

狭線幅遷移を用いたリチウム原子レーザー冷却のための

323nm 光源の開発

電気通信大学 情報理工学部先進理工学科 4年 松田 優衣

1. 背景と目的

レーザー冷却により原子を冷却する手法としてドップラー冷却というものがある。ドップラー冷却とは原子の運動方向に対して正負の向きからレーザーを照射することにより、原子に輻射圧を与える。この輻射圧と呼ばれる力によって原子の運動量を減少させる。即ち冷却させるのである。輻射圧は原子内部の電子が光を吸収し、遷移することで原子に作用する。ドップラー冷却には冷却できる限界温度が決まっており、原子の遷移に対して吸収することができる冷却光周波数の幅に比例する。この幅は自然幅と呼ばれ、冷却に用いる遷移によって異なっている。Li6 原子を冷却するために用いられる遷移は通常遷移波長 671nm (赤色)に相当し、当研究室でも MOT(磁気光学トラップ)として利用されている。2011 年先行研究においてこの遷移よりも自然幅の更に狭い遷移でのドップラー冷却が達成された。[1]この遷移はレーザー光の波長 323nm に相当する。

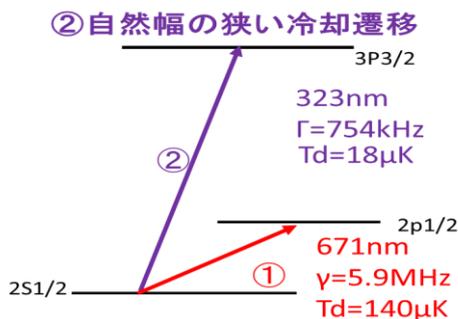


図 1：従来及び先行研究で用いられた Li6 の冷却遷移
先行研究での冷却限界温度は $60\mu\text{K}$ と、従来の 671nm の遷移での実際の限界温度 $300\mu\text{K}$ (MOT

使用時の限界温度。当研究室でもほぼ同程度の限界温度)を十分に下回る値であった。よってこの遷移を用いた冷却では、当研究室での Li6 原子のレーザー冷却の改良に非常に有用であることが見込まれる。しかし先行研究での冷却法は MOT として 323nm を利用するため、磁場や重力の影響やトラップの寿命の関係からドップラー冷却に最適な条件での冷却とは言いがたい。当研究室ではこの 323nm 光を実際に制作し Li6 原子の冷却用レーザーとして用いることを目標に掲げている。製作したレーザーは先行研究とは異なり、MOT ではなくシングルビームとして用いる。

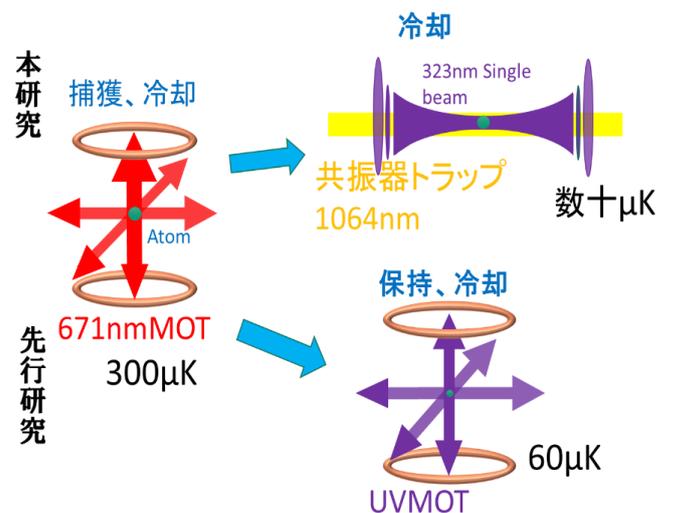


図 2：323nm 光の使用法および先行研究との比較
別のトラップ（ここでは共振器トラップ）によって原子を捕獲している状態で 323nm 光をシングルビームで挿入すれば磁場や重力の影響を受けず、323nm 光を冷却のためだけに使用することができるためよりドップラー冷却の最適な条件を満たしていると考えられるからである。先行研究程度、もしくはそれ以下まで冷却限界温度を下げるこ

ができると見込まれる。

本研究では、従来用いていた遷移より自然幅の狭い遷移の吸収波長にあたる、323nm の CW レーザーの製作を目的とする。323nm 光が目標のパワーで発振するよう各地点で目標パワーを定め、それを達成できるような機構を整備する。

2. 原理

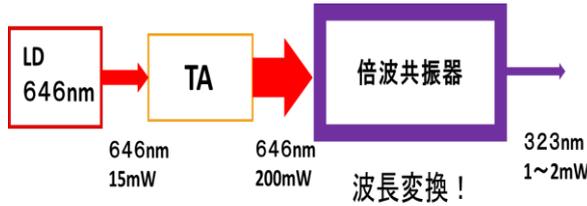


図 2 : 323nm 光発生の手法

323nm 光は半導体レーザーから 646nm を基本波として取り出し、倍波結晶に通すことで波長変換を行い 323nm の光を取り出す。目標パワーはどの程度であればよいか。ドップラー冷却に最低限要するパワーははっきりとはわからないが、飽和吸収強度を満たすパワー程度であれば輻射圧を受けるだけの吸収が充分行われると考えられる。各遷移における飽和強度は

$$I_{sat} = \frac{\pi h c}{3 \lambda^3 \frac{1}{\Gamma}} = 291.5 \cong 300 \text{ W/m}^2$$

飽和強度は単位面積あたりのパワーの形である。ここからこの飽和強度を満たすようなパワーの値を求めると、

$$P_{ideal} = I_{sat} \times S = 300 \times \pi \times (260 \times 10^{-6})^2 = 63.7 \times 10^{-6} \cong 60 \mu\text{W}$$

即ち 0.06mW 程度である。また、原子の遷移に常にレーザーの周波数が共鳴するよう飽和吸収分光を用いてロックを行う。これも飽和強度程度のパワーを要するため同じように 0.06mW 必要とすると、後はレーザーを原子の位置まで運ぶために用いる光学素子（ミラーやレンズ）による光の散乱や吸収を加味して全体に必要なパワーはおおよそ

1~2mW 程度である。図 2 の各素子を出た光の矢印の下に書いてある出力値は、目標 323nm 光のパワーを出力するための、レーザーの各地点におけるおおよその目標値である。半導体レーザーのパワーだけでは倍波に変換されたレーザーのパワーは非常に小さくなってしまいレーザー冷却には足りない。そこで、半導体レーザーから倍波共振器の間にテーパーアンプを挿入(以下 TA)、パワーを増幅させ、倍波共振器に挿入することで目標パワーの到達を目指す。

3. 実際の製作および結果

実際の製作を 646nm の半導体レーザーから順に説明する。646nm 光は中心波長 652nm 光の LD を用い、その発振波長成分から 646nm 光だけを回折格子を用いて LD の方へ回折させ、LD のへき開面を用いて共振させる。こうすることで 646nm 光を発振させることができる。このとき、646nm 光を回折させる回折格子の角度はブラッグ回折の公式から以下のように求めることができる。

$$2d \sin \theta = n \lambda$$

$$\sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{2d} \right) = \theta = 35.55$$

したがって LD の出射面に対する回折格子の角度はおおよそ 35° 程度である。以下の図は LD と回折格子の配置関係を表している。しかし、求めた角度を用いて回折格子を配置させただけでは 646nm 光は発振しない。これは中心波長に対して 646nm という波長があまりにも短波長であることが原因である。このため中心波長そのものを短波長側にシフトさせることが求められる。本研究では LD そのものをペルチェ素子で冷却することにより LD の中心波長を短波長側にシフトさせこの問題を解決した。

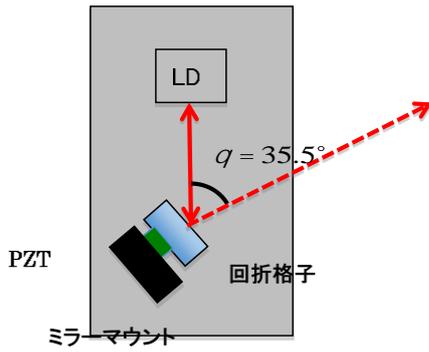


図 3：回折格子と LD の配置

表 1：646nm 光が途切れず発振したときの結果

波長	646nm
出力	18mW
温度	14℃

結果から 14℃まで温度を下げれば継続して 646nm の光を発振させることができるが、室温よりも大幅に低い温度であるため LD の機構全体に結露が生じてしまうことが懸念された。このため除湿機構を取り付け LD の箱の内部を常に湿度 10%程度に保った。

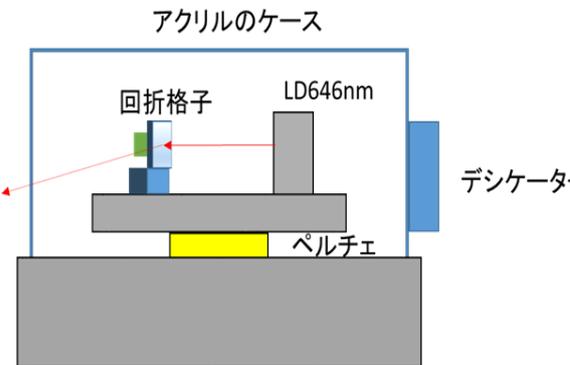


図 4：LD646nm 全体の機構

目標パワー近くまで出力させた 646nm 光を製作した TA に入射させ、その出力を 200mW 近くまで増幅させ、発振させた。増幅した光は倍波共振器に入射させ、323nm の光を出力させる。倍波共振器はミラー 4 枚を使った Bow-tie 型共振器とした。

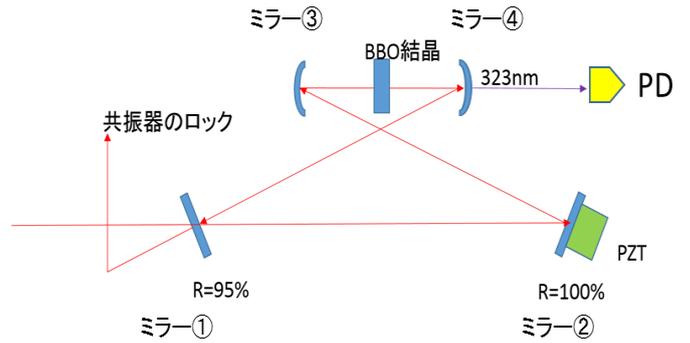


図 5：製作した Bow-tie 型共振器

ミラー① (反射率 95%)、②(反射率 100%)は平面鏡であり、ミラー③、④(透過率 0.0015%)は凹面鏡となっており、323nm の光を完全に透過するように加工されている。ミラー③と④の間に置かれた波長変換を担う BBO 結晶は銅製の結晶ホルダーによって支えられ、ペルチエ素子によって温調されている。この BBO 結晶を透過した光は 323nm 光に変換され倍波としてミラー④から出力される。基本波の 646nm はミラー④で再び反射され、ミラー①へと戻され、このサイクルを延々と繰り返す。一度の波長変換で出力された 323nm 光は延々と繰り返されるサイクルによって生み出されたそれぞれの 323nm の光と重なり合い強めあうことで、一度の出力と比べ非常に大きな出力となる。BBO 結晶は現在発注中であり、323nm 光の観測は間に合わなかった。そこで結晶を入れていない空の共振器に 646nm 光を共振製作させ、ミラー④の後ろから僅かに漏れた出力を PD を用いて観測した。機構全体で基本波がシングルモード発振を行うかを検証した。発振は PZT 素子に印加する電圧値を三角波の矩形で掃引することで共振器長をこの矩形で変化させる。こうして変化させた共振器調の中で波長の整数倍となる共振器長で共振が行われ、PD を用いてピークとして観測される。

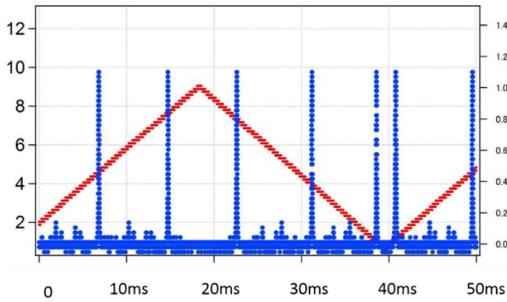


図 6：シングルモード発振の観測

図の赤い三角波は PZT の掃引する矩形、青い線は PD で観測された 646nm のスペクトルである。決まった周期で強いスペクトルが観測されており、シングルモード発振していることが分かる。この結果基本波はシングルモード発振を行うことが示され、波長変換された光がシングルモードであるための一つの条件を達成した。また共振器内部のパワーの増幅率を以下の操作を行うことで求めた。

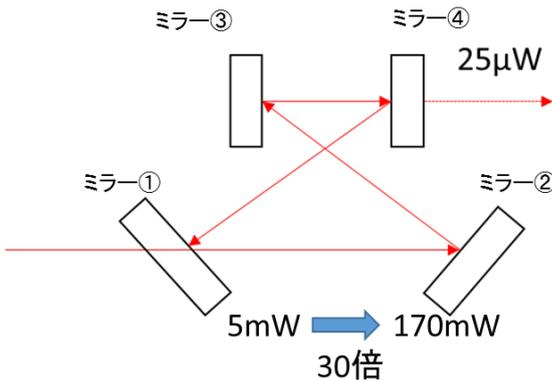


図 6：パワーの増幅率の測定

まず、646nm 光が共振器と共振するようミラーを設置し、その透過光スペクトルの強度が最大となるようにアライメントした。ミラー④を外し共振器内に入射した 646nm 光のパワーを測定した。結果は 5mW であった。次にミラー①をマウントから外し、ミラー④を再びマウントに取り付けた。これによってミラー④から 1 パスで透過した光のパワーを測定した。結果は 0.8μW であった。このことから

$$\frac{0.8 \times 10^{-6}}{5 \times 10^{-3}} = 1.5 \times 10^{-2} \%$$

より、ミラー④の透過率は $1.5 \times 10^{-2} \%$ であった。次

に共振器のミラーを再び共振が起こるようミラーマウントに取り付け、その透過光スペクトルのピークの強度を測定した。その結果ピークの強度は $25 \mu W$ であった。したがって先に述べた透過率を用いて共振器内のパワーを算出すると

$$P_{in} = \frac{25 \times 10^{-6}}{1.5 \times 10^{-4}} = 167 \text{mW}$$

これより共振器内のパワーは 170mW となる。したがって

$$\text{増幅率} = \frac{167}{5} = 33.4 \cong 30$$

よって共振器の増幅率は約 30 倍であったといえる。経験的に同じような性能の共振器を用いて波長 800nm 程度の光 200mW を 400nm 程度まで波長変換することに成功している。その際の出力は 3~4mW 程度であったことからこの共振器を用いて基本波 646nm を倍波 323nm まで波長変換し、その光を 1~2mW 出力することは十分期待できると考えられる。

4. まとめと今後の展望



図 7：製作したレーザーの全体像

狭線幅遷移を用いたドップラー冷却は Li6 原子の冷却限界温度を大幅に下げることができると見込まれ、本研究でそのためのレーザー光源の製作を行った。まだ完成には至っていないものの、ほとんどの機構の製作が完成し目標のパワーを出力するのに十分な期待が持てるスペックであることが分かった、今後の展望は実際の 323nm 光の観測と共振器調のロックや原子への共周波数にロックするための機構の製作を行いたい。

