

# カルシウムイオンのサイドバンド冷却の為の 729nm 狭線幅半導体レーザーの開発

向山研究室 興野一樹

## 1 目的

本研究の目標は、極低温での  ${}^6\text{Li}$  原子と  ${}^{40}\text{Ca}^+$  イオンの混合系における  ${}^{40}\text{Ca}^+$  の振動基底状態まで冷却することである。 ${}^{40}\text{Ca}^+$  を振動基底状態まで冷却するためには、ドップラー冷却で予備冷却したのちに、サイドバンド冷却を行う必要がある。本実験ではカルシウムイオンのサイドバンド冷却に必要な 729nm の光源を半導体レーザーを用いて開発を行った。

## 2 原理

### 2.1 サイドバンド冷却

吸収スペクトルは、 $\omega_0$  の周波数におけるキャリア遷移と  $\omega_0 \pm n\omega_v$  におけるドップラーサイドバンドから構成される。 $\eta = kx_0$  は Lamb-Dicke パラメータと呼ばれる。振動を量子化した扱いでは  $x_0$  は、振動基底状態の波動関数広がり  $\sqrt{\hbar/2m\omega}$  で表される。 $\omega_v \gg \gamma$  であるためにサイドバンドは分離して観測される。

イオンが冷却されて振幅  $x_0$  が小さく光の波長以下、 $kx_0 = 2\pi(x_0/\lambda) \ll 1$ 、になるとサイドバンドの各成分は非常に小さくなる。イオンのスペクトルは中心のキャリアが支配的になって、第一サイドバンドのみが小さく支配される。イオンが電磁波の波長以下の領域に局在しているときは Lamb-Dicke の基準が満たされているという。強い束縛条件が成り立つ場合の冷却法はサイドバンド冷却と呼ばれる。サイドバンド冷却はドップラー冷却でイオンを Lamb-Dicke 領域に閉じ込めたあと、さらにイオンを冷却する目

的で用いられる。イオンの状態を基底状態を  $|g\rangle$ 、励起状態を  $|e\rangle$ 、振動状態  $|n\rangle$  としたとき、レーザーの低周波側のサイドバンド、すなわち  $(\omega_0 - \omega_v)$  に同調するとイオンは光子のエネルギー、 $\hbar(\omega_0 - \omega_v)$  を得て、 $|g, n\rangle$  から  $|e, n-1\rangle$  へ遷移する。状態  $|e, n-1\rangle$  のイオンは自然放出により基底状態に戻るが、Lamb-Dicke の基準が満たされている場合にはキャリア遷移が支配的であるため、 $\hbar\nu$  のエネルギーを放出して  $|g, n-1\rangle$  へ遷移する。このサイクルを繰り返すことによって、振動基底状態まで冷却する。

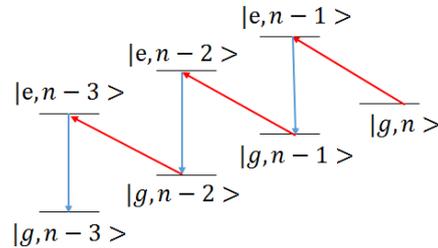


図 1: サイドバンド冷却の機構

### 2.2 カルシウムイオン

${}^{40}\text{Ca}^+$  は、イオントラップに用いられるメジャーなイオンの 1 つである。 ${}^{40}\text{Ca}^+$  イオントラップで使用する光はいずれも LD によって容易に生成されることも特徴の 1 つである。図 2 に  ${}^{40}\text{Ca}^+$  の準位構造を示した。

$S_{1/2}$  と  $D_{5/2}$  の電気四重極遷移と呼ばれる。

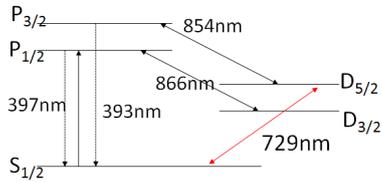


図 2:  $^{40}\text{Ca}^+$ の準位

### 2.3 ECLD

ECLD とは”External Cavity Laser Diode”の略で、外部に発振するための共振器をもつ LD のことである。

ECLD には、Littrow 型と Littman 型がある。本実験では、Littman 型配置の ECLD を製作した。回折格子の強めあいの式は、入射角  $\theta_1$ 、回折角  $\theta_2$ 、波長  $\lambda$ 、格子定数  $d$  とすると、

$$d \sin \theta_1 + d \sin \theta_2 = m\lambda \quad (1)$$

で表せるので、これを満たすように ECLD を設計すればよい。また、波長によって回折格子で反射される角度が変化するため、ミラーの角度を調整することによって発振波長を変化させることができる。しかし、ミラーを回転するだけでは、共振器長が変化せずモードホップし易くなってしまふ。そのため、共振器長とミラーの角度を適切に変化させるために、LD の出射面、回折格子の面、ミラーの面の交点の結ぶ点をピボットとしてミラーを回転することによって、モードホップを抑止することができる。

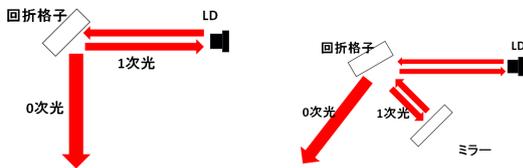


図 3: (左)littrow 型配置 (右)littman 型配置

## 3 実験結果；実験系の構築

### 3.1 ECLD 設計

本実験では、LD は ”eagleyard,EYP-RWE-0740-01000-1500-SOT02-00” を用いて、回折格子は ”Thorlabs,GH13-24V” (2400 本/mm)、また回折格子に照射する角度がなるべく大きくなるように回折格子の面と LD の成す角  $\theta_1 = 80^\circ$  となるように設計した。設計した ECLD の配置図を図 4、設計値を表 1 に示す。

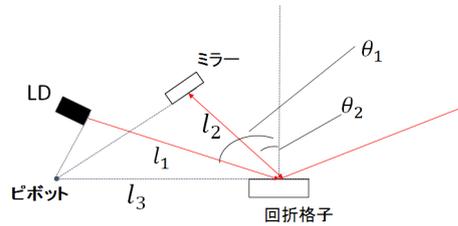


図 4: ECLD 設計

回折格子と LD の成す角 $\theta_1$	$80^\circ$
回折格子とミラーの成す角 $\theta_2$	$50^\circ$
回折格子と LD の距離 $l_1$	80cm
回折格子とミラーの距離 $l_2$	42cm
共振器長 $L$	122cm

表 1: ECLD 設計値

目標とする 2kHz のオーダーで安定化させることは難しいため、細心の注意を払って製作した。また、外的要因での振動に強くするために圧電素子で掃引するミラーも重力方向に押さえ、また接地していない箇所を減らす工夫をした。

実際に製作した ECLD の概略図を図 5 に、上部のミラーの両脇のアームが台についている圧電素子が伸び縮みすることによってピボットの軸にあわせて角度を変化させることができる。

また、製作した ECLD にはペルチェ素子による温度制御機構を製作しており、ECLD 全体で温度が

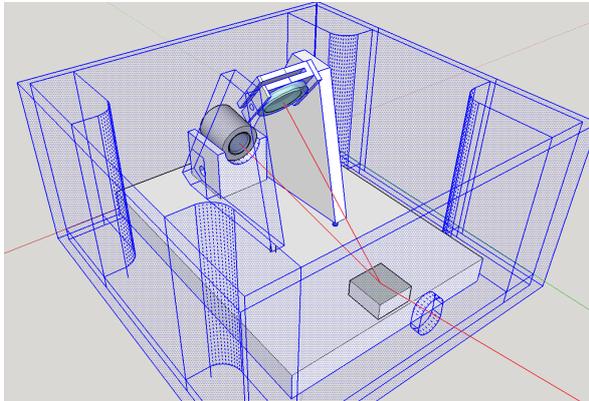


図 5: ECLD 概略図 (CAD)

一定に保たれるようにしている。

### 3.2 ULE 共振器

本実験では、ULE 共振器をなるべく外的要因から遠ざけるために、真空チャンバーの中に安置した。ULE 共振器を 2 重の銅製に入れ、またそれぞれの箱はゴム、また固定用のプラスチック製のネジでのみしか接触しておらず、金属接触はしていない。これは、共振器に伝わる熱が熱輻射のみになるようにするためのものである。また、チャンバーを真空にするために、ヒーター線をチャンバーに巻きつけ、およそ 150℃ になるようにしながら、ターボポンプを用いて空気を排出し、その後、イオンポンプを用いてより真空度が高くなるようにした。イオンポンプの電流値からチャンバー内の圧力は、およそ  $10^{-9}$  torr であった。これは、ULE 共振器を外的要因から遠ざけるのに十分なくらいの真空度になっていると言える。

## 4 実験結果; 測定結果と評価

実際に、光学系を図 6 のように組み実験を行った。

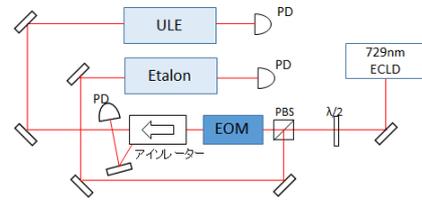


図 6: 光学系

### 4.1 ECLD の評価

LD に直流電流を流し、発振を確認できた。その後、ECLD に取り付けた圧電素子を用いて、共振器の透過光を観測したグラフを図 7 に示す。図 7 は、圧電素子には”Thorlab”製のピエゾドライバーを用いて、ファンクションジェネレーターの信号を 15 倍に増幅させている。ピエゾドライバーに 5V の三角波を掃引した印加電圧がオレンジの線で、エタロンの透過光を PD で観測した信号が灰色の線となっている。この図 7 から、エタロンの FSR が 750MHz であり、くしが 12 本あることがわかるので、本実験で制作した ECLD は 9GHz 掃引できることが確認できた。

また、同じ条件で、波長計を用いて同じだけ掃引すると、波長が 0.01nm 変化することが確認できた。

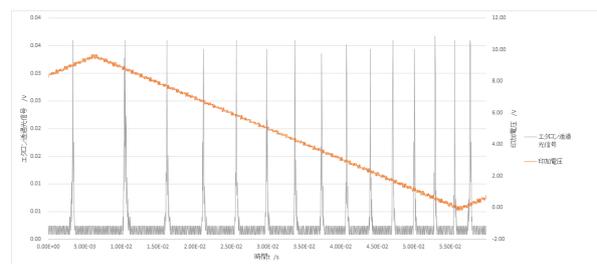


図 7: エタロンの透過光信号

一番広いところと、一番狭いところの FSR はおよそ 2 倍の差があった。しかし、実際に共振器の透過光を観測する際には、1FSR ほど観測できればよいので、エタロンの FSR を考慮すると、問題がない

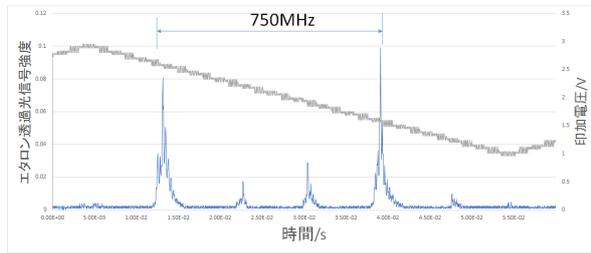


図 8: エタロン透過光信号

ことがわかった。これらのことから、今回作成した ECLD は、重力方向に光路を取ることによって、ピエゾの伸びと印加電圧の線形性は崩れてしまったものの、十分な波長を掃引できることを確認できた。ここで、スキャン範囲がおよそ 1GHz になるように、圧電素子に掃引する印加電圧を設定し、エタロンと ULE 共振器の透過光を観測した。エタロンの透過光のスペクトルを図 8 に示す。図 8 では、1FSR が 26ms であることが分かる。これと、エタロンの FSR が 750MHz ということから、エタロンの半値全幅を求めると、

$$FWHM = \frac{750\text{MHz}}{26\text{ms}} \times 160\mu\text{s} = 4.6\text{MHz} \quad (2)$$

これより、Finesse は、

$$Finesse = 750\text{MHz} \times \frac{26\text{ms}}{160\mu\text{s}} = 163 \quad (3)$$

となった。

また、先ほどの結果を用いて、ULE 共振器の 1FSR を周波数に換算すると、

$$FSR = \frac{750\text{MHz}}{26\text{ms}} \times 7.6\text{ms} = 219\text{MHz} \quad (4)$$

ULE 共振器の FSR の理論値は、221MHz となるので、測定した値とほぼ一致することが確認できた。また、これを用いて、ULE 共振器の半値全幅、Finesse を求めると、

$$FWHM = \frac{221\text{MHz}}{6.48\text{ms}} \times 6.1\mu\text{s} = 207\text{kHz} \quad (5)$$

$$Finesse = 750\text{MHz} \times \frac{6.48\text{ms}}{6.1\mu\text{s}} = 1062 \quad (6)$$

となった。

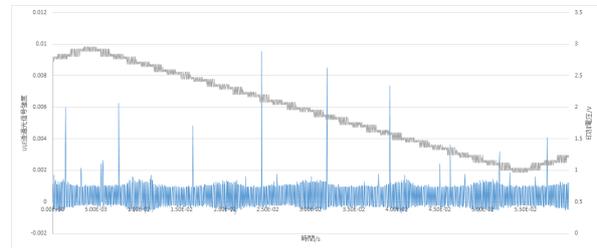


図 9: ULE 共振器の透過光スペクトル

## 5 まとめと展望

### 5.1 まとめ

ECLD は、重力方向に回転軸を作ることによって、空間的に浮いている部分を少なくなるように配置し制作を行った結果、ECLD の圧電素子によって、多少非線形的に変化するものの、波長を十分に掃引することができた。また、エタロンと ULE 共振器の透過光スペクトルをそれぞれの FSR からそれぞれの線幅を見積もることができた。

### 5.2 展望

周波数安定化を計るには、EOM によって変調した ULE 共振器の反射光を PD で誤差信号として観測し、周波数ロックを行う PDH 法によるロックが必要がある。周波数ロックを行うことで、線幅がさらに狭くなることが見込まれる。

## 参考文献

- [1] ヤリーブ イェー: "光エレクトロニクス基礎編 原書 6 版", 丸善株式会社 (2010)
- [2] URABE Shinji: "Laser-Cooled Ions and Their Applications", J. Plasma Fusion Res.