

[1] はじめに

人工衛星追尾、レーザー測距、VLBI (Very Long Baseline Interferometry) などの分野での周波数標準には、高精度かつ小型簡便なマイクロ波発振器としてルビジウム (Rb) 原子発振器が広く利用されている。しかし、上記の応用システムの性能の一層の向上には、この原子発振器の精度向上が不可欠である。そのための方法としてレーザーを励起光源として用いることが提案されているが¹⁾、現在までのところ国内外を通して殆ど未開発の状態と言って良い。しかし、最近ビデオディスク用の光源としての $0.78 \mu\text{m}$ 帯の半導体レーザー (LD) の性能が向上し、これを上記の励起光源として使用し得る可能性が高まってきた。この LD を励起光源として用いた Rb 原子発振器をレーザー励起型 Rb 原子発振器と呼び、従来のランプ励起型原子発振器と区別する。レーザー励起型 Rb 原子発振器は、LD の高コヒーレンス、高 S/N といった性質からランプ励起型に比し、短期安定度、寿命、周波数確度の点で、より優れた周波数標準器となる可能性がある。

今回、我々は、独自に開発してきたレーザー周波数安定化技術²⁾をもとにレーザー励起型 Rb 原子発振器の開発を目指し、(1) 励起光源 (LD) の高性能化として、Rb 原子の吸収線を用いた LD の周波数安定化を行ない、実際に、周波数安定化された LD でレーザー励起型 Rb 原子発振器を動作させることに成功した。さらに、(2) レーザー励起型 Rb 原子発振器の評価として、レーザーによるマイクロ波共鳴周波数のシフト量などの測定も行ない、得られたデータからレーザー励起型 Rb 原子発振器の短期安定度の推定を行なったので、それらの結果を御報告する。

[2] LD の周波数安定化

注入電流制御により LD の発振周波数を原子の吸収線 ($^{87}\text{Rb} - D_2$ 線) に安定化した。周波数基準として、線形吸収スペクトルおよび飽和吸収スペクトルを用い、周波数安定度を測定した。また LD のパワー安定度が、周波数安定化によってどのように変わるか調べた。

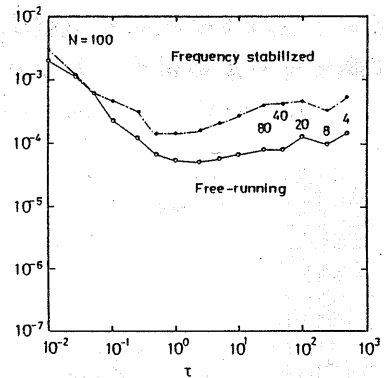
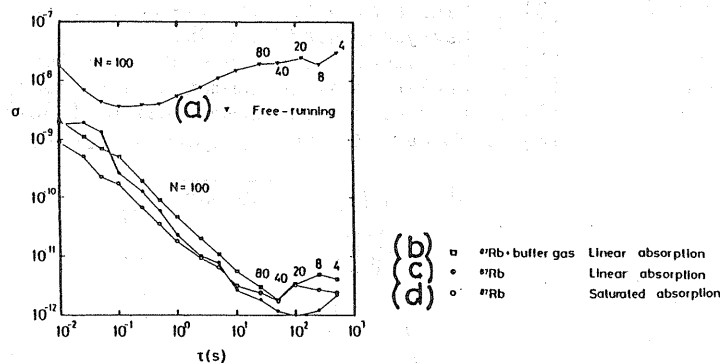


Fig. 1 LD の周波数変動のアラン分散の平方根 Fig. 2 LD のパワー変動のアラン分散の平方根

最初に、周波数変動のアラン分散の平方根 $\sigma_y(\tau)$ を Fig. 1 に示す。(a) はフリー・ランニング時、そして (b) はバッファガス ($A_r/N = 1.65$ 全圧力 43 Torr) 入りのセル、(c) はバッファガスなしのセルで得られる線形吸収スペクトルを用いた周波数安定化時の結果、(d) はバッファガスなしのセルで得られる飽和吸収スペクトルを用いた安定化時の結果である。ここで (c) と (d) を比較してみると、飽和吸収スペクトルを用いた周波数安定化の結果は線形吸収スペクトルを用いた周波数安定化の結果に比べて $\tau < 1 \text{ s}$ で向上していることがわかる。これは、飽和吸収スペクトルの幅が狭いため周波数感度が向上したためである。

また、実際に二重共鳴に使用するバッファガス入りの ^{87}Rb セルによる周波数安定化時のパワー変動のアラン分散の平方根とフリー・ランニング時のパワー変動のアラン分散の平方根を Fig. 2 のように測定した。その結果フリー・ランニング時のパワー安定度と比べ周波数安定化時のパワー安定度は、2~3 倍低下していることがわかった。

[3] レーザー励起型 Rb 原子発振器の基礎実験

Rb 原子発振器は光・マイクロ波二重共鳴をその原理とし、Rb 原子の基底状態の超微細準位間のマイクロ波

遷移(約6.8 GHz)を周波数基準に用いる。レーザー光は Rb原子を励起状態($5P_{3/2}$)にポンプし、基底状態($5S_{1/2}$)の2つの超微細準位間に原子数分布の差を生じさせる役割を持つ。このとき、ポンプ光(励起光)の性質によりマイクロ波共鳴周波数がシフトすることが知られている³⁾。従来のランプ励起型ではポンプ光のスペクトル形状が複雑であるため、この光シフトの定量的な評価は非常に困難であった。しかし、ポンプ光源にレーザーを用いるとレーザーのスペクトルが単純なデルタ関数と見なせることから、光シフトの評価が可能となる。また、既にLDの周波数安定度やパワー安定度が明らかになっているので、レーザー励起型Rb原子発振器の短期安定度として共鳴周波数自身の安定度を推定することができる。

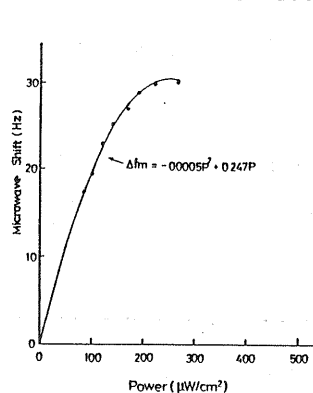


Fig. 3 マイクロ波共鳴周波数のレーザー・パワーによるシフト

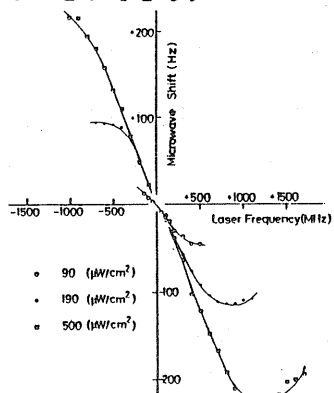


Fig. 4 マイクロ波共鳴周波数のレーザー周波数によるシフト

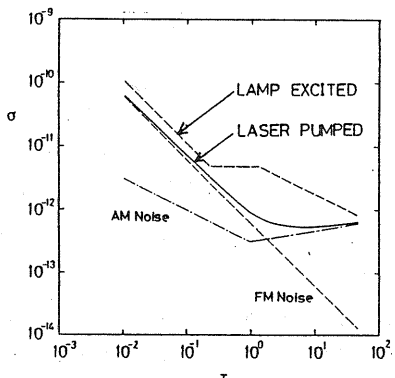


Fig. 5 レーザ励起型Rb原子発振器の短期安定度

Fig. 3は、マイクロ波共鳴周波数のレーザー・パワー(PL)によるシフト量を表わし、Fig. 4は、マイクロ波共鳴周波数のレーザー周波数(νL)によるシフト量を与える。それらの特性から、次のような光シフトの代表値を得た。

- マイクロ波共鳴周波数シフト量のレーザー周波数依存性
 $\Delta \nu M / \Delta \nu L = -0.23 \quad (\text{Hz} / \text{MHz})$
 (at PL = 190 $\mu\text{W} / \text{cm}^2$)
- マイクロ波共鳴周波数シフト量のレーザー・パワー依存性
 $\Delta \nu M / \Delta PL = 0.1 \quad (\text{Hz} / (\mu\text{W} / \text{cm}^2))$
 (at PL = 150 $\mu\text{W} / \text{cm}^2$)

バッファガス入りのセルで得られる線形吸収スペクトルを周波数基準として安定化されたLDを用いた場合、レーザー励起型Rb原子発振器の短期安定度は、上記のマイクロ波共鳴周波数シフト量のレーザー周波数依存性およびレーザー・パワー依存性の代表値を使って、LDの周波数変動とパワー変動をマイクロ波共鳴周波数シフト量に換算することによって与えられる。その結果をFig. 5に示す。LDの周波数変動をFMノイズ、パワー変動をAMノイズとし、予想されるレーザー励起型Rb原子発振器の短期安定度を両者の重ね合わせとして求めた。図中のランプ型の短期安定度のカタログ・データとレーザー励起型の短期安定度を比較すると、 $\tau = 1 \text{ s}$ で約1桁レーザー励起型の方が向上し、また $\tau > 100 \text{ s}$ で、LDのパワー変動によって短期安定度に制限を受けることがわかる。

[4] おわりに

⁸⁷Rb-D₂線にLDの周波数を安定化することにより、線形吸収スペクトル、飽和吸収スペクトルどちらを用いても 1×10^{-10} ($\tau = 100 \text{ s}$)程度の安定度を得ることができた。

さらに、レーザー励起型Rb原子発振器を動作させ、ポンプ光(レーザー)によるマイクロ波共鳴周波数シフト量の高精度な測定を行なった。これによりランプ型では極めて困難な共鳴周波数の絶対測定が行なる。従って、周波数精度の評価も可能となり、レーザー励起型Rb原子発振器は一次標準的な用途へも応用の可能性がひらけたことになる。また、レーザー励起型Rb原子発振器の安定度推定を行なった結果、 $\tau = 1 \text{ s}$ で約1桁レーザー励起型の方が向上し、また $\tau > 100 \text{ s}$ で、LDのパワー変動によって短期安定度に制限を受けることがわかった。これを改善するためには、レーザーの周波数安定化に加えパワー安定化も必要と考えられる。

謝辞 御指導、御討論を頂いた富士通、河西、橋、千葉氏、電通大、狩野助教授、本学、大浦助教授、倉持博士、寺町博士に感謝致します。

[参考文献]

- 1) J.L.Picque: Metrologia 13(1977)115
- 2) M.Ohtsu, H.Fukada, T.Tako, and H.Tuchida: Jpn.J.Appl.Phys.,22(1983)1157
- 3) J.Vanier, R.Kunski, A.Barisson and P.Paulin: J. de Physique,42(1981)C3-139