

光会合による極低温分子生成に向けた  
レーザー開発

Development of lasers for production of  
ultracold molecules with photoassociation

応用理工系学科 応用物理工学コース フォトニクス研究室

廣島将太

# 目次

1.序論.....	2
1.1 研究背景 .....	2
1.2 目的.....	2
2.原理.....	3
2.1 光会合.....	3
2.1.1 概要.....	3
2.1.2 Franck-Condon Factor.....	4
2.1.3 光会合レート .....	5
2.1.4 レーザーの波長、パワーの決定.....	5
2.2 レーザー冷却.....	8
2.2.1 原子がレーザーから受ける力.....	8
2.2.2 ドップラー冷却 .....	9
2.3 磁気光学トラップ(MOT) .....	9
3.実験.....	12
3.1 ECDL(外部共振器型半導体レーザー)の作製.....	12
3.1.1 原理.....	12
3.1.2 レーザーのパワーの測定 .....	14
3.1.3 温度コントローラ .....	16
3.2 波長の安定化.....	17
3.2.1 原理.....	17
3.2.2 servo 回路 .....	18
3.2.3 波長の測定.....	19
3.3 パワーの増幅.....	20
3.3.1 原理.....	21
3.3.2 パワーの増幅の測定 .....	22
3.4 増幅後の光学系 .....	25
4.まとめ .....	27
参考文献 .....	28
謝辞.....	29

# 1.序論

## 1.1 研究背景

1980年代から、レーザー冷却技術の飛躍的な発展し、1995年には原子気体のボース-アインシュタイン凝縮(BEC)が初めて実現し[1]、2001年のノーベル物理学賞を受賞することになった。極低温原子に関する研究がさらに発展していく中で、BECに達した原子による極低温分子の生成とこれを用いた精密分光等の研究も大きく注目されている。2019年には極低温分子を用いた電子陽子の質量比の恒常性の検証実験が行われ、測定精度がそれ以前と比較して5倍も向上した[2]。また、極低温分子を用いた化学反応の観測[3]も行われており、極低温において新たな発見がなされることが期待されている。

我々の研究室においても、極低温の原子、分子を用いた研究を立ち上げる。BECを達成した原子から極低温分子を生成、これを用いた精密分光を行うことを計画している。

## 1.2 目的

本研究では、トラップされた極低温の $^{87}\text{Rb}$ 原子から、光会合を用いて極低温分子を生成することを目的としている。1987年に提唱されたこの手法は、極低温分子を用いた精密分光に適している[4]。本論文ではこの光会合に向けたレーザーの開発を行い、実験に用いる準備を行うことを目標とする。

## 2.原理

### 2.1 光会合

#### 2.1.1 概要

光会合とは、極低温の原子に対してレーザーを当てて分子を作るという手法である。この光会合の説明のために、図 2.1 を用いる。

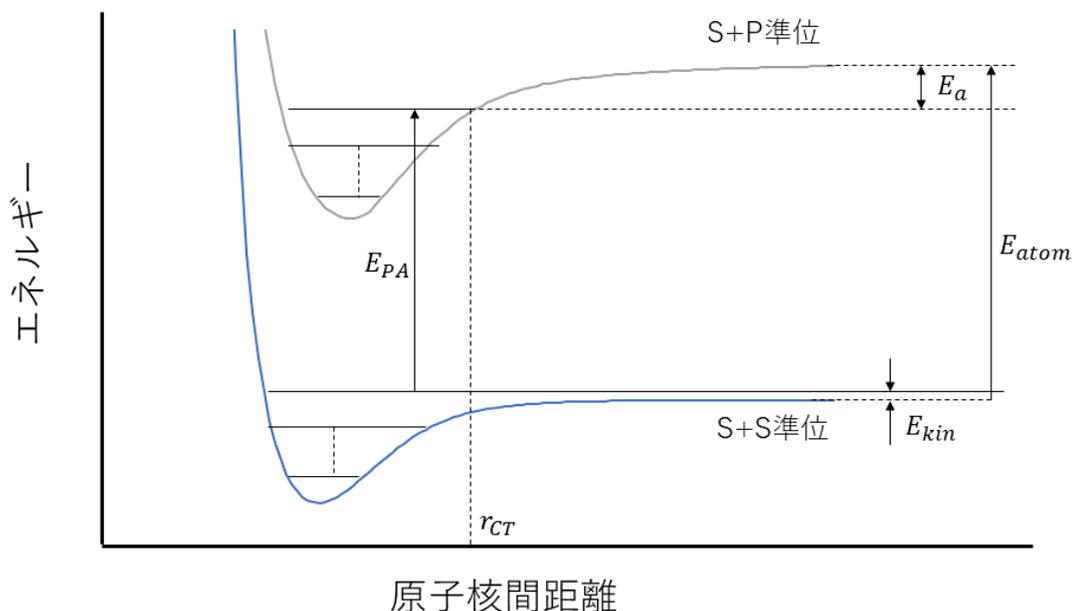


図 2.1.1：エネルギーの原子核間距離依存性

図 2.1.1 は、2 つの $^{87}\text{Rb}$  原子における、エネルギーの原子核間距離依存性を示したものである。2 つの原子が両方とも基底状態にあるものを S+S 状態、片方の原子が励起状態にあるものを S+P 状態とする。 $E_{atom}$  は S 準位にある 1 つの原子の励起エネルギー、 $E_{kin}$  は原子の運動エネルギー、 $E_a$  は、解離極限(原子核間距離  $r \rightarrow \infty$ )におけるポテンシャルと、束縛状態のエネルギー差である。 $r_{CT}$  は束縛状態の古典転回点を示している。

初期状態では、2 つの原子状態は S+S 準位にあり、原子核間距離は十分に離れている。この 2 つの原子は、衝突を繰り返すことで距離が小さくなっていき、S+P 準位の束縛状態になる距離まで近づく。この S+P 準位に近くなったところで外部からレーザーを当てると、S+P 準位へと遷移する。S+P 準位では、S+S 準位と比較して原子間距離が近いところにとどまるので、この状態を分子が生成されたとみることができる。これを起こすために必要な励起エネルギー  $E_{PA}$  について以下の関係が成り立つ。

$$E_{PA} = E_{atom} - E_{kin} - E_a \quad (2.1)$$

また、 $E_{PA}$ と必要なレーザーの周波数 $\omega_{PA}$ については、

$$E_{PA} = \hbar\omega_{PA} \quad (2.2)$$

の式が成立する。光会合に必要なレーザーの周波数の値は1つではない。S+P 準位のポテンシャルには複数の束縛状態が存在し、それぞれの準位への遷移において光会合が起こるため、 $\omega_{PA}$ が各準位に対して存在する。S+P 準位の束縛状態におけるエネルギー準位を分子の振動準位と呼び、エネルギーの低いものから順に $v=0, 1, 2, 3, \dots$ とする。

光会合によって生成された励起分子には寿命が存在する。解離極限付近の分子の寿命は、原子の寿命の約1/2であり、分子の自然幅は原子の2倍の12MHzである。分子が生成されて一定の時間が経過すると、励起分子は、自然放出で電子を放出し、S+S 準位に落ちて基底状態の分子になるか、2つの原子に解離する。原子に解離する場合、2つの原子は最初に持っていたものより大きな運動エネルギーを受け取るため、トラップから逸脱する。基底分子になる場合も、観測から外れる。光会合の観測には、このトラップロスを用いることができる。光会合の前後において、トラップ内の原子数を測定し、原子数の減少を確認するのである。

### 2.1.2 Franck-Condon Factor

光会合を考えるにあたって、S+S 準位から S+P 準位への遷移確率を考慮する必要がある。これに用いるのが Franck-Condon Factor である[5]。定式では以下の式で表される。

$$f_{FC} = \left| \int dr \psi_{mv}^*(r) \psi_a(r) \right|^2 \quad (2.3)$$

$\psi_a(r)$ は基底状態の原子の、 $\psi_{mv}(r)$ は振動準位 $v$ における分子の波動関数である。これにより、各原子間距離 $r$ における原子と分子の波動関数の積を積分することで Franck-Condon Factor が求められることが分かる。全区間において波動関数の重なりを積分を行う。

S+S 準位のポテンシャルと比較して S+P 準位のポテンシャルは深くなっていて、束縛状態も S+P 準位の方が強いために原子の波動関数 $\psi_a(r)$ は激しく振動する。よって波動関数の積 $\psi_{mv}^*(r) \psi_a(r)$ を積分すると打ち消されてしまい、特に原子間距離が小さい領域の寄与が小さくなる。しかし、 $r$  が古典転回点 $r_{CT}$ の近傍においては $\psi_{mv}(r)$ の腹となっているため、この時の $\psi_{mv}^*(r) \psi_a(r)$ の値は Franck-Condon Factor に効いてくる。 $r_{CT}$ における分子の波動関数の値 $\psi_{mv}(r_{CT})$ が大きい場合、Franck-Condon Factor の値も大きくなるが、 $r_{CT}$ が基底状態の原子の波動関数の節に相当する場合、 $\psi_{mv}(r_{CT})=0$  となり、得られる Franck-Condon Factor の値も非常に小さくなる。これより、Franck-Condon Factor の値が、S+P 準位での古典転回点 $r_{CT}$ における分子の波動関数の振幅 $\psi_{mv}(r_{CT})$ で決まることが分かった。また、この古典転回点 $r_{CT}$ の位置は、励起状態の振動準位 $v$ によって異なるため、分子の振動準位 $v$ に

よって Franck-Condon Factor の値が異なる。

### 2.1.3 光会合レート

光会合を評価する際に用いるのが光会合レートである [6]。これは、1 秒当たりの分子生成数を表しており (単位は  $s^{-1}$ )、以下の式で表される。

$$R_{PA} = \left(\frac{3\lambda_{th}^2}{2}\right)^{\frac{3}{2}} n_{at} K^2 A f_{FC} \quad (2.4)$$

この式における各パラメータを以下に示す。

$$\lambda_{th} = \sqrt{\frac{h}{3\mu k_B T}}; \text{熱的ド・ブROI波長}$$

$n_{at}$ : 原子密度

$2K$ : 原子のラビ周波数 (レーザーの強度に比例)

$A$ : angular factor (角運動量に依存する項)

この式をより簡潔に示すと以下のようなになる。

$$R_{PA} \propto T^{-\frac{3}{2}} \cdot n_{at} \cdot I \cdot f_{FC} \quad (2.5)$$

原子密度と熱的ド・ブROI波長はレーザー冷却され、トラップされた原子のパラメータによる。よってレーザー冷却とトラップによって原子を低温高密度にするほど極低温分子を作りやすくなる。しかし、実際には、光会合によって生成される分子は少ない。その原因となるのが、前項で説明した Franck-Condon Factor である。これが分子の振動準位によって異なってくることに加えて、非常に小さい値をとる。それゆえに、光会合レートを上げるためには、原子の基底状態からの遷移確率が最大となる分子の振動準位を選択し、レーザーの強度を大きくする必要がある。

### 2.1.4 レーザーの波長、パワーの決定

前項で述べた光会合レートに基づいて、ここでは、光会合を行うに当たって必要なレーザーの波長とパワーを決定する。

まず、レーザーの波長を決めるために、光会合によって遷移させたい分子の振動準位を決める必要がある。

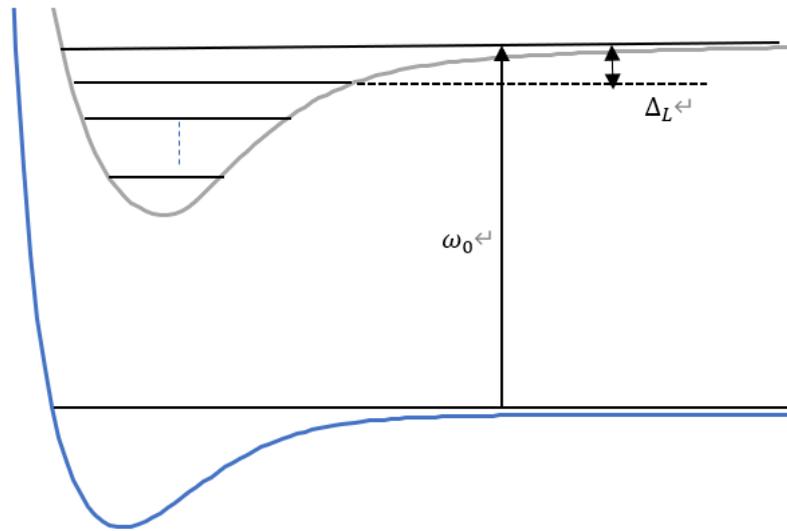


図 2.1.2：分子の振動準位とレーザーの周波数の関係

図 2.1.2 に、分子の振動準位とレーザーの周波数の関係を示した。 $^{87}\text{Rb}$  原子において励起状態から基底状態に遷移する共鳴周波数を $\omega_0$ としている。この共鳴周波数と等しい周波数のレーザーを当てると、原子は基底状態から励起状態に遷移する。しかし、この共鳴周波数 $\omega_0$ に相当する振動準位が、必ずしも分子を生成しやすい準位ではない。よって、図に示すように、共鳴周波数からの離調を $\Delta_L$ とおき、光会合レートがピークとなる時の共鳴周波数からの離調の値から振動準位を特定し、必要なレーザーの波長を決めることにする。

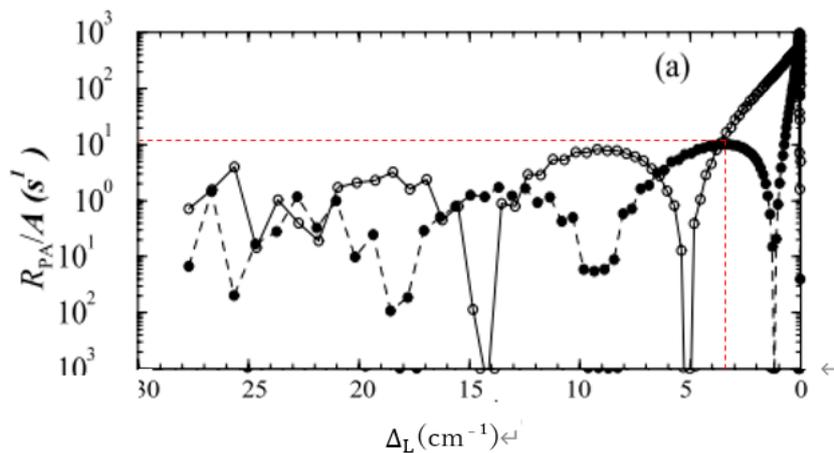


図 2.1.3：光会合レートと離調 $\Delta_L$ の関係[6]

図 2.1.3 は、本研究において参考にした、光会合レート (angular factor で割っている) と、共鳴周波数からの離調の関係を示すグラフである [6]。今回は $^{87}\text{Rb}$  の光会合レートを示す黒点で表されるグラフを見る。分子の各振動準位への遷移確率が異なるがゆえに

Franck-Condon Factor の値が変化しているために、グラフがジグザグの変化をしていることが分かる。このグラフの赤い破線で示した点を見ると、 $\Delta_L = -3.27 \text{ cm}^{-1}$ において、光会合レートがピークになっていることが分かる。よってこの離調に相当するレーザーの波長を決めることにする。 $^{87}\text{Rb}$  の共鳴周波数が $\omega_0 = 384.2346141 \text{ THz}$ であり、 $1 \text{ cm}^{-1} = 30 \text{ GHz}$ なので、これより必要なレーザーの周波数は $\omega = 384.1366141 \text{ THz}$ 、波長に換算して $\lambda = 780.97 \text{ nm}$ であることが分かった。また、分子の自然幅が約  $12 \text{ MHz}$  であるため、この値より小さい誤差で周波数を安定化させる必要がある。

次に、レーザーの必要なパワーだが、これを求めるために、図 2.1.3 の光会合レートにおける各パラメータを以下に示す。

$$T = 120 (\mu\text{K})$$

$$n_{at} = 3 \times 10^{10} (\text{cm}^{-3})$$

$$I = 10 (\text{W}/\text{cm}^2)$$

$$A = 0.03$$

この条件において、 $\Delta_L = -3.27 \text{ cm}^{-1}$ のときに、光会合レート  $R_{PA}/A = 10 (\text{s}^{-1})$  となることがグラフから読み取れる。一方、我々の実験系におけるパラメータを以下に仮定する。

$$T = 30 (\mu\text{K})$$

$$n_{at} = 1.6 \times 10^{11} (\text{cm}^{-3})$$

$$r = 0.5 (\text{mm}) \quad (r \text{ はビーム径を示す})$$

これらの値をもとに、光会合レートの式(2.4)を用いて必要なレーザーのパワーを求めると、約  $200 \text{ mW}$  であることが分かった。また、このときの光会合レートは

$$R_{PA}/A = 1081 (\text{s}^{-1}) \text{ となった。}$$

以上で、本研究における光会合用レーザーの開発において必要なレーザーの波長とパワーが決定した。

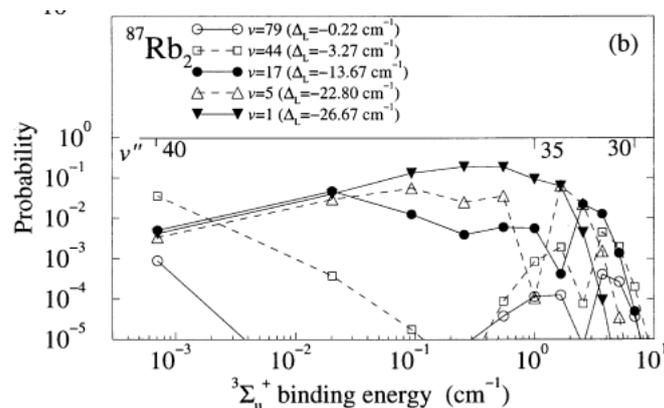


図 2.1.4 :  $^{87}\text{Rb}$  における分子の結合エネルギーと振動の分布の関係[6]

参考として図 2.1.4 に、 $^{87}\text{Rb}$  における分子の結合エネルギーと振動の分布の関係を表したグラフを示す[6]。このグラフより、先ほど波長を決定する際に使用した、原子の共鳴周

波数からの離調 $\Delta_L = -3.27 \text{ cm}^{-1}$ という値が、分子の振動準位 $\nu = 44$ に相当することが分かった。

また、振動準位が分かったことで、振動準位 $\nu = 44$ の極低温分子における原子核間距離を特定することができる。 $\nu = 44$ の極低温分子の原子核間距離は約 $44.5 \text{ \AA} \sim 4.5 \text{ nm}$ である[6]。一方で、我々の実験における原子密度が $n_{at} = 1.6 \times 10^{11} (\text{cm}^{-3})$ であることから、原子核間距離は原子密度の $-1/3$ で求められるので、計算すると、約 $1.84 \mu\text{m}$ になる。これより、極低温分子における原子核間距離が、2原子の状態における原子核間距離と比較して非常に小さい値であることが分かり、極低温分子が生成されにくいことが示せる。

## 2.2 レーザー冷却

この項と次項にて、光会合に用いるための原子の冷却とトラップの原理を述べる[7][8][9]。

### 2.2.1 原子がレーザーから受ける力

ここでは2準位系を考える。図2.2.1は、基底状態にある原子にレーザーを当てた時の、エネルギーの遷移を示した図である。

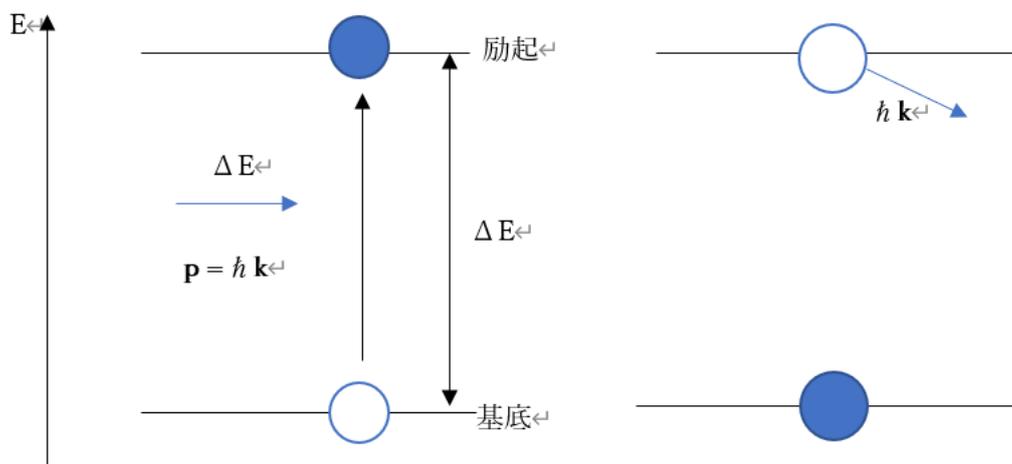


図 2.2.1:原子にレーザーを当てた時のエネルギー遷移図

基底状態と励起状態間のエネルギー差 $\Delta E$ に対応する周波数のレーザーを当てると、原子が光子を吸収して励起状態となる。原子は励起されると、吸収した光子を放出することで基底状態に戻る(自然放出)。自然放出では、光子の放出は等方的なので、これによる原子の運動量の変化は平均してゼロと考えることができる。以上より、運動量の変化はレーザーによる光の吸収の分のみを考えればよく、レーザーの光が進む方向に原子は力を受ける。これを輻射圧といい、以下の式で表される。

$$F_{scatt} = \hbar k \frac{\Gamma}{2} \frac{\Omega_R^2/2}{\delta^2 + \Gamma^2/4 + \Omega_R^2/2}$$

この式における各パラメータは以下に示す。

- ・  $\Gamma$  : 自然放出スペクトルの半値全幅
- ・  $\Omega_R$  : 2準位間の存在確率のラビ周波数
- ・  $\delta$  : レーザー周波数と2準位間の共鳴周波数の離調

### 2.2.2 ドップラー冷却

前項で、レーザーによって生じる力を示した。ここから原子に光を当てていくのだが、実際には原子は速度を持った運動をしているので、それを考慮する必要がある。

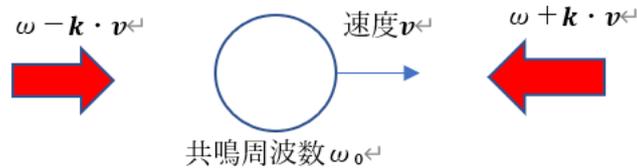


図 2.2.2: 原子の減速

図 2.2.2 は、1次元系において、速度  $v$  を持つ共鳴周波数  $\omega_0$  の原子に対して、正負の方向から同じ周波数  $\omega$  のレーザーを当てている様子を示している。このとき、それぞれのレーザーの周波数は、原子から見た相対値  $\omega \pm \mathbf{k} \cdot \mathbf{v}$  と見なせる ( $\pm \mathbf{k} \cdot \mathbf{v}$  をドップラーシフトという)。2つのレーザーのうち、原子に対向する方のレーザーの周波数を低くしておくことで、 $\omega_0$  により近い周波数で原子に当てることができるため、吸収が起きやすくなり、原子が受ける力も大きくなって減速される。原子の運動エネルギーは速度依存であるため、減速されれば運動エネルギーも減少し、温度が下がるということである。

### 2.3 磁気光学トラップ(MOT)

ドップラー冷却によって冷却された原子を空間的に集めるのが磁気光学トラップの役割である。

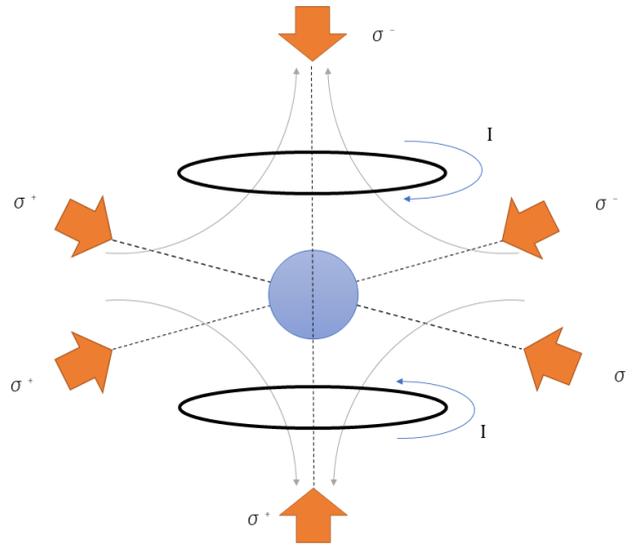


図 2.3.1 : MOT の模式図

図 2.3.1 は、MOT の模式図である。2つのコイルにそれぞれ逆向きの電流を流すと、原点  $O$  に対して対称に、コイルの中心から離れるほど強度が大きくなる磁場ができる(四重極磁場)。図中にて矢印で表記したものが磁場である。この磁場に対して、三軸のそれぞれ正負の方向から対向するように円偏光のレーザーを入射させる。この6つのレーザーと不均一磁場によってゼーマン効果が発生し、原子のエネルギー準位が分裂する。図 2.3.2 がそのエネルギー準位を示した図である。

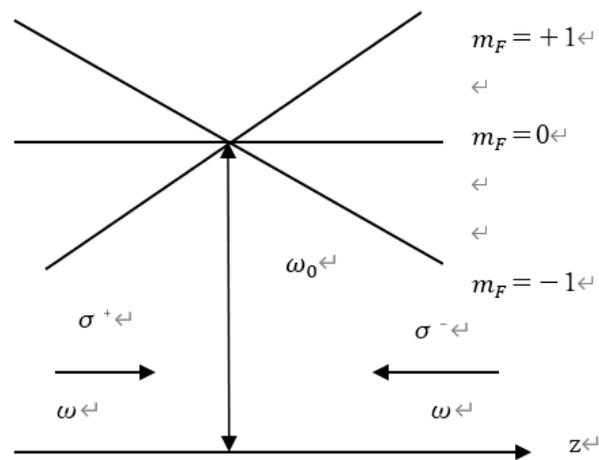


図 2.3.2: MOT における磁場による原子のエネルギー準位

円偏光の回転方向によって原子が遷移する磁気副準位  $m_F$  が決まるという法則を、円偏光による遷移選択則という。図 2.3.2 においては、円偏光の回転方向が  $\sigma^+$  のときは  $\Delta m_F = +1$

に、 $\sigma^-$ のときは $\Delta m_F = -1$ の準位に遷移する。これにより、原子は常に $m_F = 0$ の方に向かう、つまりは図 2.3.1 におけるコイルの中心に向かう力を受け、中心にてトラップされる。

### 3.実験

前述の原理の項にて、光会合において必要なレーザーの波長とパワーの値を決定した。レーザーの開発とこれらの目標値を得るために、大きく分けて以下の手順で実験を行った。

- ・ ECDL(外部共振器型半導体レーザー)の作製
- ・ 波長の安定化
- ・ レーザーのパワーの増幅
- ・ 実験系の作製

この項では、以上の順で説明を行っていく。

#### 3.1 ECDL(外部共振器型半導体レーザー)の作製

##### 3.1.1 原理

ここでは、光会合を行うために使用する、波長 780nm の ECDL について述べる。

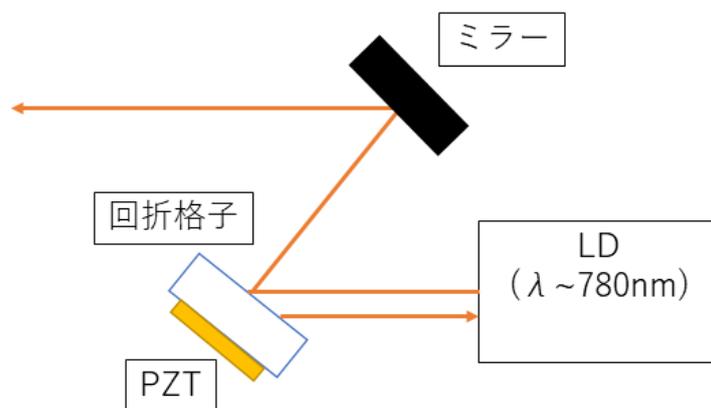


図 3.1.1:ECDL の概形図

図 3.1.1 に ECDL の簡潔な仕組みを示した。外部電源から電流を LD(レーザーダイオード)に流すことでレーザーが発射される。直後に入射するコリメーションレンズによってレーザーを平行にしたのちに、回折格子に入射する。ここで、レーザーが 0 次光と 1 次光に分けられる。1 次光は図にあるようにもどり光として LD に戻る。このもどり光が発生することで回折格子と LD 間が共振器の役割となる。回折格子の角度を調整することで、レ

レーザー発振を起こす波長を大きく変えることができ、回折格子の後ろに取り付けた PZT 素子の大きさが変化することで波長を微調整することができる。

まず、この ECDL の作製を行った。図 3.1.2 に作製したものを示す

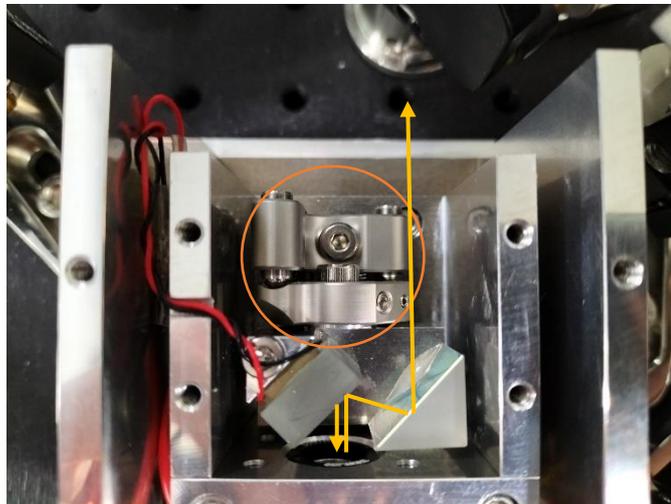


図 3.1.2:作製した ECDL の内部構造

図 3.1.2 において、黄色線で示したものが、レーザーの光の経路である。この経路の始点にあるものがコリメーションレンズであり、これを前後に位置を調整することで、ビームの形を平行にすることができる。平行にしたレーザーのビーム形をカメラで観測したものが図 3.1.3 である。

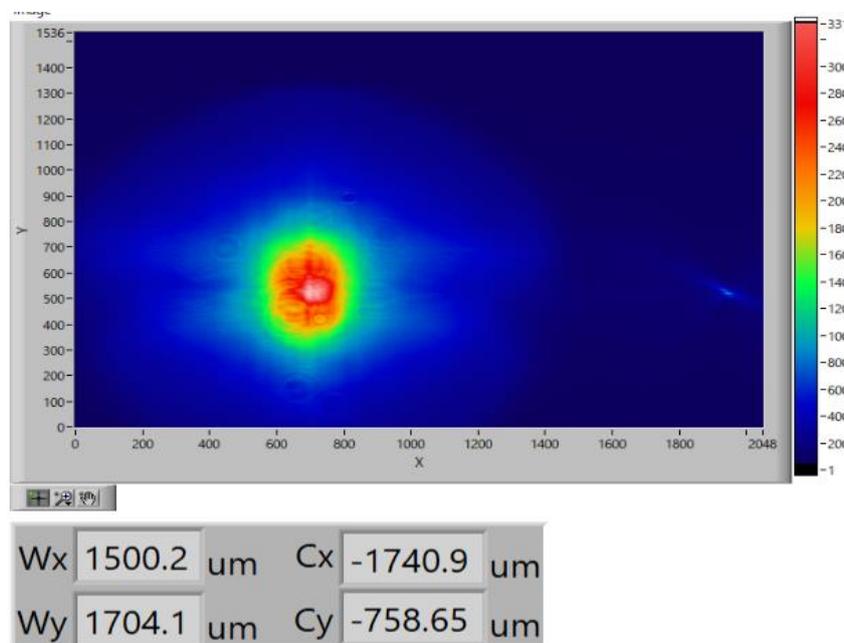


図 3.1.3 : カメラで観測したレーザーのビーム形

$(W_x, W_y)$  はビーム形の大きさを、 $(C_x, C_y)$  はビームの中心座標を示す(ピクセルサイズで表記)。

図 3.1.2 において、オレンジ線で囲んだところが、回折格子とミラーの保持用台である。この保持用台のねじを回すことで回折格子の角度を調整することができる。このねじを回して回折格子の縦軸の角度を調整することで発振を起こす波長を変えることができ、横軸の角度を調整することで、得られるレーザーのパワーを最適化することができる。

### 3.1.2 レーザーのパワーの測定

次に LD に電流を流してレーザー発振を発生させ、レーザーのパワーの電流特性を測定し、レーザー発振が起き始める電流のしきい値(threshold)を特定した。測定結果が図 3.1.4 である。

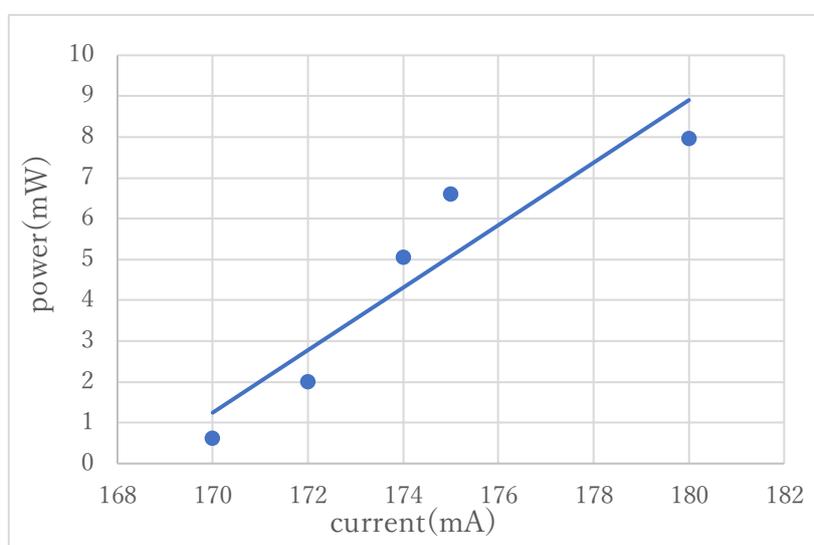


図 3.1.4: レーザーのパワーの電流特性

図 3.1.4 では、LD に流している電流を current と表記してある。

電流が 170mA のときにはパワーが 1mW を下回っており、これより電流をあげることで発振が発生した。よってこの時点での電流の threshold が 170mA であることが分かった。また、得られたパワーは 180mA のときに 8mW 得られた。

次に、より大きなパワーを得るために、threshold を下げようと試みた。そこで行ったが、レーザーの偏光を変えることである。今回用いた回折格子の回折効率が、偏光に依存するというものであった。回折効率を上げることで、回折格子によって発生する LD へのもどり光が大きくなり、より小さい threshold で発振が起こるようになる。図 3.1.5 に今回使用した回折格子の回折効率を示す[9]。

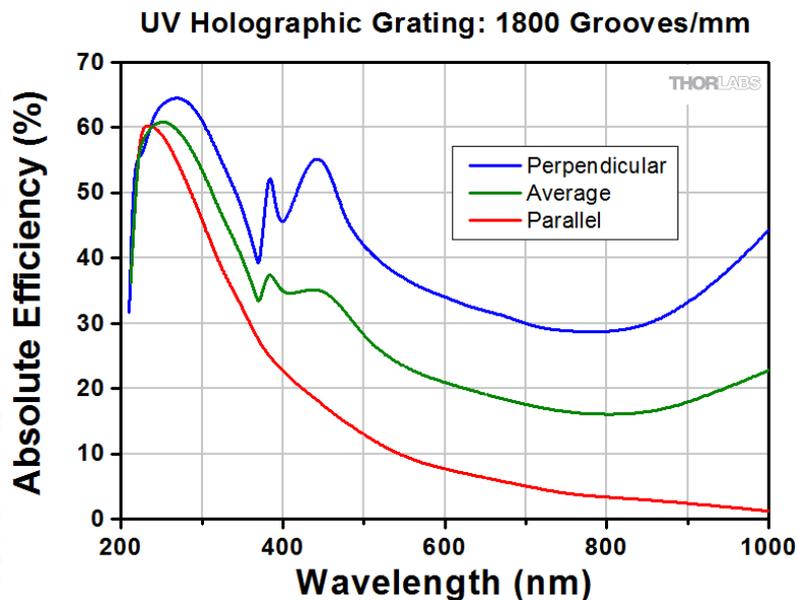


図 3.1.5:回折格子の回折効率

このグラフの波長 780nm のところを見ると、Parallel(横偏光)の回折効率が約 3%に対して、Perpendicular(縦偏光)のときの回折効率は約 30%であった。よって偏光を縦に変えることに決定した。偏光を変えるために、LD を 90° 回転させた。この状態で、再びレーザーのビーム形をカメラで観測したものが図 3.1.6 である。

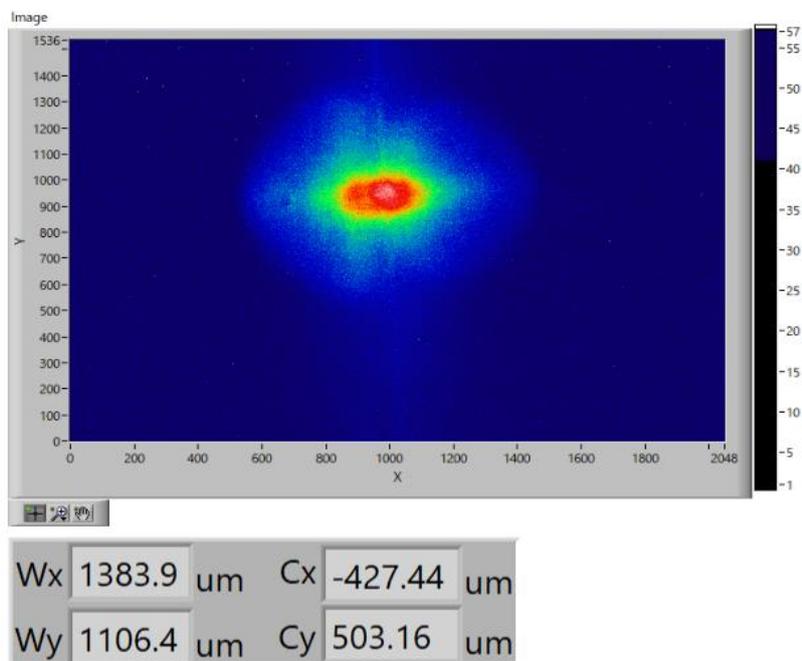


図 3.1.6 :縦偏光に変えた後のレーザーのビーム形

ビーム形を観測した後、再びパワーの電流特性を測定した。測定結果を、偏光を変える前の測定結果と比較したものが以下に示す図 3.1.7 である。

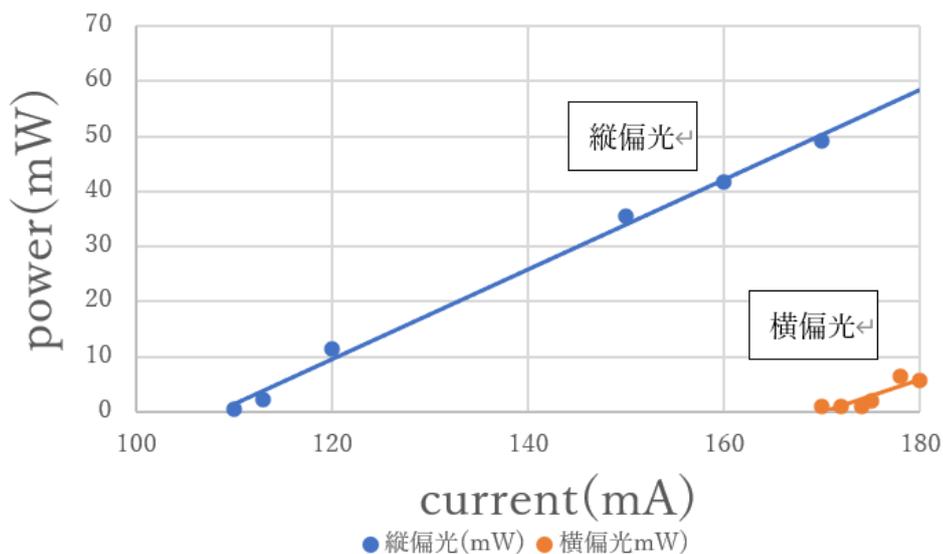


図 3.1.7：偏光を変えた後のレーザー発振の電流特性

この図を見てわかるように、偏光を変える前と比較して小さい電流で大きなパワーを得られた。値を示すと、電流 170mA のときに約 50mW のパワーを得られた。また threshold についてだが、113.67mA に下がった。

### 3.1.3 温度コントローラ

ECDL は、流している電流や実験環境の影響で温度が変化している。温度が変化するとレーザーの出力や周波数にも影響が生じ、安定しなくなってしまう。そこで用いるのが温度コントローラである。図 3.1.8 に、今回作製した温度コントローラを示しておく。

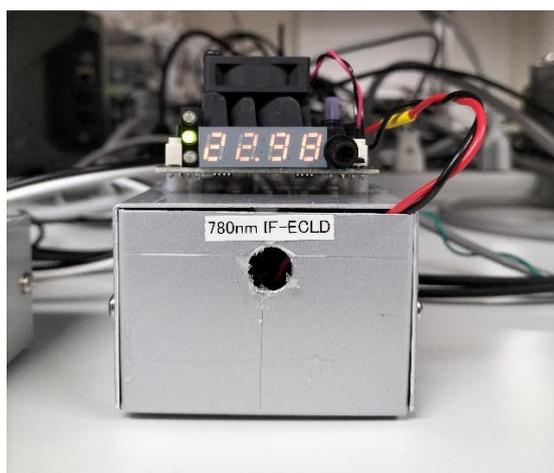


図 3.1.8：作製した温度コントローラ

作製に使用した温度コントロール回路とスイッチング電源の型番を以下に示す。

- ・温度コントロール回路：WTC3293-14
- ・スイッチング電源：RPS-30-7.5

原理としては、まず外部電源から 100V の電圧を受ける。この 100V という電圧を、図 3.1.8 の箱内部のスイッチング電源で出力 15V に変換させる。その後、箱の蓋に取り付けた温度コントロール回路から、ECDL に取り付けたペルチェに電流を流す。電流が流れてこのペルチェの温度が上下することで、ECDL の温度がコントロールされるということである。本実験では、ECDL の温度を 23.00°C で安定させるよう設定したうえで行っている。

## 3.2 波長の安定化

### 3.2.1 原理

3.1 で ECDL を作成したのだが、レーザーの波長は時間とともに変化する。これでは光会合を行うにあたって、必要な波長で原子に光を当てることができない。ゆえに波長を安定化させる必要がある。波長を安定する主な方法として飽和吸収分光という手法があるが、本実験では、 $^{87}\text{Rb}$  原子の共鳴周波数に対して大きく離調をとって波長を決定したためにこの手法を用いることができない。ゆえに今回は波長計ロックという手法を用いる。波長計ロックを用いることで、波長の値を任意に設定して安定化させることができる。

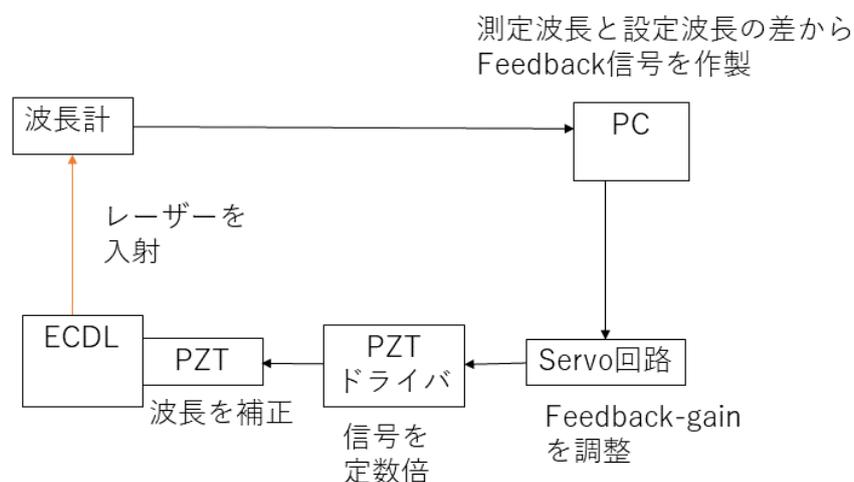


図 3.2.1:波長計ロックの回路図

図 3.2.1 に波長計ロックの回路図を示した。レーザーを波長計に入射して波長測定を行い、計測された値が PC に表示される。ここで、計測された波長と欲しい波長の値の差が生じると、PC 内のアナログボードからその差を補正するフィードバック信号が送信される。その後、このフィードバック信号が servo 回路に送られて信号が定数倍され、PZT ドライバを介して ECDL に設置された PZT 素子に送信される。PZT 素子に信号が入ること

で PZT 素子の大きさが変化することで波長が補正される。以上が波長計ロックの概要である。ここで、今回作製した PZT ドライバの写真を示す。



図 3.2.2：作製した PZT ドライバ

作製に使用した PZT ドライバの素子を示す。  
 松定の ピエゾドライバー HPZT-0.15PB(0.3W)

### 3.2.2 servo 回路

前項で説明した波長計ロックにおいて、アナログボードから来たフィードバック信号を変換する役割を担っているのがこの波長計ロックにおける servo 回路である。

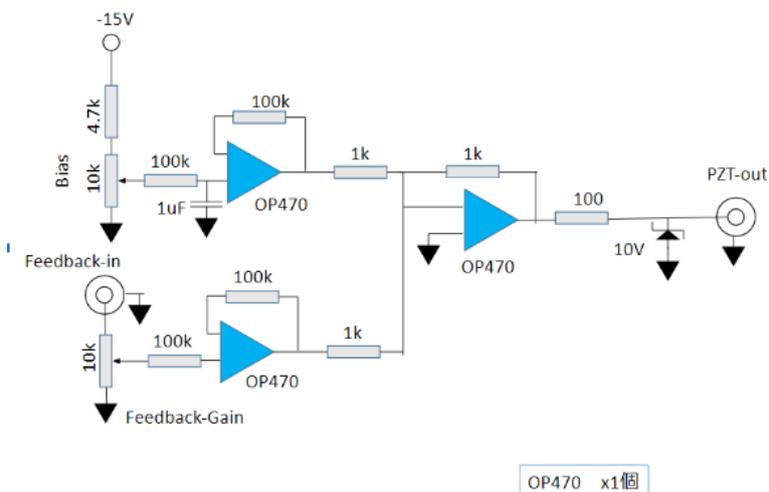


図 3.2.3:波長計ロックの servo 回路図

図 3.2.3 に波長計ロックの servo 回路の回路図を示した。図中の Bias と Feedback-gain という部分は可変抵抗になっている。Bias の可変抵抗を回すことでレーザーの波長を調節することができ、Feedback-gain の方を回すとフィードバック信号の伝達速度を調節でき

る。図中左上の-15V というのは外部電源である。3つ配置されている青い三角形の素子がオペアンプである。オペアンプには、前後の抵抗のつなぎ方に応じて、入力された信号を反転ないしは非反転して増幅させる役割がある。

PC 内のアナログボードから送信されたフィードバック信号が、Feedback-in から servo 回路に入力されると、オペアンプにて非反転増幅される。外部電源からくる電流も同様に非反転増幅される。この2つの合成信号が3つ目のオペアンプで反転増幅されて PZT-out の端子から PZT に送られる。これが servo 回路の原理である。本実験ではこの回路を作製し、波長計ロックに使用した。

### 3.2.3 波長の測定

レーザーを光ファイバーに通し、波長計にてロックをせずに測定したものが図 3.2.4 である。

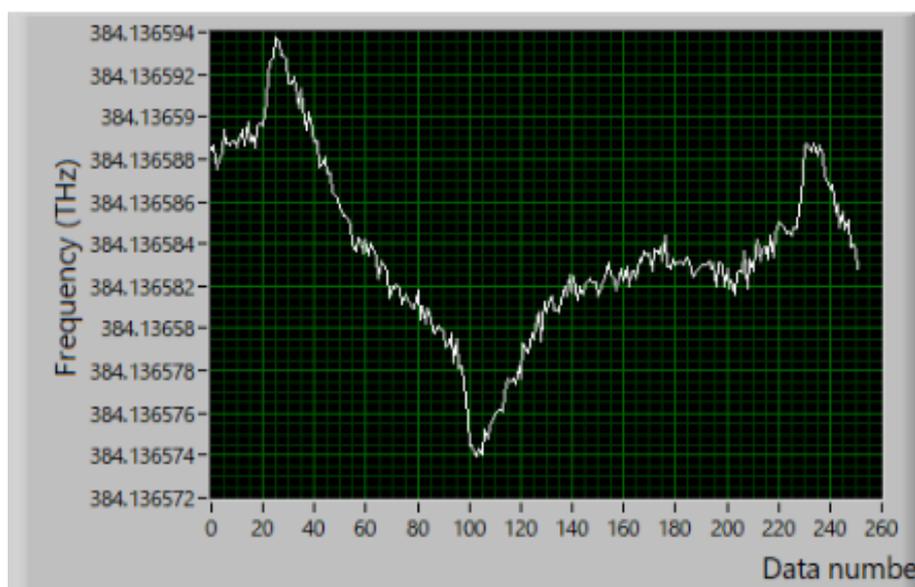


図 3.2.4:波長の測定結果

波長は周波数(単位は THz)として、横軸の Data number を測定時間として記録されている。この測定結果において、測定された波長の最大値と最小値の幅を取ると、およそ 20MHz であった。光会合における分子の自然幅は 12MHz であるため、この状態では波長が安定していないことが分かる。この状態から、servo 回路における Bias の可変抵抗を動かして、波長計ロックが可能になる値まで波長を調節し、ロックをかけて再び測定した。それが図 3.2.5 である。

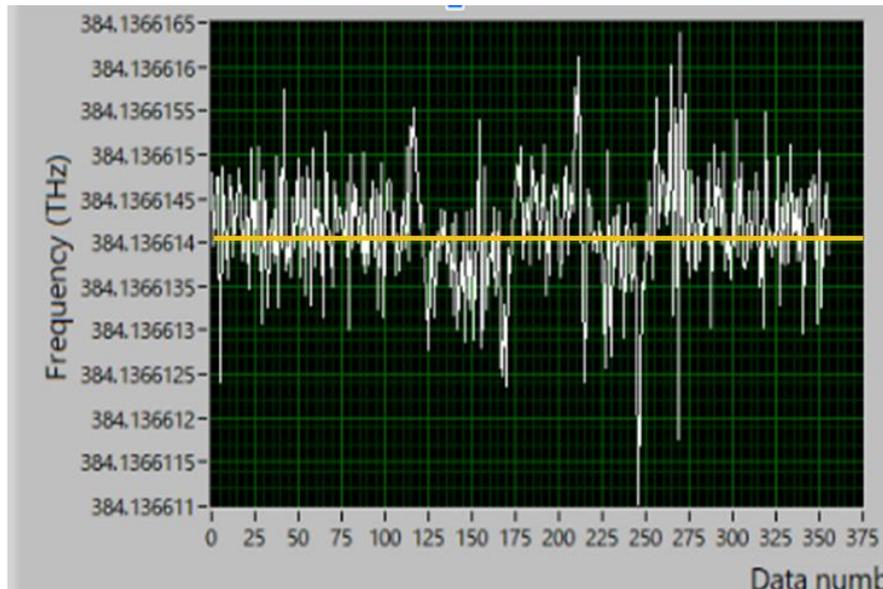


図 3.2.5:波長計ロック時の測定結果

図中の黄色線が、設定波長の値を示している。今回の測定では、Bias の可変抵抗で波長を調整した結果、測定波長と設定波長の値の差が約 50MHz 以内である時に、波長計ロックによる安定化を行うことができた。

図 3.2.5 においてもロック前と同様に、波長の最大値と最小値の幅を取ると、約 5.5MHz であった。これより、波長計ロックにより、分子の自然幅 12MHz と比較しても十分安定化できたことが分かる。この状態を本実験で用いるものとする。

### 3.3 パワーの増幅

レーザーのパワーの値は 200mW 欲しいということであった。ECDL の作製の時点では、50mW のパワーが得られた。しかし、これでは光会合には足りないので増幅する必要がある。このために行うのが TA(テーパードアンプ [Tapered Amplifier])を用いたパワー増幅である。

### 3.3.1 原理

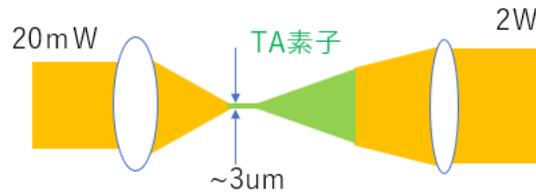


図 3.3.1:TA 増幅の概要図

この項で、TA 増幅の原理を説明する。

図 3.3.1 に、TA 増幅の概要図を示した。TA 素子は、テーパー型(入射光に対してビーム形が広がって出力される)の半導体レーザーである。この TA 素子にはエリアルコートが施してあるため、電流を流すだけでは発振しない。そこで、種光としてレーザーを入射することで、そのレーザー光によって誘導放出が発生し、出力されるパワーが増幅される。これが TA 増幅である。本実験では ECDL のレーザー光を種光として用いることでパワーの増幅を行う。図 3.3.2 に今回作製した TA の写真を示す。

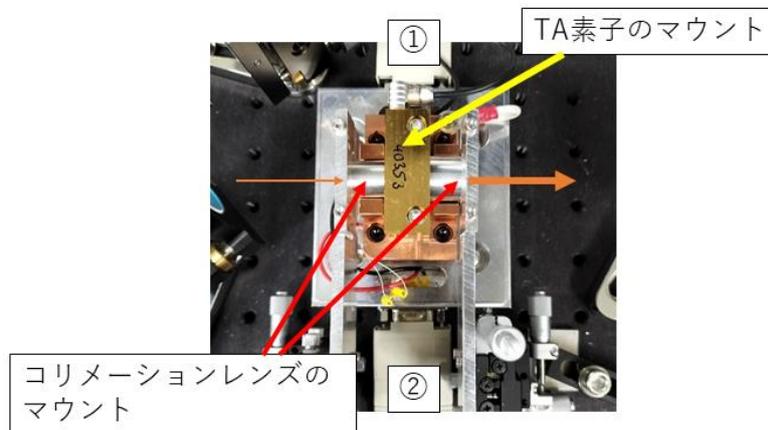


図 3.3.2 : 作製した TA

オレンジ線で示した矢印の方向に、レーザーが入射し、パワーが増幅されて出力される。金色の箱状のマウントの中に TA 素子を取り付けられており、これに対して光を当てる。図中にて①で示したケーブルが、TA に流す電流の電源につながっている。②で示したケーブルは、TA の温度コントローラにつながっていて、サーミスタで測定する TA の温度を表示、制御する。TA は熱に敏感であり、電流を流すことによる過熱によって TA が壊れるのを防ぐ役割が温度コントローラにはある。TA 作製に使用した TA 素子、温度コントローラ、電源を以下に示

す。

TA 素子：TA-0780-2000-DHP-F Ser No.40353

温度コントローラ：TED200C

電源：LDC240C

コリメーションレンズ(入射側出力側で同じ)：A230TM-B (f=4.51mm)

TA に外部電源から電流を流し、レーザーの光をコリメーションレンズに入射して集光させ、TA 素子に当てる。すると TA から出力されるレーザーのパワーが増幅される。しかし、この TA 素子は非常にサイズが小さい(~3um)ので、コリメーションレンズの焦点距離と TA 素子からの距離を調整することで、TA 素子に入射するときのビームの大きさの微調整を行う。さらに、ビームの TA 素子に対する入射角度を調整することで、出力されるレーザーのパワーを最適化することができる。

### 3.3.2 パワーの増幅の測定

最初に、サーミスタの抵抗値を、温度コントローラにて 10.7kΩ(TA の温度は 23°C)に設定した。TA に入射するレーザーのパワーを 20mW に設定し、入射側のコリメーションレンズの焦点距離と、前後の位置を変えることで、TA 増幅を試みた。その結果、焦点距離 f=4.51mm のコリメーションレンズを用いたときに、出力されるレーザーのパワーが最適化された。このときの TA に流れる電流と出力されるパワーの関係を測定した。その測定結果を図 3.3.2 に示す。

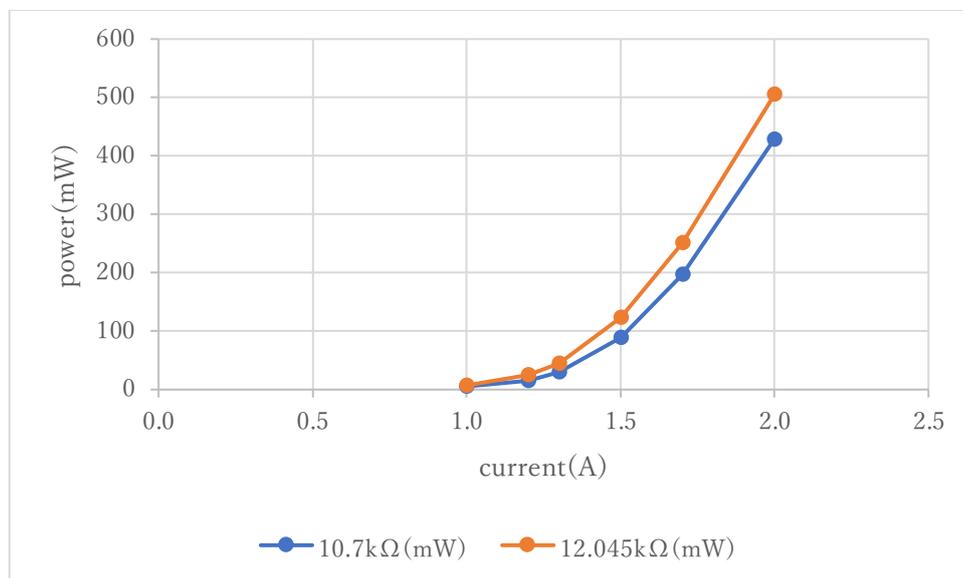


図 3.3.3:TA からの出力の電流特性

サーミスタの抵抗値と TA の温度の換算式を以下に示しておく。

$$R = R_{25} \exp \left[ B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{298} \right) \right] \quad (3.1)$$

式中の各パラメータを以下に示す。

$R$ : TA の温度  $T$  における抵抗( $\Omega$ )

$T$ : 温度(K)

$R_{25}$ : TA の温度  $25^{\circ}\text{C}$ における抵抗値( $\Omega$ )

$B$ : サーミスタ(温度計)の B 係数(今回は  $3250\text{K}$ )

また、今回使用した TA 素子のスペックシートを図 3.3.4 に示す。

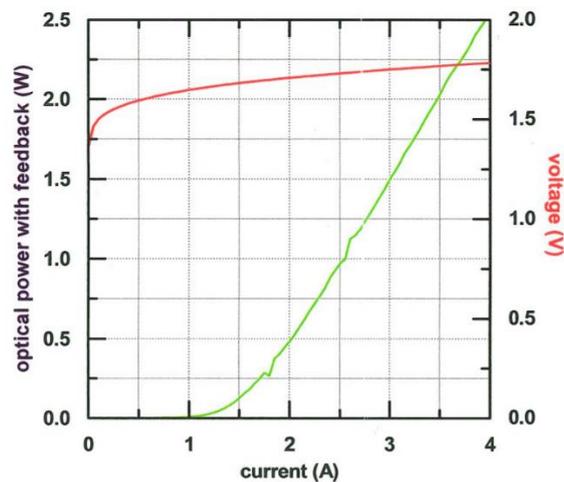


図 3.3.4 : 使用した TA 素子のスペックシート

今回用いた TA 素子は、スペックシートにおいては、TA に流す電流が  $2.0\text{A}$  のときにおよそ  $500\text{mW}$  のパワーが得られるものがあった。しかしサーミスタの抵抗値が  $10.7\text{k}\Omega$  のときには  $2.0\text{A}$  において  $429\text{mW}$  とこの値には届いていなかったために、 $12.045\text{k}\Omega$  (TA の温度は  $20^{\circ}\text{C}$ ) に抵抗値を上げて再び測定を行った。その結果、 $2.0\text{A}$  において  $505\text{mW}$  のパワーが得られ、スペックシートと同じ結果が得られた。

次に、次項で示す実験系において、TA 後に様々な装置に通すことでパワーが減少することを想定して、TA からの出力を  $2.0\text{W}$  にできるかどうかを、TA に流す電流をさらに上げることで調べた。この際、測定に使用するパワーメーターが  $1.1\text{W}$  以上のパワーを測定できないということだったので、ND フィルタを付けてパワーメーターに入射するパワーの値を落として測定を行った。その測定結果が以下の図 3.3.5 である。

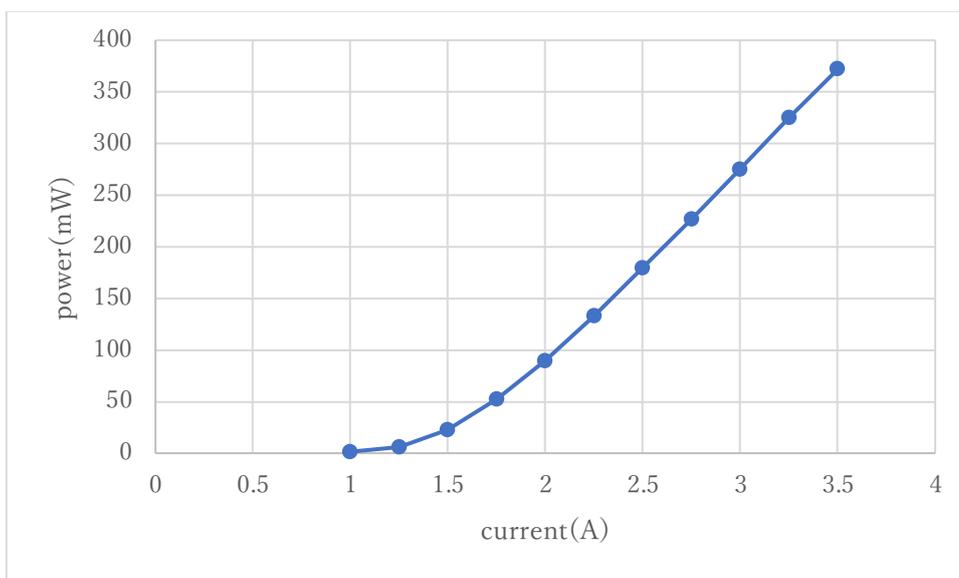


図 3.3.5: パワーを落とした時の出力の電流特性

また、この測定結果をもとに、図 3.3.2 における ND フィルタを通していないときの値との比から、パワーの値を換算したものが以下に示す図 3.3.6 である。

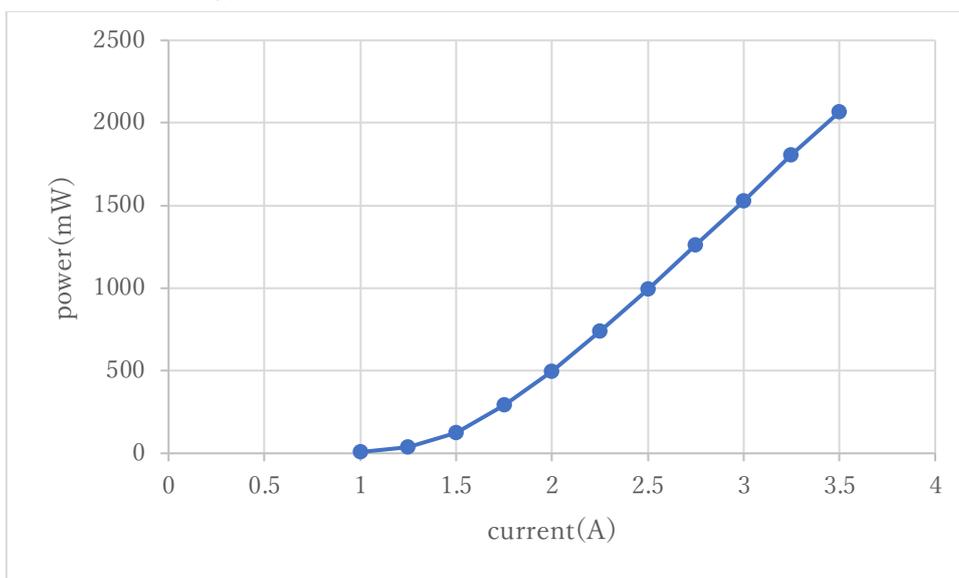


図 3.3.6: 換算後の出力で電流特性

図 3.3.6 から、TA に流れる電流が 3.5A のときに、パワーが 2.0W に達していることが確認できた。これにより、TA 前で 20mW あったレーザーのパワーを 2.0W に増幅することに成功した。

### 3.4 増幅後の光学系

ここまでの実験によって、ECDL の作製、波長の安定化、レーザーのパワーの増幅を達成した。これらを用いて、冷却原子実験に向けた光学系を作製した。図 3.4.1 にその実験系の光路図と作製したものの写真を示す。

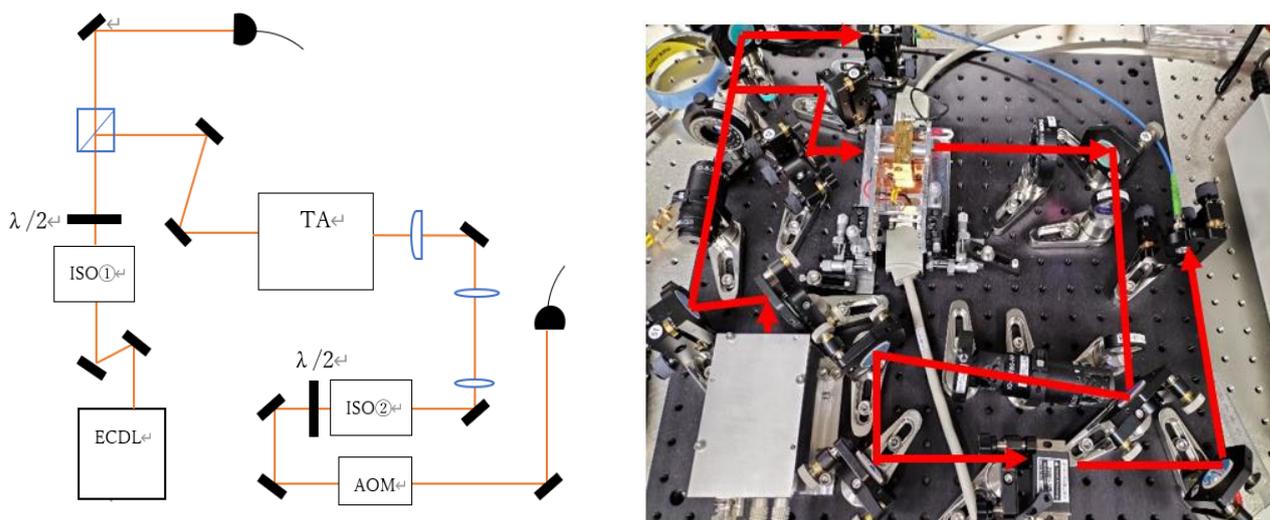


図 3.4.1：光学系の光路図と実際の光学系の写真

光路図において、「ISO」と示したものはアイソレータである。各アイソレータの詳細について以下に示す。

[アイソレータ①]

型番：IO-5-780-VLP

得られた透過率：47.2%

[アイソレータ②]

型番：IO-3-780-HP

得られた透過率：68.9%

アイソレータ①に通した後に PBS に入れ、波長計に入れて波長測定に用いるビームと TA に入れてパワーを増幅させる光に分けた。TA 後にはレンズを 3 種類置いた。種類はレーザーが入射する順にシリンドリカルレンズ( $f=100\text{mm}$ )、平凸レンズ( $f=150\text{mm}$ )、平凹レンズ( $F=-50\text{mm}$ )である。これらのレンズは、TA から出力される際に横に広がったビーム形を小さくし、再び平行に直す役割がある。ビームが平行に直った時の平凸レンズと平凹レンズの距離は約  $10\text{cm}$  であった。その後アイソレータ②に通した後に AOM(音響光学変調器)に通した。今回使用した AOM の詳細を以下に示す。

型番:AOMO 3100-125

波長：380~850nm

中心周波数：100MHz

AOM は、オシレーターから RF アンプを経由して音波を受信し、それを入射してきたレーザーに当てることでレーザーを回折させて周波数をシフトさせることができるので、光のスイッチとして用いている。レーザーを AOM に通すと、図 3.4.2 で示すレーザー光の回折が観測された。

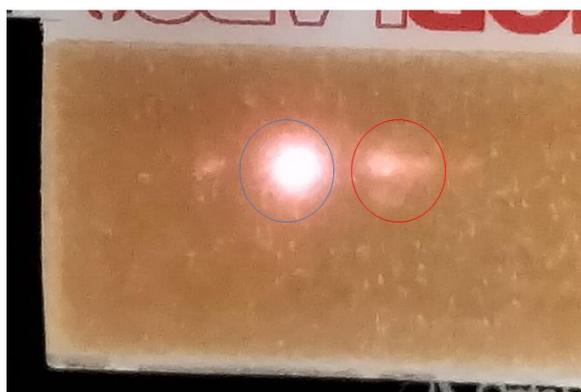


図 3.4.2：回折されたレーザー光

今回の実験では、AOM に通したところ、出射したレーザーが 0 次光(図中赤丸)と -1 次の回折光(図中丸)に分かれていることが確認された。よって、AOM にて -100MHz の変調が起きていることになる。また、AOM 前と通した後における、レーザーの透過率と回折率を計算したところ、透過率は 93.6%、回折率は 84.04%であった。

AOM に通した後、レーザーを光ファイバーに通してファイバー後のレーザーのパワーを測定した。このファイバーを通して出てきたレーザーを極低温原子に当てることになる。その結果、ファイバー前のパワー 11.5mW に対してファイバー後で 6.40mW 得られ、ファイバーのカップリング効率は約 56%となった。また、TA から出力されるパワーを 20mW に調整してあったので、これとファイバー後のパワーの比が約 32%であることが分かった。この状態で TA からの出力を 2.0W にしたときのファイバー後のパワーの測定を行おうとしたのだが、ファイバーがレーザーのパワーに耐えられず焦げてしまったために測定値が得られなかった。よって、アイソレータ②の透過率、AOM の透過率と回折率、ファイバーのカップリング効率をもとに、TA から出力されたパワーが 2.0W のときのファイバー後のパワーを見積もったところ、約 600mW 得られる予想となった。以上より、当初の目標であった光会合に必要なレーザーのパワー 200mW に対して十分なパワーが得られた。

#### 4.まとめ

本研究では、光会合による極低温分子生成に向けたレーザー開発を目的としていた。光会合に必要な ECDL、温度コントローラ、PZT ドライバ、servo 回路、TA を作製し、これらを用いて光学系を組んだ。その結果、レーザーの波長を安定化し、十分なパワーを得られた。よって光会合に必要な準備が完了し、分子生成を行うことができる状況である。

今後の展望としては、まずは実際に光会合を発生させて極低温分子生成を行う。今回は理論値のみの考察となったので、実験を行うことで分子生成の最適化を目指す。その後は生成した極低温分子を用いた実験を進めていきたいと考えている。

## 参考文献

- [1] M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman, and E. A. Cornell, Science 269, 198(1995)
- [2] Jun Kobayashi, Atsushi Ogino, Shin Inouye, Nature Communications 10, 3771 (2019)
- [3] J. Hu et al., Science 358 1078-1080 (2017)
- [4] H.R. Thorsheim, J. Weiner, P.S. Julienne, Phys. Rev. Lett. 58, 2420 (1987)
- [5] 反保 尚基 「イッテルビウム光格子系における 各サイトの原子数測定に向けた光会合分光」東京工業大学卒業論文(2015)
- [6] A. Fioretti, C. Amiot, C.M. Dion, O. Dulieu, M. Mazzoni, G. Smirne, and C. Gabbanini Eur. Phys. J. D 15, 189–198 (2001)
- [7] 久我隆弘 「量子光学」朝倉書店(2003)
- [8] 岡田瑛理 「Rb 原子気体の高速 BEC 生成に向けたレーザー冷却実験」北海道大学卒業論文(2021)
- [9] Christopher J. Foot 「Atomic Physics」OXFORD UNIVERSITY PRESS(2005)
- [10] THORLABS ホログラフィック回折格子、UV 反射型 GH13-18U  
[https://www.thorlabs.co.jp/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=25](https://www.thorlabs.co.jp/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=25) (2004)

## 謝辞

本論文の執筆にあたり、たくさんの方々に指導していただきましたこと、この場を借りて御礼申し上げます。

指導教官である小林先生には本研究及び論文執筆で大変お世話になりました。研究における理論にて理解が不足している点については何度も説明していただき、実験についても、難航した際には問題が解決できるよう一緒に考えていただきました。本論文の完成は小林先生のご助力あってのことです。本当にありがとうございました。

長谷川先生と村上先生には、卒論発表に際してアドバイスをいただきました。私一人では気付かなかった点も多く、大変参考になりました。

同じ冷却原子グループの奥田さんには、日々の研究や勉強会の場でお世話になりました。論文執筆や卒論発表の資料作成においても、実際に作成した経験をもとに多くのアドバイスをいただきました。

量子グループの梅村さんには、共同の勉強会にて多く学ばせていただきました。レーザーの基礎を教えてくださいましたし、普段の研究への熱意にも大変刺激を受けました。

天文グループの須藤さん、大平さん、浅野さんにはゼミでお世話になりました。研究の内容を大変興味深く拝聴させていただきました。

同期の角田君、佐藤君、鄭君、高橋君とは、共に学ぶ中で非常に充実した研究室生活を送らせていただきました。御礼申し上げます。

改めまして、私の家族やその他友人、本研究を支えてくださった全ての方へ深謝いたします。