

ヨウ素飽和吸収線を用いた Nd:YAG レーザーの周波数安定化の研究

量子・物質工学科 植田研究室 川口浩治 0313031

<背景と目的>

レーザーの周波数安定化に必要なことは2つあり、1つは制御ループ(レーザー自身を安定化する技術)と、もう1つは周波数基準の安定度である。周波数基準の安定度については、主に2つの安定化方法がある。1つは、原子・分子の共鳴周波数を用いた方法と、もう1つは光共振器の共振周波数を用いたものがある。共振器については、短期的(100秒以下)安定度は高いが、長期的には安定度が低下する。本実験では、重力波測定用の安定化レーザーの開発を最終目的としているため、長い期間での安定度と再現性が期待できる原子・分子の共鳴周波数を用いて、周波数の安定化を試みた。目標値としては、宇宙レーザー干渉計計画(DECIGO)の要求値と同じで、周波数の安定度は $1\text{Hz}/\text{Hz}@1\text{Hz}$ である。本実験では、ヨウ素の飽和吸収線を用いて Nd:YAG レーザーの周波数の安定化を行った。

<安定化の方法>

高い安定度には、高い S/N と細い線幅が必要である。細い線幅を得るための方法として、飽和吸収分光法を用いた。飽和吸収分光法とは、互いに反平行の2つの光を物質に入射させ、一方の光で原子の吸収を飽和させ(Pump 光)、もう一方の光で吸収を検知する(Probe 光)方法である。ビームの周波数が $\nu=0$ の共鳴周波数に一致するときのみ Probe 光の吸収の減少を検知でき、透過光のスペクトルがその周波数のところだけ鋭いスペクトルをみせる。これにより、ドップラー幅の影響を取り除くことができる。本実験では、ヨウ素の光吸収線(飽和吸収線)を用いてレーザーの周波数を安定化する。ヨウ素を用いた理由としては、吸収線が 532nm 付近にあり、線幅が細いこと($<1\text{MHz}$)が挙げられる。細い線幅により、雑音が軽減でき、短波長により、ビームの広がりを抑えられる。

<実験方法>

下に図1：実験概略図を示す。

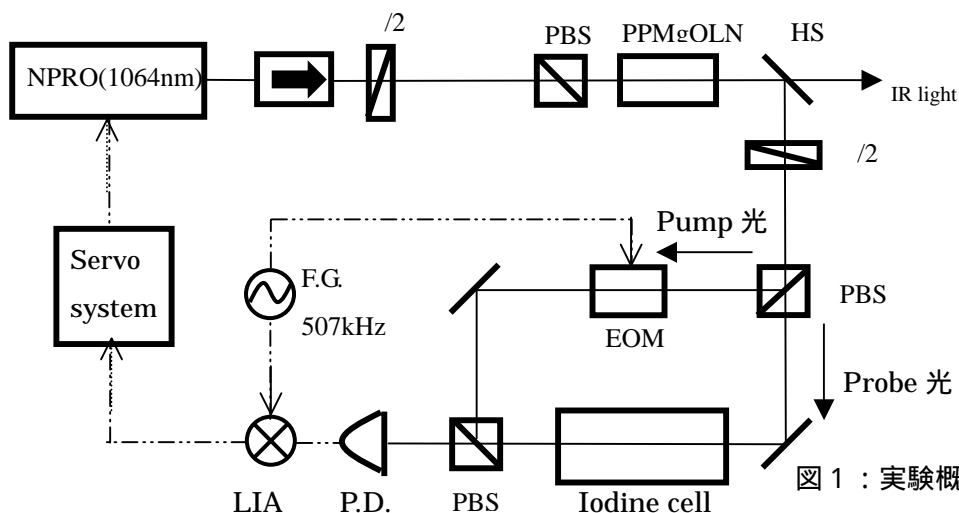


図1：実験概略図

PBS : polarization beam splitter
 HS : harmonic separator
 EOM : electro-optic modulator
 P.D. : Photo Detector
 LIA : lock in amp
 IR light : infrared radiation
 F.G. : function generator

本実験では光源に、半導体励起モノリシック型 Nd:YAG レーザー (NPRO) 1064nm を用いた。ヨウ素は 532nm 付近に吸収線を持つので、飽和吸収線を観測するためには、レーザーの波長変換をする必要がある。そこで、光源のビームを PBS で単一偏光にし、周期的に極性を反転させることで疑似位相整合がとれる PPMgOLN 結晶を用いて、第二高調波 (532nm) を発生させた。そのビームを $\lambda/2$ 板に通して、偏光を調整した後、PBS で 2 つのビーム (Pump 光と Probe 光) に分け、それぞれをヨウ素セルに入射させた。Pump 光だけに、EOM で位相変調を加えた。それにより、Pump 光と Probe 光が同じ分子に共鳴するときのみ、つまり飽和吸収信号が検出されるときのみ、四光波混合によって Pump 光の位相変調を Probe 光に移した (Modulation Transfer)。変調が移った Probe 光を Photo Detector で検出し、この信号と EOM の変調周波数と同じ周波数の信号を Lock In Amp により復調し、微分信号を得た。その信号を、Servo System を介して、NPRO の圧電素子に負帰還制御をかけることにより、レーザーの周波数をヨウ素の共鳴周波数に安定化した。又、ヨウ素セルの温度を変化することにより、セル内の圧力を変化させ (3.51Pa ~ 1.95Pa)、飽和吸収線幅の温度依存性を測定した。

{ 以前に作った実験系について }

又、以前に作った実験系を図 2 に示す。ここでは、行きは Pump 光、帰りは Probe 光として、ヨウ素セルに入射させ、Modulation Transfer を起こさせずに微分信号を検知した。

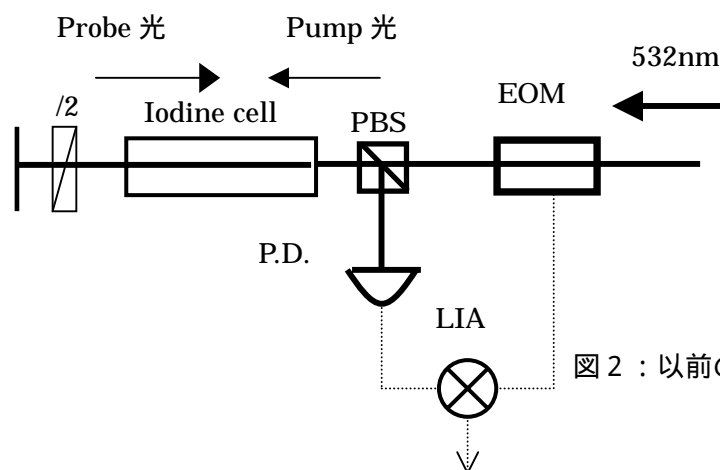


図 2 : 以前の実験系の概略図

< 実験結果 >

光源の NPRO のパワーは 380mW、 M^2 は 1.1 であった。

PPMgOLN により得られた第二高調波は 1.75mW @380mW であった。

今回、ヨウ素の吸収線は R[56]32-0, 波長 : 532.245[nm] を用いた。

次に、以前の実験系で得た (Modulation Transfer なし) 微分信号 (図 3) と Modulation Transfer 法を用いたときの微分信号 (図 4) を示す。

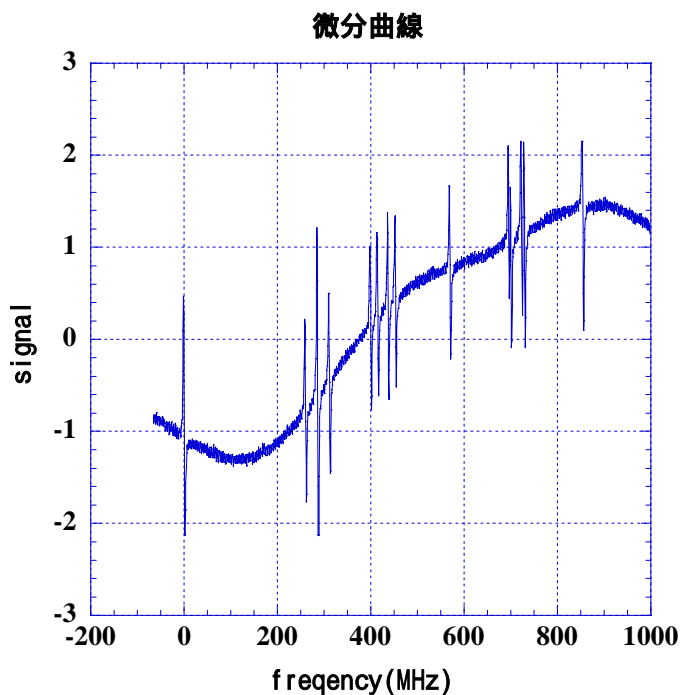


図 3 : 以前の実験系で得た微分信号

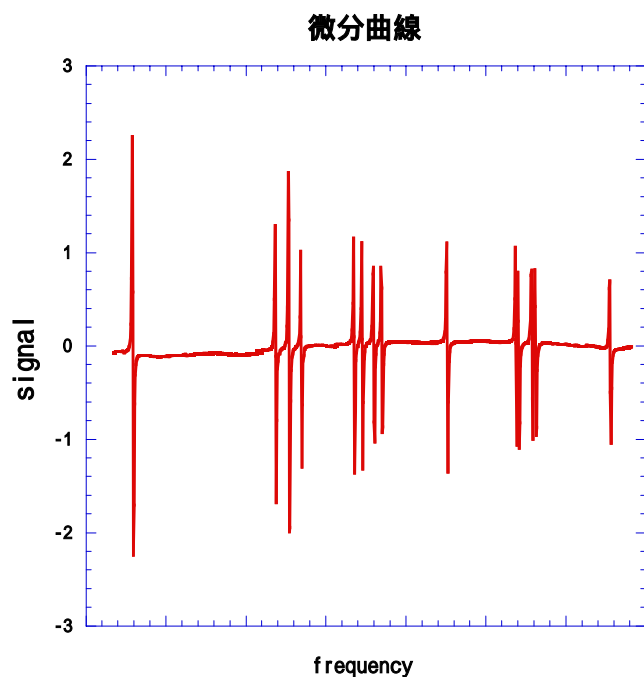


図 4 : Modulation Transfer 法を用いたときの微分信

図 3、4 より、以前の実験系で得た微分信号には DC オフセット信号が乗ってしまっているが、Modulation Transfer 法を用いたときは、DC オフセットを取り除けたことがわかる。

次に、線幅の圧力依存性 (図 5) と、誤差信号の安定度 (図 6) の測定結果を示す。

線幅の圧力依存性

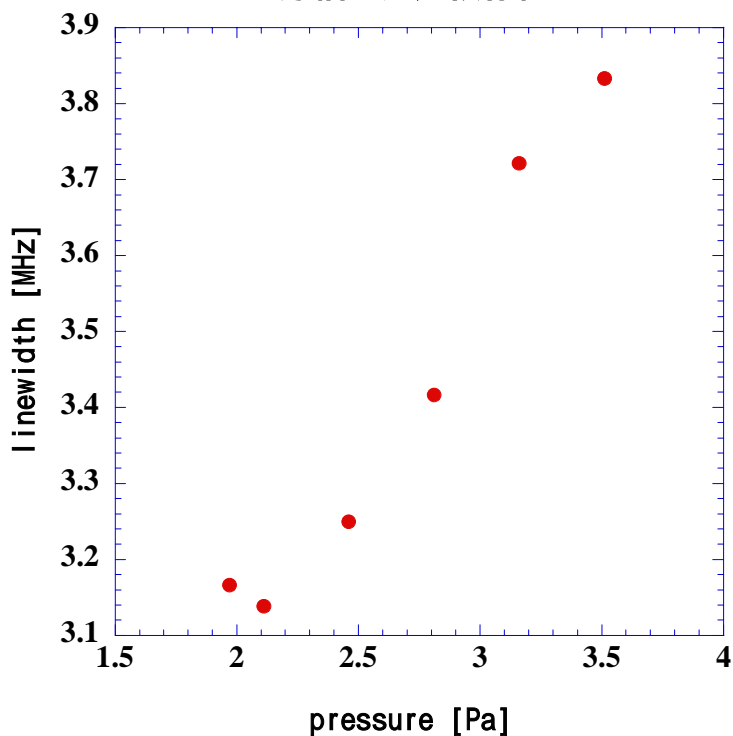


図 5 : 線幅の圧力依存性

誤差信号の安定度

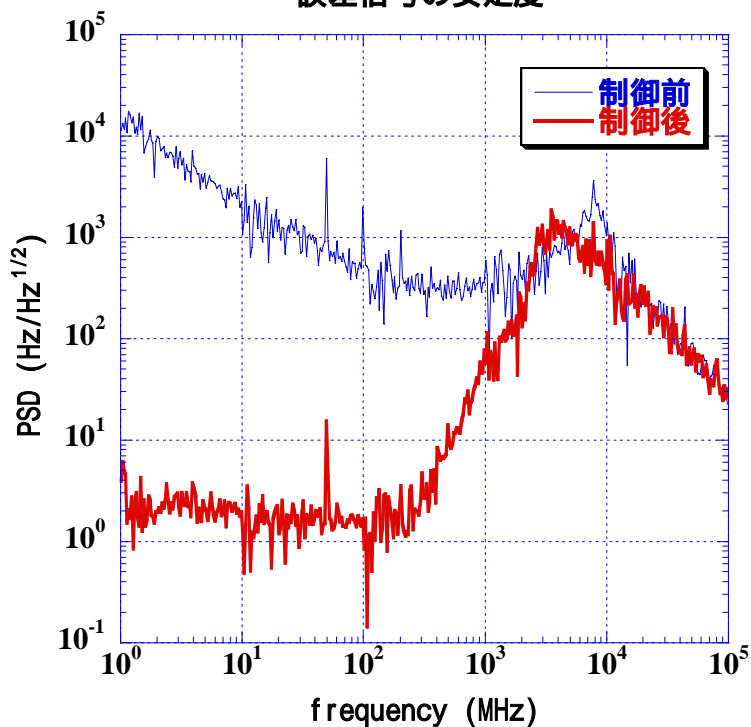


図 6 : 誤差信号の安定度

図5より、ヨウ素セル内の圧力を下げることにより、線幅が細くなることが確認できた。
(線幅: 3.84[MHz] @3.5[Pa], 3.14[MHz] @2.1[Pa])

図6より、誤差信号に関する安定度は[2Hz/ Hz @1Hz]であり、目標値(1Hz/ Hz @1Hz)に近づくことができた。

<まとめ>

本実験では、Nd:YAG レーザーの周波数安定化の準備を行った。

Modulation Transfer により、DC オフセットの無い信号が得られた。これにより、レーザーの強度が変わっても、ロックをかけやすくなったと言える。

ヨウ素セル内の圧力を下げることにより、線幅を細くできることを確認した。低い圧力(1.95Pa)で線幅が狭まらなかった理由としては、ヨウ素セルに不純物が含まれていたことが原因と考えられる。

飽和吸収信号を用いて、周波数安定化を行った。誤差信号に関しては、目標値に近づくことができた。

<今後について>

今後は、Pump 光と Probe 光の干渉を防ぐため、AOM を入れる予定である。これにより、ノイズを軽減できる。また、より高い S/N 信号を得るために、長いヨウ素セルを用いることも予定している。そして、本実験では、誤差信号の安定度の評価をしたが、周波数基準の安定度を評価するため、同程度の周波数安定度のレーザーを用いて、ビート信号を得ることも予定している。

<参考文献>

- [1] Chikako Ishibashi, Jun Ye, and John L.Hall “ Issues and applications in ultra-sensitive molecular spectroscopy ” Proceedings of SPIE Vol.4634(2002)
- [2] Feng-Lei Hong, Hun Ishikawa, Zhi-Yi Bi, Jing Zhang, Katuo Seta, Atsushi Onae, Jun Yoda, and Hirokazu Matsumoto ” Portable I₂-Stabilized Nd:YAG Laser for International Comparisons ” IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL.50, NO/2, APRIL 2001
- [3] 丸山 純孝 “ ヨウ素安定化 Nd:YAG レーザーの開発 ” 修論
- [4] J.J.snyder, R.K.Raj, D.Bloch, and M.Ducloy “ High-sensitivity nonlinear spectroscopy using a frequency-offset pump ” OPTICS LETTERS Vol.5, No4 April 1980