

SYNOPSIS: Laser-pumped Rb-beam atomic clock is proposed to improve the accuracy of its microwave frequency in order to realize a novel primary standard of frequency. As the first step, laser spectroscopy of Rb atomic beam was carried out, and Doppler-free spectral lines were observed. The effect of optical pumping to produce the population inversions of hyperfine levels in the ground state were examined to get a high quality of sensitive frequency discriminator for microwave frequency stabilization.

1. はじめに

ルビジウム (Rb) 原子発振器 (6.8GHz) は光励起を用いた実用的な二次周波数標準器であり、マイクロ波通信、GPS など広範な分野において利用されている。我々はこれまで、Rb 原子発振器の励起光源を半導体レーザーとすることにより、高感度なマイクロ波周波数弁別信号が得られること [1, 2]、さらに光シフトの測定が容易になり、マイクロ波周波数のドリフトを補正できることを明らかにしてきた [3, 4]。つまり、小型可搬である利点を失わずにより高精度な周波数標準器が実現できた。

最後に残された問題としては、「周波数精度の向上」がある。即ち、新しい一次周波数標準器を実現するためには、ガスセルに封入されているバッファガスとの衝突による周波数シフトを除去する必要がある。この目的のために、本研究では光マイクロ波二重共鳴を用いたまま、ガスセルを原子ビームに替えた方式 (Fig. 1 参照) を提案する。

そこで、その予備実験として Rb 原子ビームのレーザー分光を行ったので、その結果について報告する。まず使用する原子ビームが、バッファガスを用いたガスセル型で得られる信号線幅に比して同程度のものを提供し得るかを確認した (第2節)。次に高効率な光励起が可能か否かを確認した (第3節)。

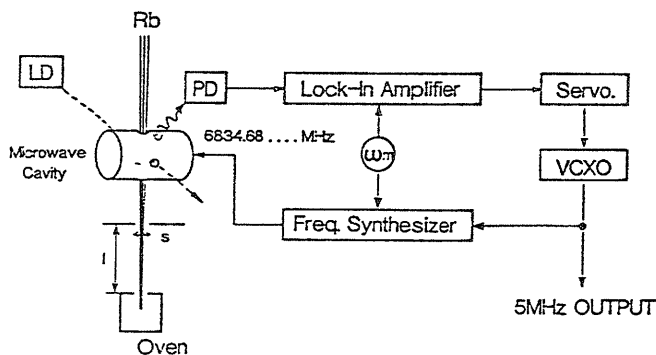


Fig.1 Block diagram of a laser-pumped Rb-beam atomic clock.

2. Rb 原子ビームの生成とそのレーザー分光

Fig. 2 (a) に観測される蛍光スペクトル例を示す。図中 F 、 F' は Rb 原子のエネルギー準位の全角運動量を表す量子数 (Fig. 3) に対応する。ルビジウム 87 (^{87}Rb) では 7 本の超微細遷移を表す蛍光スペクトルが分解観測できた。そのうち ^{87}Rb の基底状態の超微細準位 $F=2$ からの遷移に関するものを扱う。Fig. 2 (b) には文献 [5, 6] より算出される各遷移のスペクトルを示す。スペクトル線幅 70 MHz ((a) でのスペクトル線幅) のローレ

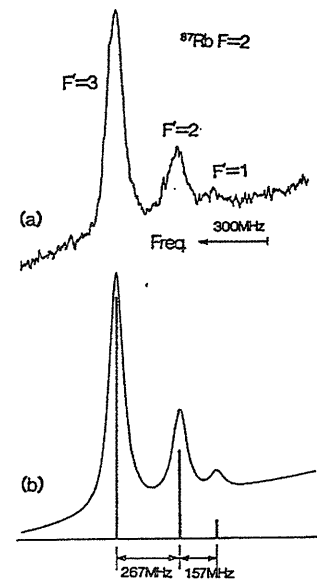


Fig.2 Fluorescent spectral lines of Rb atomic beam. These are lines corresponding to the transitions from $F=2$ of the ground state. (a) Experimental results. The oven temperature was 443K, Rb thermal beam was collimated by two pin-holes. Their diameters were 2.5 and 2 mm, respectively, and their separation was 96 mm. The incident laser power was 10 μW . (b) Calculated results, based on the theory of Refs.5 and 6.

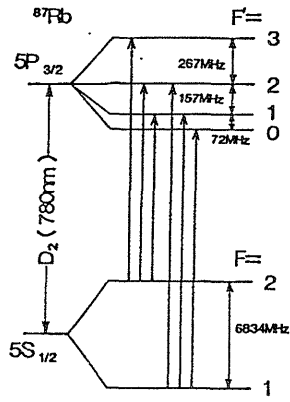


Fig.3 Energy levels of a ^{87}Rb atom.

ンツ曲線で近似し、半導体レーザーの注入電流変化による強度差及び背景光を考慮して求めた。Fig. 2 (a) と (b) とは、周波数・強度ともによく一致している。ここで半導体レーザーのスペクトル線幅 (40 MHz) を考慮し、ルビジウム間の衝突が無視できるとすると、原子ビームの広がり角はドブラー幅より約5度と見積れる。この値を基にマイクロ波でのドブラー幅を見積ると約530 Hz となり、良好な原子ビームが発生していることがわかる。

3. 光励起の確認

レーザー光励起により、基底状態の超微細準位間の原子密度分布が変化する様子を確認した。2台独立に用意したレーザーの一方をポンプ光、他方をプローブ光とする。この時2本のレーザー光軸は原子ビームに対し垂直な同じ軸上にとった。ポンプ光の周波数は任意の遷移周波数に固定し、プローブ光の周波数を掃引しながら、チョッパを用いてその蛍光スペクトルを同期検波した。Fig. 4 にその結果例を示す。ここでポンプ光を用いない場合 (a) と、基底状態 ($5S_{1/2}$) の $F=2$ から励起状態 ($5P_{3/2}$) の $F'=3$ への (サイクリック遷移—Fig. 3 参照、選択則により、この遷移により励起された原子は、放射後、もとの基底状態のエネルギー準位のみに移る。) 遷移に励起した場合 (b)、基底状態の $F=2$ から励起状態の $F'=2$ に励起した場合 (c) を比較すると、その様子がよくわかる。サイクリック遷移では、励起された $F'=3$ のスペクトル強度に大きな変化は見られない。遷移の選択則が確認できた。

4. まとめ

新しい一次周波数標準器を実現する目的のため、レーザー励起 Rb ビーム原子発振器を提案し、そのための基礎実験として Rb 原子ビームのレーザー分光実験を行った。その結果ルビジウム 87 (^{87}Rb) では7本の超微細遷移を表す蛍光スペクトルが分解観測できた。原子ビームの発散角は約5度と見積れ、良好な原子ビームを得ることができた。基底状態の超微細遷移間の原子密度分布変化を観測し、高感度な周波数弁別信号を得るのに必要な光励起が可能であることを確認した。

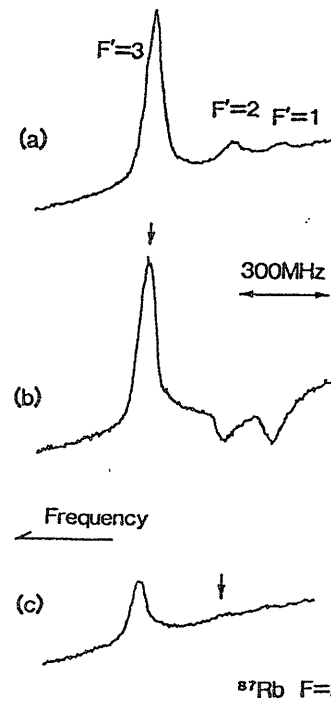


Fig.4 Results of optical pumping. The temperature of Rb oven was 433K. The incident laser power of pumping and probe lights were 0.2 mW and 75 μW , respectively. (a) The result without using the pumping light. (b) The frequency of pumping laser was tuned to the transition $5S_{1/2} F=2 \rightarrow 5P_{3/2} F'=3$ (cyclic transition), and (c) tuned to the transition $5S_{1/2} F=2 \rightarrow 5P_{3/2} F'=2$, respectively.

謝辞

御指導、ご討論頂いた、日本IBMの狩野覚博士、職業訓練大学校の寺町康昌教授に感謝致します。ご助言頂いた、通信総合研究所の標準測定部長、ならびに中桐紘治氏、梅津純氏他の皆様に感謝致します。また、実験上の便宜を計って頂いた、富士通の千葉一治氏、住吉秀夫氏、中島義文氏に感謝します。

[参考文献]

- [1] M. Hashimoto, and M. Ohtsu, IEEE J. Quantum Electron., QE-23, 446(1987)
- [2] M. Hashimoto, and M. Ohtsu, J. Opt. Soc. Am. B, Series 2, vol.6, to be published in Oct., 1989
- [3] 大津、橋本、鈴木, 「半導体レーザー励起 Rb 原子発振器の性能評価」, 応用物理学会講演会発表予定(1989)
- [4] M. Hashimoto, and M. Ohtsu, submitted to IEEE Trans. Instrum. Meas.
- [5] A. R. Edmonds, Angular Momentum in Quantum Mechanics, Rev. Ed. (Princeton Univ. Press, Princeton, NJ, 1968)
- [6] E. Arimondo, M. Inguscio, and P. Violino, Rev. Mod. Phys., 49, 31(1977)