

A. Chachulski, K. Drogoń
WŁASNOŚCI REZONANSOWE
W PRZYPADKU POBUDZANIA
MONOENERGETYCZNEJ WIĄZKI
WOLNYCH ATOMÓW PRZY ZASTOSOWANIU
METODY N.F. RAMSEY'A

6/1995

P.269



WARSZAWA 1995

<http://rcin.org.pl>

ISSN 0208-5658

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 4 stycznia 1995 r.



56603



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Nakład 100 egz. Ark. wyd. 0,75 Ark. druk. 1,0
Oddano do drukarni w lutym 1995 r.

Wydawnictwo Spółdzielcze sp. z o.o.
Warszawa, ul. Jasna 1

<http://rcin.org.pl>

Andrzej Chachulski
Krystyna Drogoń
Pracownia Atomowych
Wzorców Częstotliwości

WŁASNOŚCI REZONANSOWE W PRZYPADKU POBUDZANIA
MONOENERGETYCZNEJ WIĄZKI WOLNYCH ATOMÓW PRZY ZASTOSOWANIU
METODY N.F. RAMSEYA

Streszczenie

Praca niniejsza przedstawia analizę własności rezonansowych układu z wiązką atomów cezu w funkcji zmniejszania, w relacji do warunków naturalnych, prędkości poruszania się atomów i zawężania pasma rozkładu tej prędkości.

W szczególności rozważono dla powyższych przypadków wpływ amplitudy i różnicy faz na prawdopodobieństwo zmiany stanu kwantowego.

1. Wstęp.

W metrologii częstotliwości i czasu opartej na wykorzystaniu zjawisk kwantowych dąży się do minimalizacji szerokości wykorzystywanych krzywych spektralnych. [1],[4]

W układach z wiązkami molekularnymi taka minimalizacja może być uzyskiwana poprzez zwiększanie wymiarów aparatury (w krańcowych przypadkach budowano aparaty o długości kilku metrów) lub poprzez zmniejszanie prędkości poruszania się molekuł.

W warunkach naturalnych prędkości poruszania się cząsteczek określone są temperaturą gazu oraz charakteryzują się semi-maxwellowskim rozkładem prawdopodobieństwa ich występowania. [3]

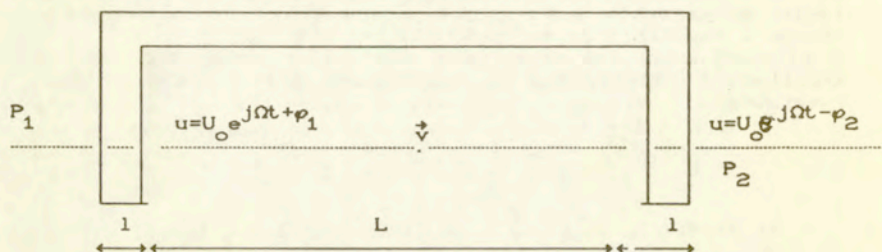
Uzyskiwanie mniejszych (w stosunku do naturalnych) prędkości poruszania się wymaga stosowania skomplikowanych technik wytwarzania wiązki. [2]

Przy stosowaniu schładzania wiązki spójnym promieniowaniem

uzyskuje się temperatury wiązki rzędu kilku stopni Kelwina. Praca niniejsza przedstawia analizę własności rezonansowych układu z wiązką atomów cezu w funkcji zmniejszania, w relacji do warunków naturalnych, prędkości poruszania się atomów i zawężania pasma rozkładu tej prędkości. W szczególności rozważono dla powyższych przypadków wpływ amplitudy i różnicy faz na prawdopodobieństwo zmiany stanu kwantowego.

2. Opis własności rezonansowych przy wykorzystaniu metody N.F. Ramsey'a dla semimakswellowskiego rozkładu prędkości poruszania się atomów.

Zasadę dwukrotnego pobudzenia wiązki molekularnej obrazuje schemat przedstawiony na Ryc Nr 1.



Ryc. Nr 1 . Metoda N.F Ramseya pobudzania wiązki molekularnej.

Prawdopodobieństwo zmiany stanu kwantowego, dla powyższej metody [3] dla cząsteczki poruszającej się z prędkością v wyraża się następującą zależnością :

$$P_{z1 \text{ atom}} = 4 \sin^2 \theta \sin^2(0.5 \pi \tau) [\cos(0.5 \lambda T) \cos(0.5 \pi \tau) + \cos \theta \sin(0.5 \lambda T) \sin(0.5 \pi \tau)]^2 \quad / 1 /$$

gdzie :

$\tau = l/v$ - czas oddziaływania sygnału pobudzającego w obszarach pobudzenia o długości l

$T = L/v$ - czas przelotu między dwoma obszarami pobudzenia odległymi od siebie o dystans L

b - współczynnik amplitudowy proporcjonalny do natę-

żenia pola pobudzającego

$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ - kąt przesunięcia fazowego pomiędzy sygnałami w obu obszarach pobudzania

Ω - częstotliwość sygnału pobudzającego

Ω_0 - częstotliwość rezonansowa linii

$$\lambda = \Omega - \Omega_0$$

$$\cos \theta = (\Omega - \Omega_0) / a$$

$$\sin \theta = -2b/a$$

$$a = \sqrt{(\Omega - \Omega_0)^2 + (2b)^2}$$

Dla zbioru cząsteczek charakteryzującego się rozkładem gęstości prawdopodobieństwa poruszania się z prędkością v wyrażoną funkcją $p(v)$, gdzie rozkład ten jest ograniczony do przedziału $v_d + v_g$ prawdopodobieństwo zmiany stanu kwantowego wyraża się następującą zależnością :

$$P_{z1 \text{ zbior}} = \int_{v_d}^{v_g} p(v) P_{z1 \text{ atom}} dv \quad / 2 /$$

W warunkach naturalnych zbiór cząstek w wiązce powstałej na skutek efuzji pary nasyconej z otworu zbiornika charakteryzuje się semimakswellowskim rozkładem prędkości, danym

$$\text{przez: } p(v) = k \frac{v^3}{\alpha^4} \exp(-v^2 / \alpha^2) \quad / 3 /$$

gdzie :

α - prędkość najbardziej prawdopodobna

$$\alpha = \sqrt{2kT / m}$$

k - stała Boltzmana

m - masa cząsteczki

T - temperatura gazu

Na prawdopodobieństwo zmiany stanu kwantowego mają wpływ następujące parametry sygnału pobudzającego : częstotliwość Ω , amplituda - b i różnica faz - φ .

Z punktu widzenia wykorzystywania danej linii rezonansowej dla celów metrologii częstotliwości ważnymi parametrami są pochodne prawdopodobieństwa zmian stanu kwantowego względem częstotliwości, fazy i amplitudy sygnału pobudzającego. Wartość pochodnej względem częstotliwości jest określona warun-

kiem nieoznaczoności Heisenberga.

Warunek ten wyznacza relację między prędkościami poruszania się cząsteczek (czasem oddziaływania) a zakresem nieoznaczoności częstotliwości.

Jest interesujące jak zachowują się pozostałe pochodne w zależności od prędkości średnich i pasma rozkładu prędkości.

3. Wpływ zmniejszania prędkości i pasma rozkładu prędkości na własności rezonansowe.

Ważne z punktu widzenia technicznego są informacje odnośnie pochodnych prawdopodobieństwa zmiany stanu kwantowego względem amplitudy i różnicy faz sygnału pobudzającego i ich zależności od średnich prędkości i pasma rozkładu prędkości.

Analizy tych parametrów dokonano na drodze obliczeń liczbowych na przykładzie spektrometru z wiązką atomów cezu Cs^{133} . W spektrometrze tym wykorzystywane jest zjawisko rezonansu magnetycznego związanego z przejściami $F 3.0 \rightarrow F 4.0$.

3.1. Zależność prawdopodobieństwa zmian stanu kwantowego od amplitudy sygnału pobudzającego.

Pochodna prawdopodobieństwa zmiany stanu kwantowego względem amplitudy sygnału pobudzającego dla atomu poruszającego się z prędkością v wyraża się następującą zależnością :

$$\frac{d P_{12}}{d b} = \frac{32 b \lambda}{a^3} \left\{ \left[\frac{\sin^2(0.5a\tau) (\lambda Q)^2}{a} + b^2 \tau \sin a\tau \right] Q^2 + \right.$$

$$\left. \left[-4b^2 \sin^3 0.5a\tau \cos 0.5a\tau + \frac{4b\tau}{a} \sin 0.5a\tau \sin 0.5a\tau + \right. \right.$$

$$- \frac{4\lambda^2 b}{a} \sin 0.5\lambda T \cos 0.5a\tau \left. \vphantom{\frac{4\lambda^2 b}{a}} \right\} Q \quad / 4 /$$

gdzie za Q przyjęto wartość :

$$Q = \cos 0.5\lambda T \cos 0.5a\tau - \sin \theta \sin 0.5\lambda T \sin 0.5a\tau$$

Dla wiązki atomowej charakteryzującej się rozkładem $p(v)$ ograniczonym do przedziału $v_d + v_g$ zależność powyższa przyjmuje postać :

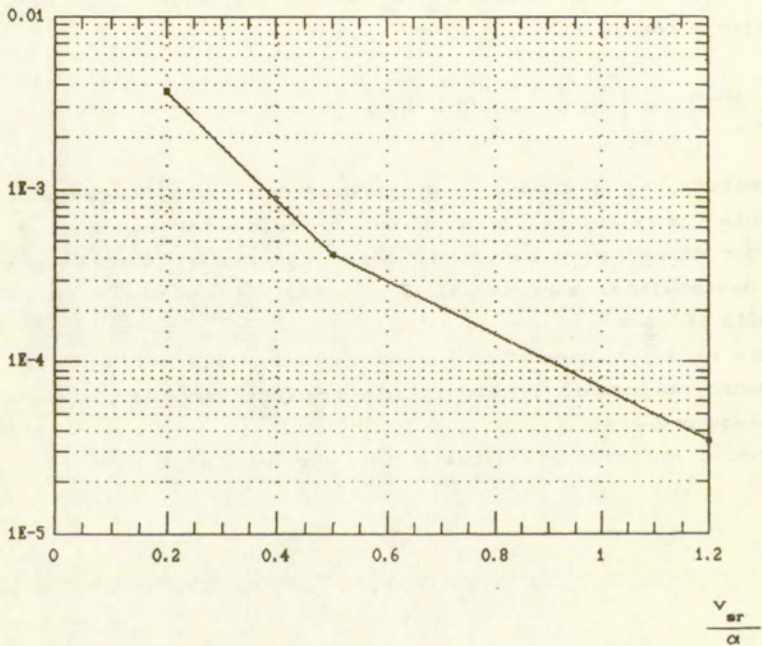
$$\frac{d P_{\text{zsbior}}}{d b} = \int_{v_g}^{v_d} p(v) \frac{d P_{21}}{d b} dv \quad / 5 /$$

Obliczenia pochodnej przeprowadzono dla prędkości średniej przyjmującej w stosunku do prędkości najbardziej prawdopodobnej pary nasyconej cezu, określonej temperaturą T , następującą wartość : $T = 373 \text{ }^\circ\text{K}$ wtedy $\alpha = 2,26913 \cdot 10^4 \text{ cm/s}$.

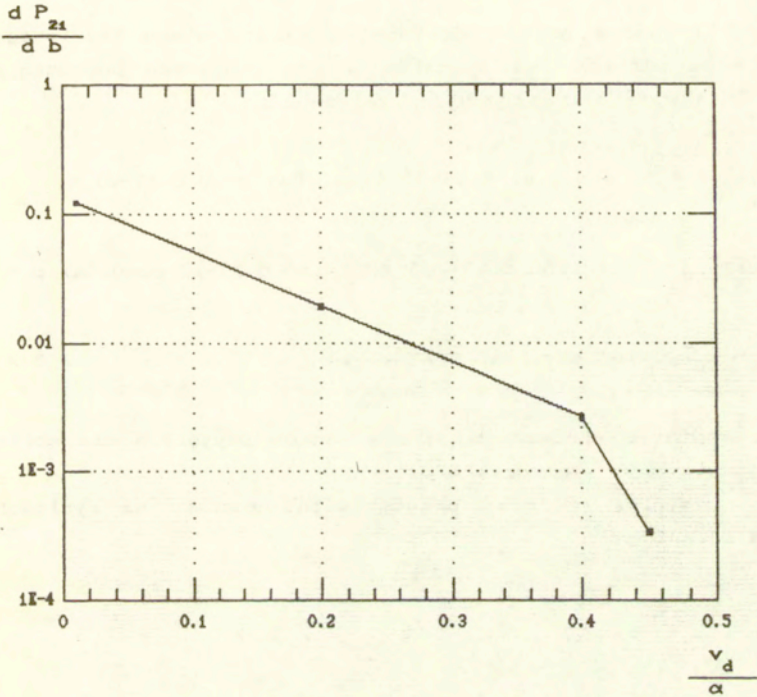
Dla każdej z powyższych wartości prędkości średniej przeprowadzono obliczenia pochodnej dla różnych szerokości pasma rozkładu prędkości.

Wyniki obliczeń przedstawiono na rycinach Nr.2 i Nr.3.

$$\frac{dP_{z1}}{db}$$



Ryc Nr2. Zależność pochodnej $\frac{dP_{z1}}{db}$ od wartości średniej v_{sr} (wyrażonej jako wielokrotność α) prędkości poruszania się atomów cezu.



Ryc. Nr 3. Zależność pochodnej $\frac{dP_{z1}}{db}$ od pasma rozkładu prędkości poruszania się atomów cezu $v_d - v_g$ (0,01+1 ; 0,2+0,8 ; 0,4+0,6 ; 0,45+0,55) α .

Przedstawione wyniki wskazują, że zmniejszanie prędkości średniej jak i zawężanie pasma rozkładu prędkości prowadzi do zwiększenia wartości analizowanej pochodnej. W sensie technicznym wyraża się to zwiększaniem czułości układu na zmiany amplitudy sygnału pobudzającego.

3.2. Zależność prawdopodobieństwa zmiany stanu kwantowego od różnicy faz.

Pochodna prawdopodobieństwa zmiany stanu kwantowego względem różnicy faz sygnałów w obu obszarach pobudzenia wiązki wyraża się następującą zależnością :

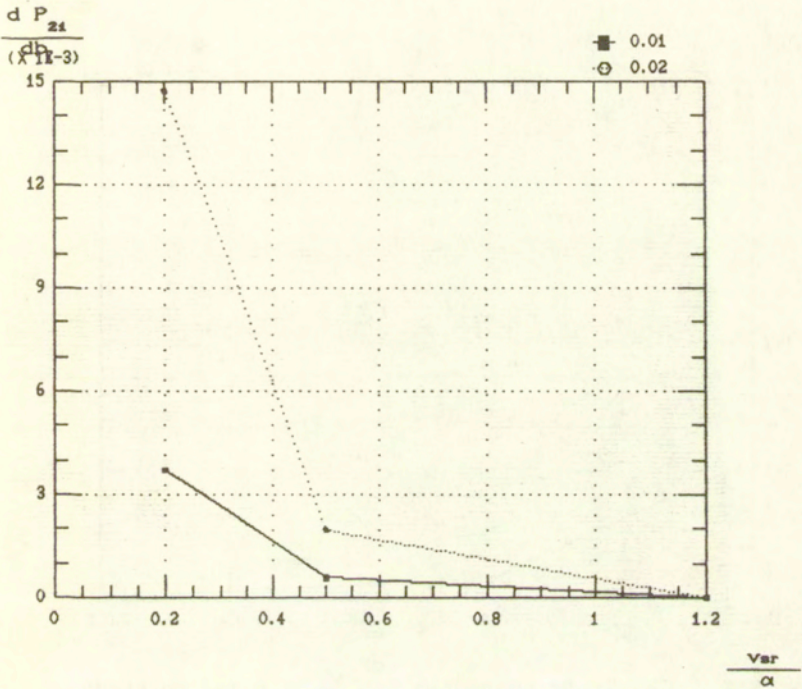
$$\frac{d P_{21}}{d \varphi} = 8 [\sin \theta \sin 0.5 a \tau]^2 [\cos 0.5 a \tau \cos 0.5(\lambda T - \varphi) +$$

$$- \cos \theta \sin 0.5 a \tau \sin 0.5(\lambda T - \varphi)] (0.5 \sin 0.5(\lambda T - \varphi) \cos 0.5 a \tau \varphi +$$

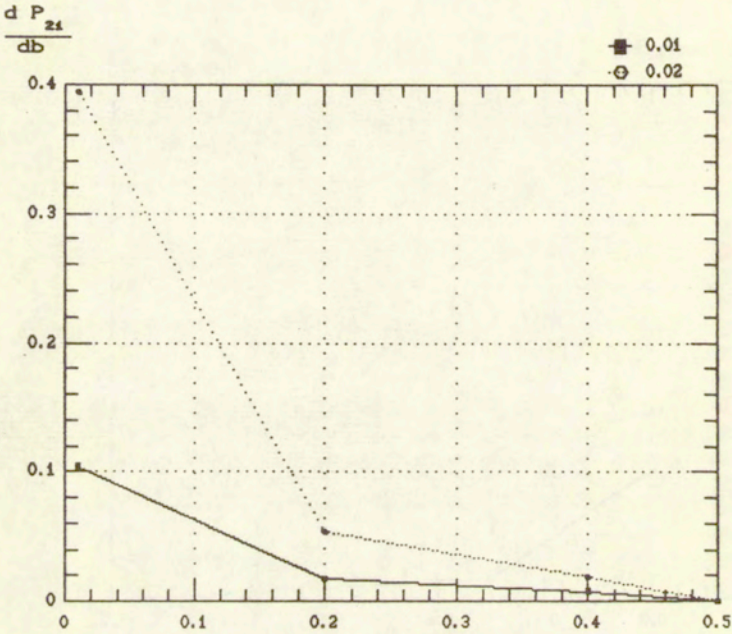
$$+ 0.5 \sin \theta \sin 0.5 a \tau \cos 0.5(\lambda T - \varphi) \varphi) \quad / 6 /$$

Obliczenia przeprowadzono dla warunków przyjętych dla obliczeń cytowanych w rozdziale 3.1.

Wyniki obliczeń przedstawione zostały na rycinach Nr 4 i Nr 5.



Ryc Nr 4. Zależność pochodnej $\frac{dP_{21}}{d\varphi}$ od wartości średniej v_{sr} (wyrażonej jako wielokrotność α) prędkości poruszania się atomów cezu dla wartości kąta przesunięcia fazowego podanych w legendzie.



Ryc Nr5 . Zależność pochodnej $\frac{dP_{21}}{db}$ od pasma rozkładu prędkości poruszania się atomów cezu $v_d - v_g$ (0,01+1 ; 0,2+0,8 ; 0,4+0,6 ; 0,45+0,55) α czyli $v_{sr} = 0,5 \alpha$ dla dwu wartości różnicy faz φ podanej w legendzie.

4. Wnioski.

Przedstawione wyniki wskazują jak parametr zawężania szerokości krzywej rezonansowej wpływa na wymogi jakim muszą podlegać amplituda i różnica faz sygnału pobudzającego układ atomów do rezonansu.

Wymogi te w odniesieniu do odchyłek od wartości nominalnej o charakterze niedeterministycznym mogą stać się trudnymi do zrealizowania od strony technicznej.

Wymagania w odniesieniu do stałości amplitudy jak i fazy wraz ze zmniejszaniem prędkości poruszania się molekuł, stają się coraz bardziej ostre i w krańcowym przypadku bardzo trudne do zrealizowania od strony technicznej.

Literatura

- [1] AUDOIN C. "Caesium Beam Frequency Standards : Classical and Optically Pumped", Metrologia 1992, 29, 113-134
- [2] Nakagiri K., Shibuki M., Okazawa H., Aida M., Kotake N. "Work on Primary Cesium Beam Frequency Standard at CRL" Proceedins of 4 Symposium Frequency Standards and Metrology, Ancona 1988
- [3] RAMSEY N.F. "Molecular beams" Oxford Clarendon Press 1956
- [4] VIG J.R. "Military Applications of High Accuracy Frequency Standards and Clocks", IEEE Trans.on Ultr., Ferr. and Freq. Cont., 1993, vol.40, 522-527