniowania synchrotronowego wiązki elektronów możemy “wzmocnić” stosując zamiast zwykłych magnesów zakrzywiających specjalne układy magnesów, tzw. **wiggler** lub **undulatory**

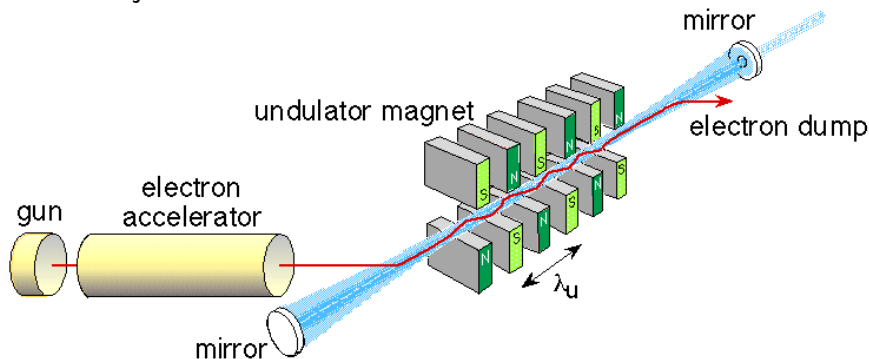


Możemy uzyskać silnie skolimowaną wiązkę promieniowania.

Obserwujemy emisję spontaniczną promieniowania synchrotronowego...

Free Electron Laser (FEL)

Możemy jednak “zachęcić” wiązkę elektronów do promieniowania w wybranej długości fali umieszczając układ w odpowiednio dobranej wnęce rezonansowej



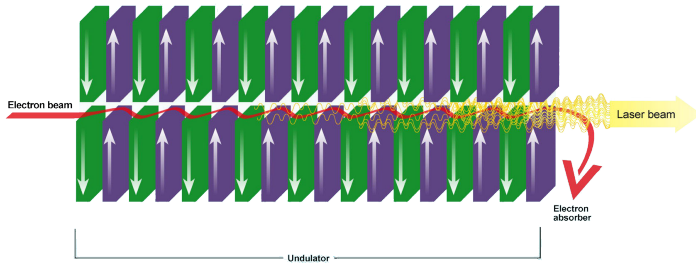
Dobierając parametry undulatora i wnęki możemy uzyskać silne wzmocnienie emisji wymuszonej dla wybranej długości fali \Rightarrow laser

Laser na swobodnych elektronach

Samowzmacniająca emisja spontaniczna

Self-amplified spontaneous emission (SASE)

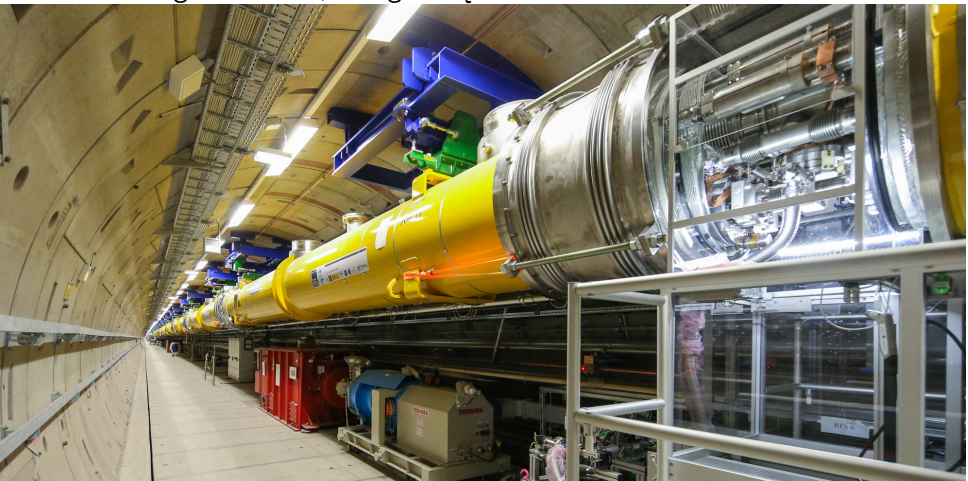
Jeśli wiązka jest bardzo intensywna i silnie skolimowana, emisja wymuszona może zdominować promieniowanie nawet bez wnęki rezonansowej (!)



Możemy uzyskać wiązkę laserową w bardzo szerokim zakresie długości fali, także w zakresie promieniowania rentgenowskiego (nie ma zwierciadeł!)

Laser na swobodnych elektronach - FEL

Akcelerator w Hamburgu budowany przez międzynarodowe konsorcjum X-FEL : długość 3.4 km, energia wiązki e^- do 17.5 GeV $\Rightarrow \lambda = 0.05$ nm.



Laser na swobodnych elektronach

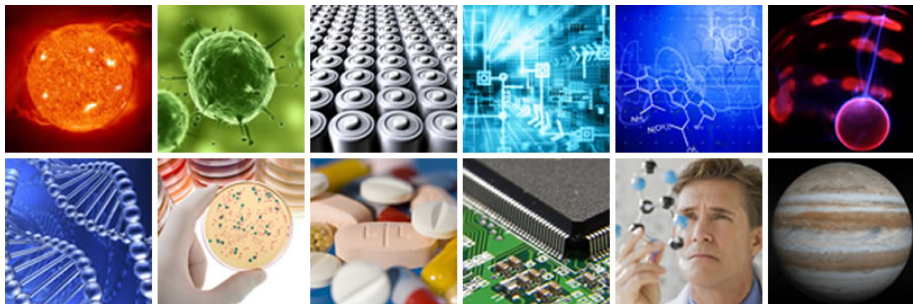
Laser na swobodnych elektronach X-FEL

Wiązka ma wszystkie własności klasycznej wiązki laserowej:

- monochromatyczna,
- niezwykle intensywna,
- w postaci bardzo krótkich impulsów.

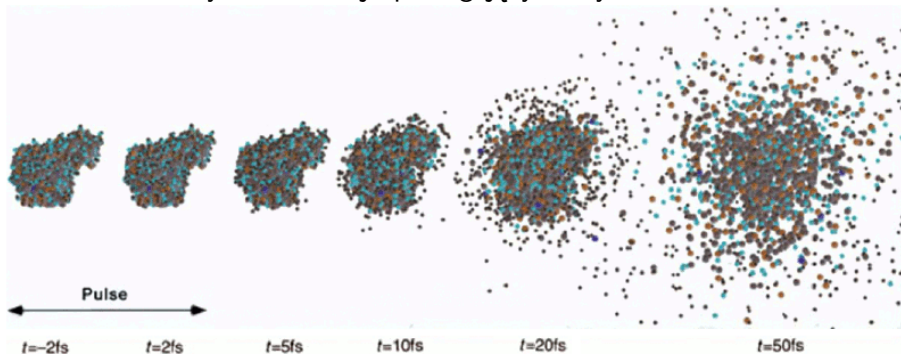
Nowe możliwości badawcze w wielu dziedzinach:

biologii, medycynie, farmacji, chemii, fizyce materiałów, nanotechnologii, energetyce, elektronice, fotonice, ochronie środowiska.



Przykład

Możliwość prowadzenia badań strukturalnych (dyfrakcja rentgenowska) także dla delikatnych substancji, podlegających szybkiemu zniszczeniu



Impuls lasera X-FEL jest tak krótki (< 5 fs), że atomy nie zdążą zmienić swojego ustawienia, mimo dużego przekazu energii...