

外部変調器を用いた広帯域可変周波数安定化レーザー

中川研究室 山崎智樹

1. 序論

我々の研究室では ^{87}Rb を用いた可搬型の原子干渉計の開発を行っている。原子干渉計は非常に高精度な加速度測定や回転角、回転速度の測定が行える。原子干渉計によって作られるセンサー類は微細構造定数の測定や重力加速度の測定、等価原理の検証といった範囲に応用される[1]。我々の研究室では特にこの原子干渉計により重力加速度の測定を行うことを主な目標としている。

原子干渉計による重力加速度の測定では測定に用いるレーザー光の周波数の精度により測定結果の精度が決まる。よって用いるレーザー光源には周波数の安定化が求められる。加えて、原子干渉計には原子の冷却用のレーザー光源や原子干渉実験用のレーザー光源といった異なる周波数の光源が必要となる。また実験のためにこれらを高速に切り替える必要がある[2]。

本研究では原子干渉計に求められるレーザー光源作成のため光学系を作成し、その周波数安定化を行うことを目標としている。重力加速度の精度は $\Delta g/g = 10^{-9}$ (9桁)を目指しているため、周波数の安定化の精度として $\Delta f/f = 10^{-9}$ (9桁)を目指している。

2. 原理

2.1 周波数変調(FM)分光法

レーザー光源の周波数安定化のためにFM分光法を用いる。FM分光法の概略図を図2.1として示す。

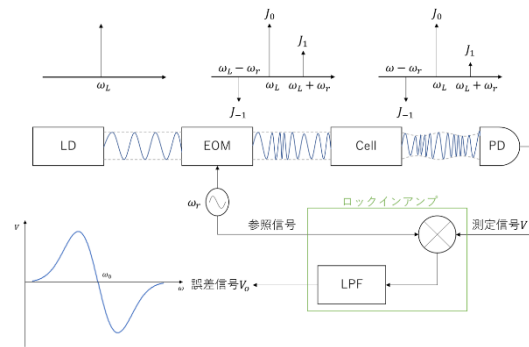


図 2.1 FM 分光法

EOM(電気光学変調器)で変調された光には、 $\omega_L \pm \omega_r$ のサイドバンドが発生している。これらのサイドバンドの強度は同じであり、これによりサイドバンドの影響で光の振幅がうなることはない。しかし、この光がセルを通過した際に、セル内の原子によりサイドバンドの吸収が起こりサイドバンドの強度のバランスが崩れ、振幅にうなりが発生するようになる。このうなりはPDで測定信号 V として観測することができる。

測定信号 V と参照信号をミキサーにいれローパスフィルター(LPF)に通すことで吸収線の周波数微分信号を得ることができる。この信号を誤差信号という。この誤差信号

は入射光の周波数 ω_L が共鳴周波数 ω_0 のとき0になり、この共鳴周波数の前後で正から負に入れ変わる。よって共鳴周波数 ω_0 からずれるとそのずれに応じた出力を出している。これにより共鳴からずれた場合、共鳴周波数に戻るような信号となっている。また共鳴周波数付近での傾きが大きい程共鳴周波数に戻る力が強い。この誤差信号をレーザーの電流源やピエゾドライバーにフィードバックすることによりレーザーの安定化をする。

2.2 ^{87}Rb の超微細構造

原子干渉計に用いる ^{87}Rb の超微細構造を図2.2として示す。

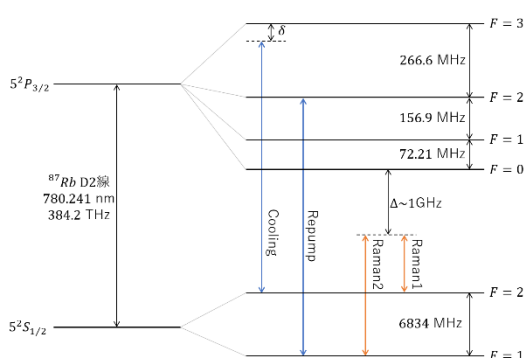


図 2.2 ^{87}Rb の超微細構造

^{87}Rb の $5^2S_{1/2} \leftrightarrow 5^2P_{3/2}$ が吸収する光の波長は780nmである。そのためレーザー光源として780nm程度のものを準備する必要がある。

3. 実験

3.1 実験系

先の課題を解決するために図3.1のような光学系を作る。

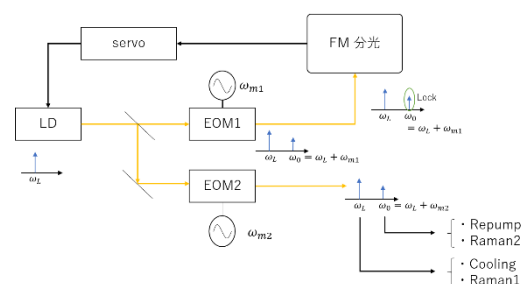


図 3.1 光学系概要

LD から出てくる周波数 ω_L のレーザー光をEOM1に通すことで $\omega_L + \omega_{m1}$ のサイドバンドを立たせる。このサイドバンドをFM分光法で ^{85}Rb の $5^2S_{1/2}, F=3 \leftrightarrow 5^2P_{3/2}, CO(3,4)$ の吸収線にロックして周波数を安定化する。

この際0次光(ω_L)はdetector光やblowing光として用いられ、EOM1の周波数を赤方偏調することでCooling光として用いることができる。さらにEOM2でサイドバンドを立てこれをRepump光として用いる。またEOM1の周波数を調整することで0次光の周波数を自由に調整することができ、この0次光をRaman光の一つとして使う。同時にEOM2でサイドバンドを立てるとRaman光のもう一つを作ることができる。

周波数の調整にEOMを用いることで電気回路による制御で周波数を高速に切り替えることができる。またEOMにより周波数の調整を広い範囲で可能としている。

3.2 ^{85}Rb の超微細構造

先の光学系ではレーザー光の0次光(ω_L)を ^{87}Rb の $5^2S_{1/2}, F=2 \leftrightarrow 5^2P_{3/2}, F=3$ に合わせている。そのため周波数の安定化はEOM 1で発生させたサイドバンドを ^{85}Rb の $5^2S_{1/2}, F=3 \leftrightarrow 5^2P_{3/2}, \text{CO}(3,4)$ の吸収線にロックして行っている。図3.2として ^{85}Rb の超微細構造を示す。

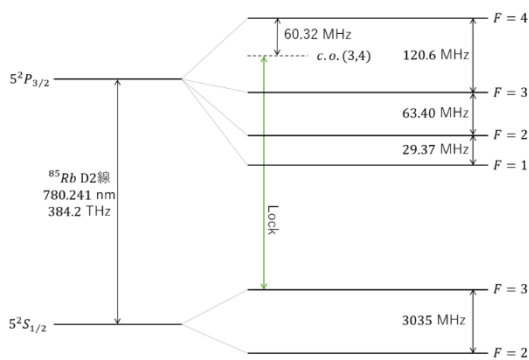


図 3.2 ^{85}Rb の超微細構造

^{87}Rb と同様に ^{85}Rb の $5^2S_{1/2} \leftrightarrow 5^2P_{3/2}$ が吸収する光の波長は780nmである

3.3 誤差信号の測定

実験装置を図3.3に示した。

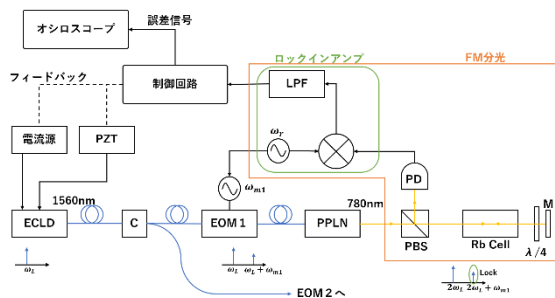


図 3.3 誤差信号を測定する光学系

図において、青色の線は光ファイバ、黄色の線は光の経路、黒色の線は電気信号の経路を示している。実験に用いた波長1560nm外部共振型半導体レーザー (ECLD)、及び制御回路は既存のものを使用した。EOMに変調を加える発振器はシンセサイザーを使用している。

ECLD から出たレーザー光(1560nm)にEOM 1で300MHz(ω_{m1})の変調をかけサイドバンドを発生させる。このときロックインアンプ内の発信器によりサイドバンドを96kHz(ω_r)でさらに変調をかけている。PPLN でレーザー光に第二高調波を発生させ1560nmの波長を780nmにする。さらに空間中にレーザー光を出し、Rb Cellでサイドバンドを飽和吸収分光しPDで観測する。PDで観測した信号と発信器の信号をロックインアンプ内のミキサーにいれ、ローパスフィルタ(LPF)を通して得られた信号をオシロスコープで観測する。

3.4 実験結果

EOMに300MHzの変調をかけ、電流の値を調整することで誤差信号をオシロスコープで探し、得られた信号の記録をとった(図3.4)。その際、吸収線の頂点付近にロックするために誤差信号の中心が0になるようにオフセット調整をした。測定した誤差信号は分かりやすくするため横軸を周波数に変換している。これは各吸収線の遷移周波数差とオシロスコープで測定された時間を対比させることで変換をした。また雑音を調べるために吸収の起こらない周波数帯で電圧の測定をした(図3.5)。

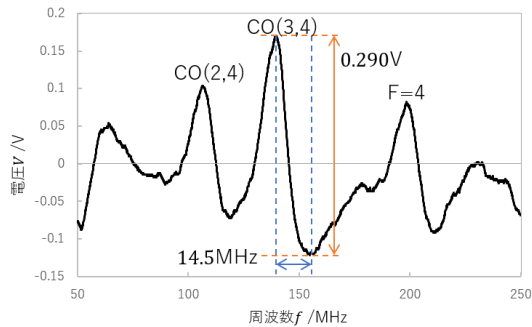


図 3.4 FM 分光法による誤差信号

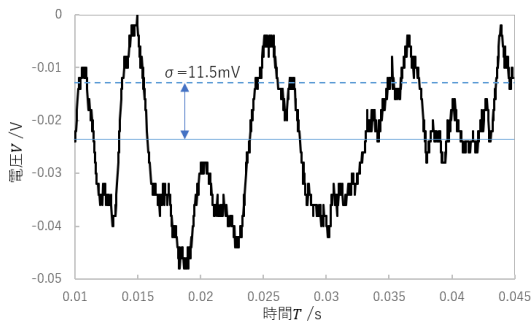


図 3.5 測定時のノイズ電圧

図 3.4 において、 $F = 3 \rightarrow \text{C.O.}(3,4)$ の誤差信号の最大値と最小値の差は電圧が 0.290V で周波数が 14.5MHz である。これによりロックする信号の傾き α は $\alpha = 2.00 \times 10^{-2} \text{V/MHz}$ となる。図 3.5 より雑音電圧の標準偏差 $\sigma = 11.5\text{mV}$ となった。この信号をフィードバックした場合の周波数のゆらぎ Δf_n は $\Delta f_n = 575 \text{kHz}$ と見積もれる。よって誤差信号をフィードバックしたときに最低でも 575kHz まで安定化できる。

波長 780nm のレーザー光の周波数の精度 9 桁 ($\Delta f/f = 10^{-9}$) は、 $\Delta f_{780} = f_{780} \times 10^{-9} \cong 380 \text{kHz}$ となる。よって実験から見積もった周波数のゆらぎ Δf_n は目標 9 桁よりは大きい。しかし見積もりに用いた傾き α は共鳴周波数近傍の傾きより小さい。そのため実際に周波数安定化したときに周波数

のゆらぎ Δf_n は小さくなる可能性がある。

また今回の実験における S/N 比は $S/N \cong 25$ であった。加えて、ロックインアンプに含まれるローパスフィルタについて、カットオフ周波数は 72Hz であった。

4. 結論

実際に周波数の安定化までは至らなかったが、事前段階で重要な誤差信号の測定と周波数ゆらぎの見積もりはできた。見積もった周波数ゆらぎは目標値より大きかったが実際に安定化したときに小さくなる可能性がある。なので今後は実際に安定化を行いたい。

今回使ったロックインアンプは研究室にあったものを改造して使った。そのため特に本実験用に作られたものではなかったため実験に最適なものではなかったと考えられる。実際に誤差信号の S/N が良くなかったため周波数のゆらぎが大きくなってしまっている。S/N はロックインアンプのローパスフィルタにも依存するので、そのことを考慮した上でロックインアンプを設計したい。

5. 参考文献

- [1] Achim Peters and Steven Chu, et al. "Measurement of gravitational acceleration by dropping atoms" Nature. Vol. 400, 26 August(1999)849
- [2] Fabien Theron and Alexandre Bresson, et al. "Narrow linewidth single laser source system for onboard atom interferometry" Appl. Phys. B,(2015)118:1-5