



Meandry Techniki Laserowej

3. Dlaczego Lasery

Zdzisław Jankiewicz

Podziel się wiedzą – WAT, Warszawa 05.04.2019

Streszczenie

Jako datę wynalezienia LASERA przyjmuje się dzień 7 lipca 1960 r., tj. datę publikacji Th. Maimana w Nature o uruchomieniu pierwszego generatora kwantowego w zakresie optycznym. Istotne jest jednak to, że Th. Maiman nie należał do czołowych badaczy zajmujących się zagadnieniami wzmacniaczy kwantowych, w szczególności optycznych. Inni (wymienimy ich nieco później) byli bardziej do tego przygotowani i usilnie do tego dążyli. Th. Maiman był w takim razie „czarnym koniem”, któremu udała się ta sztuka jakby przypadkiem. W swojej firmie zajmował się wytwarzaniem rubinów, stąd w oczywisty sposób wybrał ten materiał, chociaż niektórzy uważali go za nieodpowiedni. Pozostałe elementy, to wybór spośród już istniejących w tym najważniejszy – flesz fotograficzny jako źródło promieniowania pompującego. Pokazuję te elementy na kolejnych przeżyciach. **A jaki efekt:**

- z jednej strony dość prymitywne urządzenie, którego zdjęcia fotograf podobno nie chciał wykonać inaczej niż na tle twarzy twórcy,
- z drugiej strony efekt niebywały – to działało. **To urządzenie rzeczywiście świeciło niebywale jaskrawym ciemno-czerwonym, nie spotykanym gdzie indziej, światłem.** Sam kiedyś doznałem tego wrażenia i możecie mi wierzyć na słowo - to **efekt piorunujący**.

Wzmacniacze kwantowe idealnie nadają się do wytwarzania (generacji) promieniowania zakresu optycznego.

Postaram się to w sposób prosty, ale jednocześnie dostatecznie ogólny, wykazać

Dla rubinu jako materiału aktywnego, dokonano porównania parametrów dwóch trójpoziomowych wzmacniaczy kwantowych: **masera** i **lasera** biorąc pod uwagę wartości danych spektroskopowych realnie wykorzystywanych poziomów tego materiału. Wykorzystano w tym celu podane w prelekcji „**Dlaczego nie maser**” zależności i wprowadzając oczywiste uproszczenia:

- dla przejść w zakresie mikrofal: $h\nu \ll kT \rightarrow \exp(-h\nu/kT) \approx 1 - h\nu/kT$
- dla przejść w zakresie optycznym: $h\nu \gg kT \rightarrow \exp(-h\nu/kT) \approx 0$.

Otrzymane wyniki i wynikające z nich wnioski są oczywiste. Tylko lasery są urządzeniami racjonalnymi, rokującymi szerokie możliwości zastosowań praktycznych.

Laureat Nagrody Nobla za mikrofalowe wzmacniacze kwantowe Ch. Townes i jego bardzo bliski współpracownik (nota bene zięć) A. Schawlow też byli tego zdania. W 1957 r. zgłosili oni patent na **Optyczny Maser**, bo tak nazwali kwantowy generator światła, dziś powszechnie nazywany **Laserem**, a w 1958 opublikowali w Phys. Rev. artykuł [2] wyjaśniający zasady budowy kwantowych wzmacniaczy w tym paśmie.

Należy wziąć pod uwagę wyjątkową atrakcyjność tych propozycji. Do tej pory generatorów światła nie potrafiono budować. Mowa oczywiście o optycznych generatorach fal monochromatycznych. Nic więc dziwnego, że informacje te zelektryzowały środowisko uczonych i wręcz uruchomiły wyścig zespołów badawczych, którego celem (meta) było uruchomienie pierwszego lasera. W wyścigu wzięło udział aż pięć zespołów w tym (już oddzielnie) autorzy wcześniej wspomnianych: patentu i publikacji.

Pisząc cokolwiek o historii odkrycia laserów nie sposób pominąć barwną, aczkolwiek dość kontrowersyjną postać Gordona Golda. W interesującym nas okresie przebywał on w uczelni (Columbia University) jako doktorant. Interesował się wzmacniaczami kwantowymi, a nawet miał szereg bardzo nowatorskich i interesujących pomysłów, które spisywał w specjalnym notesie. Ich treść uwierzytelniał notarialnie. G. Gold włączył się aktywnie w „wyścig do lasera” (nazwa **LASER** do niego należy; użył ją po raz pierwszy w swoich notatkach). Był **szczęściarzem** - jako jedyny otrzymał na ten cel (promienie śmierci) specjalne środki - milion dolarów z Ministerstwa Obrony USA. Jednocześnie okazał się wyjątkowym **pechowcem**. Program został utajniony, a on ze względu na przynależność żony do organizacji marksistowskiej, został odsunięty od realizacji programu, którego był autorem. Pierwszego lasera nie zbudował, lecz nie zrażony (podejrzewany o plagiat) przez 30 lat walczył z patentem Ch. Townesa o pierwszeństwo niektórych sformułowań we wspomnianym już notesie. Tu powiodło mu się. Otrzymał cztery częściowe patenty w czasie, gdy lasery były już powszechnie produkowane. Patenty te przyniosły mu znaczące korzyści materialne. Podobno stał się milionerem.

Powracając do „*wyścigu do lasera*”, zwyciężył jak wiadomo, „czarny koń” - Th. Maiman, który szczęśliwie wybrał rubin jako materiał aktywny, a jeszcze szczęśliwiej jako pompę użył flesz fotograficzny, emitujący promieniowanie w pasmach zielonym i niebieskim gdzie rubin ma szerokie pasma pochłaniania oznaczone literami „U” i „Y”. Na dodatek istnieje silne sprzężenie pomiędzy tymi pasmami a pasmem metastabilnym 2E , skąd na linii R_1 zaobserwował emisję czerwonego promieniowania o długości fali $\sim 694 \text{ nm}$.

Sukces Th. Maimana został dość łatwo powtórzony w wielu ośrodkach. Na dodatek otrzymano generację także z użyciem innych ośrodków aktywnych w tym gazowych oraz w półprzewodnikach. Świadczyło to o tym, jak blisko byli wygrania „wyścigu” inni badacze i jak szeroka istnieje gama materiałów, które mogą stanowić ośrodki czynne optycznych generatorów kwantowych. Porównanie pojawienia się licznych uruchomień kolejnych laserów do wysypu „grzybów po deszczu” ma swoją wymowę. Rzeczywiście w ciągu kolejnych czterech lat powstało większość wykorzystywanych dotąd typów laserów w tym opracowano metodę przełączania strat rezonatora, umożliwiającą generację impulsów nanosekundowych.

Znalezienie odpowiedniego materiału i metody jego wzbudzania, tak by uzyskać inwersję obsadzeń, to jeszcze nie wszystko. Każdy generator (kwantowy również) składa się z dwóch podstawowych części: **wzmacniacza** i **układu dodatniego sprzężenia zwrotnego**. Rolę wzmacniacza w laserze spełnia *materiał aktywny, w którym zapewniamy inwersję obsadzeń pomiędzy wybraną parą poziomów energetycznych*. Rolę układu dodatniego sprzężenia zwrotnego w laserze spełnia **rezonator Fabry’ego – Perota**. Materiał aktywny umieszczony jest wewnątrz rezonatora i w warunkach rezonansu energia wzbudzenia cząstek materiału czynnego, w aktach *stymulowanej (wymuszonej) emisji* przekazywana jest do pola elektromagnetycznego rezonatora skąd następnie może być wyemitowana w przestrzeń. Tak pokrótce realizowany jest proces generacji promieniowania.

Wybór rezonatora F-P jako układu dodatniego sprzężenia zwrotnego nie był przypadkowy. Stanowią go dwa zwierciadła o niewielkich rozmiarach poprzecznych, oddalone od siebie na tyle, by można było pomieścić pomiędzy nimi niezbędne elementy w tym materiał aktywny lasera. Kształt zwierciadeł to przeważnie sfery o odpowiednio dobranych promieniach krzywizny lub płaszczyzny. Dobierając odpowiednie krzywizny zwierciadeł, można tworzyć specyficzne, znane powszechnie ich rodzaje.

Wydłużony kształt rezonatora powoduje, że transmitują się nim tzw. rodzaje pola poprzecznie elektro-magnetyczne ($TEM_{m,n,q}$ gdzie $m \approx n \ll q$ - liczby całkowite). Rozchodzą się one jako fale „przyosiowe” tworząc skolimowane wiązki o małym $\sim 10^{-2}$ rad. kącie rozbieżności.

Przypadkiem szczególnym (pożądanym w laserach) jest wiązka o rozkładzie (modzie) podstawowym: TEM_{00q} . Rozkład intensywności pola e-m w płaszczyźnie poprzecznej opisywany jest w niej funkcją Gaussa, a częstotliwości rezonansowe tworzą ciąg wartości równoodległych o odstępzie $c/2L$ – gdzie L – długość rezonatora z uwzględnieniem współczynnika załamania wypełniającego rezonator ośrodka. Teoria rezonatorów F-P była już dobrze znana i należało tylko z niej skorzystać. Podstawowe zależności zostały w prelekcji zamieszczone.

Stosowane w laserach rezonatory mają nie zabudowane powierzchnie boczne, umożliwiając w ten sposób pompowanie i chłodzenie ośrodka czynnego, bez wpływu na dobroć rezonatora i parametry wyjściowej wiązki promieniowania. To szczęśliwa okoliczność.

Powstałe w 1960r. urządzenie – **LASER** wykazał swoje niewątpliwe zalety. Mógł być zasilany z konwencjonalnych źródeł energii, emitował w pasmach częstotliwości gdzie dotychczas takich źródeł nie było, a oferowane parametry promieniowania dawały możliwość bardzo szerokiego jego wykorzystania w nauce, przemyśle i gospodarce. Oczywiście dotknęliśmy tu zaledwie podstaw, zasad wytwarzania zbliżonego do monochromatycznego promieniowania optycznego, myślę jednak, że dla prelekcji o tytule „**Dlaczego Laser**” wystarczy.

Pierwszy (Optyczny Maser)- **LASER**

Theodore H. Maiman



1927 - 2007

Publikacja T. H. Maimana w „[Nature](#)” 07.07.1960 –
zbudowanie lasera w Hughes Research Laboratories
w Malibu (California)*) – data wynalezienia Lasera.

Ośrodek aktywny: **Rubin ($\text{Cr:Al}_2\text{O}_3$)**; Pompa : **flesz**

Zauważmy prostotę, „prymitywność” jego budowy

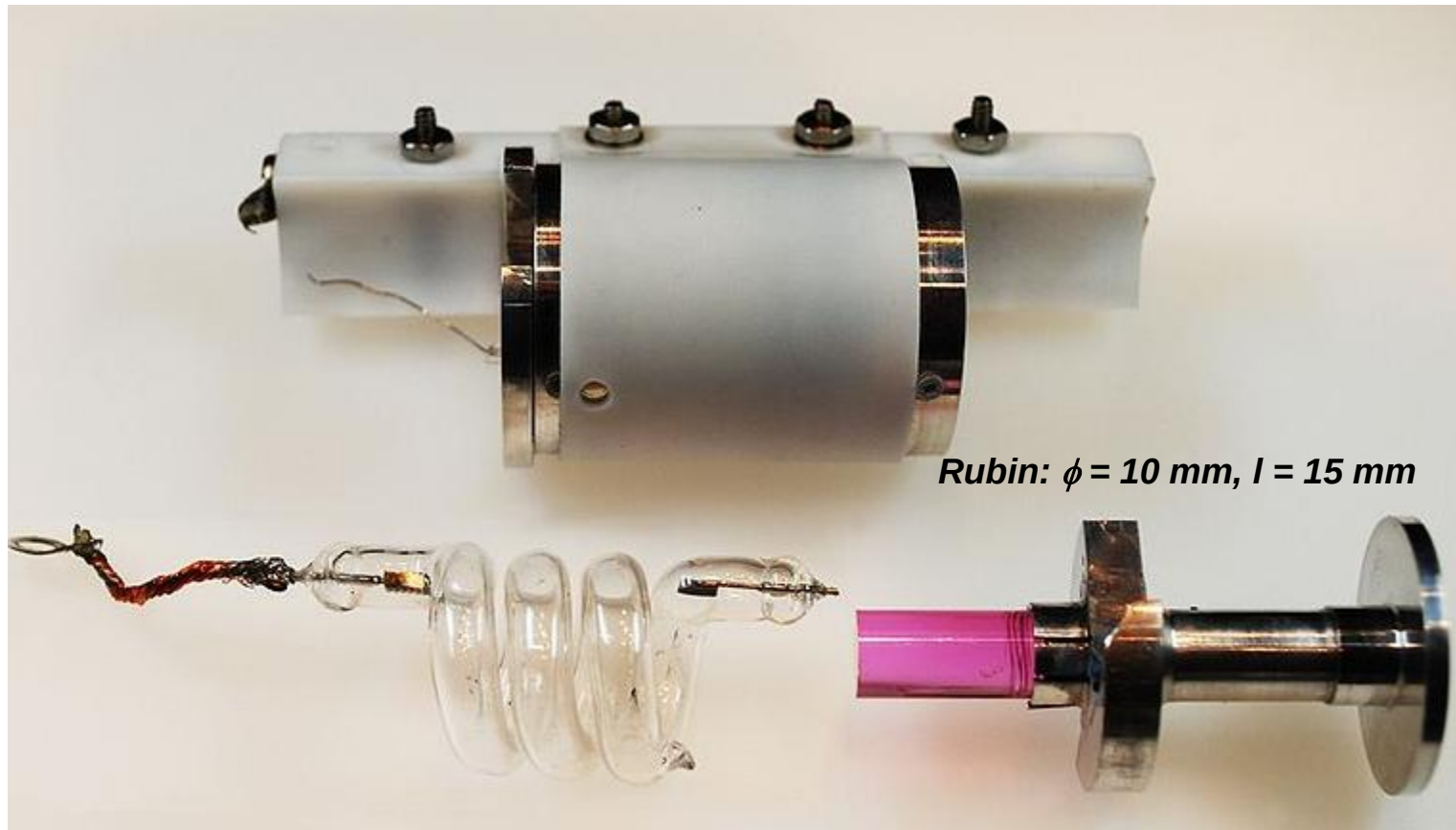
Dziś (po 50. latach): Trudno wymienić gałęzie
techniki i nauki gdzie laserów nie ma.

Lasery spowodowały, że podobnie jak nazwano
wiek XX – wiekiem elektronów, **wiek XXI – ma**
szansę nazwania go wiekiem fotonów.

[1] Th. Maiman „Stimulated Optical Radiation in Ruby” *Nature*, 187 4736, pp. 493 – 494 (1960)

Podstawowe elementy lasera rubinowego

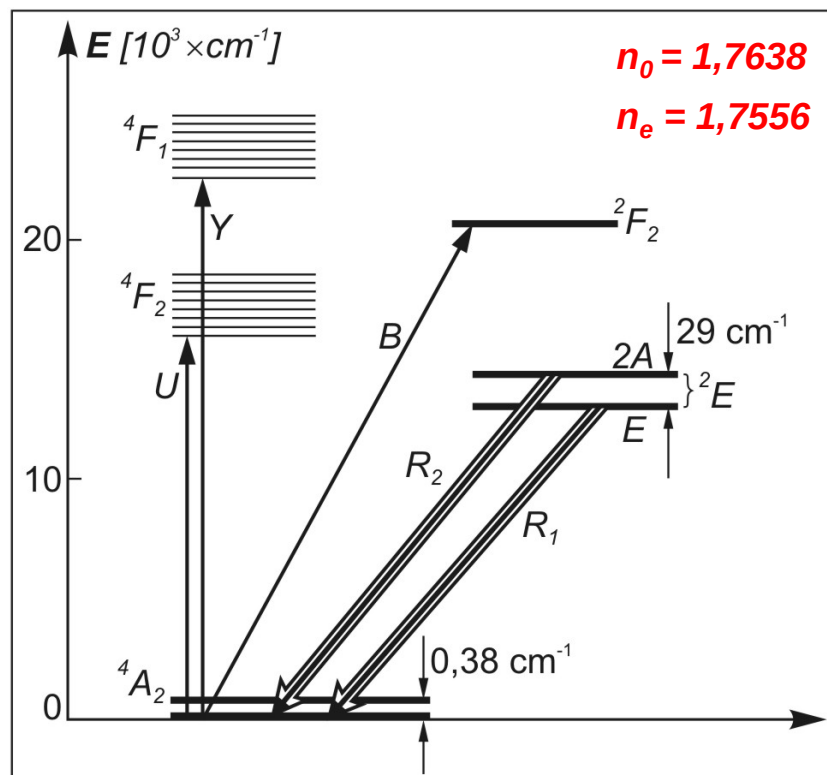
Th. Maimana



Spektroskopia Rubinu

$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ „c” $\cong (0,03 - 0.05) \%$

Przejścia optyczne:



R $4A_2 \rightarrow 2E$

$R_1 \rightarrow 14\,417 \text{ cm}^{-1}, 694,3 \text{ nm}$

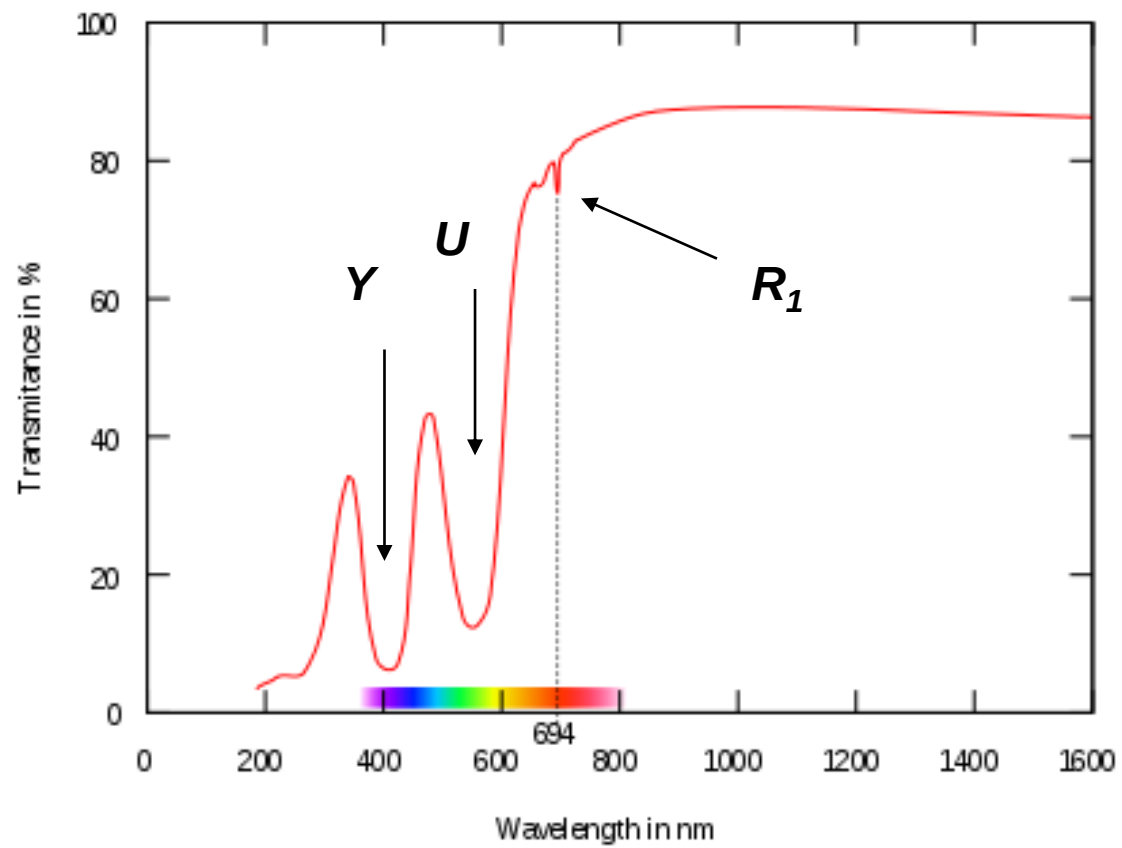
$R_2 \rightarrow 14\,446 \text{ cm}^{-1}$

U $4A_2 \rightarrow 4F_2$ ($560 \pm 50 \text{ nm}$ (zielony))

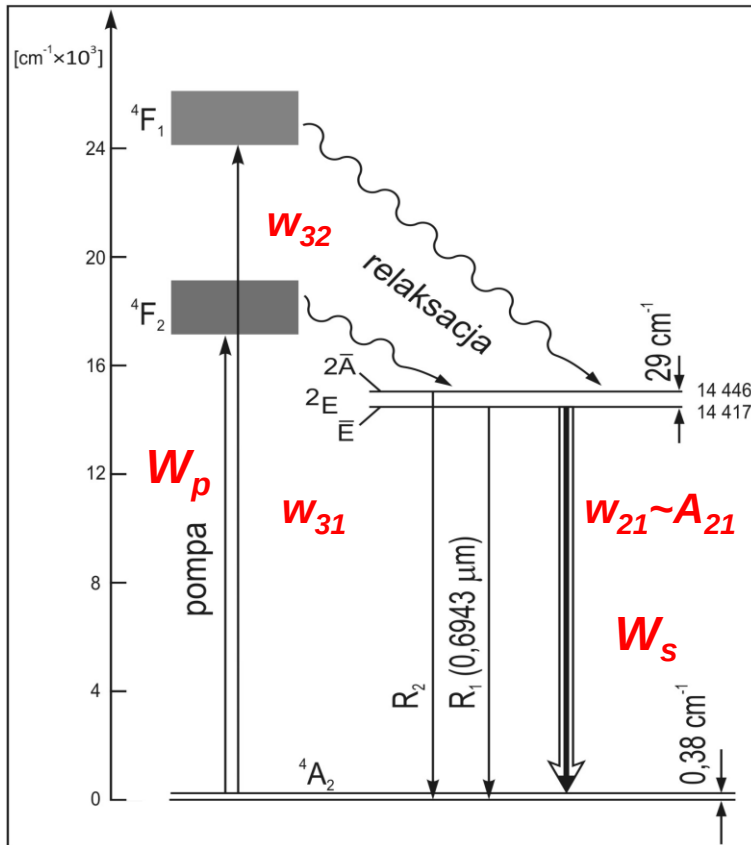
B $4A_2 \rightarrow 2F_2$

Y $4A_2 \rightarrow 4F_1$ ($410 \pm 50 \text{ nm}$ (niebieski))

Al_2O_3 – korund, osnowa,
 Cr^{3+} - jon aktywny, domieszka



Rubin jako ośrodek czynny Lasera



Czasy życia optycznych poziomów wzbudzonych:

1. Linia R_1 : $T_1 \approx A_{R1}^{-1} \cong 10^{-3} \text{ s}$
– stan 2E metastabilny;
2. $W_{32} \gg W_{31}$ – sprzężenie $3 \rightarrow 2$
3. $\tau_U \sim \tau_Y \cong W_{32}^{-1} \sim 10^{-13} \text{ s}$
– stany 4F_1 i 4F_2 labilne;
4. Poziomy $\pm 1/2$ i $\pm 3/2$ 4A_2
w 300 K – nie są rozróżnialne;
5. W_p - promieniowanie lampy ksenonowej (flesza)

Dlaczego „Maser Optyczny - Laser” został tak łatwo uruchomiony?

(Łatwo w stosunku do wcześniej budowanych urządzeń mikrofalowych)

Układ pierwszego lasera ma prostą wręcz prymitywną budowę.

Laser zbudowano z użyciem kontrowersyjnego ośrodka czynnego.

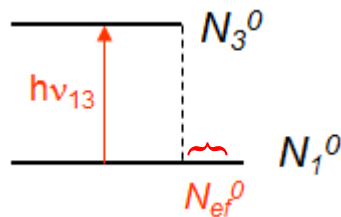
Został zbudowany nie w laboratorium o największym przygotowaniu.

Nie zbudowali go ludzie, którzy opracowali i opatentowali jego budowę.

Próba odpowiedzi:

Porównanie parametrów materiałowych rubinu chcąc na jego bazie budować masery i lasery. Mimo użycia tylko jednego materiału (rubinu), wnioski mają wyjątkowo ogólny charakter.

1. Efektywna koncentracja obiektów kwantowych dla przejścia pompy (1 → 3)



$$N_{ef}^0 = \frac{N_1^0 - N_3^0}{N_1^0 + N_3^0} = \frac{1 - e^{-\frac{h\nu_{31}}{kT}}}{1 + e^{-\frac{h\nu_{31}}{kT}}}$$

Mikrofale: $h\nu \ll kT$

$$N_{ef} \sim 10^{-4} \text{ dla } T = 300 \text{ K}$$

$$N_{ef} \sim \text{kilku \% dla } T = 4,2 \text{ K}$$

Konieczne chłodzenie kriogeniczne

Optyka: $h\nu \gg kT \rightarrow \exp(-h\nu/kT) \sim 0$

$$N_{ef} = 1 \text{ dla } T = 300 \text{ K}$$

Brak konieczności chłodzenia

2. Czas relaksacji stanów wzbudzonych

$$T_1^{-1} = A_{21} \frac{\exp\left(\frac{h\nu_{21}}{kT}\right) + 1}{\exp\left(\frac{h\nu_{21}}{kT}\right) - 1}$$

Mikrofale: $h\nu \ll kT$

$$T^{-1} \approx A_{21} \frac{2kT}{h\nu}$$

Silna zależność od temperatury

Dla: 10 GHz i 300K $T^{-1} \sim 10^3 A_{21}$

Dla: 10 GHz i 4,2 K $T^{-1} \sim 10^1 A_{21}$

Optyka: $h\nu \gg kT \rightarrow \exp(-h\nu/kT) \sim 0$

$$T^{-1} = A_{21} = A_{R_1}$$

*Brak oddziaływań fononowych
i zależności od temperatury*

Działanie w temperaturze otoczenia

3. Szerokość linii przejścia kwantowego

$$\Delta \nu = (\pi \tau_l)^{-1}$$

Mikrofale: $h\nu \ll kT$

$$\Delta \nu \approx A_{21} \frac{2kT}{\pi h \nu}$$

Wzrost temperatury silnie poszerza linie przejść mikrofalowych.

W 300 K dublet 4A_2 w rubinie jest nierozróżnialny.

Optyka: $h\nu \gg kT \rightarrow \exp(-h\nu/kT) \sim 0$

$$\Delta \nu = A_{21} = A_{R_1}$$

Wpływ temperatury na szerokość linii w zakresie optycznym np. linii R_1 w rubinie istnieje, lecz jest mało istotny

4. Inwersja obsadzeń

$$\Delta N_{21} = -\Delta N_{32} = N \frac{w_{32}[1 - \exp(-\frac{h\nu_{32}}{kT})] - w_{21}[1 - \exp(-\frac{h\nu_{21}}{kT})]}{w_{32}[1 + 2\exp(-\frac{h\nu_{32}}{kT})] + w_{21}[1 + 2\exp(-\frac{h\nu_{21}}{kT})]} > 0$$

Mikrofałe: $h\nu \ll kT$

$$\frac{\Delta N_{21}}{N} = \frac{h}{3kT} \frac{w_{32}\nu_{32} - w_{21}\nu_{21}}{w_{32} + w_{21}} > 0$$

Inwersja mała i tylko dla temperatur helowych:

$$T \leq 4,2 \text{ K}$$

Ograniczenie częstotliwości sygnału:

$$\nu_s < \frac{1}{2} \nu_p$$

Optyka: $h\nu \gg kT \rightarrow \exp(-h\nu/kT) \sim 0$

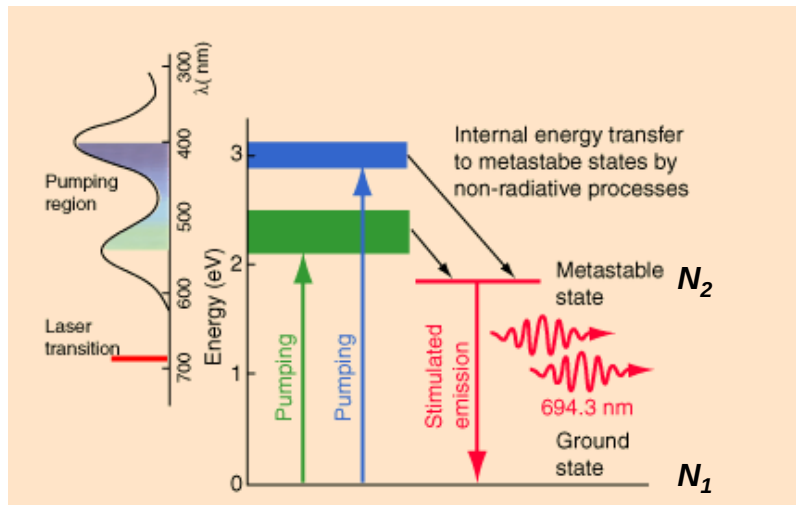
$$\frac{\Delta N_{21}}{N} = \frac{1 - \frac{w_{21}}{w_{32}}}{1 + \frac{w_{21}}{w_{32}}} = \frac{1 - \frac{\tau_U}{\tau_{A_R}}}{1 + \frac{\tau_U}{\tau_{A_R}}} \square 1 > 0$$

Warunek dodatniej, dużej inwersji obsadzeń:

$$w_{32} > w_{21} \rightarrow \tau_U \square \tau_Y \ll \tau_{A_R}$$

Brak warunków na „ T ” i „ ν_s ”

Rubin – schemat trójpoziomowy (wzmacniacz)



Warunek: $\tau_U \square \tau_Y \ll \tau_{A_R} \rightarrow N_U \approx N_Y \approx 0$

Nie ma możliwości nasycenia przejścia pompy

Przy $\tau \approx 3$ ms można uzyskać duże N_2

Inwersja oznacza, że:

$$N_1 + N_2 \leq N \quad i \quad N_2 > N_1$$

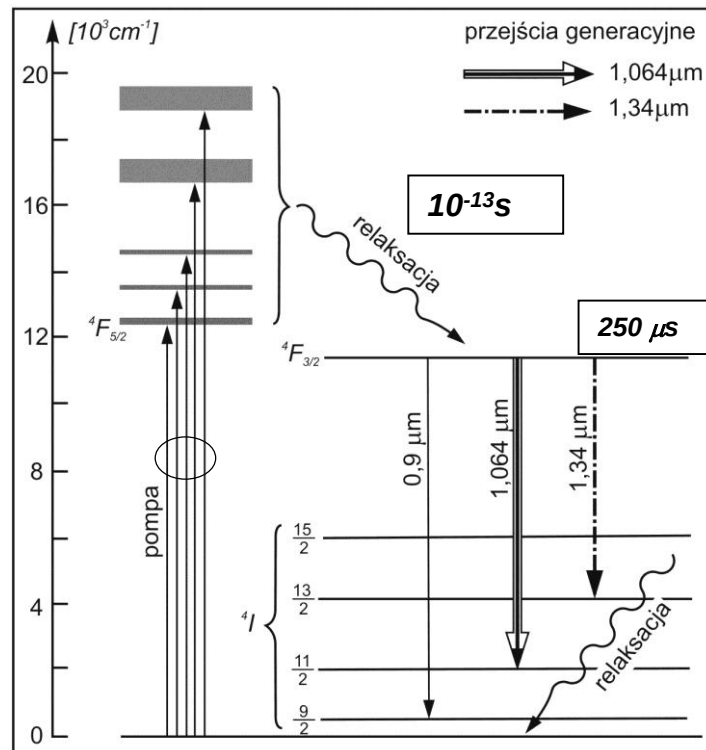
Warunek nie do zrealizowania w maserach

1957 – Ch. Townes i A. Schawlow patentują i (**1958**) ogłaszają (art. w *Phys. Rev.*) ideę Masera Optycznego – Lasera.

1959 – A. Schawlow na konferencji **ocenia negatywnie rubin** jako materiał aktywny lasera. Uważa, że wymaga on zbyt dużej energii pompy do uzyskania inwersji. W konferencji uczestniczy **Th. Maiman** i **G. Gould** – odegrają w historii ważną rolę. Th. Maiman uważa, że oceny Ch. Townesa i A. Schawlowa są zbyt pesymistyczne.

1960 – **Th. Maiman uruchamia laser właśnie na rubinie jako ośrodku czynnym.** **Udział G. Goulda w odkryciu lasera jest bardziej dramatyczny i kontrowersyjny.**

Schemat czteropoziomowy - **neodym** powszechny aktywator laserów ciała stałego (Nd:YAG)



Pompa: $^4I_{9/2} \rightarrow$ stany powyżej $^4F_{5/2}$

Sygnał: $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ - poziom pośredni

Odstęp $^4I_{11/2} - ^4I_{9/2}$ wynosi 2000 cm^{-1} i jest mniejszy od kT (300 K). **Obsadzenie** $\sim 10^{-5} \text{ N}$.

Osnowa: YAG $\equiv \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ - **granat itrowo-glinowy**

Domieszka: Nd – neodym $\sim 1\%$; $T_1 \cong 250 \mu\text{s}$.

Pompa: lampa błyskowa (impuls), łukowa (cw)
napełnienie – **krypton**;

Generacja: **głównie** $1,064 \mu\text{m}$; ($1,34 \mu\text{m}$)

Główna zaleta: Łatwość uzyskania inwersji
obsadzeń (**poziom** $^4I_{11/2}$ – **nieobsadzony**)

Współtwórcy lasera

1957 - Ch. Townes i A. Schawlow - idea „masera optycznego” [2].



Ch. Townes (1915-2015)



A. Schawlow (1921-1999)

Ch. Townes – fizyka masera optycznego.

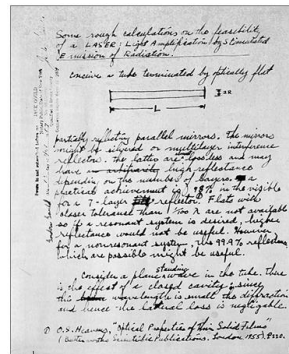
A. Schawlow – optyk, rezonator F – P

Do autorstwa pomysłu zastosowania w laserze rezonatora F – P pretenduje wielu autorów na zachodzie i wschodzie.



Gordon Gould (1920 – 2005)

(ważna rola w współtworzeniu lasera)



The first page of notes that Gould had notarized in November 1957. He sketched a tube with half-silvered mirrors at each end, which would become a fundamental component of the laser.

1. Autor nazwy „laser” (notatnik, konf. Q-E 1959)),
2. Wykorzystanie jako rezonatora *interferometru F-P*,
3. Optyczne pompowanie ośrodków aktywnych,
4. Stosowanie *gazowego ośrodka czynnego*,
5. Zastosowań: *synteza t-j, pomiary odległości*.

[2] Schawlow A., Townes Ch.: „Infrared and Optical Masers” (12/1958), *Physical Review* 112 (6), 1940-1949.

Pech i triumf Gordona Goulda

I. „Promienie śmierci”

Gordon Gould



1920 - 2005

Fizyk (mikrofale, optyka) – studia w Union College i Yale University

1944 -1945 praca przy proj. „Manhattan” – usunięty za „komunizm” żony(?)

1954 – doktorant w Columbia University; kier. Polykarp Kusch (noblista), gdzie tym czasie Ch. Townes i A. Schawlow pracowali nad maserami. (nie zakończył.)

1957 -1958 powstają główne idee Gordona Goulda dotyczące laserów, rejestrowane w notesie uwiarygadnianym notarialnie.

1959 – G. Gould rozpoczyna pracę w TRG (Technical Research Group), cel:

1. Budowa lasera: finansowanie projektu przez DoD w wys. 1 mln. \$.
Projekt został utajniony, a G. Gould nie dopuszczony do jego realizacji.

2. W kwietniu 1959 złożony został przez G. Goulda (TRG) projekt patentu.
Projekt patentu Ch. Townes’a i A. Schawlow’a (Bell Laboratories) pojawił się w czerwcu 1958 i uprawomocnił w 1960. Patent Goulda odrzucono.

Pech: Gould nie zbudował lasera + plagiat (?) - wszyscy pracowali w Columbia University.

II. Wyścig do lasera

1958 - Publikacja A. Schawlowa i Ch. Townesa o możliwości budowy „masera optycznego” uruchomiło wyścig do pierwszeństwa dokonania tego wynalazku:

1. Columbia University - Próby Ch. Townesa budowy lasera na **parach potasu**. Silna korozja szkła.
2. TRG - projekt na „**promienie śmierci**” z DoD (1 mld. \$) czyniło G. Goulda bliskim wygranej: **pech** !
3. Westinghouse Research Laboratories - Irwin Wieder wybrał **rubin** jako materiał czynny, który pompował promieniowaniem **lamp wolframowych**. System był wyjątkowo mało sprawny.
4. IBM's Thomas J. Watson Research Center, - Peter Sorokin próba użycia **kryształu fluorku wapnia** o konfiguracji zapewniającej akcję laserową **bez użycia zwierciadeł** w rezonatorze.
5. Bell Labs – dwie drogi: 1. A. Schawlow (odszedł z Columbia Univ.) użył **rubin** – materiał czynny. 2. Ali Javan – mieszanina **helu i neonu** wzbudzana **elektrycznym rozładowaniem** w gazie.

Uruchomienie **pierwszego lasera** było kwestia czasu. Wyścig wygrał „czarny koń” – T. H. Maiman z Hughes Laboratory (Malibu), który do pobudzenia **rubiny** użył **silnego flesza** emitującego w krótkofalowym (zielonym i niebieskim) pasmie optycznym, tam gdzie rubin ma główne pasma pochłaniania U i Y.

III. Patentowa wojna

I. 1951 - V. A. Fabrykant (ZSRR) patent utajniony do 1959 (*nie odegrał żadnej roli*).

II. Czerwiec 1958 - Charles Townes i Arthur Schawlow (Bell Laboratories)

III. Kwiecień 1959 – Gordon Gould (TRG - Technical Research Group), odrzucony.

G. Gould nie pogodził się z odrzuceniem patentu i miał do tego argumenty:

1. Zapisy w *notesie z podpisem notariusza były wcześniejsze* od doniesień Ch. Townesa
2. Szeregu *propozycji z notesu nie było* w doniesieniach A. Schawlowa i Ch. Townesa.

G. Gould żądał uznania patentów częściowych – początek 30. letniej wojny patentowej

1. 1977 – patent na metodę *optycznego pobudzania* ośrodków czynnych lasera;
2. 1978 – patent na *zastosowania laserów*: np. dalmierze w tym do księżyca;
3. 1987 – patent na stosowania gazów jako ośrodków czynnych lasera, *lasery gazowe*;
4. 1988 – patent na *okienka pod kątem Brewstera* zamykające rury laserów gazowych.

Gordon Gould wygrał – **TRIUMF !!!!** – i to podwójnie:

1. Uzyskał 4 patenty na newralgiczne metody, elementy budowy i zastosowania laserów;
2. Uzyskał je wtedy, gdy produkcja laserów była powszechna i w pełnym rozwoju.

Mimo trudności w ściąganiu należnych odpisów autorskich G. Gould pod koniec życia stał się człowiekiem majątnym – był milionerem

Rezonator Fabry – Perota

- Układ sprzężenia zwrotnego w laserze



Ch. Fabry (1867-1945)



A. Perot (1863 – 1925)

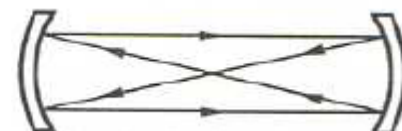
**Zasadą działania i budowę interferometru F-P
opublikowano w 1897**

Przykłady: Rezonatorów F-P

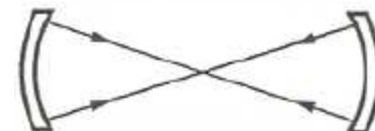
Płaski



Konfokalny



Sferyczny



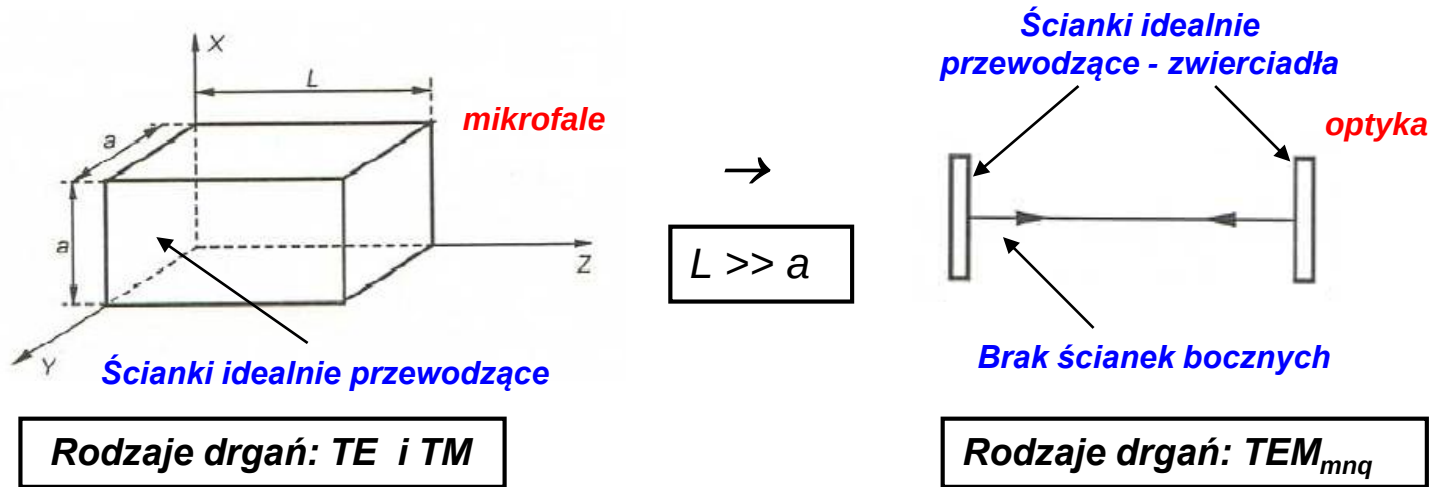
Hemikonfokalny



Hemisferyczny



Metamorfoza rezonatora zamkniętego w otwarty



Wartości własne – częstotliwości rezonansu

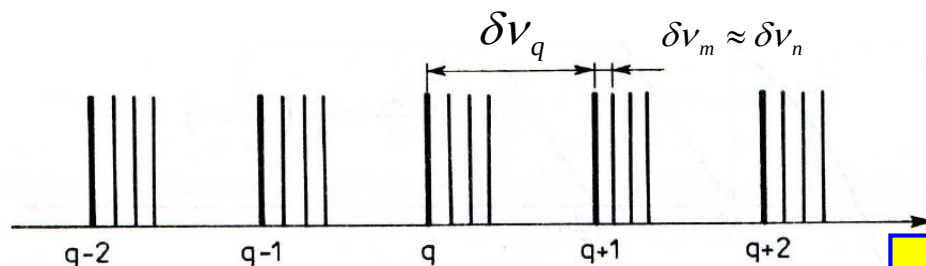
$$\nu_{m,n,q} = \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{a}\right)^2 + \left(\frac{q}{L}\right)^2}$$

Dla: $m \sim n \ll q$ (mody przyosiowe)

$$\nu_{m,n,q} = q \frac{c}{2L} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{mL}{qa} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{nL}{qa} \right)^2 \right]$$

$$\nu_{m,n,q} \cong q \frac{c}{2L} \left(1 + \frac{m^2 + n^2}{q^2} \frac{L^2}{a^2} \right)$$

Widmo drgań własnych rezonatora otwartego



Mod podstawowy:
 $m=n=0$

$$\nu_{00q} = \frac{cq}{2L}$$

$$L = q \frac{\lambda_{00q}}{2}$$

W „L” mieści się wielokrotność
połowy długości fali

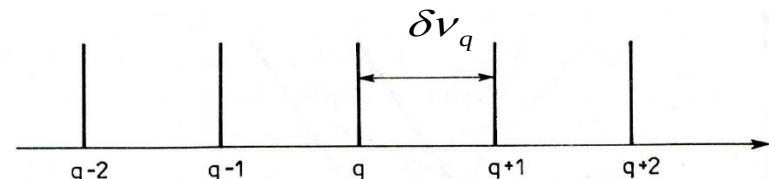
$$\delta \nu_q = \nu_{00(q+1)} - \nu_{00q} = \frac{c}{2L}$$

Odstęp modów indeksowanych przez „q” niezależny od „m” i „n”

Dla otwartego rezonatora typu F – P i modów $TEM_{m,n,q}$

$$\delta \nu_m \approx \delta \nu_n \ll \delta \nu_q$$

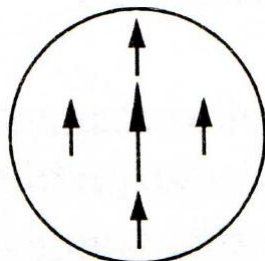
Widmo wartości własnych modu TEM_{00q}



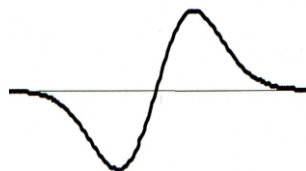
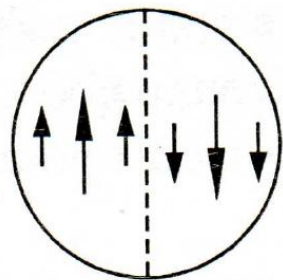
Wiązki Gaussa

A. G. Fox i T. Li podali rozkłady pól w rezonatorach otwartych typu F – P [3]

TEM_{00q}



TEM_{10q}



TEM_{21q}



TEM_{22q}



Dla TEM_{00q}

$$L = q \frac{\lambda_{00q}}{2}$$

[3] A. G. Fox, T. Li „Resonans modes in a maser interferometer” Bell Systems Tech. J. 40, (1961) 453-488.

Mod podstawowy TEM_{00q}

$$E(r, z, t) = \frac{1}{2} E_0 \frac{w_0}{w_z} \exp \left\{ -\frac{r^2}{w^2(z)} - i \left(\frac{r^2 k}{2R(z)} - \Phi(z) \right) \right\} \exp[-i(kz - \omega t)]$$

Amplituda f. Gaussa

Promień krzywizny frontu falowego

Fala biegnąca w kier. +z

Intensywność:

$$I(r, z) = I_0 \left(\frac{w_0}{w_z} \right)^2 \exp \left[-2 \left(\frac{r}{w_z} \right)^2 \right]$$

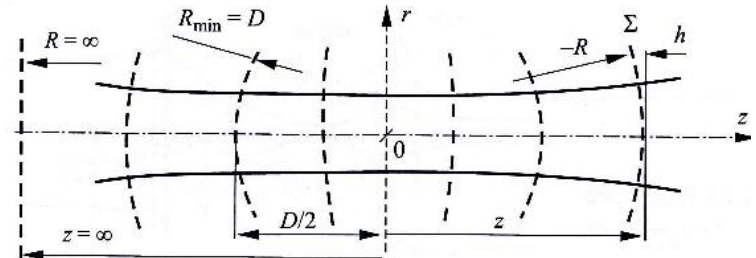
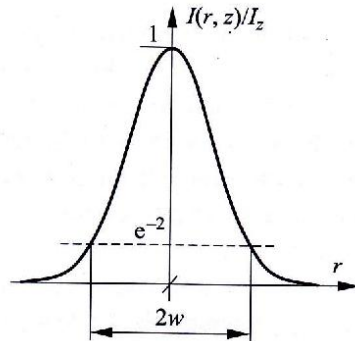
$$I_0 = \frac{2P}{\pi w_0^2}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi n}{\lambda_0}$$

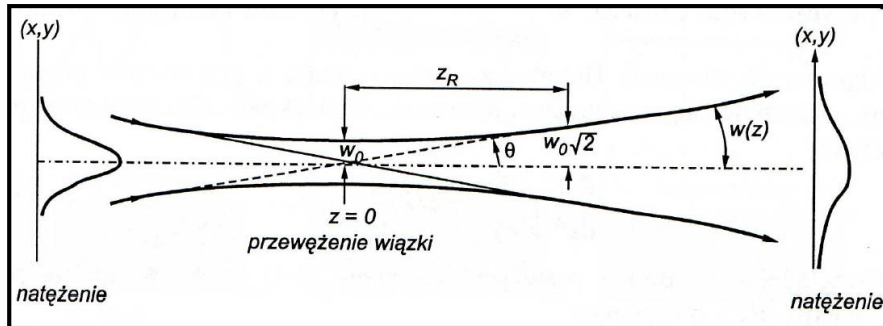
Równanie powierzchni stałej fazy

$$kz - \Phi(z) + \frac{kr^2}{2R(z)} = \text{const}$$

$$\text{tg } \Phi = \frac{z}{z_R}$$



Parametry modu podstawowego



$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$

$$w(z_R) = \sqrt{2} w_0$$

Zasięg Rayleigha – odległość po której powierzchnia wiązki wzrasta dwukrotnie

$$D = 2z_R = \frac{2\pi w_0^2}{\lambda}$$

Parametr konfokalny – obszar kolimacji

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}$$

Średnica wiązki mierzona na wysokości: E_0/e lub I_0/e^2

Dla $z = 0$: $2w(0) = 2w_0$ - średnica wiązki w przewężeniu (**talia**).

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_R}{z}\right)^2 \right]$$

Promień krzywizny frontu falowego - **zmienny**

Fala płaska: $R(z) \rightarrow \infty$ dla $z = 0$ i $z \rightarrow \infty$

$$\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \left(\frac{w(z)}{z} \right) = \frac{\lambda}{\pi w_0}$$

Kąt rozbieżności wiązki

$$\theta \cdot w_0 = \frac{\lambda}{\pi}$$

Niezmiennik dyfrakcyjny wiązki Gaussa

Idealne dla laserów cechy rezonatorów F-P:

1. **Boczne powierzchnie** rezonatora **odkryte**, dostęp do materiału aktywnego (pompowanie, chłodzenie) bez zmian dobroci rezonatora;
2. **Mody** rezonansowe - **przyosiowe TEM** – promieniowanie w małym kącie bryłowym wzdłuż osi rezonatora ($\theta \sim 10^{-3} \text{ rad}$);
3. **Wysoka** dobroć ($10^6 - 10^7$);
4. **Względnie ubogie widmo częstotliwości rezonansowych**; ułatwia osiągnięcie inwersji obsadzeń i generację;
5. **Wiele** możliwych **konfiguracji** rezonatorów stabilnych i niestabilnych

Sukces



1964 – Nagroda Nobla

Po pierwszym laserze, bez problemu powtórzono ten eksperyment i uruchomiono inne typy laserów.

„Jak grzyby po deszczu”:

1961 – A. Javan i W. Bennett – laser He-Ne;
1962 - laser półprzewodnikowy GaAs;
1962 – teoria generacji impulsów Q – S;
1964 – laser na dwutlenku węgla - CO₂ ;
1964 – laser jonowy argonowy - Ar⁺ ;
1964 – laser ciała stałego Nd:YAG
1966 – laser na barwnikach organicznych.

Czy to przypadek?

Czy liczba zaangażowanych ośrodków?

A może zbudować laser - to zdecydowanie nie było aż takie trudne zadanie.

Wzmacniacz kwantowy darem przyrody dla generatorów zakresu optycznego

Zagadnienia stanowiące zasadniczy problem w maserach nie istnieją w laserach:

1. Uzyskiwanie inwersji obsadzeń: w **maserach** jedyny skuteczny sposób to **separacja cząstek** wzbudzonych (nie dotyczy ciał stałych); konieczność izolowania cząstek – próżnia.
2. Praktycznie **jednakowe obsadzenie stanów dla $h\nu \ll kT$** , dla uzyskania inwersji obsadzeń w maserach konieczne chłodzenie ośrodka czynnego do **temperatur ciekłego helu**. Problem nie występuje w **laserach** – **pracują** z reguły w **temperaturach 300K**, gdyż **$h\nu \gg kT$** .
3. **Stałe pole magnetyczne** – niewystarczająca liczność stanów tylko w zakresie mikrofalowym i możliwość dostrajania częstotliwości. Duża komplikacja aparatury (jednorodność pola).
4. **Pompa** – uzyskanie inwersji. W **mikrofalach** musi być **generator monochromatyczny**. W **zakresie optycznym** łatwo zastosowano **inne dostępne rodzaje energii wzbudzających**.
5. Wydajność energetyczna; W **maserach** mała efektywna koncentracja ogranicza wydajność. W zakresie optycznym $N_{\text{eff}} \sim 1$ i mogą być uzyskiwane ogromne generowane moce.
6. **Zasadniczy atut lasera** – **brak** w tym czasie **generatorów promieniowania optycznego**. Główny **motor stymulujący pracę** w tej tematyce.
7. **Opanowanie generacji w zakresie optycznym** zaowocował możliwością generacji **bardzo krótkich impulsów**: $\tau_i \cong 1/\Delta\nu$ - im wyższa częstotliwość tym większe dostępne pasma.
8. **Możliwości zastosowań laserów przekroczyły wszelkie oczekiwania**.

Ograniczenia

Wnioski z dotychczasowych rozważań:

Wzmacniacze kwantowe predestynowane są dla fal optycznych

Zasadnicze pytanie czy istnieją i jakie są granice ich stosowania*):

Ograniczenie od dołu (oczywiste):

$\nu > kT/h$; dla 300K $\nu_{min} > 10 \text{ THz}$ ($\lambda < 30 \mu\text{m}$);

Ograniczenie od góry:

$$\frac{A}{B} = \frac{8\pi h}{c^3} \nu^3$$

- dla $\lambda_{min} < 300 \text{ nm}$ przeważa promieniowanie niespójne, luminescencja

*) Obydwie granice są szacunkowe

Dziękuję za przeczytanie