

準安定状態アルゴン原子レーザー冷却トラップに用いるレーザーの開発

量子・物質工学科 清水研究室 福場 賢

『背景・目的』

本研究では、準安定状態 Ar*原子の磁気光学トラップ (MOT) を実現する為のレーザーシステムを開発する。







[冷却レーザーの条件]

- Ar*の冷却遷移波長において、スペクトル幅(2MHz)程度で長時間安定に発振する。
- MOT では冷却レーザーの周波数を負に数 MHz 離調する必要がある。
- 直径 2cm で 4 本のレーザー用いる MOT では 120mW 以上のパワーが必要である。

[準安定状態アルゴン原子]

遷移波長	811.754nm
自然幅	5.9MHz
飽和吸収パワー密度	8.6mW/cm ²

『方法・手順』

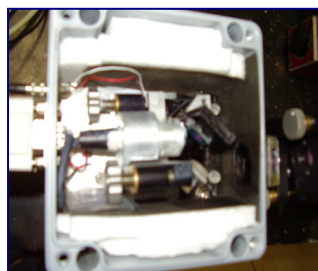
- ① 外部共振器半導体レーザーを製作し、で Ar*の共鳴周波数付近で安定にシングルモード発振させる。

- ② Ar*放電セルを用い飽和吸収分光法により共鳴線を得る。

- ③ 飽和吸収セルにコイルを製作し、10KHz の変調をかけ Lock-in-amp に入力し共鳴線で誤差信号を得る。PZT にかかる三角波と誤差信号を制御回路に入力し共鳴周波数でロックする

- ④ 飽和吸収セルにコイル(DC)を製作し磁場をかけゼーマンシフトによりロックした共鳴線を負に離調する。

- ⑤ プローブ光用に共鳴周波数でロックする為、もう 1 台外部共振器半導体レーザーを製作する。

- ⑥ 共鳴周波数と離調した周波数を 2 台同時にロックし、スペクトラムアナライザーで周波数のビートを観測する。

- ⑦ 注入同期法によりレーザーの出力を増幅する為のスレイブレーザーを製作する。

『実験』

① 「外部共振器半導体レーザーの製作」

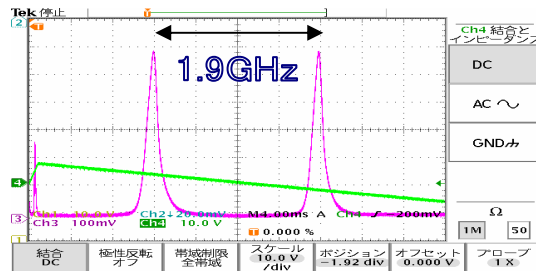
外部共振器半導体レーザーを製作し、{PZT、温度、発振電流}を調整して冷却遷移波長(811.754nm)でシングルモード発振できた。{波長計・ファブリペロー共振(FSR=1.9GHz)}

図:(外部共振器半導体レーザー)



- LD (Sanyo DL-8031-031B)
($\lambda = 803\text{nm}$ ・ P=100mW)
- グレーティング(1800Line/mm)
グレーティング角 ($\theta = 46.9^\circ$)
- 温度コントロール範囲(10°C~45°C)

図:ファブリペロー共振起(FSR=1.9GHz)・波形

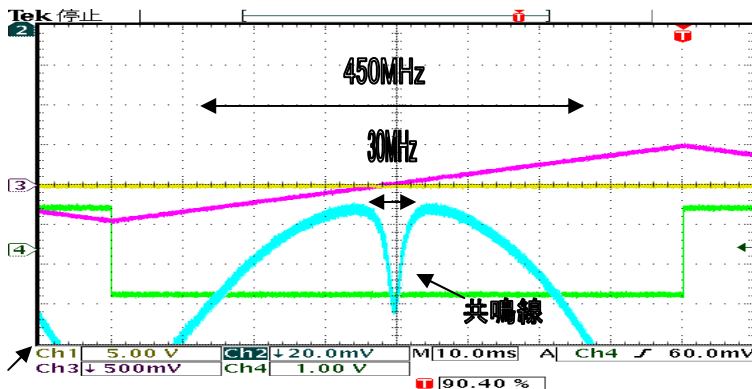


② 「Ar*放電セルによる飽和吸収分光法」

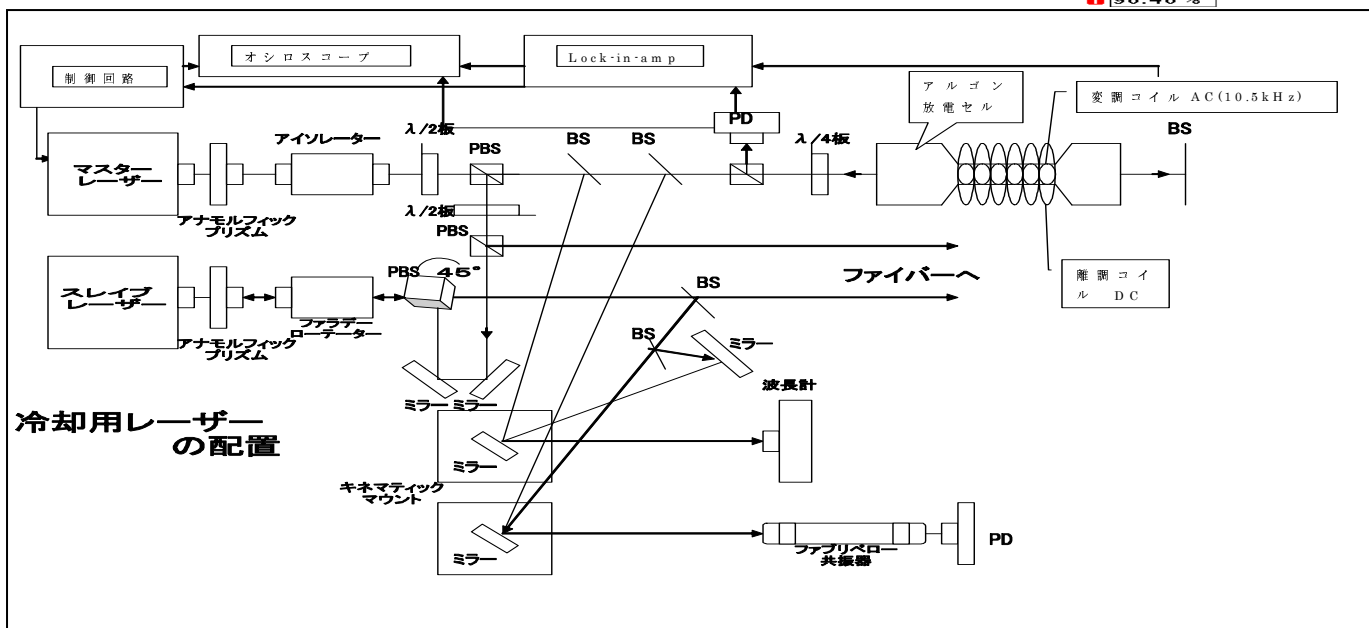
発振するレーザーはコリメイトされた状態でビーム径(横 6mm・縦 2mm)であるので、アナモルフィック・プリズム(3:1)で、横方向を 2mm にした。

戻り光を防止するためアイソレーターを置き、次に $\lambda/2$ 板と PBS でレーザーのビーム径に対する飽和パワー (約 4mW) 程度に分けた。

原子と相互作用するため $\lambda/4$ 板で円偏光にし Ar*放電セルを透過させる,BS でプローブ光を反射させ、吸収した原子に作用することにより吸収の飽和が起こる。プローブ光はもう一度 $\lambda/4$ 板を透過し直線偏光になり、PBS で光路が分かれ,PD から入射させ、信号が得られる。



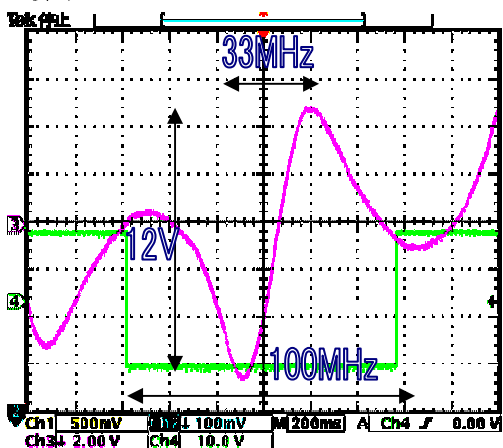
「図②：得られた信号」



【光学アライメント図】

③ 「周波数ロック」

- 飽和吸収信号と変調信号(10KHz)を Lock-in-amp に入力し誤差信号を得る、増幅した誤差信号と三角波を制御回路に入力し、PZT にフィードバックすることにより、周波数をロックすることができた。
- 微分波形の傾きの逆数を計算すると約 2.8MHz/V であった。ロックした後の 100 秒間の安定性を計算すると



図③: 微分波形

ロック

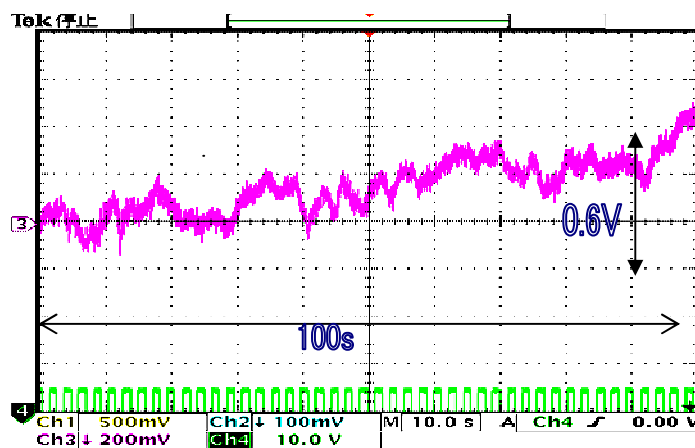
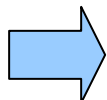


図: ロック後100秒の波形

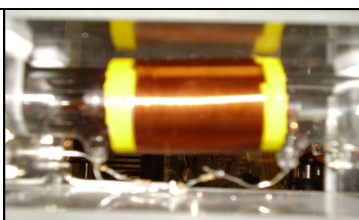
$$2.8[\text{MHz}] \times 0.6[\text{V}] \approx 1.7[\text{MHz}] \text{ となった。}$$

④ 「周波数の離調」

周波数を離調するためコイルを製作し、ゼーマンシフトによりロックした共鳴周波数を数 MHz 負に離調した、コイルは発熱があるので 140MHz 程度まで離調が可能であった。

8mA	→	1Guss
1Guss	→	1.4MHz (Ar)

「計算値」



図④: 離調コイル(DC)

- 銅線直径: 0.45[mm]
- 銅線長さ: 65[m]
- 抵抗値: 12[Ω]
- コイル直径: 3.8[cm]
- コイル巻数: 9000[1/m]

⑤⑥ 「ビートの観測」

レーザーをもう 1 台製作して、共鳴周波数と負に離調したレーザーを同時にロックし、スペクトラムアナライザーで周波数のビートを観測すると、5MHz 程度 (Span: 100MHz) のノイズが確認された。

⑦ 「注入同期」

図⑦に示すように、マスター光を 45 度傾けた PBS に入れ、ファラデー回転子で反時計周りに 45 度偏光を回転させ偏光をスレイブ光と一致させる。注入され、周波数が同期したスレイブ光はマスター光と同じ経路を通るが回転子により偏光が反時計回り 45 度回転し、マスター光と偏光が 90 度回転しているため、PBS で光路が分けられる。また PBS はアイソレーターのポラライザーとして併用した。

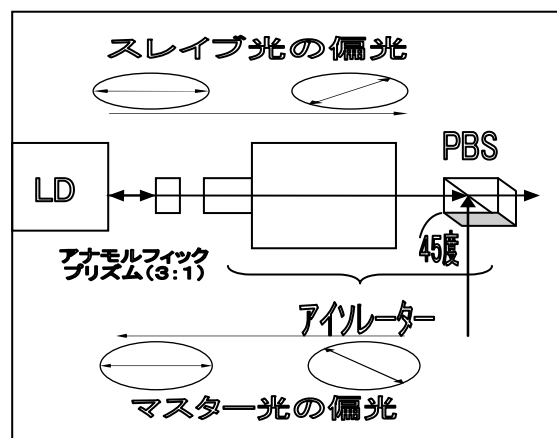
(注入同期の条件)

$$|\nu_m - \nu_s| \leq \frac{\Gamma}{2\pi} \frac{|E_m|}{|E_s|}$$

ν : レーザー周波数
 E : 電場
 Γ : 共振器損失

冷却遷移波長(811.754nm)で注入同期を行うため幾つかの半導体素子で実験を行った。

高い増幅率で安定に発振する為にはマスター光とスレイブ光(Free run)の「周波数の差」が大きく影響することが確認できた。



図⑦: 偏光の状態

半導体レーザー素子	波長(nm) Free run	注入パワー(mW)	最大発振パワー(mW)	周波数同期平均時間
①Sanyo (DL-LS2031) $\lambda = 803\text{nm}$ 最大出力: 150mW	804 ($t = 40^\circ\text{C}$)	15	50	数十分
②Sharp (LT016MFO) $\lambda = 807\text{nm}$ 最大出力: 30mW	808 ($t = 35^\circ\text{C}$)	5	30	数時間
③Sanyo (DL-8031-031B) $\lambda = 808\text{nm}$ 最大出力: 150mW	809 ($t = 40^\circ\text{C}$)	4	100	マスター光がシングルモードである限り同期し続ける

レーザーは表の③を用い、発振電流(180mA)でパワー(80mW)増幅率は約20倍、またマスター光のスペクトルが安定である限り同期が外れないことも観測できた。

『まとめ』

今回の実験では準安定状態アルゴン原子の MOT に必要な光源の開発を行い MOT に必要な周波数の安定度(2MHz程度)、パワー(120mW)を満たすレーザーを製作することができた。

『今後の展望』

更なる周波数の安定度(1MHz以下)にするために、外部共振器半導体レーザー内部の(振動、光の散乱、電気的なノイズ)を減少させる必要がある。また MOT で、より多くの原子を冷却するため更なるレーザーパワーの増幅が必要であり、光アンプなどを用いることなどが考えられる。