

1. はじめに

GPSや測距等に用いられる高精度マイクロ波発振器としてルビジウム (Rb) 原子発振器が従来より実用に供されている。しかし、上記の応用システムの性能の一層の向上のために、原子発振器の精度向上が強く要望されている。筆者らは原子発振器の性能向上を目的として、半導体レーザーを励起光源として用いたレーザー励起ルビジウム原子発振器の研究開発を行ってきた。この半導体レーザー励起ルビジウム原子発振器では従来のルビジウム原子発振器 (ランプ励起) に比べて周波数精度が優れている等多くの利点に加え、非常に狭い線幅を持った光・マイクロ波二重共鳴スペクトルを得ることができる。これは光・マイクロ波二重共鳴によって、共鳴セルを通過するレーザー光に位相変調が加えられるためである。ここでは光・マイクロ波二重共鳴によるレーザー光の位相変調の効果と、それに対するシミュレーションの結果を御報告する。

2. 光・マイクロ波二重共鳴スペクトルの観測

図1 (a) は半導体レーザー励起ルビジウム原子発振器で観測された光・マイクロ波二重共鳴スペクトル (同期検波出力) の例である。図1 (a) は従来のスペクトルとは全く異なっており、マイクロ波周波数の変調指数、変調周波数、および光検出器からの信号と同期検波のための参照信号との位相角が変わると、他の実験条件 (セル温度、レーザーパワー等) は同一でも著しくその形状が変化する。

この効果で注目すべき所は、図1 (a) の光・マイクロ波二重共鳴スペクトルの線幅 (図中のA-B間) が非常に狭いことである。図1 (a) の場合には線幅はわずか7.5 Hzしかない。(ちなみに、従来型で得られた線幅は300~400 Hz程度) またマイクロ波共鳴周波数を横切る直線も急峻な傾きを持っており、しかもその傾きがマイクロ波周波数の変調指数、変調周波数、および光検出器からの信号と同期検波のための参照信号との位相角等のパラメータによって依存することである。ここで、マイクロ波共鳴周波数を横切る直線の傾きの大きさを光・マイクロ波二重共鳴スペクトルの周波数弁別感度と定義する。原

子発振器の周波数安定度は、周波数弁別感度に反比例するから、周波数弁別感度が大きい方が周波数安定度は良くなる。従って、もしパラメータを最適にすることができるなら、いままでにない高い周波数安定度を持ったレーザー励起ルビジウム原子発振器を実現できる可能性がある。

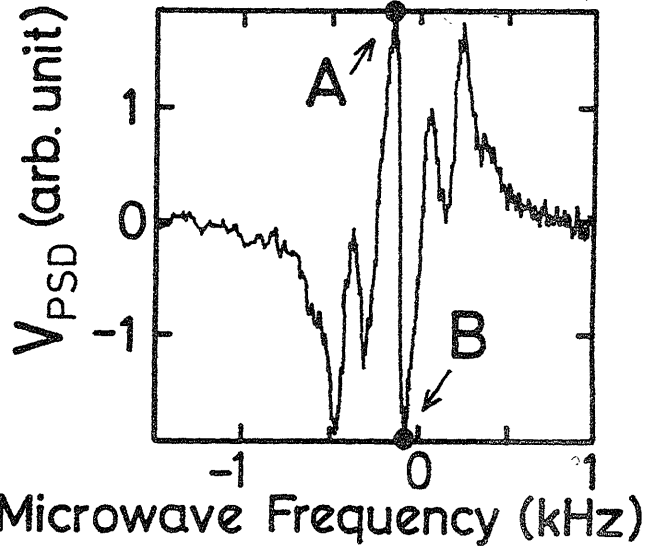


図1 (a) 実測例

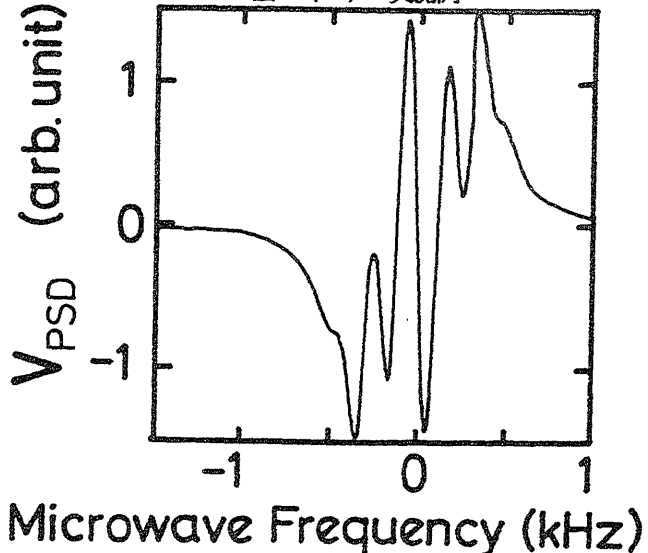


図1 (b) シミュレーション結果

### 3. シミュレーション

光・マイクロ波二重共鳴によるレーザー光に対する位相変調の効果はFMレーザー分光<sup>[1]</sup>と同様の手法で求められる。

すなわち、位相変調によって生じたサイドバンドとキャリアとのヘテロダイン出力を計算すればよい。光・マイクロ波二重共鳴によるレーザー電場 $E_L$ の振幅減衰量を $\delta$ 、位相シフト量を $\phi$ 、変調角周波数を $\omega_m$ とすれば、光検出器出力 $I_T(t)$ は

$$I_T(t) = I_0 [A + B \cdot \cos \omega_m t + C \cdot \sin \omega_m t] \quad (1)$$

となる。ただし

$$I_0 = c |E_L|^2 / 8\pi \quad (2)$$

$$A = J_3^2(1 - 2\delta_{-3}) + J_2^2(1 - 2\delta_{-2}) + J_1^2(1 - 2\delta_{-1}) + J_0^2(1 - 2\delta_0) + J_1^2(1 - 2\delta_1) + J_2^2(1 - 2\delta_2) + J_3^2(1 - 2\delta_3) \quad (3a)$$

$$B = 2[J_2 J_3(\delta_{-3} + \delta_{-2} - \delta_2 - \delta_3) + J_1 J_2(\delta_{-2} + \delta_{-1} - \delta_1 - \delta_2) + J_0 J_1(\delta_{-1} - \delta_1)] \quad (3b)$$

$$C = 2[J_2 J_3(\phi_{-3} - \phi_{-2} - \phi_2 + \phi_3) + J_1 J_2(\phi_{-2} - \phi_{-1} - \phi_1 + \phi_2) + J_0 J_1(\phi_{-1} - 2\phi_0 + \phi_1)] \quad (3c)$$

ここで $\delta_q$ 、 $\phi_q$ はマイクロ波角周波数 $\omega_m + q\omega_m$  ( $q=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$ )における $\delta$ 、 $\phi$ の値を示す。

同期検波のための参照信号が $\cos(\omega_m t - \theta)$ であるとする。と、(1)式の $I_T(t)$ を同期検波した後の出力 $V_{ps0}$ はそれぞれ(4)式ようになる。

$$V_{ps0} = V_0 [ (B/2) \cos \theta + (C/2) \sin \theta ] \quad (4)$$

このように $V_{ps0}$ はBとCの重ね合わせとなり、位相 $\theta$ を適当に調節することにより、さまざまな形状のスペクトルを周波数弁別曲線として使用することができる。図2

A~C成分のマイクロ波周波数依存性を図2に示す。図2におけるA成分、B成分、およびC成分はそれぞれパワー減衰率、振幅減衰率の1次微分、位相シフトの2次微分に対応する。

さらにシミュレーションによって図1(a)の光・マイクロ波二重共鳴スペクトルに対応する曲線を図1(b)のように求めた。図1の(a)と(b)が良く一致することから理論の正当性が確かめられた。

### 4. おわりに

レーザー励起ルビジウム原子発振器における位相変調の効果を明らかにした。この効果を使うことにより周波数安定度をさらに改善することが可能である。

【参考文献】

[1] G. C. Bjorklund; Optics Letters, Vol. 5, No. 1, January, 1

980

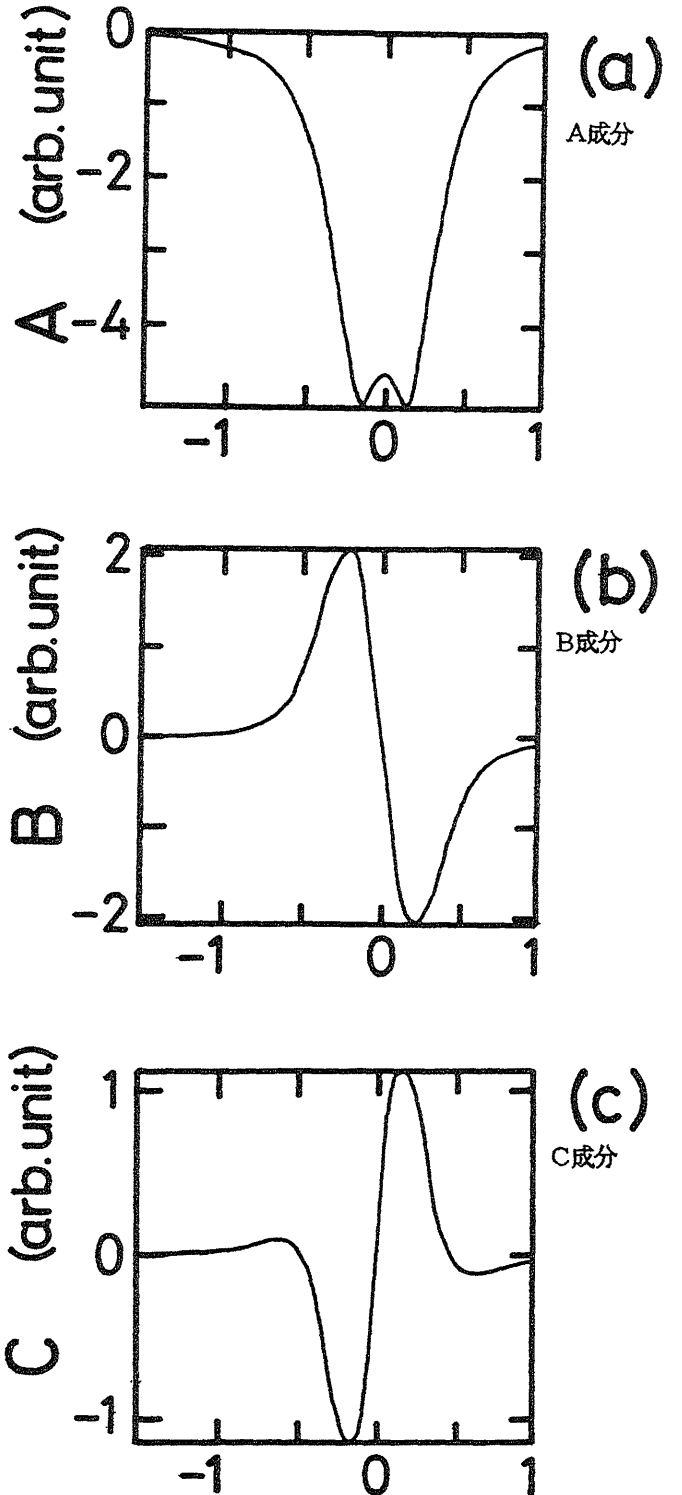


Figure 2: Dependence of A, B, and C components on Microwave Frequency (kHz).

図2