



Meandry Techniki Laserowej ***Typy laserów***

Zdzisław Jankiewicz

Podziel się wiedzą – WAT, Warszawa 15.05.2018

Zakres merytoryczny cyklu

1. Nie jest to wykład określonego przedmiotu – to pogadanki o urządzeniach elektroniki kwantowej: maserach i laserach, oraz o ich najbardziej wyszukanych zastosowaniach.
2. Nie będziemy przy tym stronić od wiadomości podstawowych, przedkładając przy tym interpretację fizyczną nad matematyczną.
3. Dlaczego: „Meandry...”. Rozwój urządzeń e-k nie był z góry przewidziany. Masery budowane z trudem i ograniczonymi możliwościami zastosowań. Pojawienie się lasera zmienia zasadniczo tempo rozwoju i perspektywy.
4. Pojawia się wiele ośrodków wykazujących akcję laserową. Technologia wielu z nich dojrzewała ujawniając zasadnicze ich walory i możliwości.
5. Wszystko to powoduje, że poszczególne typy laserów konkurują z sobą parametrami, czasem pracy, ceną, a przede wszystkim aplikacjami.
6. Pragnę pokazać pojawienie się poszczególnych rozwiązań technicznych, ich twórców, a niejednokrotnie późniejszy ich zmierzch.
7. Z czasem (obecnie) stabilizują się dominujące typy laserów.
8. Możliwościami aplikacyjnymi lasery kształtują rozwój cywilizacji.



Motto:

„W przyrodzie realizowana jest idea matematycznej prostoty” A. Einstein

„Nie ma nic bardziej użytecznego, niż dobra teoria” L. Boltzmann

1. Wzmacniacz kwantowy **- to bardzo proste**

Zdzisław Jankiewicz

Podziel się wiedzą – WAT, Warszawa 5.04.2019

Streszczenie

Zapoznanie się z zasadami wzmacniaczy i generatorów kwantowych najlepiej dokonać na bazie podstawowej pracy A. Einsteina z roku 1917 „**On the quantum theory of radiation**”, **Phys. Z. p. 121 (1917)**. W ten sposób możemy przybliżyć sobie ideę i zasadę działania wzmacniacza kwantowego oraz sens i znaczenie wprowadzonych przez niego współczynników emisji spontanicznej i wymuszonej, które są używane także we współczesnej literaturze.

Wcześniej warto jednak przypomnieć sobie dwa ważne zagadnienia:

- **Prawo promieniowania ciała doskonale czarnego – Maxa Plancka** i wynikające z niego wnioski,
- **Prawo gęstości obsadzeń stanów energetycznych w nie zaburzonym stanie równowagi termodynamicznej – Ludwika Boltzmanna**.

W realnych warunkach, gdy temperatura przewyższa wartość zera bezwzględnego, materia jest źródłem promieniowania elektro-magnetycznego, którego rozkład określony jest Prawem Plancka. Podaną tu jego wyidealizowaną (ciało doskonale czarne) postać otrzymał M. Planck po założeniu (jego słusność udowodnił A. Einstein w 1907r.), że promieniowanie to emitowane jest w postaci kwantów energii, których wartość jest wprost proporcjonalna do częstotliwości fali za pomocą, której się rozprzestrzenia. Współczynnik proporcjonalności nazwany został **stałą Plancka** i oznaczony symbolem „**h**”.

Każdy materialny element kwantowy (atom, jon, molekuła) umieszczony w otoczeniu innych podobnych mu elementów tworzących cały ich kompleks (termostat o określonej temperaturze T), poddawany jest podwójnemu oddziaływaniu: mechanicznemu (związanemu z ruchem postępowym lub drganiami elementów tworzących termostat) i cieplnemu promieniowaniu elektromagnetycznemu, istniejącemu w jego otoczeniu. Oddziaływania te powodują zmiany energii elementów kwantowych (przejścia pomiędzy charakterystycznymi dla nich stanami energetycznymi), ustalając naturalny rozkład ich liczby na poszczególnych wyróżnionych poziomach energetycznych. Rozkład ten w nie zaburzonym stanie stacjonarnym określa właśnie Prawo Boltzmanna.

Jak z powyższego wynika zagadnienia promieniowania cieplnego (Plancka), rozkład obsadzeń stanów energetycznych (Boltzmanna) i wzmacnianie kwantowe (podane przez Einsteina) wiążą się z sobą i wzajemnie warunkują, stąd przypomnienie tych dwóch pierwszych w tym miejscu jest zasadne.

Dodam do tego ponadto różne, używane w literaturze miary energii promieniowania elektromagnetycznego, gdyż odbiegają one od powszechnie używanych (w międzynarodowym układzie jednostek), a specjaliści z zakresu fizyki, elektrodynamiki, telekomunikacji itp. mają w tym względzie swoje ulubione przyzwyczajenia i stosują je w technicznym piśmiennictwie.

Przechodząc do meritum, należy zauważyć rzecz charakterystyczną. Zasada działania kwantowego wzmacniacza, (co przeważnie oznacza także generację) została sformułowana wtedy, gdy inne metody wzmocnienia (generacji) promieniowania elektromagnetycznego były już znane i stosowane. Znane już były prądnice energetyczne (wytwarzające przebiegi o częstotliwości 50/60Hz) przetwarzające energię mechaniczną na elektryczną, także elementy umożliwiające wytwarzanie sygnałów o większych częstotliwościach: lampy elektronowe, klistrony, magnetrony, tranzystory. Wszystkie te urządzenia wykorzystują do wzmocnienia (generacji) promieniowania elektromagnetycznego **swobodne (niezwiązane) elektrony**. Mogą to być swobodne elektrony z **pasma przewodnictwa metali**, które poruszane w polu magnetycznym przemieszczają się i grupują tworząc charakterystyczne różnice potencjału, lub strumień elektronów **emitowany z katod urządzeń próżniowych** (lamp elektronowych itp.), następnie przyśpieszany w polu elektrostatycznym oraz odpowiednio grupowany. Oddają one część swojej energii kinetycznej do pola obwodów rezonansowych, a ta z kolei emitowana jest w przestrzeń w postaci fal elektromagnetycznych. Cechą charakterystyczną tej metody generacji jest możliwość wykorzystywania jedynie części energii kinetycznej elektronu. Przez to powstaje zdolność do wytwarzania promieniowania o różnych częstotliwościach oraz ich przestrajanie.

Czym więc się różni od tych urządzeń wzmacniacz (generator) kwantowy. Proponowana przez A. Einsteina metoda pokazuje możliwość wykorzystania do celów wzmocnienia (generacji) promieniowania elektromagnetycznego nie elektrony swobodne, ale **konfiguracje elektronów związanych z powłoką elektronową elementów kwantowych**. To jakościowa różnica, która decydująco wpływa na sposób pobudzania tego rodzaju urządzeń (rodzaj przetwarzanej w trakcie generacji energii) i na ich parametry wyjściowe. Przede wszystkim w urządzeniach tych w stosunkowo łatwy sposób rozszerzone zostało pasmo generowanych częstotliwości na zakres optyczny aż do ultrafioletu włącznie. Metody wykorzystujące elektrony swobodne w tym zakresie widma były nieskuteczne. Obecnie aczkolwiek są już takie możliwości (laser na swobodnych elektronach), są one dość uciążliwe i nie często wykorzystywane.

W ślad za tokiem rozumowania autora ww. publikacji, śledzić będziemy skutki oddziaływania zewnętrznego (sztucznie wytworzonego i odpowiednio uformowanego) pole elektromagnetycznego (strumienia fotonów) na zespół elementów kwantowych (materiał aktywny wzmacniacza) znajdujących się w temperaturze T i poddanych działaniu wynikającemu stąd promieniowania cieplnego Plancka.

*Zasadniczym dorobkiem publikacji A. Einsteina było wprowadzenie pojęcia **emisji wymuszonej**. Wykazał on, że pole elektromagnetyczne (foton) oddziałując na wzbudzony element kwantowy znajdujący się na wyższym poziomie energetycznym, przy spełnieniu określonych warunków, może spowodować jego przejście na poziom energetyczny niższy i emisję fotonu. Ponieważ foton wymuszony (wtórny) ma identyczne cechy jak foton wymuszający (pierwotny) - są one nierozróżnialne. W przypadku wielokrotnego powtarzania tego aktu można mówić, że pole wymuszające jest powiększane o pole wymuszone, a więc wzmacniane.*

Tak by było, gdyby nie istniał proces odwrotny. Pole wymuszające (foton) może także oddziaływać na element kwantowy nie wzbudzony (na niższym poziomie) i go wzbudzić (przenieść na poziom wyższy). Wtedy zostanie pochłonięty, a pole wymuszające zmniejszane – stłumione.

*Jak z tego wynika, proces kwantowego wzmocnienia, to różnica liczby aktów emisji wymuszonej i liczby aktów absorpcji strumienia fotonów oddziałujących z zespołem elementów kwantowych materiału aktywnego wzmacniacza. Ze wzmacnianiem kwantowym będziemy mieli do czynienia wówczas, gdy liczba aktów emisji wymuszonej będzie większa niż liczba aktów absorpcji. Jak wynika z prostych rachunków, nastąpi to wówczas, gdy obsadzenie poziomu o wyższej energii będzie większe niż obsadzenie poziomu o energii niższej. Taki stan ośrodka aktywnego nazywamy **inwersją obsadzeń**. Jest on sprzeczny z rozkładem obsadzeń wynikającym z Prawa Boltzmann'a, co oznacza, że nie występuje w warunkach naturalnych, a może być powodowany i utrzymywany jedynie w sposób sztuczny.*

*Dodatkowo warto zwrócić uwagę na interpretację fizyczną wprowadzonego w pracy A. Einsteina **współczynnika emisji spontanicznej** – „**A**”. Oznacza on, że istnieje określone, niezerowe prawdopodobieństwo samoistnego (bez udziału promieniowania wymuszającego) przejście elementu kwantowego z wyższego do niższego stanu energetycznego z emisją fotonu - kwantu energii promienistej..*

Taki akt nazywany jest **przejściem spontanicznym**, a wynikające stąd promieniowanie **emisją spontaniczną**

Współczynnik emisji spontanicznej jest ważnym parametrem materiałowym. Liczbowo, współczynnik ten jest równy średniej liczbie aktów emisji spontanicznej w czasie jednej sekundy. W takim razie jego odwrotność jest (liczonym w sekundach) **średnim czasem życia** elementu kwantowego na wzbudzonym poziomie energetycznym w przypadku braku promieniowania wymuszającego. Dodatkowo może on zależeć od warunków, w jakich znajdują się elementy kwantowe (np. od temperatury). Współczynnik emisji spontanicznej silnie zależy od częstotliwości.

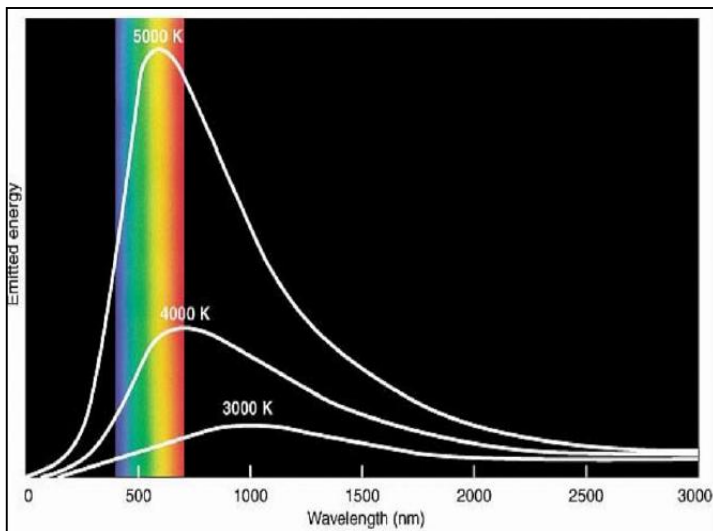
Ta ważna zależność charakteryzuje widmo emisji spontanicznej oraz określa częstotliwościową zależność oddziaływania zewnętrznego pola z elementami kwantowymi. Oddziaływanie pól elektromagnetycznych z izolowanymi obiektami kwantowymi ma charakter rezonansowy i opisywane jest funkcją Lorentza. Brak izolacji, (istnienie i wpływ otoczenia na element kwantowy) z reguły poszerza pasmo częstotliwości oddziaływania i może nawet istotnie modyfikować jego opis matematyczny. Te wielkości i funkcje charakteryzują każdy z materiałów aktywnych lasera.

To jedna z zasadniczych cech różniących generatory kwantowe od generatorów wykorzystujących swobodne elektrony. Generatory kwantowe działają jedynie w pasmach częstotliwości, które wyznacza różnica energii pomiędzy wykorzystywanymi poziomami.

Warunkiem podstawowym **zbudowania wzmacniacza (generatora) kwantowego jest umiejętność uzyskiwania i utrzymywania inwersji obsadzeń pomiędzy wybranymi poziomami energetycznymi.**

To nie jest zadanie łatwe do spełnienia szczególnie w zakresie mikrofal. W trudnościach uzyskania inwersji obsadzeń wielu autorów upatrywało duże opóźnienie pomiędzy momentem ogłoszenia teorii wzmacniacza kwantowego (1917), a jego pierwszą realizacją praktyczną (1954). Zresztą w pierwszym „maserze” na parach amoniaku, jaki zbudował Charles Townes inwersję obsadzeń uzyskano przez odseparowanie (wyodrębnienie) molekuł wzbudzonych. Przy tej różnicy częstotliwości (23,87 GHz) było ich dużo (prawie połowa). „Żyły” (przebywały na poziomie wzbudzonym) ponadto dostatecznie długo, by można było w tym stanie wprowadzić je do rezonatora i wykorzystać ich energię wzbudzenia do wzmocnienia promieniowania metodą emisji wymuszonej:

Promieniowanie termiczne



$$E_q = h\nu \quad - 1889$$

$$h = 6,6260693 \cdot 10^{-34} \text{ [J s]}$$
$$h = 4,1356674 \cdot 10^{-15} \text{ [eV s]} \quad - \text{Stała Plancka}$$

Promieniowanie ciepłe jest wszechobecne. Kosmos przenika promieniowanie resztkowe - pozostałość po BB (Big Bang - Wielkim Wybuchu), a każde ciało w temperaturze $T > 0 \text{ K}$ jest jego źródłem. Najważniejszym i największym źródłem dla naszej planety - Ziemi jest **Słońce**. Temperaturę słońca ocenia się na $\sim 5500 \text{ K}$, przy której $\lambda_{\max} = 550 \text{ nm}$ (barwa zielona).

Istotnym dla opracowania teorii promieniowania cieplnego było założenie M. Planck'a, że emitowane jest ono w postaci **kwantów** o energii wprost proporcjonalnej do częstotliwości fali z jaką się propaguje.

Promieniowanie ciała doskonale czarnego

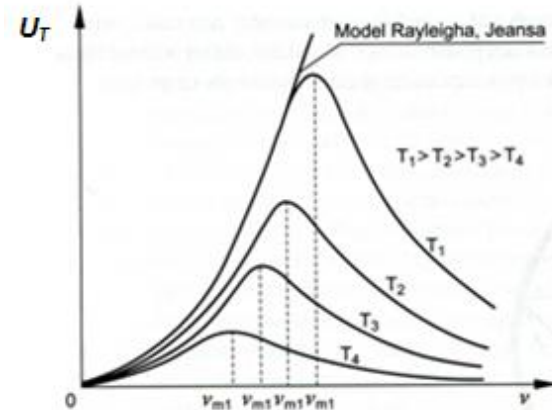
Max Planck



1858 -1947

Gęstość energii promieniowania cieplnego wyznaczona przez M. Planck'a w jednostkach $[J\ cm^{-3}Hz^{-1}]$

$$U(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$



Prawo Stefana - Boltzmannna

$$U(T) = \int_0^{\infty} \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} [Wm^{-2}K^{-4}];$$
$$k = 1,38 \times 10^{-23} [JK^{-1}]$$

Prawo przesunięć Wiena

$$T \cdot \lambda_{max} = 2,8977685 \cdot 10^3 [\mu m K]$$

λ_{max} - długość fali dla maksymalnej emisji prom.

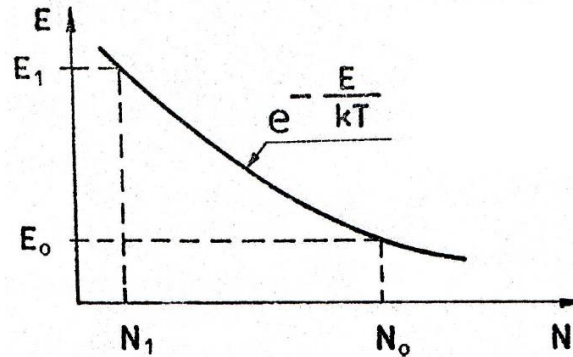
Rozkład Boltzmann

Ludwik Boltzmann



1844 - 1906

Rozkład Boltzmann określa sposób obsadzenia stanów energetycznych przez obiekty kwantowe w stanie równowagi termodynamicznej - 1890



$$\frac{N_i}{N_j} = \frac{q_i}{q_j} \exp\left(-\frac{E_i - E_j}{kT}\right)$$

N_i - obsadzenie dowolnego z „ N ” stanów:

$$\frac{N_i}{N} = \frac{q_i \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right)}{\sum_j q_j \exp\left(-\frac{E_j}{kT}\right)}$$

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ [J K}^{-1}\text{]}$ – stała Boltzman’a

T – temperatura termostatu

g_i, g_j - krotności degeneracji stanów

$n = \sum_i n_i$ - koncentracja obiektów kwantowych

Los uczonego

Ludwik Eduard Boltzmann (1844-1906) – urodzony w Wiedniu fizyk austriacki. Studia – Uniwersytet w Wiedniu; doktorat na temat kinetycznej teorii gazów w 1866 pod kier. Josefa Stefana. 1869 – posada profesora na Uniwersytecie w Grazu, a następnie w na Uniwersytetach w Wiedniu, Monachium i Lipsku,

Główny kierunek prac – mechanika (fizyka) statystyczna w odniesieniu do atomistycznej budowy materii. Twórca równań określających rozkłady cząstek w stanie równowagi termodynamicznej. Wprowadził do nich stałą fizyczną określającą rozkład energii cząstek nazwaną na Jego cześć Stałą Boltzmann

Podjęcie reprezentowane przez L. Boltzmann było na przełomie w. XIX/XX silnie krytykowane, a jego teorie przedmiotem niewybrednych napaści i drwin. Stany depresyjne jakim podlegał stały się przyczyną jego samobójczej śmierci. Główni jego adwersarze Ernst Mach i Wilhelm Oswald tylko z tego powodu przeszli do historii nauki.

Teorie L. E. Boltzmann stanowią podstawę współczesnej fizyki

Miary energii promieniowania elektro-magnetycznego

Jednostką energii w układzie SI jest: $1 [J]$ (dżul) $\equiv 1 [W \cdot s]$

$$E = h \omega = h \nu$$

gdzie

$$h \cong 1,0546 \cdot 10^{-34} [J \cdot s]$$

$$h \cong 6,628 \cdot 10^{-34} [J \cdot s]$$

Uwzględniając wzór na energię fotonu, jako miarę energii promieniowania można używać częstotliwość lub wielkości proporcjonalne do odwrotności długości towarzyszącej mu fali

Elektronowolt – energia elektronu przyspieszonego w polu o różnicy potencjałów równym 1V

$$1 \text{ eV} = 1,602176565 \cdot 10^{-19} \text{ J};$$

$$1 \text{ J} = 6,24150947 \cdot 10^{18} \text{ eV}$$

$$h = 4,136872 \cdot 10^{-15} [eV \cdot s]; \quad h = 6,582119 \cdot 10^{-16} [eV \cdot s]$$

Jako miary energii promieniowania mogą występować następujące wielkości charakteryzujące promieniowanie i proporcjonalne do jego energii

1. Częstotliwość: $\nu = \frac{E}{h} [s^{-1}]$

2. Wartość wektora falowego: $|k| = \frac{2\pi}{\lambda} [cm^{-1}]$

3. Liczba falowa: $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} [cm^{-1}]$

4. Elektronowolt: $E = \frac{1240}{\lambda_{[nm]}} [eV]$

Temperatura jako miara energii promienistej

Możliwość wykorzystania temperatury jako miary energii promieniowania elektromagnetycznego wynika z prawa Plancka i Boltzmann'a.

Istnieją dwie charakterystyczne równości wiążące te wielkości:

1. $h\nu_R = kT_B$ Charakterystyczna wartość częstotliwości ν_R , która przy danej temperaturze T_B rozdziela obsadzenia stanów o stosunku $N_i/N_j=1/e$.

Dla $\nu < \nu_R$ obsadzenia stanów wyrównują się, by w przypadku granicznym, gdy $h\nu \ll kT$ przyjąć, że $N_i/N_j=1 - h\nu/kT \sim 1$ (wszystkie stany obsadzone są prawie jednakowo)

Dla $\nu > \nu_R$ nierównomierność obsadzeń powiększa się i w przypadku granicznym, gdy $h\nu \gg kT$ można przyjąć, że $N_i/N_j = \exp(-h\nu/kT) \sim 0$ (obsadzony jest tylko stan najniższy).

T_B [K]	300	77	4,2
ν_R [GHz]	6248	1603	87,4

Nawet dla temperatur ciekłego helu „ ν_R ” leży powyżej typowego zakresu mikrofal (fal o dł. $\sim 1\text{cm} \equiv 30\text{GHz}$)

2. $T \cdot \lambda_{\max} = 2,8977685 \cdot 10^3 [\mu\text{m K}]$

Wiąże temperaturę źródła z maksimum wydajności widmowej. Wykorzystywany do oceny, innych niż żarowe, źródeł światła białego („zimne” lub „cieple”).

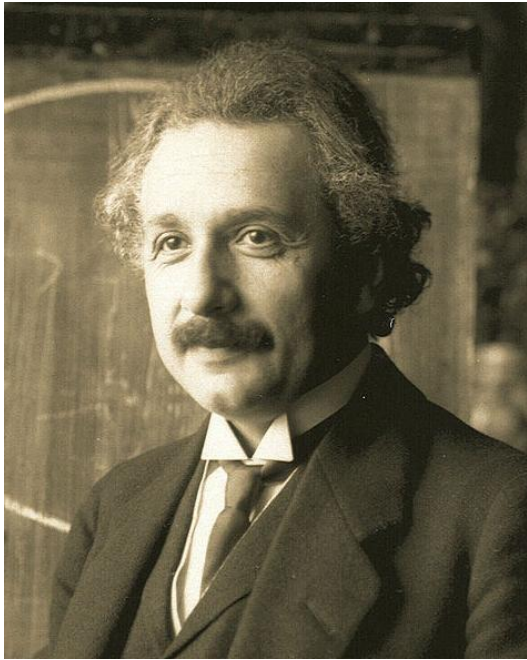
Porównanie miar energii promieniowania

Długość fali [nm]	Energia [J]	Częstotliwość [s^{-1}]	Liczba falowa [cm^{-1}]	E [eV]	T [K] ^{*)}
100	$1,99 \cdot 10^{-18}$	$3,00 \cdot 10^{15}$	10^5	12,4	28977
200	$9,93 \cdot 10^{-19}$	$1,50 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^4$	6,20	14488
500	$3,97 \cdot 10^{-19}$	$6,00 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^4$	2,48	5795,4
1000	$1,99 \cdot 10^{-19}$	$3,00 \cdot 10^{14}$	10^4	1,24	2897,7
10000	$1,99 \cdot 10^{-20}$	$3,00 \cdot 10^{13}$	10^3	0,124	289,77

^{*)} T – temperatura odpowiadająca maksimum gęstości energii rozkładu Plancka.

Ważne opracowania twórcy teorii wzmacniaczy kwantowych:

Albert Einstein - teoria względności i teoria emisji wymuszonej



Albert Einstein 1879 - 1955

Ważniejsze prace (dla poruszanych zagadnień)

1905 – STW (Szczególna Teoria Względności)

- pojęcie czasoprzestrzeni, względność ruchu;
- ograniczenie prędkości $v < c$, przy $c = \text{const}$;
- dylatacja czasu i kontrakcja przestrzeni;
- równoważność masy i energii $E = mc^2$.

1905 – Efekt fotoelektryczny (1921-Nobel)

1907 – Dowód, że wzór Plancka $E = h\nu$ jest uniwersalnym prawem fizyki.

1915 – OTW (Ogólna Teoria Względności)

- grawitacja jako zakrzywienie czasoprzestrzeni.

1917 – Emisja wymuszona promieniowania e-m
- podstawy teoretyczne działania laserów.

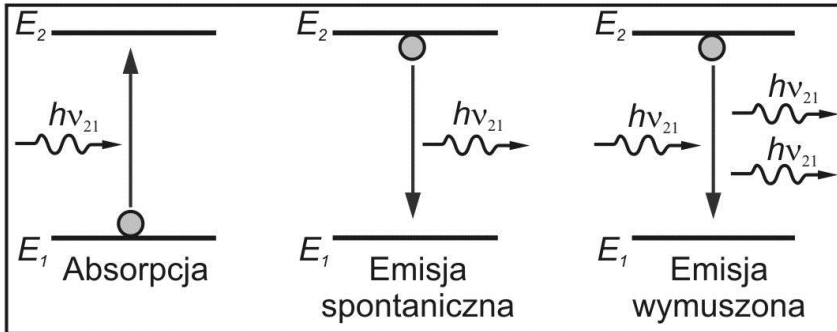
Podstawy fizyczne wzmacniaczy kwantowych.

Zostały wyłożone w pracy:

***Einstein A., „On the quantum theory of radiation”,
Phys. Z. p. 121 (1917)***

Teoria wzmacniacza kwantowego

Model 2-poziomowy



Ciepłe promieniowanie e-m Plancka może powodować przejścia obiektu kwantowego z jednego poziomu na drugi – zawiera bowiem szerokie pasmo, więc także ν_{12} :

1. $E_1 \rightarrow E_2$ absorpcja kwantu: $h\nu_{12} = E_2 - E_1$;
2. $E_2 \rightarrow E_1$ emisja kwantu: $h\nu_{21} = E_2 - E_1$

Prawdopodobieństwa absorpcji i emisji wymuszonej polem zewnętrznym:

$$\frac{dW_{12}^a}{dt} = B_{12}(\nu)U(\nu, T) \quad \frac{dW_{21}^e}{dt} = B_{21}(\nu)U(\nu, T)$$

B_{12} , B_{21} , – współczynniki Einsteina dla emisji wymuszonej;

Prawdopodobieństwo emisji spontanicznej

$$\frac{dW_s}{dt} = A_{21}$$

A_{21} – współczynnik Einsteina dla emisji spontanicznej

Wartości A i B – własność charakterystyczna materiału aktywnego

Charakterystyka promieniowania spontanicznego i wymuszonego

Promieniowanie spontaniczne: występuje zawsze (dążenie układu do min. energii → max. entropii); nie jest ukierunkowane, ma losową częstotliwość (w obrębie linii), fazę i polaryzację.

Promieniowanie spontaniczne w stosunku do wymuszonego traktowane jest jako *szum*.

Promieniowanie wymuszone ma wszystkie parametry identyczne jak promieniowanie wymuszające:

- częstotliwość;
- kierunek;
- fazę;
- polaryzację.

**Promieniowania wymuszające i wymuszone są względem siebie *spójne (koherentne)*.
Proces emisji wymuszonej należy traktować jako wzmocnienie prom. wymuszającego.**

Bilans cząstek

W stanie stacjonarnym, tj. **równowagi termodynamicznej** zachodzi równość:

$$N_1^0 B_{12}(\nu) U(\nu, T) = N_2^0 \left[B_{21}(\nu) U(\nu, T) + A_{21} \right]$$

Obsadzenia stanów w równowadze termodynamicznej wiąże równanie Boltzmann'a

$$N_2^0 = \frac{g_2}{g_1} N_1^0 \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right)$$

Można stąd znaleźć wartość $U(\nu, T)$, a porównując ją z wartością z wzoru Plancka dla prom. ciała doskonale czarnego, wyznaczyć zależności wiążące współczynniki Einsteina oraz prawa rządzące emisją spontaniczną i wymuszoną

$$U(\nu, T) = \frac{\frac{A_{21}}{B_{21}}}{\frac{g_1 B_{12}}{g_2 B_{21}} e^{\frac{E_2 - E_1}{kT}} - 1} \equiv U(\nu, T) = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Zależności wiążące współczynniki Einsteina

1. $h\nu_{12} = E_2 - E_1.$

2.; 3. $g_2 B_{21} = g_1 B_{12},$

4.; 5.

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h}{c^3} \nu^3,$$

- Wnioski:**
1. W^a, W^e, W^s - mają charakter rezonansowy $h\nu_{12} = E_2 - E_1$
 2. B_{12} i B_{21} są sobie równe z dokładnością do krotności degeneracji stanów
 3. Rozkład cząstek na poziomach podlega statystyce Boltzmanna
 4. B jest wprost proporcjonalne do A ; $B > 0$ gdyż $A > 0$.
 5. B maleje w stosunku do A z trzecią potęgą wzrostu częstotliwości

Uwaga: Wniosek 5 traktowany jest jako ograniczenie wykorzystania mechanizmu emisji wymuszonej do generacji fal coraz krótszych.

Interpretacja fizyczna współczynnika emisji spontanicznej

A_{21} - jest bardzo ważnym parametrem materiałowym; opisuje zanik obsadzenia stanu wzbudzonego na skutek emisji spontanicznej

$$dN_2 = -A_{21} dt \rightarrow N_2(t) = N_2(0) \exp(-A_{21}t) = N_2(0) \exp(-t/\tau_0)$$

$$A_{21} = \frac{1}{\tau_0}$$

τ_0 – **czas życia**; (czas po którym obsadzenie maleje e-razy)

Jednocześnie wielkości te wiążą się z **szerokością linii widmowej**

Naturalne rozmycie widma przejścia kwantowego wynika z zasady nieoznaczoności Heisenberga

$$\Delta E \Delta \tau \geq \hbar$$

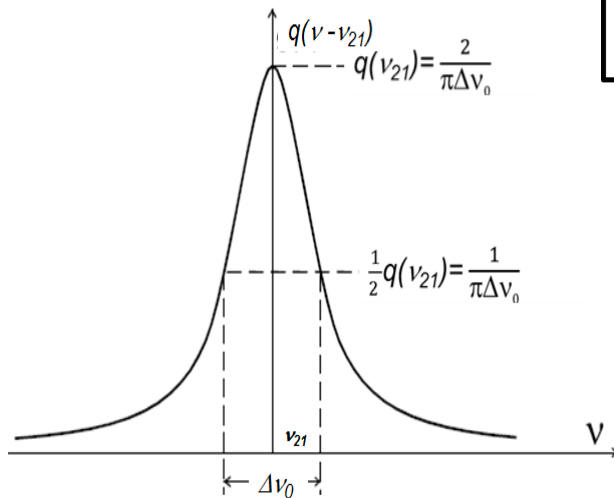
Traktując nieoznaczoność $\Delta \tau = \tau_0$, a nieoznaczoność $\Delta E = h \Delta \nu_0$, mamy:

$$\Delta \nu_0 \geq \frac{1}{2\pi\tau_0}$$

$\Delta \nu_0$ – szerokość linii rezonansowej przejścia kwantowego jest wyznaczona przez czas życia τ_0 (wsp. emisji spontanicznej - A).

Dyskusja

Powyższe założenia wskazują, że przejścia mają charakter rezonansowy, a naturalne rozmycie linii przejścia kwantowego opisywane jest funkcją Lorentza



$$q(\nu_{21}) = \frac{2}{\pi \Delta \nu_0}$$

Szerokość linii określa wartość maksymalną rezonansu

1. Długi czas życia cząstki na poziomie wzbudzonym oznacza wąską linię przejścia kwantowego lecz jednocześnie zmniejszenie wartości współczynników Einsteina A i B (przejścia wzbronione).

2. Wartości τ_0 i $\Delta \nu_0$ wynikające z wartości A_{21} są ekstremalne. Nie biorą pod uwagę wpływu ruchu i koncentracji obiektów kwantowych oraz wpływu termostatu. Warunki rzeczywiste zasadniczo mogą modyfikować wartości tych wielkości.

Interpretacja fizyczna notacji Einsteina

Wielkości występujące we wzorach odnoszą się do jednostkowej objętości [cm^3]; aby przejść do rzeczywistych ich wartości należy uwzględnić całą objętość materiału aktywnego.

Stosowane we wzorach zapisy w skróconej formie oznaczają:

$$B_{12}(\nu)U(\nu) \equiv \int_0^{+\infty} B_{12}q(\nu - \nu_{21})U(\nu) d\nu$$

$$q(\nu - \nu_{21})$$

Kształt linii (np. Lorentza)

$B_{12} = B_{21}$ – wsp. Einsteina dla $\nu = \nu_{21}$

Jednostki:

$U(\nu)$: [$\text{J cm}^{-3}\text{Hz}^{-1}$] – gęstość energii (przestrzenna) na jednostkę pasma (widmowa)

B_{21} : [$\text{cm}^3\text{J}^{-1}\text{s}^{-2}$]; $q(\nu)$: [s]

$B(\nu)U(\nu)$: [s^{-1}] – liczba aktów absorpcji lub emisji stymulowanej w jednostce czasu (**sekundzie**) wywołana polem e-m o gęstości $U(\nu)$.

Relacja pomiędzy przejściami spontanicznym i wymuszonym

A_{21} [s^{-1}] – jest prawdopodobieństwem przejść (emisji) spontanicznych w jednostce czasu (**sekundzie**)

Prawdopodobieństwem przejść wymuszonych jest iloczyn:

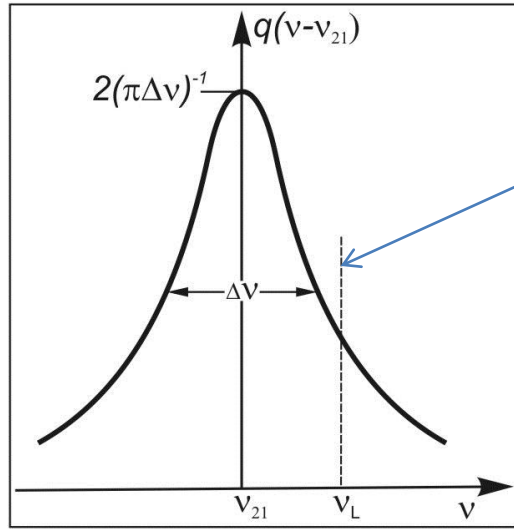
$$\frac{d}{dt}W_{21} = B_{21}(\nu)U(\nu) \quad [s^{-1}]$$

Przy oddziaływaniu na układ tylko promieniowania cieplnego, stosunek

$$R = \frac{A_{21}}{B_{21}(\nu)U(\nu)} = (e^{h\nu/kT} - 1) \quad - \text{silnie zależy od temperatury i zakresu widmowego}$$

1. Dla 300K i zakresu mikrofalowego ($\nu = 10^{10}$ Hz) $h\nu/kT \approx 10^{-3} \ll 1$; $R \approx h\nu/kT \ll 1$.
Emisja wymuszona dominuje nad spontaniczną: wzmacniany jest szum termiczny
2. Dla 300K i zakresu optycznego ($\nu = 10^{15}$ Hz) $h\nu/kT \approx 160 \gg 1$; $A \gg BU(\nu)$; $R \gg 1$.
W laserach powyżej NIR dominuje emisja spontaniczna z wzbudzonego materiału.
Laser się wzbudza (generuje), a nie wzmacnia prom. cieplnego (jest ono b. małe).

Oddziaływanie pola monochromatycznego z układem kwantowym



Pole monochromatyczne: $\Delta\nu_L \ll \Delta\nu_0$

$$\int_0^{\infty} U(\nu) \delta(\nu - \nu_L) d\nu = U(\nu_L) \quad [\text{J cm}^{-3}]$$

$$\delta(\nu - \nu_L) \quad - \text{delta Diraca}$$

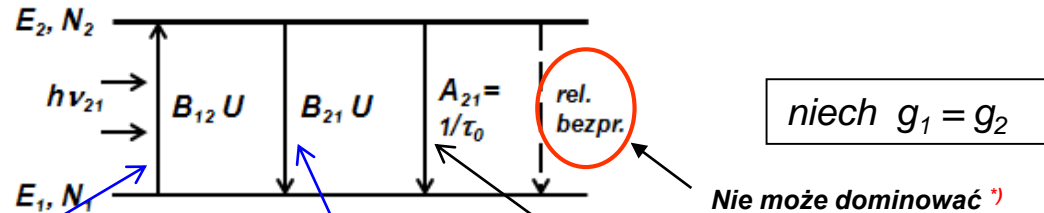
Prawdopodobieństwo przejść wymuszonych

$$\frac{d}{dt} W_{21}^e = B_{21} q(\nu_L - \nu_{21}) U(\nu_L)$$

Oddziaływanie pola monochromatycznego na układ kwantowy jest skuteczne jedynie dla $|\nu - \nu_L| \leq 1/2\Delta\nu_0$; jest to powszechnie występujący przypadek we wzmacniaczach i generatorach kwantowych

Idea wzmacniacza kwantowego

Pole zewnętrzne zmienia rozkład obsadzeń stanów energetycznych.
W stanie stacjonarym dla pól monochromatycznych mamy:



$$N_1 B q (\nu_L - \nu_{21}) U (\nu_L) = N_2 B q (\nu_L - \nu_{21}) U (\nu_L) + \frac{N_2}{\tau_l}; \quad N_1 + N_2 = N$$

$$B q (\nu_L - \nu_{21}) (N_2 - N_1) U (\nu_l) = \Delta F \quad - \text{przyrost liczby fotonów}$$

Gdy istnieje inwersja obsadzeń $N_2 > N_1, \Delta F > 0$ - wzmocnienie !!!

*) Relaksacja bezpromienista objawia się jako zmniejszenie czasu życia $\tau_l < \tau_0$.

Pomiędzy ideą a jej realizacją

Inwersja obsadzeń podstawowy warunek budowy wzmacniacza kwantowego

Inwersja obsadzeń (obsadzenie wyższego stanu energetycznego **większe od obsadzenia stanu niższego**) nie występuje w sposób naturalny w przyrodzie – jest sprzeczna z rozkładem Boltzmanna. **Inwersję** można wytworzyć jedynie w **sposób sztuczny**. Proces prowadzący do powstania inwersji obsadzeń nazywamy **pompowaniem**

Pierwsze prace nad realizacją idei A. Einsteina wykonano w latach 50. po przeszło 30 latach **w zakresie mikrofal**.

Prawdopodobne przyczyny opóźnienia:

1. Nie umiano poradzić sobie z wytwarzaniem inwersji obsadzeń;
2. Niesprzyjające czasy: rewolucje; światowy kryzys; II wojna światowa;
3. Nauka nie dorosła technologicznie do realizacji tej idei szczególnie w zakresie optycznym.

Ważniejsze równoległe odkrycia

- 1831** – James C. Maxwell – Równania pola elektromagnetycznego;
- 1889** - Max Planck – Kwantyzacja promieniowania e-m; poprawny wzór na gęstość energii promieniowania cieplnego;
- 1890** - Boltzmann – statystyka obsadzeń w równowadze termodynamicznej;
- 1897** – Gulielmo Marconi – Patent na „radio”; **1909** – Nagroda Nobla; **1943** – Sąd Najwyższy USA uznaje patent za plagiat wcześniejszego patentu N. Tesli (?);
- 1897** – Joseph J. Thomson – Odkrycie elektronu; **1906** – Nagroda Nobla;
- 1904** – John A. Fleming – Budowa pierwszej lampy elektronowej – diody
- 1907** – Lee De Forest – Budowa triody: wzmacniacz sygnałów elektrycznych;
- 1913** – Nils Bohr – Wyjaśnia kwantowanie poziomów energetycznych wodoru;
- 1917** – Albert Einstein – **Teoria wzmacniacza kwantowego;**
- 1923** – Budowa pierwszego profesjonalnego nadajnika radiowego;
- 1924** – Louis de Broglie – Teoria fal materii
- 1925** – Werner Heisenberg, Erwin Schrodinger – Zasady mechaniki kwantowej
- 1927** - Werner Heisenberg – zasada nieoznaczoności.

Odkrycia ważne dla elektroniki i fotoniki powstały mniej niż 100 lat temu

DLaczego lata 50.(?)

- 1. Rozwój w czasie II wojny światowej urządzeń zakresu mikrofalowego: 1940 (Wlk. Bryt.) – udoskonalony **magnetron** pozwala zrealizować pomysł Ch. Hulsmeyer'a na **Radar Impulsowy**. Pierwsze instalacje w Wlk. Bryt.**
- 2. Uczni udowadniają swą przydatność; udział w zwycięstwie aliantów – Program „Manhattan”, radary i urządzenia łączności, wykrywacze min itp. Skutkuje to **zasilaniem finansowym** uczonych i zespołów badawczych.**
- 3. Świat jest maksymalnie podzielony. W czasie wojny i po wojnie badania naukowe są otoczone ścisłą tajemnicą. Prowadzone są prace w różnych miejscach niezależnie. **Dotyczyło to również wzmacniaczy kwantowych.****
- 4. Zakres mikrofal jest w centrum zainteresowania ośrodków badawczych. Nic dziwnego, że nową ideę chciano zastosować dla tego zakresu fal.**
- 5. Podstawową kwestię – inwersję obsadzeń – w pierwszych urządzeniach rozwiązano w pomysłowy sposób: użyto ośrodek CH_3 (amoniak), w którym **wyizolowano obiekty kwantowe wzbudzone, nie wzbudzone odrzucono.** Realizacja możliwa tylko w gazach i ewentualnie w parach.**

Pierwsze wzmacniacze i generatory kwantowe

1954 – **MASER** - Charles Townes, **Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation**

1960 – **MASER OPTYCZNY – LASER** – Theodore Maiman
Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

1964 – Nagroda Nobla



1. *Charles Townes (1915 – 2015)*
- Amerykanin
2. *Aleksander Prochorow (1916-2002)*
- Rosjanin
3. *Nikołaj Basow (1922-2001)*
- Rosjanin

**Za fundamentalne prace w dziedzinie elektroniki kwantowej,
które doprowadziły do skonstruowania oscylatorów i
wzmacniaczy bazujących na zasadzie działania masera i lasera”**

**Ta fotografia będzie nam towarzyszyła często w tym cyklu.
To pierwsza, ale nie ostatnia Nagroda Nobla w dziedzinie laserów.**

Dziękuję za przeczytanie