



Meandry Techniki Laserowej

2. Dlaczego nie Masery

Zdzisław Jankiewicz

Podziel się wiedzą – WAT, Warszawa 05.04.2019

Streszczenie

Albert Einstein tworząc teorię **wzmacniacza kwantowego** nie łączył go z zakresem widma w jakim ten wzmacniacz miał pracować. Istnieje wiele danych wskazujących na przyczyny, dlaczego pierwsze opracowania praktyczne dotyczyły mikrofal, chociaż jak się później okazało wzmacniacz kwantowy idealnie nadaje się do wzmacniania fal znacznie krótszych, fal zakresu optycznego. Właśnie wykazaniu powyższego chcę głównie poświęcić ten wykład.

Przed wszystkim praca Einsteina dotycząca wzmacniaczy kwantowych [2] pojawiła się stosunkowo wcześniej, gdy **elektronika** (taka z jaką dziś mamy do czynienia) była w powijakach, nie mówiąc o **optoelektronice (fotonice)**, która wtedy nie istniała. Nie chcę być źle zrozumiany, istniała i była dobrze rozwinięta **optyka** – istniały przyrządy wspomagające widzenie i specjalizowane, naukowe optyczne urządzenia pomiarowe. Dotyczyły one w zasadzie tzw. „światła białego” o szerokim widmie częstotliwości, emitowanego przez źródła termiczne, podobnego do światła naturalnego, jakie dostarcza nam słońce.

My, mówiąc o generatorach fal elektromagnetycznych, będziemy mieli na myśli źródła generujące sygnały o wąskim widmie częstotliwości, zbliżone do fal monochromatycznych. Takie promieniowanie zostało wytworzone i wykorzystane między innymi do budowy sieci radiowych – przekazu informacji za pomocą transmisji fal elektromagnetycznych w wolnej przestrzeni. Czasy, których te zdarzenia dotyczą, nie należały do spokojnych. Toczyła się wtedy jedna z najkrwawszych wojen światowych. W zmaganiach tych nie tylko brali czynny udział uczeni, ale udowodnili oni swoją wyjątkową przydatność, walnie przyczyniając się zwycięstwa (broń atomowa, radary). Właśnie radary wykrywające samoloty wymagały opanowania generacji fal o długościach rzędu jednego metra i krótszych. Zaliczamy je do tzw. **pasma mikrofal**. Ten rodzaj generacji został opanowany pod koniec II wojny światowej i wykorzystany praktycznie w trakcie obronie Londynu. Nie trzeba podkreślać, że wszelkie prace w tym (i nie tylko) zakresie były otoczone ścisłą tajemnicą, która została przedłużona długo na następne lata, tzw. zimnej wojny.

Na początku lat 50. doszło do zainteresowania się wspomnianą pracą A. Einsteina i jego wzmacniaczami kwantowymi. Gdy idzie o St. Zjednoczone, prace w tym zakresie podjęto w dwóch ośrodkach: Columbia University i w NBS (National Bureau of Standards). Nic dziwnego, że dotyczyły one mikrofal. Trudny problem inwersji obsadzeń został w nich „sprytnie” rozwiązany przez usunięcie elementów kwantowych na dolnym poziomie energetycznym. Pozostała ich część (prawie połowa, bo dla mikrofal $h\nu \ll kT$) utworzyła ośrodek wzmacniający o wysokiej inwersji obsadzeń. Zabiegu takiego skutecznie można dokonać jedynie w ośrodku gazowym (ewentualnie w parach) i tylko wtedy, gdy czas życia poziomu wzbudzonego jest dostatecznie długi, aby wzbudzone cząstki można bezpiecznie wprowadzić do rezonatora bez istotnego ubytku ich ilości. Dodatkowo wiadomo, że przejścia pomiędzy długo życiowymi poziomami zachodzą w bardzo wąskim paśmie częstotliwości. Ta własność tłumaczy zainteresowanie się nimi pracowników zespołu zajmującego się budową wzorców częstotliwości i czasu w NBS.

Prace obydwu zespołów zostały uwieńczone sukcesem. W 1954 r. Ch. Townes z Columbia University uruchomił pierwszy wzmacniacz kwantowy - MASER wykorzystując jako materiał czynny molekuły amoniaku (CH_3), zaś w roku 1955 N. Ramsey zbudował pierwszy model atomowego wzorca czasu z użyciem atomów cezu (Cs). W tym przypadku wybór okazał się na tyle trafny, że docelowe urządzenie w postaci tzw. „*fontanny cezowej*” od 1967r. gra rolę ***pierwotnego wzorca czasu i przestrzeni (długości)***.

Faktycznej oceny użyteczności i możliwości zastosowań mikrofalowych wzmacniaczy kwantowych można dokonać na bazie publikacji N. Bloembergena [4]. Przeprowadzona tam analiza dotyczy rubinu jako materiału czynnego, ale jest ona na tyle ogólna, że obejmuje wszystkie materiały, w których inwersja obsadzeń nie jest otrzymywana przez wyodrębnienie wzbudzonych elementów kwantowych (w rubinie tego uczynić nie można). W tym przypadku stosując dodatkowy sygnał pompy zmieniamy obsadzenia układu złożonego z 3 lub 4 (rubin) poziomów w taki sposób, by pomiędzy dwoma wybranymi poziomami wystąpiła inwersja obsadzeń.

Proste obliczenia optymalizacyjne wskazują, że dla uzyskania inwersji w rubinie powinien on znajdować się w temperaturze ciekłego helu, a częstotliwość sygnału pompy powinna być co najmniej dwukrotnie większa od częstotliwości sygnału wzmacnianego. Im wyższa częstotliwość pompy, tym większe uzyskiwane inwersje. Niestety dla dostępnych źródeł mikrofalowych, inwersje są niewielkie i nie przekraczają kilku procent wartości domieszki czynnej.

Istnieje jeszcze jedna wada kwantowego wzmacniacza mikrofalowego, która praktycznie eliminuje go z powszechnego użycia. Chcąc zbudować maser należy już mieć taki generator, by użyć go jako pompy. Takiego wymagania wcześniej nie stawiała żadna z konstrukcji wzmacniaczy i generatorów. Nie stawiały przede wszystkim te, w których wykorzystywane były swobodne elektrony. W tych konstrukcjach, w energię pola elektromagnetycznego wielkiej częstotliwości przetwarzana jest energia kinetyczna ruchu nie związanych elektronów (tj. powszechnie znana i dostępna energia przyspieszającego elektrony pola elektrostatycznego).

Tym stwierdzeniem mógłbym zakończyć prelekcję: **dłaczego nie masery**. Przedłużę ją jednak nieznacznie z racji zajmowania się swego czasu pompowaniem optycznym maserów [7]. Jeżeli inwersja rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości sygnału pompy, to dlaczego do tego celu nie wykorzystać promieniowania optycznego, tym bardziej, że wkrótce takie generatory (LASERY) zbudowano. Pierwsze próby realizacji tego pomysłu dotyczyły rubinu jako materiału czynnego lasera i masera i wskazywały na anomalie, lepsze rezultaty uzyskiwano przy chłodzeniu ciekłym azotem niż helem. Rozpoczywałem wtedy pracę na Wydziale Łączności WAT i interesowałem się wzmacniaczami kwantowymi. Brałem udział w przygotowaniu niezbędnych technologii i aparatury do badań nad maserami oraz w uruchomieniu pierwszych w kraju laserów rubinowych. Uznałem to zagadnienie (oczywiście z udziałem przyszłego promotora) za godne podjęcia w ramach pracy doktorskiej.

Na kilku przeźroczach poniżej przedstawiłem założenia konstrukcyjne, wykonane urządzenia, wyniki obliczeń i eksperymentów oraz zasadnicze wnioski wyjaśniające zaobserwowane anomalie. Tezę, którą dowodziłem, było twierdzenie, że w maserze rubinowym pobudzonym impulsowo promieniowaniem lasera rubinowego, uzyskuje się większą inwersję obsadzeń w temperaturze ciekłego azotu niż w temperaturze ciekłego helu. Sytuacja jest odwrotna, gdy pobudzanie ma charakter nie impulsowy, a ciągły. Wtedy w temperaturach azotowych nie można w ogóle uzyskać inwersji obsadzeni przejścia mikrofalowego.

Zachodzi pytanie czy własność tą można zachować dla dalszego podwyższania temperatury. W zasadzie nie ma ograniczenia. Temperatura jednak tak silnie wpływa na inne parametry kwantowych wzmacniaczy i generatorów rubinowych, że w tym zastosowaniu materiał ten nie dopuszcza dalszego podwyższania temperatury. Dla innych materiałów (lasera i masera) i spełnieniu dodatkowych warunków uruchomiony został maser z pompą optyczną pracujący w temperaturze otoczenia [11].

Istnienie maserów pobudzanych optycznie nie zmieniło zasadniczo obrazu możliwości zastosowań mikrofalowych wzmacniaczy kwantowych. Wykorzystuje się je w zasadzie jedynie jako wzorce częstotliwości. O wzorcu cezowym i zasadzie jego pracy była już mowa. Wtórna wzorce atomowe wykorzystujące inne pierwiastki (rubid, wodór) działają właśnie jako masery z pompą optyczną i są powszechnie wykorzystywane np. w satelitach GPS. Reasumując, należy stwierdzić, że właściwym pasmem częstotliwości dla **wzmacniaczy kwantowych** jest zakres optyczny i to **lasery**, a nie **masery** wyznaczyły ich rolę w rozwoju techniki i cywilizacji.

Masery

Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation



Ch. Townes
(1915 – 2015)

1954 – uruchomienie pierwszego **masera** na parach amoniaku – NH_3

1956 – N. Bloembergen opisuje **maser ciała stałego** (np. rubinowy)

1960 – Th. Majman – uruchomienie pierwszego **lasera** (rubinowego)



N. Basow
(1922-2001)



A. Prochorow
(1916-2002)

1964 – już po skonstruowaniu laserów, dla całej trójki **Nagroda Nobla** -
to **pierwsza, ale nie ostatnia Nagroda Nobla za badania w zakresie Laserów**

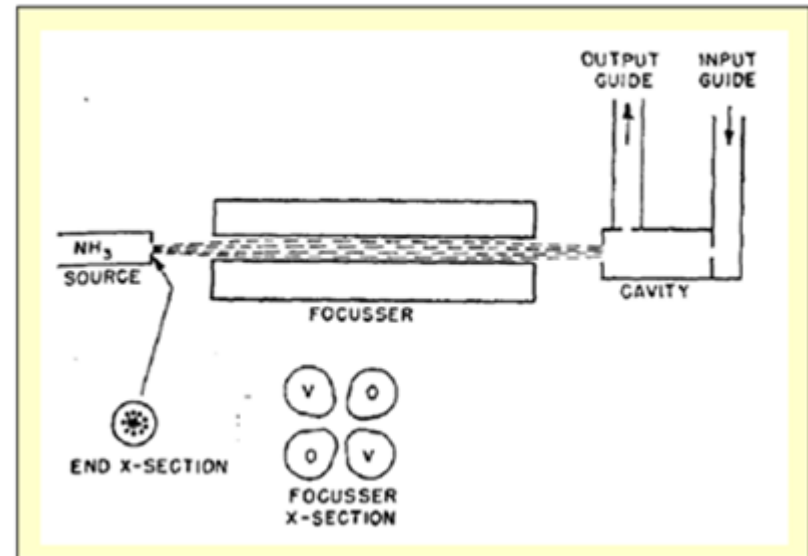
Pierwszy maser [1]

Maser amoniakalny – NH_3
 $\nu_w = 23870,14 \text{ MHz}$

Charles Townes



Columbia University



Schemat aparatury pierwszego masera

[1] J. P. Gordon, H. J. Zeiger,* C. H. Townes „Molecular Microwave Oscillator and New Hyperfine Structure In the Microwave Spectrum of NH_3 ” Phys. Rev. 95, 282, (1954)

Obsadzenia stanów w paśmie mikrofal (temperatura otoczenia - 300 K)

Obiekt kwantowy o dwóch stanach energetycznych: $\nu_{12} = (5 \div 50) \text{ GHz}$

$$kT = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 = 4,14 \cdot 10^{-21}$$

$\nu [\text{GHz}]$	5	20	35	50
$h\nu [\text{J}]$	$3,314 \cdot 10^{-24}$	$1,326 \cdot 10^{-23}$	$2,32 \cdot 10^{-23}$	$3,314 \cdot 10^{-23}$
N_2 / N_1	0,999	0,9968	0,9944	0,989
$\lambda [\text{cm}]$	6	1,5	0,857	0.6

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{h\nu}{kT}} \quad \text{dla } h\nu \ll kT \quad \frac{N_2}{N_1} \approx 1 - \frac{h\nu}{kT} \quad \rightarrow \quad N_k \approx \frac{N}{n}$$

N – koncentracja obiektów kwantowych; n – liczba poziomów.

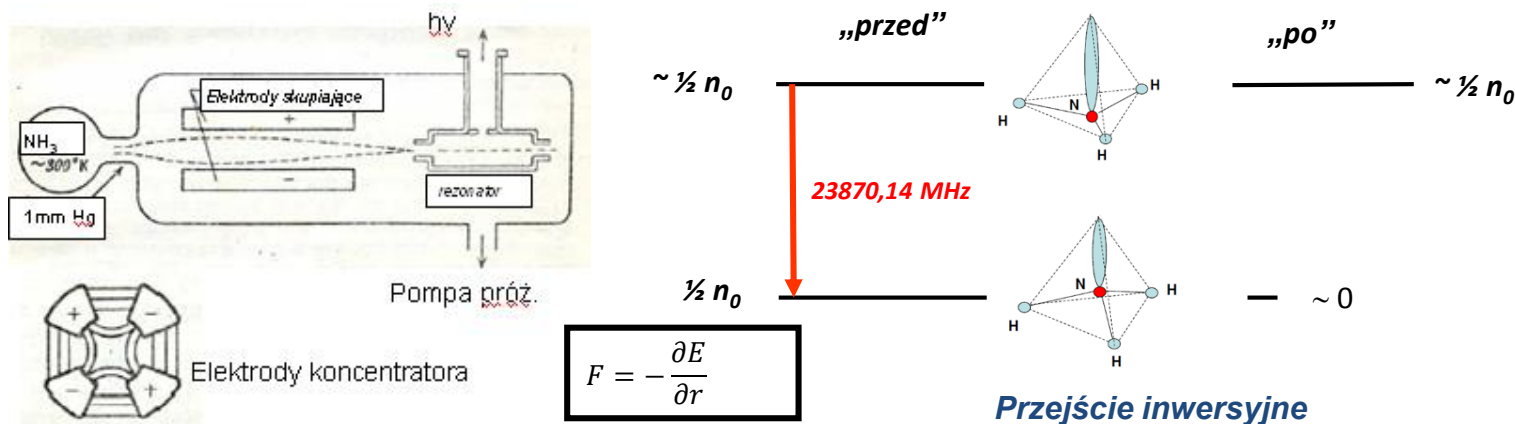
W paśmie mikrofalowym obsadzenia stanów są praktycznie jednakowe

Inwersja obsadzeń poprzez wyodrębnienie cząstek wzbudzonych (pierwszy maser)

Możliwość dla swobodnych obiektów kwantowych (gazy lub pary).

Dla NH_3 (23,87 GHz) i $T \geq 300\text{K}$ liczba cząstek wzbudzonych $n_2 \approx \frac{1}{2} n_0$

A. Pole elektrostatyczne – separacja dipoli elektrycznych - NH_3



Niejednorodne, pole elektrostatyczne zanikające na osi koncentratora,
skupia cząstki wzbudzone, które trafiają w szczelinę rezonatora.
Cząstki w stanie podstawowym (nie wzbudzone) są rozpraszane.

Warunki konieczne do spełnienia

1. Czas życia w stanie wzbudzonym długi, wystarczający na dotarcie molekuł amoniaku w stanie wzbudzonym do rezonatora tzw. przejście wzbronione;
2. Strumień molekuł porusza się w próżni bez kontaktu z innymi cząstkami – brak oddziaływań z termostatem (drganiami mechanicznymi);
3. Molekuły par amoniaku emitowane są z pieca i formowane w wąski strumień;
4. Prędkość poruszania się molekuł wynika z temperatury parowania NH_3 (przeważnie ok. 300K) i wynosi $v \sim 400 \text{ m/s}$;
5. Energia (częstotliwość) przejścia inwersyjnego CH_3 wynosi $\nu = 23870,14 \text{ MHz}$ i jest stała. Maser na parach amoniaku nie może być przestrajany.

Ch. Townes łatwo uzyskał inwersję obsadzeń i sprawdził prawdziwość idei wzmacniacza kwantowego A. Einsteina [2].

Warunki wskazują na małą przydatność praktyczną urządzenia. Jest w tej konstrukcji istotna wartość, która uczyniła maser amoniakalny sławny nie tylko z tego powodu, że był pierwszym. To duża stałość częstotliwości, jednak jako wzorzec czasu wytypowany został izotop cezu „ ^{133}Cs ”.

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

Szerokość linii przejścia inwersyjnego NH_3

$$A = \frac{64\pi^4}{3h\lambda^3} |\mu|^2$$

$|\mu|$ dipolowy moment elektryczny

W warunkach działania masera amoniakalnego (ciśnienie par, częstotliwość itp.) oceniono prawdopodobieństwo przejść spontanicznych na:

$$B = \frac{8\pi^3}{3h^2} |\mu|^2$$

$$A = 10^{-8} \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

Czas życia $\tau_0 = A^{-1}$ jest więc liczony w latach.

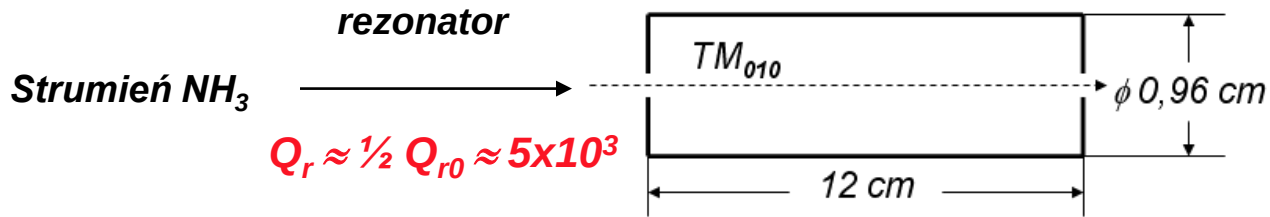
To sugerowałoby, że **szerokość pasma linii rezonansowej** przejścia kwantowego powinna być niezwykle mała (przypominamy):

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

Tak dobrze jednak nie jest. Molekuły CH_3 poruszają się i w rezonatorze przebywają znacznie krócej.

Za τ_0 należy wstawić czas przebywania molekuły w rezonatorze

Ocena szerokości linii rezonansowej w Maserze Townsa - wyniki i wnioski



Wychodząc z prawa Fouriera $\Delta\nu \Delta t \approx 1$, **Gordon** wyraził szerokość linii:

$$2\Delta\nu_0 = \frac{1,2v}{L}$$

gdzie: - v - średnia szybkość molekuł NH_3 ;
 L – długość rezonatora.
 - mnożnik 1,2 wynika z nierównomiernego rozkładu pola w rezonatorze.

$$Q_0 = \frac{\nu_r}{2\Delta\nu_0} \sim 5 \times 10^6$$

Dla NH_3 w $T = 300\text{K}$ $v \approx 4 \cdot 10^4 \text{ cm/s}$, $2\Delta\nu_0 \approx 4 \cdot 10^3 \text{ Hz}$

Dla wzorców częstotliwości to za mało i H. Ramsey zastosował specyficzną metodę wydłużenia czasu oddziaływania ich z polem w rezonatorze[3]

[3] N. F. Ramsey „Molecular Beam Resonance Method with Separated Oscillating Fields”. Phys. Rev. 78, 695 (1950).

Prekursor atomowych wzorców czasu

„How the laser happened” - Wspomnienia Ch. Townesa

>>Llewelyn H. Thomas, wybitny teoretyk z Uniwersytetu Columbia powiedział mi, że z fundamentalnych praw fizyki wynika wprost, iż maser nie może dawać tak czystej częstości. Był tak pewny siebie, że właściwie odmówił słuchania moich wyjaśnień. Po uruchomieniu masera po prostu przestał się do mnie odzywać.<<

Ch. Towns zdawał sobie sprawę z faktu, że smukłość linii rezonansu atomowego zapewnia, niespotykaną dotąd czystość i stabilność generowanej fali elektromagnetycznej [4].

Jak wspomina J. Hall wykładzie z okazji nagrody Nobla [5], był taki czas (1949 – 1955), że przejście rezonansowe w amoniaku było brane pod uwagę jako wzorzec czasu.

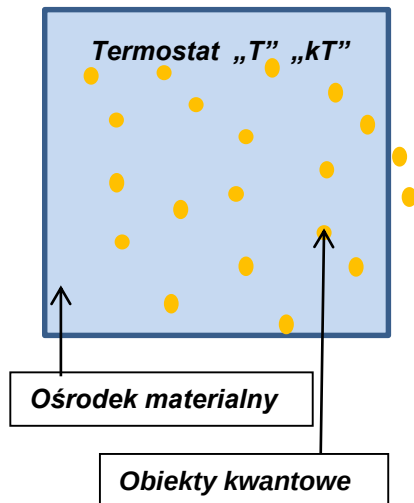
Od roku 1955 jako wzorzec czasu został uznany generator cezowy (Cs), działający na podobnej zasadzie jak maser amoniakalny.

[4] Townes C. H. „ NH_3 - Quantum Oscillator like Frequency Standard” *Nuovo Cimento, Suppl.* V, 1 (1957)

[5] John L. Hall „Defining and Measuring Optical Frequencies: the Optical Clock Opportunity – and More” *Nobel Lecture, December 8, 2005*

Masery ciała stałego - wpływ termostatu

W realnych wzmacniaczach kwantowych obiekty odpowiedzialne za wzmacnianie promieniowania są w kontakcie z innymi cząstkami.



Koncentracja obiektów kwantowych z reguły jest mała:

$$C \leq 1\%$$

Nie oddziałują wzajemnie z sobą,
lecz podlegają oddziaływaniu drgań
mechanicznych (cieplnych) osnowy

Konsekwencje:

1. Pojawiają się przejścia (absorpcja, emisja) nie związane z pochłanianiem czy emisją **fotonów** lecz **fononów** (drgań mech.);
2. **Skracają się czasy życia** obiektów kwantowych w stanach wzbudzonych przez pojawienie się przejść fononowych;
3. Prawdopodobieństwa przejść i czasy życia zależą od „T”

Czasy życia i szerokość linii

W_{ij} - całkowite prawdopodobieństwo przejścia z „i” do „j”

Zachowany jest związek pomiędzy prawdopodobieństwami przejść:

$$E_j > E_i$$

$$\frac{w_{ij}}{w_{ji}} = \exp\left(-\frac{V_{ij}}{kT}\right) \text{ dla } j > i$$

$$\text{W konsekwencji: } T_1 = \frac{1}{w_{ij} + w_{ji}} < A_{ji}^{-1} \quad \Delta\nu_{ij} = \frac{1}{2\pi T_1} > \Delta\nu_0$$

Czas życia

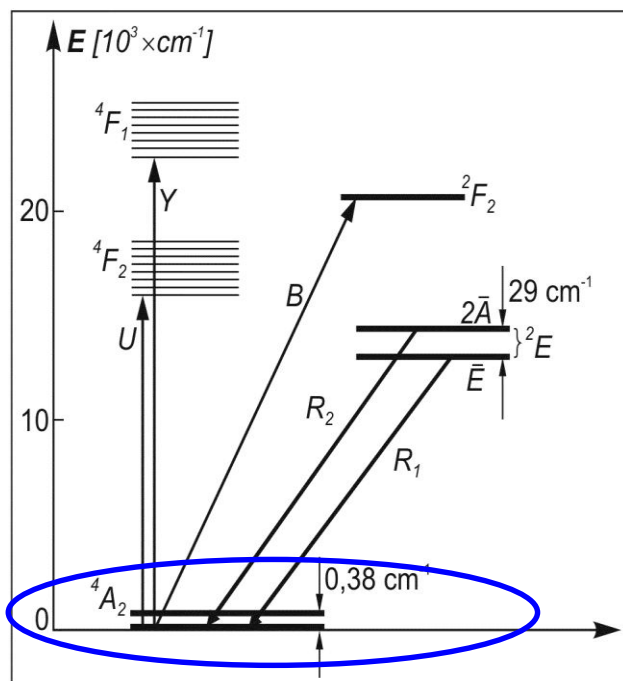
$$T_1^{-1} = A_{ij} \frac{\exp\left(\frac{hV_{ij}}{kT}\right) + 1}{\exp\left(\frac{hV_{ij}}{kT}\right) - 1}$$

W przypadku maserów : $h\nu \ll kT$
– czas życia zależy silnie od temperatury

$$T_1^{-1} \cong A_{ij} \frac{2kT}{h\nu_{ij}}$$

Rubin uniwersalny ośrodek czynny pierwszych urządzeń kwantowych maserów i laserów

Rubin $\equiv$ Korund $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Cr}^{3+}$ - jednoosiowy kryształ otrzymywany wcześniej metodą Verneuila, a następnie Czochralskiego.



W **zakresie mikrofalowym** mogą być wykorzystane dwa poziomy stanu 4A_2 oddalone od siebie o $0,38 \text{ cm}^{-1} = 11,47 \text{ GHz}$. Konieczne do zbudowania wzmacniacza dalsze poziomy uzyskujemy umieszczając rubin w zewnętrznym **polu magnetycznym (efekt Zeemana)**.

Wymagania:

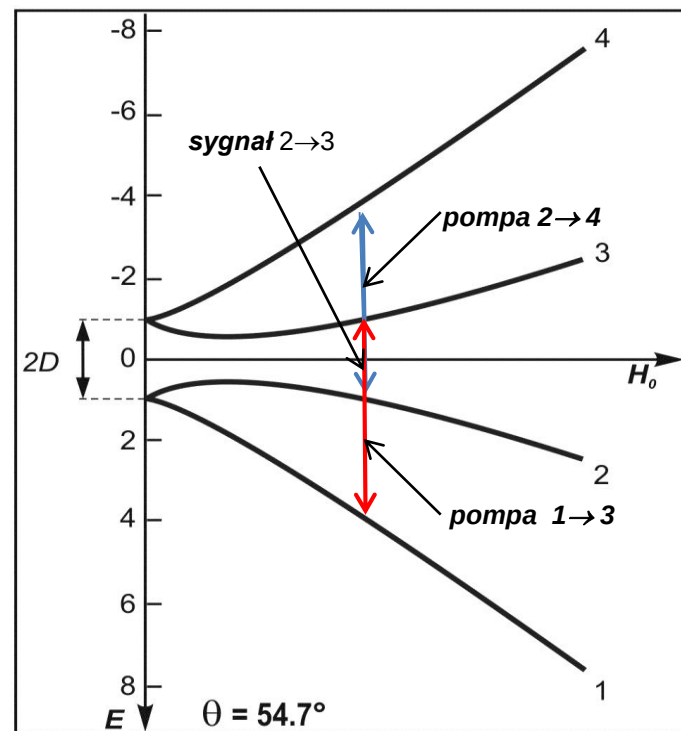
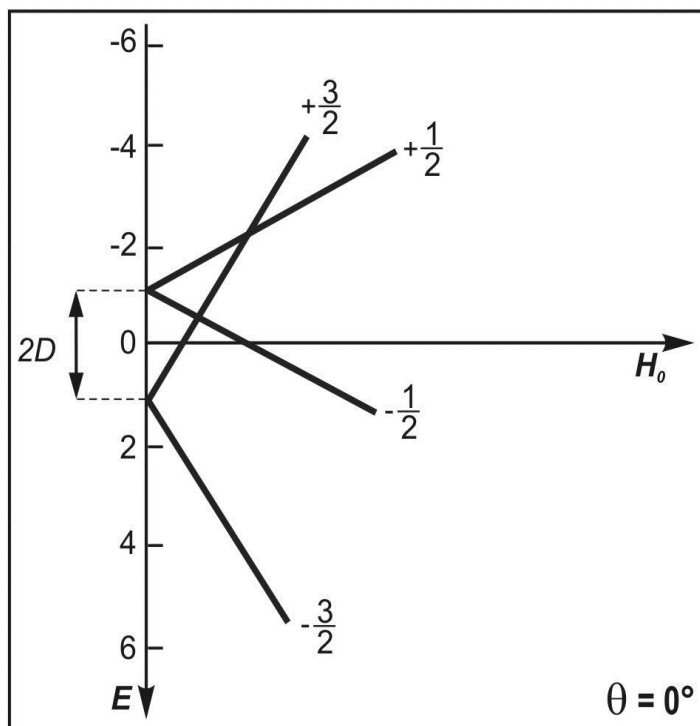
1. Pola stosunkowo duże – kilka **kGs**;
2. Duża jednorodność – poszerzenie niejednorodne przejść kwantowych;
3. Elektromagnesy o dużych gabarytach, i mocy (konieczne chłodzenie wodne).

Poziomy stanu podstawowego 4A_2 w zewnętrznym polu magnetycznym

(mamy do dyspozycji **cztery** poziomy –**trzy** możliwe przejścia)

$$2D = 0,3824 \text{ cm}^{-1} = 11,47 \text{ GHz}$$

Układ push-pull



Maser rubinowy może być przestrajaný za pomocą pola magnetycznego. Częstotliwości sygnału i pompy są z sobą związane wyborem kąta „ θ ”

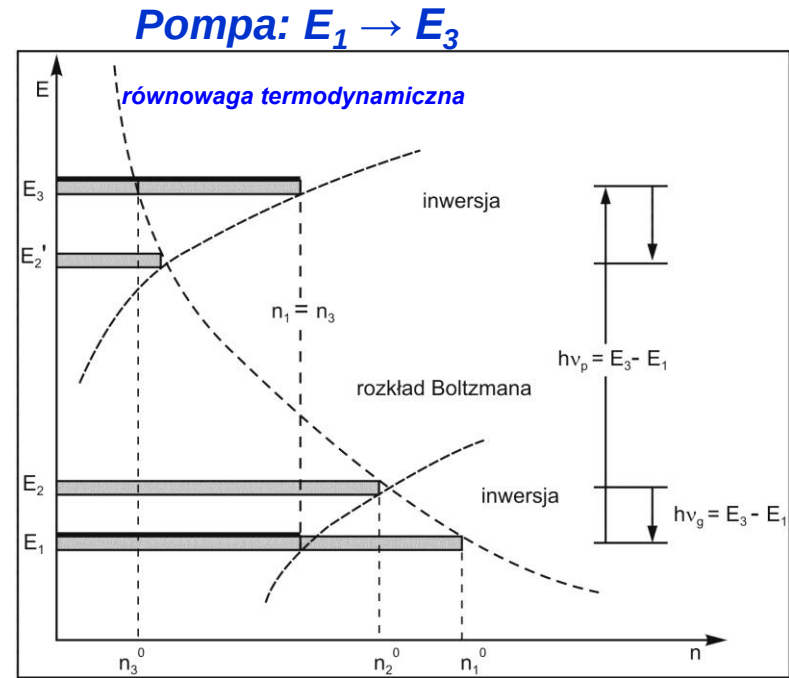
Maser ciała stałego (rubinowy) [5]

N. Bloembergen



1920 - 2017

1981 – Nagroda Nobla



Inwersja: $E_2 \rightarrow E_1$ i $E_3 \rightarrow E_2'$

Miara inwersji obsadzeń:

$$\frac{\Delta N_{21}}{N} = \frac{N_2 - N_1}{N} > 0$$

[6] N. Bloembergen „Proposal of New Type Solid State Maser”, Phys. Rev. Vol. 104 (No 2), October (1956)

Równania kinetyczne

(3-poziomowy)

$$\begin{aligned}\frac{dN_1}{dt} &= -(w_{12} + w_{13})N_1 + w_{21}N_2 + w_{31}N_3 - W_p(N_1 - N_3) = 0, \\ \frac{dN_2}{dt} &= -(w_{21} + w_{23})N_2 + w_{12}N_1 + w_{32}N_3 = 0 \\ N_1 + N_2 + N_3 &= N\end{aligned}$$

gdzie: W_p - prawdopodobieństwo przejść polem pompy [s^{-1}]
.
 $w_{i,j}$ -prawdopodobieństwo przejść relaksacyjnych [s^{-1}]

$$P_p = h \nu_{31} (N_1 - N_3) W_p$$

gdzie: P_p – gęstość mocy pola pompy [$W \cdot cm^{-3}$]

Inwersja obsadzeń

Nasylenie przejścia pompy

$$N_3 - N_1 = \frac{N_3^0 - N_1^0}{1 + \frac{2W_p}{(w_{31} + w_{13})}}$$

Dla nasycenia przejścia pompy:

$$W_p = W_{31} \gg (w_{13} + w_{31})$$

$$N_3 - N_1 \approx 0$$

Inwersja obsadzeń

$$\Delta N_{21} = -\Delta N_{32} = N \frac{[w_{32} - w_{23}] - [w_{21} - w_{12}]}{[w_{32} + 2w_{23}] + [w_{12} + 2w_{21}]} > 0$$

Wartość inwersji obsadzeń

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

Inwersja obsadzeń zależy od **prawdopodobieństw przejść relaksacyjnych** ale także jest funkcją **temperatury**. Ta zależność szczególnie uwidacznia się dla częstotliwości leżących **w paśmie mikrofalowym**.

Możliwość obsadzania wyższych maserowych poziomów ciepłym promieniowaniem powoduje, że **MASERY mogą pracować wyłącznie przy kriogenicznym chłodzeniu**. Jak wykazał N. Bloembergen, praktycznie powinny to być temperatury **ciekłego helu (4.2 K)**

MASER – częstotliwości sygnału i pompy

Mikrofale:

$$h\nu \ll kT \rightarrow \exp(-h\nu/kT) \approx 1 - h\nu/kT$$

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

$$h/3kT = 1,6 \cdot 10^{-11}/T$$

Inwersja obsadzeń silnie zależy od temperatury i jest mała

$$\nu_{21} < \frac{w_{32}}{w_{21}} \nu_{32}$$

Warunek na dodatnią inwersję,
przy: $w_{32} \approx w_{21}$, $\nu_s = \nu_{21}$, $\nu_p = \nu_{31}$

Wprowadza ograniczenie na ν_s

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

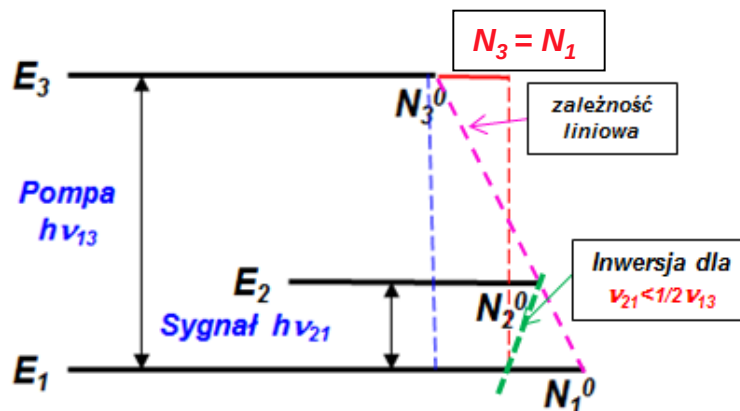
Biorąc pod uwagę, że $\nu \sim 10^{10}$, to $\Delta N_{21}/N$ nawet dla temperatur ciekłego helu (4.2 K) nie może przekroczyć **pojedynczych procentów** domieszki aktywnej. Przejście do wyższych temperatur np. ciekłego azotu (77 K) czyni **pracę masera problematyczną**

Maser ciała stałego (rubinowy)

N_1^0 ; N_2^0 ; N_3^0 – obsadzenia w równowadze termodynamicznej zgodne z prawem Boltzmana

W nasyceniu pompy: $N_3 = N_1$

$$N_1 = N_1^0 - \frac{N_1^0 - N_3^0}{2}$$



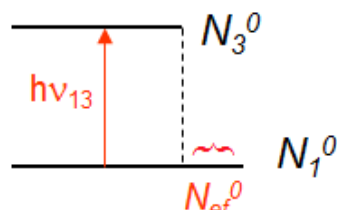
Dyskusja: - dążymy do uzyskania maksymalnej Inwersji obsadzeń przejścia sygnałowego tj. spełnienia wymogu by $N_2^0 \gg N_1$

Możemy to uczynić maksymalizując $(N_1^0 - N_3^0)$ tzn. dążyć do jak najmniejszego obsadzenia poziomu E_3 w stanie równowagi termodynamicznej ($\text{min. } N_3^0$).

Dwie drogi: 1. obniżanie temperatury ośrodka aktywnego ($\text{min. } T$),
2. zwiększanie częstotliwości pompy ($\text{max. } \nu_p$).

Efektywna liczba obiektów kwantowych

(zachowanie się w funkcji temperatury różnicy energii)



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

N_{ef}^0 – dostępna dla $U(\nu_L)$ koncentracja zależy od temperatury i różnicy energii.

ν_{13} [Hz]	10^{10}	10^{11}	10^{12}	10^{13}	10^{14}	10^{15}
ν	10GHz	100GHz	1 THz	10 THz	100THz	10^3 THz
λ_0	3 cm	3 mm	300 μm	30 μm	3 μm	300 nm
$N_{ef} / 300K$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-2}$	0,63	~ 1	1
$N_{ef} / 77K$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	0,3	~ 1	1	1
$N_{ef} / 4,2K$	$5,7 \cdot 10^{-2}$	0,51	~ 1	1	1	1

mikrofałe

tera herce

optyka

Warunki umożliwiające działanie wzmacniaczy kwantowych w paśmie mikrofal

1. Konieczne obniżenie temperatury do ciekłego helu – **4.2K**
2. Stosunkowo duża różnica częstotliwości pompy i sygnału

$$\nu_p > 2\nu_s$$

- Im wyższa częstotliwość pompy tym lepiej

Warunki te stanowią poważne ograniczenia dla maserów ciała stałego

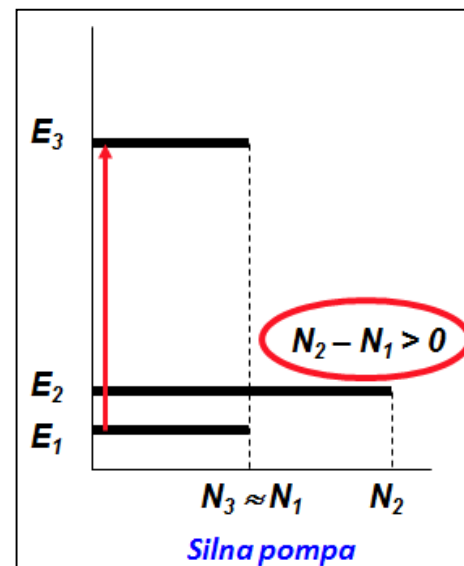
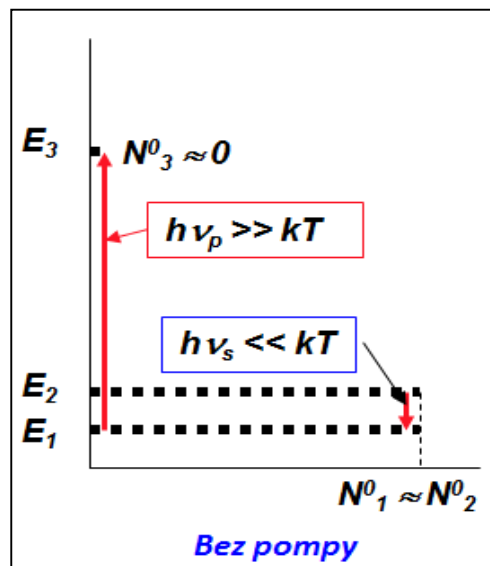
Rozwiązanie radykalne:

Przeniesienie częstotliwości pompy w zakres optyczny.

W latach 50. nie było możliwe (brak generatorów fal optycznych).

Dopiero zbudowanie laserów umożliwia stosowanie tej metody.

Pompowanie optyczne maserów



Zastosowanie pompy optycznej umożliwia uzyskanie wysokich **inwersji mikrofalowego przejścia maserowego**. Stało się to możliwe po zbudowaniu lasera. Problem był badany dla **rubinu** jako materiału aktywnego **laser i masera**.

Maser rubinowy pompowany optycznie [7]

**Wnioski z rozwiązania równań
obsadzeń w stanie stacjonarnym**



Założenia: $h\nu_p \gg kT$; $h\nu_s \ll kT$

**Zastosowanie tych uproszczeń do
podanego wzoru na inwersję obsadzeń
prowadzi do wniosku, że $\Delta N_{21}/N > 0$ po
spełnieniu (stan stacjonarny) warunku:**

$$\tau_s > 2T_1 \quad \text{gdzie:}$$

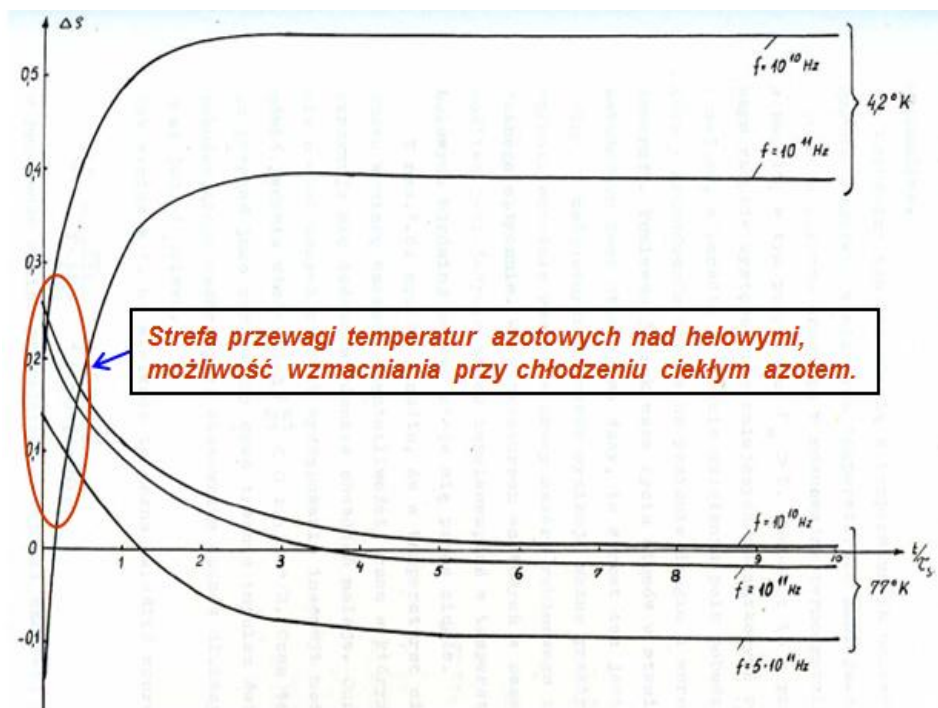
T_1 – czas życia poziomu (3): rubin ${}^2E \sim (3-5) \text{ ms}$

τ_s - czas relaksacji poziomów stanu 4A_2
silnie zależy od temperatury:
 $77K \sim 50 \mu s$, $4,2K \sim (20 - 50) \text{ ms}$.

**Wniosek: W stanie stacjonarnym warunek dodatniej inwersji przejść
mikrofalowych spełniony jest wyłącznie dla temperatur helowych.**

[7] Zdzisław Jankiewicz „Optyczne pobudzanie mikrofalowych wzmacniaczy kwantowych” Rozprawa doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna (1968)

Wyniki rozwiązywania równań obsadzeń w stanie niestacjonarnym



Stan stacjonarny:

Inwersja obsadzeń
tylko dla temp. **4,2K**

Pobudzenia imp.:

1. Inwersja możliwa
dla czasów $t < \tau_s$;
2. Dla $f_s < 10^{11}\text{ Hz}$
przewaga temp. **77K**

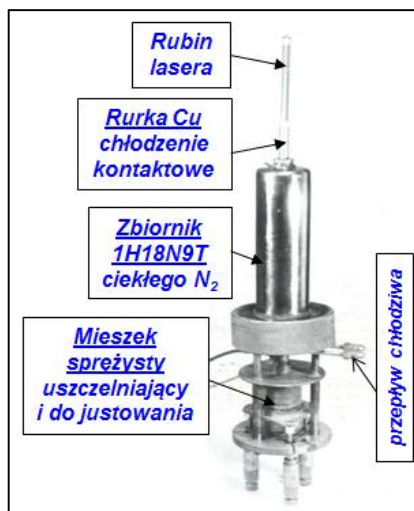
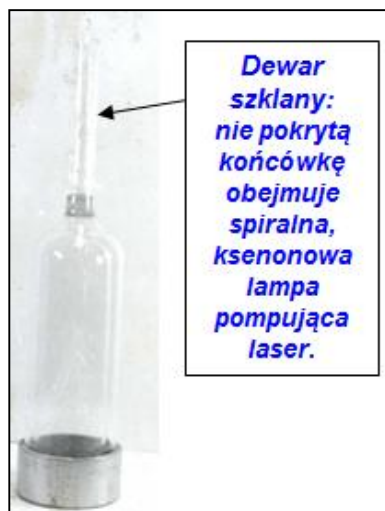
Maser pompowany optycznie - realizacja

Specyfika pompowania optycznego

1. **Kryształy lasera i masera powinny mieć tą samą temperaturę (np. 77K).**
2. **Cały kryształ masera powinien być oświetlony polem pompy.**
3. **Należy uwzględnić anizotropię wypełnienia rezonatora mikrofalowego**
4. **Dobór punktu pracy masera (ν_s , H) musi uwzględniać brak możliwości regulacji ν_p (dobierana wyłącznie temp. kryształu lasera).**
5. **Stosunkowo wąskie linie przejść mikrofalowych i optycznego wymagają stabilizacji punktu pracy masera.**

Laser pompujący – zarys konstrukcji

Założenie: maser i laser w temperaturze ciekłego azotu – **77K**



Główne elementy lasera:

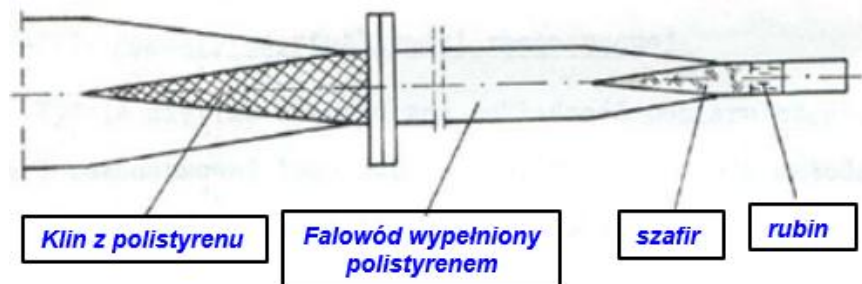
- 1.** Dewar szklany z przezierną końcówką umieszczaną w spiralnej ksenonowej lampie pompującej.
- 2.** Kontaktowo chłodzony azotem ze zbiornika z niemagnetycznej stali 1H18N9T pręt rubinowy mieści się w przeziernej części dewara szklanego.
- 3.** Przestrzeń rezonatora chroniona przed dopływem powietrza i wilgoci z atmosfery (mieszek stalowy).

Podzespoły wykonane w kraju lub z elementów dostępnych w kraju:

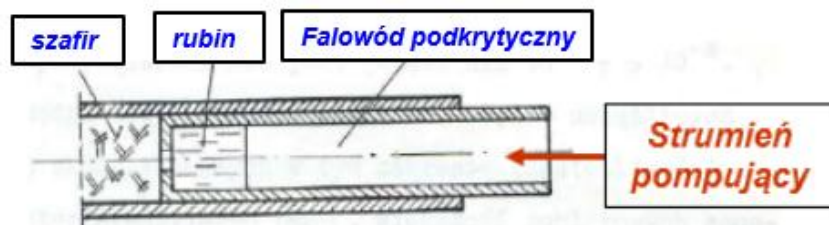
- 1.** Pręt laserowy wykonany w Hucie Aluminium w Skawinie (inż. Czesław Janusz);
- 2.** Szlifowanie i polerowanie rubinów – WAT (płk. mgr inż. Alfred Tulibacki);
- 3.** Zbiornik na ciekły azot ze stali 1H18N9T wykonany metodą wyciskania i wyoblania opracowaną w Milanówku (zakłady igieł chirurgicznych);
- 4.** System automatycznego zalewania ciekłym azotem - z użyciem elementów instalacji hydraulicznej samolotów odrzutowych (płk. mgr inż. Janusz Czaplicki)

Rezonator i tor falowodowy masera pompowanego optycznie [8,9]

Falowodowe elementy dopasowujące



Rezonator zamknięty odcinkiem podkrytycznym



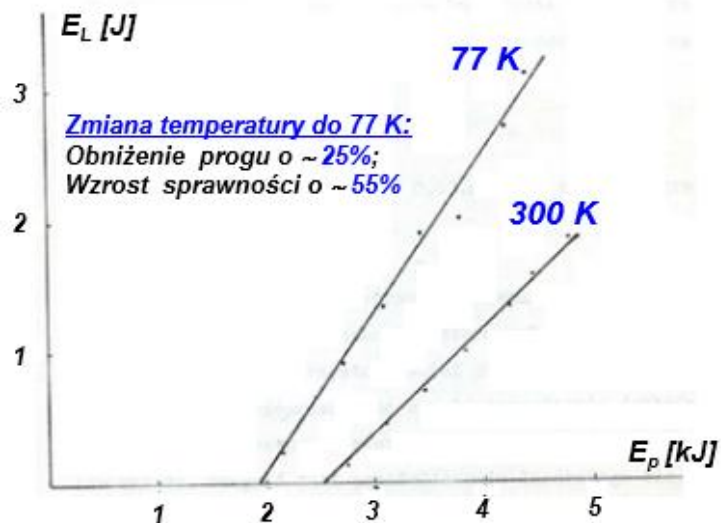
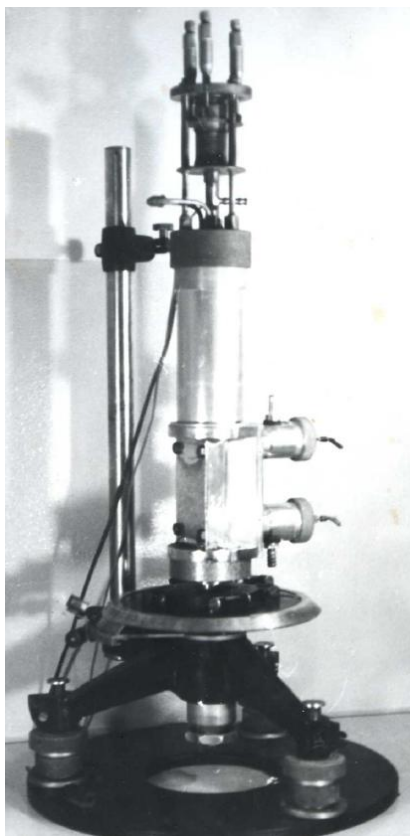
Elementy toru mikrofalowego wykonane we własnym zakresie metodą chemicznego strącania srebra na dielektryk i pogrubienia warstwy elektrolitycznie srebrem i miedzią.

Wykonawstwo mechaniczne i operacje chemiczne w warsztacie mechanicznym i nieetatowej pracowni chemicznej przy Katedrze Radiotechniki WE, a następnie Instytucie Elektroniki Kwantowej WE WAT.

[8] Z. Jankiewicz „Rezonator częściowo wypełniony rubinem do masera pobudzanego optycznie” Biuletyn WAT, vol. XV, nr 4 (164), 1966.

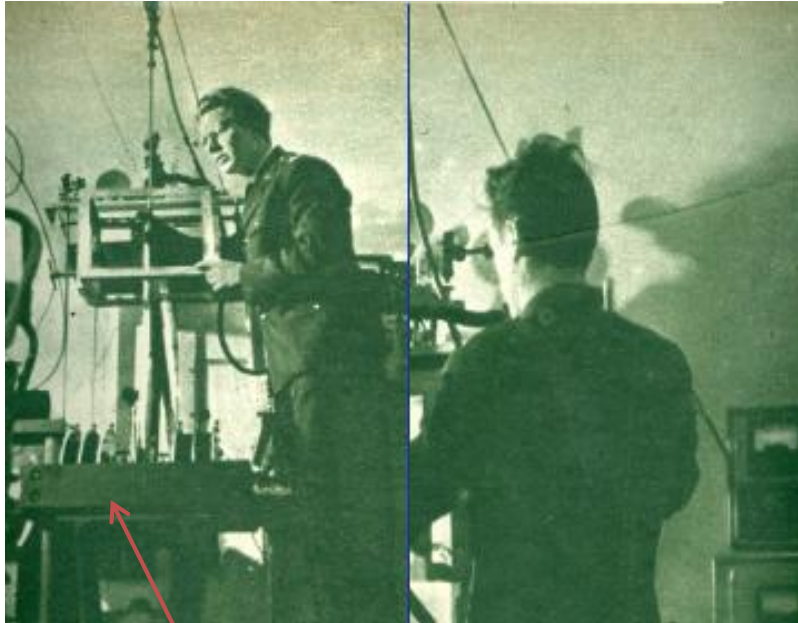
[9] Z. Jankiewicz, Z. Trzęsowski „Rodzaje anizotropowe w rezonatorach cylindrycznych o przekroju prostokątnym i kołowym” Cz. I „Częstotliwości i rozkłady pól niższych rodzajów anizotropowych”; Cz. II „Przestrzeń problemu i elementy sprzęgające” Biuletyn WAT vol. XX, nr 5 (225), (1971)

Laser rubinowy przystosowany do pracy w temp. 77 K



**Charakterystyki energetyczne
lasera rubinowego w 300K i 77K**

Maser pompowany optycznie - realizacja



Elektromagnes $\Phi = 120$ mm

Pracownia MASERÓW

W latach 1962 -1968 powstały w niej dwa demonstratory: **lasera** rubinowego i rubinowego **masera**, przystosowanego do pobudzania optycznego.

Urządzenia działały w temperaturze ciekłego azotu (**77 K**) i posłużyły do udowodnienia tezy pracy doktorskiej, że w takim maserze, przy impulsowym pobudzaniu, można uzyskać inwersję obsadzeń.

Dyskusja: - ocena przydatności maserów

Ogólna ocena: przydatności maserów jest mierna, faktycznie poza generacją częstotliwości wzorcowych, nie są obecnie nigdzie używane.

Cechy maserów, które traktować należy jako wady:

1. Praca w kriogenicznych temperaturach, w zasadzie **ciepłego helu (4,2 K)** nie tylko z **powodu inwersji obsadzeń**, lecz także **przejść fononowych**.
2. Niska wartość **inwersji obsadzeń**, zaledwie **kilka %** nawet w **ciepłym helu**.
3. Stosowanie **stałego pola magnetycznego (kGs)**- **sprawność, gabaryty, waga**.
4. Ograniczenie wartości częstotliwości sygnału: $\nu_s < \frac{1}{2} \nu_p$ - **sprawność**
5. **Pompa monochromatyczna** – by zbudować generator trzeba już go mieć.
6. **Wysoki koszt budowy i eksploatacji** – próby użycia w **astrofizyce**.

Mimo, że porównania dokonano bazując na cechach masera rubinowego, ma ono charakter ogólny.

Wiadomość z ostatniej chwili



*Powstał pierwszy maser działający w temperaturze pokojowej
17 sierpnia 2012, | [Technologia](#) [10]*

Naukowcy z NPL – National Physical Laboratory – Wielk. Bryt. w sierpniu 2012 donieśli o uruchomieniu pierwszego w historii nauki masera ciała stałego w temperaturze otoczenia (300 K). W Maserze wykorzystano kryształ organiczny p-terfenyl wzbogacony pentacenem. Jako pompę zastosowano promieniowanie przestrajanego lasera barwnikowego.

[10] M. Oxborrow et al., „Room-temperature solid-state maser”, *Nature* vol. 488, p. 353 (2012)

Dziękuję za przeczytanie