

富山高等専門学校 専攻科  
平成 21 年度

# 特別研究報告



研究題目 ビーム角変動を抑制した外部共振器型半導体  
レーザーの開発

指導教員 由井 四海

提出者 制御情報システム工学専攻

太田 光輔

平成 22 年 3 月 7 日 提出

— 目次 —

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 1.はじめに .....                        | 1  |
| 2.外部共振器型半導体レーザーの概要 .....            | 2  |
| 2.1 外部共振器型半導体レーザー .....             | 2  |
| 2.2 Littrow 型外部共振器型半導体レーザーの原理 ..... | 2  |
| 2.3 外部共振器型半導体レーザーの発振条件 .....        | 3  |
| 2.3.1 回折格子による条件 .....               | 4  |
| 2.3.2 共振器長による条件 .....               | 5  |
| 2.4 ピボットポイント .....                  | 5  |
| 2.5 ビーム角変動の抑制 .....                 | 7  |
| 3.外部共振器型半導体レーザーの製作 .....            | 9  |
| 3.1 半導体レーザー .....                   | 9  |
| 3.2 コリメートレンズ .....                  | 9  |
| 3.3 回折格子 .....                      | 10 |
| 3.4 偏光ビームスプリッター .....               | 10 |
| 3.5 外部共振器型半導体レーザーの構成 .....          | 11 |
| 3.6 外部共振器型半導体レーザーの発振 .....          | 13 |
| 4.外部共振器型半導体レーザーの特性 .....            | 14 |
| 4.1 発振線幅 .....                      | 14 |
| 4.2 波長掃引特性 .....                    | 16 |
| 4.3 出力光強度特性 .....                   | 17 |
| 4.4 出力光方向の変動特性 .....                | 20 |
| 5.まとめ .....                         | 22 |
| 付録 .....                            | 23 |
| 謝辞 .....                            | 27 |
| 参考文献 .....                          | 27 |

## 1.はじめに

近年の地球環境の悪化は顕著であり、中でも大気汚染は地球上の生態系に大きな影響を及ぼす地球規模の環境問題として挙げられるため、その原因物質の変動解析は重要視されている。温室効果やオゾン層の破壊、酸性雨などの原因となる物質は二酸化炭素やメタン、窒素酸化物などであり、これらの濃度は数百 ppm～数十 ppt と非常に微量であるため、濃度測定を行うためには高感度な測定技術が求められる。

従来の微量気体の濃度測定は質量分析法などの化学的な手法で行われていたが、化学的手法ではサンプルの採取が必要、測定をリアルタイムで行うことができない等の欠点がある。そのため、近年ではサンプル採取が不要でありリアルタイムな測定が可能である光学的な測定技術が注目を集めている。

光学的手法の1つとして、光吸収によって物質の濃度を計測する吸収分光法があり、用いられる光源の特性として単一周波数発振、数百 MHz 以下の発振線幅、連続した波長の掃引が求められる。

Littrow 配置の外部共振器型半導体レーザーは小型で出力光強度が高く、構成が簡易であるが、回折格子の反射光を出力ビームとして取り出しているため、波長掃引に伴って出力ビームの角度が変動することが欠点として挙げられる。そこで、本研究では出力ビームの角度の変動を抑制した Littrow 配置の外部共振器型半導体レーザーを製作することを目的とする。

## 2.外部共振器型半導体レーザーの概要

### 2.1 外部共振器型半導体レーザー

外部共振器型半導体レーザー(ECDL : External Cavity Diode Laser)は、半導体レーザー(LD : Laser Diode)と回折格子によって構成される小型の波長可変光源である。ECDLにおける回折格子の配置方法には図 2.1 に示すように Littrow 配置と Littman 配置の 2 種類がある。Littrow 配置は LD と回折格子のみで構成されており、回折格子へレーザー光を照射し、回折格子の角度を調整することで波長を変えることができ、出力光強度が高く構成が簡易である。一方、Littman 配置は LD、ミラー、回折格子によって構成されている。回折格子を固定し、回折光を一旦ミラーへ返し、再度回折格子に反射させることで LD 内部へ回折光を戻す。また、ミラーの角度を調整することにより波長を変えることができる。出力光方向を常に一定とすることができ、Littrow 配置と比較して発振線幅が狭い。本研究では光出力の高い Littrow 配置で ECDL を製作した。

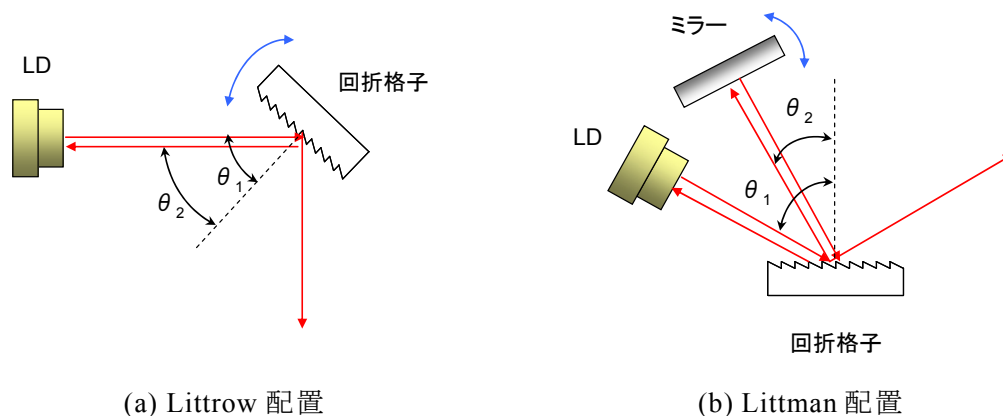


図 2.1 外部共振器型半導体レーザーにおける回折格子の設置方法

### 2.2 Littrow 型外部共振器型半導体レーザーの原理

Littrow 型 ECDL は半導体レーザー(LD)と回折格子によって構成されるレーザーであり、図 2.2 に構成を示す。LD からのレーザー光は回折格子に照射することで 1 次の回折光と 0 次の反射光に分光される。この 1 次光を LD 内部へ戻すことで、回折格子と LD の後方端面との間に新たな共振器が形成される。新たに形成された共振器の長さ  $L'$  は LD 内部の共振器の長さ  $L$  より長くなるので、発振線幅の狭窄化が実現される。また LD では利得スペクトルと共振器の縦モードが一致する波長の光が出力されるが、ECDL ではさらに利得

スペクトルに比べて狭い回折格子の分光スペクトルの一致が必要となり、その結果単一周波数発振が実現される。また、回折格子への入射角を変えることで波長の連続掃引が可能となる。

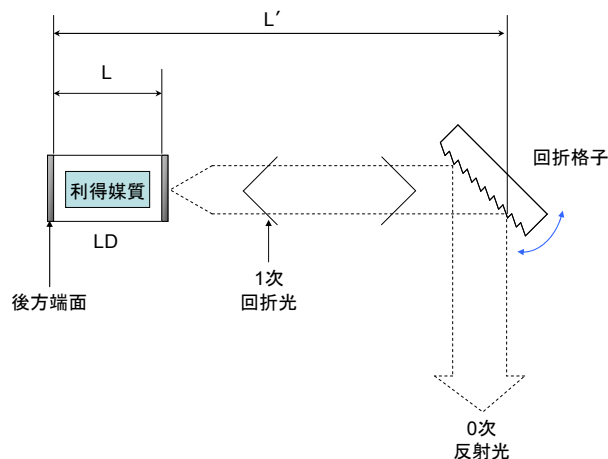


図 2.2 Littrow 型外部共振器型半導体レーザーの原理

### 2.3 外部共振器型半導体レーザーの発振条件

外部共振器型半導体レーザーが発振するためには、図 2.3 に示すように媒質の利得スペクトル(a)と共振器の縦モード(b)、回折格子による分光スペクトル(c)が一致する必要がある。ここでは、媒質の利得スペクトルの幅が他の2つに比べて十分に広いため、回折格子により分光スペクトルと共振器の縦モードによる2つの発振条件について検討を行なう。

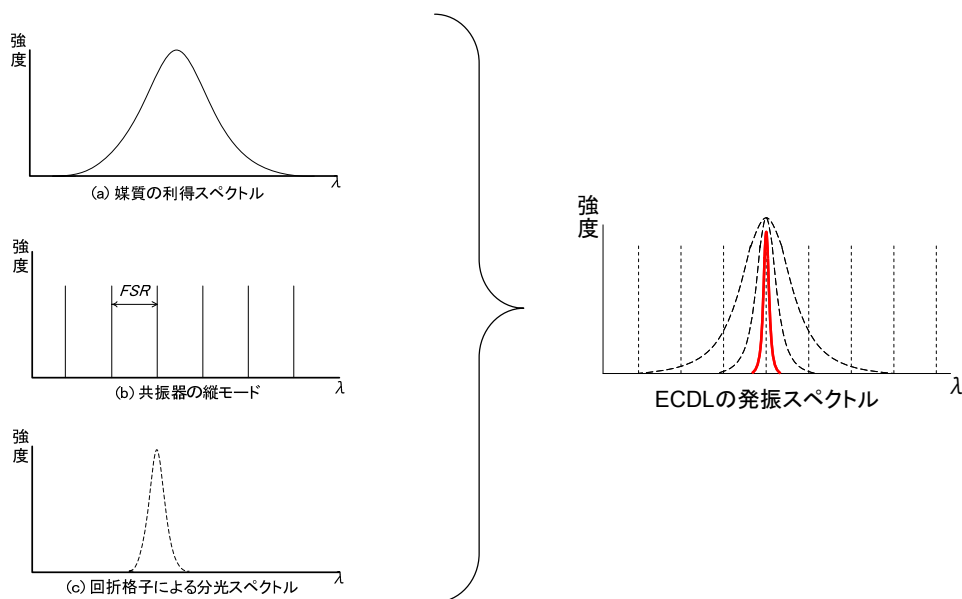


図 2.3 外部共振器型半導体レーザーの発振条件

### 2.3.1 回折格子による条件

回折格子は、さまざまな波長を含んだ光を入射すると、波の回折効果により特定の波長だけが強め合い、一次の回折光として分光できる素子のことである。回折格子によって分光される波長は次のように求められる。回折格子を通った光が強め合う条件は次式で示される。

$$d(\sin \theta_1 + \sin \theta_2) = m\lambda \quad (2.1)$$

ここで、 $d$  は格子溝間隔、 $m$  は回折次数、 $\theta_1$  は回折格子への入射角、 $\theta_2$  は回折格子からの回折角、 $\lambda$  は回折格子により分光された波長である。

Littrow 配置では図 2.2(a)に示すように、入射角と回折角が等しいため、

$$\theta_1 = -\theta_2 \quad (2.2)$$

となる。よって式(2.1)は式(2.2)より

$$\lambda = \frac{2d}{m} \sin \theta_1 \quad (2.3)$$

となり、回折格子による分光波長と回折角の関係を求めることができる。格子溝本数  $D$  ( $=1\text{mm}/d$ ) を 600、1800、2400 本/mm としたときの波長と回折角の関係を図 2.4 に示す。

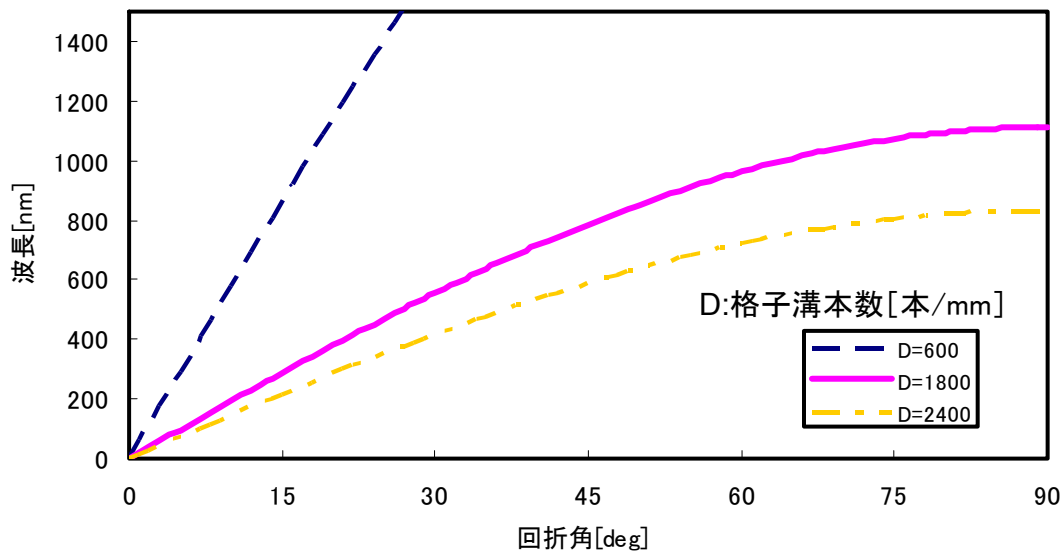


図 2.4 回折格子の回折角と分光波長

### 2.3.2 共振器長による条件

共振時に伝搬する波を定在波といい、レーザー共振器が発振するとこの定在波の波長の光が出力される。共振器長  $L$  は光の半波長の整数倍であり、共振器内に定在波は複数存在する。言い換えると、

$$k_q = \frac{q\pi}{L} \quad (q = 1, 2, \dots) \quad (2.4)$$

なる波数を持つ光のみが共振器中に存在を許されるということである。共振器の形状が変わらなければ、この定在波は共振器固有の形をとり、このような光の固有の形態を縦モードという。<sup>[4]</sup>

共振器の縦モード間隔である自由スペクトル領域(FSR : Free Spectral Range)は次式のように定義される。<sup>[2]</sup>

$$FSR = \frac{c}{2L} \quad (2.5)$$

ここで、 $c$  は光速である。光の波長と周波数の関係は、

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2.6)$$

であり、式(2.4)と式(2.5)より共振器長と縦モードの波長に次の関係が成り立つ。

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad (2.7)$$

ここで、 $n$  は縦モードの次数である。発振波長は 784nm であるため共振器長は  $L = n \cdot 392$  [nm] の条件を満たす必要がある。

## 2.4 ピボットポイント

Littrow 型 ECDL では、図 2.5(a)に示すように回折格子の角度を変化させることで波長の連続掃引が可能である。しかし、波長掃引時に安定した発振スペクトルを得るためには 2.3.1 と 2.3.2 に示された回折格子による分光条件と共振器長による条件が一致したままで掃引を行わなければならない。そこで、図 2.5(b)に示すように回折格子への入射角と共振器長を同時に変化させて、それぞれの条件が一致したまま波長を掃引することができる点が必要となる。この点をピボットポイントといい、ピボットポイントを中心として回折格

子を回転させることで、上に記した 2 つの条件を満たすことが可能となる。

ピボットポイントの導出方法について述べる。 $\lambda_G$ を回折格子の角度による条件の波長、 $\lambda_L$ を共振器長による条件の波長とするとそれぞれの波長は、

$$\lambda_G = 2d \sin \theta \quad (2.8)$$

$$\lambda_L = \frac{2L}{n} \quad (2.9)$$

となる。これらの波長は、回折格子の位置を変化させる前の波長であるので、条件が一致しているものとし、それぞれ 784nm とした。それぞれの波長に対しての回折格子の角度  $\theta$  が  $44.87^\circ$ 、縦モードの次数  $n$  は 127551 となった。

次に、回折格子の角度と共振器長を変化させて波長を掃引した後の波長をそれぞれ  $\lambda_G'$ 、 $\lambda_L'$  とするとそれぞれの波長は、

$$\lambda_G' = 2d \sin(\theta + \Delta\theta) \quad (2.10)$$

$$\lambda_L' = \frac{2(L + \Delta L)}{n} \quad (2.11)$$

となる。ここで  $\Delta\theta$  は回折格子への入射角の変化、 $\Delta L$  は共振器長の変化である。それぞれの条件が一致したまま波長掃引を行うには、それぞれの波長の変化量が等しくなるようにピボットポイントの位置を設定する必要があるので、

$$|\lambda_G - \lambda_G'| = |\lambda_L - \lambda_L'| \quad (2.12)$$

と表される。 $\lambda_G$  と  $\lambda_L$  は波長掃引前の波長であり、発振条件が満たされているものとする、これら 2 つの波長の差は 0 となる。このことから  $\lambda_G'$  と  $\lambda_L'$  の関係は、式(2.10)と式(2.11)より、

$$|\lambda_G' - \lambda_L'| = \left| 2d \sin(\theta + \Delta\theta) - \frac{2(L + \Delta L)}{n} \right| = 0 \quad (2.13)$$

となる。この式から、波長掃引量が 10GHz となるようにピボットポイントの位置を求めた。



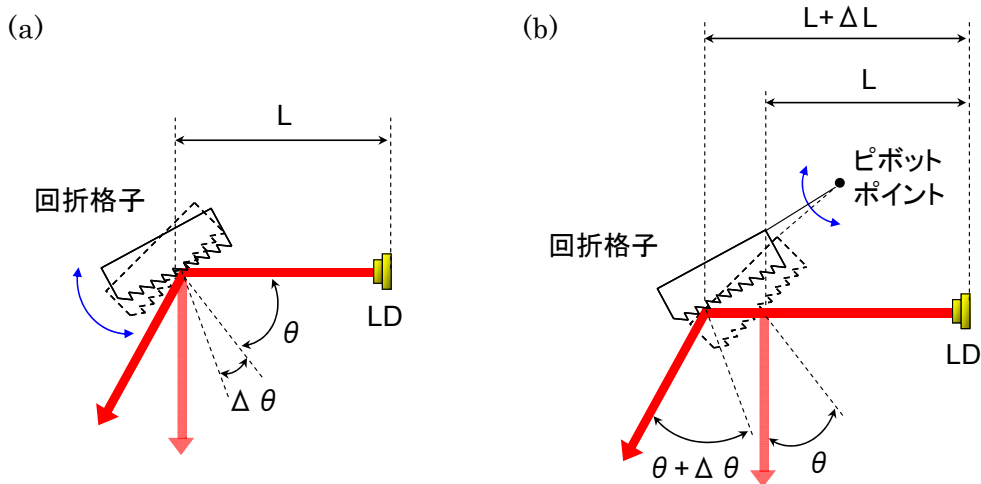


図 2.5 ピボットポイントを考慮した外部共振器型半導体レーザー

## 2.5 ビーム角変動の抑制

ECDL では回折格子の角度を連続的に変えることで発振波長の連続掃引が可能である。しかし、図 2.5(b)に示すような配置では出力ビームである回折格子からの反射光の角度は LD から回折格子への入射角と等しいため、出力ビームの角度は回折格子の入出射角度、すなわち波長に依存して変化するという欠点がある。

そこで、波長掃引時における出力ビームの角度変動を抑制するため、図 2.6 に示すように平面ミラーを回折格子に対して平行になるように取り付けた。これにより、回折格子の入出射角度を変化させても回折格子と平面ミラーは常に平行であるため、波長掃引時における出力ビームの角度は常に一定となる。

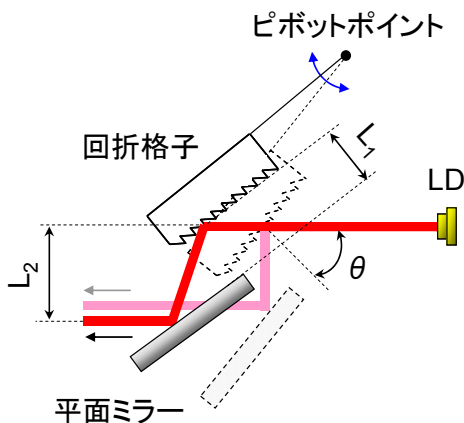


図 2.6 平面ミラーを付加した Littrow 型外部共振器型半導体レーザー

ミラーを付加した Littrow 型 ECDL における出力ビームの水平方向の長さ  $L_2$  は以下の式で示される。

$$L_2 = 2L_1 \sin \theta \quad (2.14)$$

ここで、 $L_1$  は回折格子と平面ミラーの距離、 $\theta$  は LD から回折格子への入射角である。式(2.14)より、 $\theta$  を  $0 \sim 90^\circ$  変化させたときの出力ビームの変位量を求めたグラフを図 2.7 に示す。この図より、 $\theta$  を大きくすると変位量  $L_2$  が増加していることがわかる。

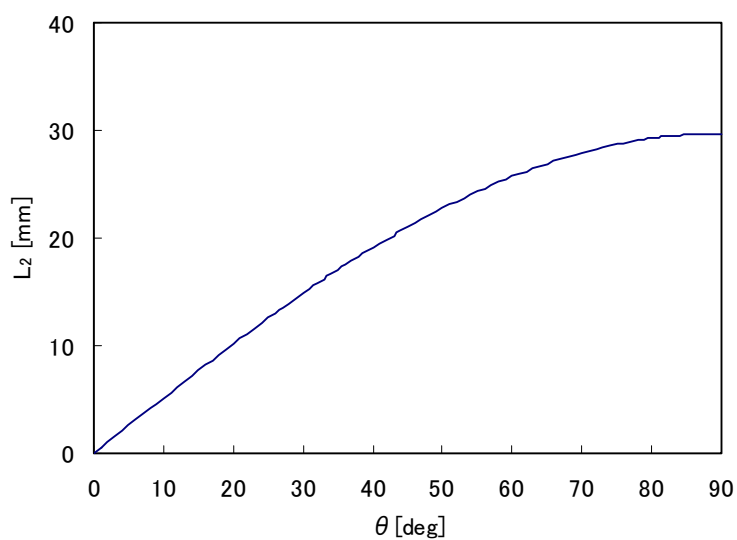


図 2.7 出力ビームの水平方向の変位量

### 3.外部共振器型半導体レーザーの製作

#### 3.1 半導体レーザー

近赤外半導体レーザー(LD)は直接遷移型の GaAlAs 結晶を用い Ga と Al の組成を変えることによってバンドギャップ幅を制御し発振波長を調整している。また、市販の LD は活性層(≒0.1 μ m)をこれより大きな禁制帯を持つ P 型及び N 型のクラッド層で挟み込んだ、ダブルヘテロ構造を用いている。ダブルヘテロ構造によって活性層に効率良く電子と正孔が閉じ込められると同時に、活性層の屈折率がクラッド層よりも大きいため効率の良い光導波路として光子を閉じこめることができる。これらの理由から、低閾値、室温連続発振が可能になっている。本研究では中心波長が 784nm の LD である SHARP 製 GH0781JA2C を使用した。その仕様を表 3.1 に示す。

表 3.1 半導体レーザーの仕様 (T=25°C)

|            |               |
|------------|---------------|
| 中心波長       | 784nm         |
| 直流光出力      | 120mW@I=141mA |
| 閾値電流       | 30mA          |
| スロープ効率     | 0.9mW/mA      |
| ビーム広がり(平行) | 8.7°          |
| ビーム広がり(垂直) | 16°           |

#### 3.2 コリメートレンズ

LD の出射光は拡がりを持って発振される。外部共振器型半導体レーザー(ECDL)が発振するためには、回折格子からの戻り光を効率良く LD に再入射させる必要がある。そのため、拡がる出射光を平行光へ補正する作業を行なう。補正する光学素子としてコリメートレンズを用いた。コリメートチューブ内に LD とコリメートレンズを入れ、専用スパナレンチを用いてレンズ位置を調整する。このとき、LD の出射光を約 3m 離れたミラーに反射させ、反射光の拡がりを赤外線検出カードで確認する。出射後と反射光の光スポットの縦横比を比較して目で見て同等の大きさになるように調整を行なう。

LD の垂直方向の拡がり角  $\theta \perp = 16^\circ$  より開口数(NA)は式(3.1)により求められ、0.28 となる。よって使用したコリメートレンズは NA が最も近い 0.25 である Thorlabs 製 LT110-P-B を使用した。

$$NA = n \sin \theta \quad (3.1)$$

### 3.3 回折格子

回折格子とは、光を波長ごとに分ける光学素子である。本研究では格子溝本数 1800 本/mm の回折格子 (Thorlabs 製 GH13-18V) を用いた。図 3.1 は分光波長と回折効率の特性を表したものであり、この回折格子は幅広い波長領域において回折効率が高いホログラフィック型である。図 3.1 より  $\lambda = 785\text{nm}$  の S 偏光で回折効率は約 65% となる。

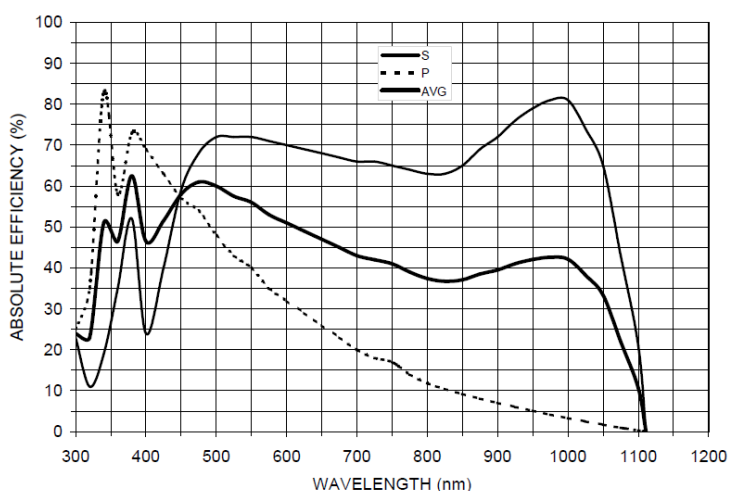


図 3.1 分光波長と回折効率

### 3.4 偏光ビームスプリッター

回折格子の回折効率は偏光の種類に大きく依存する。よって回折効率を高めるには、LD の偏光方向を調整する必要がある。このため偏光ビームスプリッター(PBS)を使用して調整を行なった。その調整方法は図 3.4 に示す。LD を光軸に対して回転させ、PBS によって  $90^\circ$  に反射された S 偏光の輝度が最も高くなるようする。

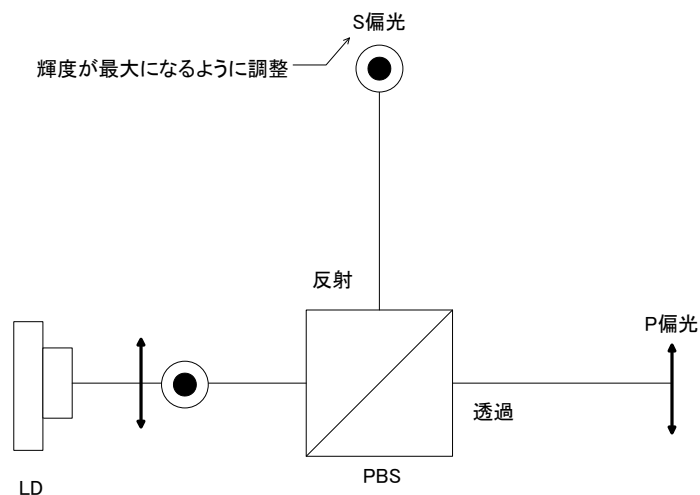


図 3.2 PBS による偏光方向の調整

### 3.5 外部共振器型半導体レーザーの構成

製作した ECDL の構成と概観を図 3.3 と図 3.4 にそれぞれ示す。ECDL が発振するためには、LD と回折格子を正確に配置する必要がある。それぞれの光学素子の配置を微調整するために、キネマティックマウント(Thorlabs 製 KS1D)と  $\theta$  軸粗微動ステージ(シグマ光機製 KSP-406M)を使用した。キネマティックマウントは上下・左右のあおり方向と共振器長の前後、計 3 軸による調整ができる。3 軸はそれぞれ 0.01mm の分解能で  $\pm 5$ mm の範囲での動作が可能である。また、 $\theta$  軸粗微動ステージはマイクロメータによって 40 秒の位置分解能で回折格子の調節が可能となる。ベースプレートは  $50 \times 117 \times 5$ mm アルミ製で、キネマティックマウントと  $\theta$  軸粗微動ステージの距離を短く設置できる。距離を短くとることによって、回折格子からの戻り光が LD へ入射し易くなる。今回はマウント間の距離を 44mm にとり LD と回折格子の光路長として 50mm となるように設計した。

回転ステージのマイクロメータを手動で調整することで波長の掃引を行う場合、熱や振動によって LD の縦モードが飛び移る現象であるモードホップが発生する。そのため、回転ステージの回転量調整には電圧の印加量により変位が生じる piezo 素子(PZT : Piezo Electric Transducer)(日本セラテック製 PAC166J)を使用した。この PZT は 150V 印加することで  $10 \mu\text{m}$  変化する。これを粗微動調整ネジの頭に取り付けることで波長の掃引を行なうことができる。

ビームの角度変化を抑制するために、回折格子に対して平行に平面ミラーを取り付けた。  
平面ミラーはシグマ光機製 TFA-15S03-10 を使用し、ミラーの固定には光学素子固定用の  
小型クランプアーム（Thorlabs 製 PM1/M）を使用した。

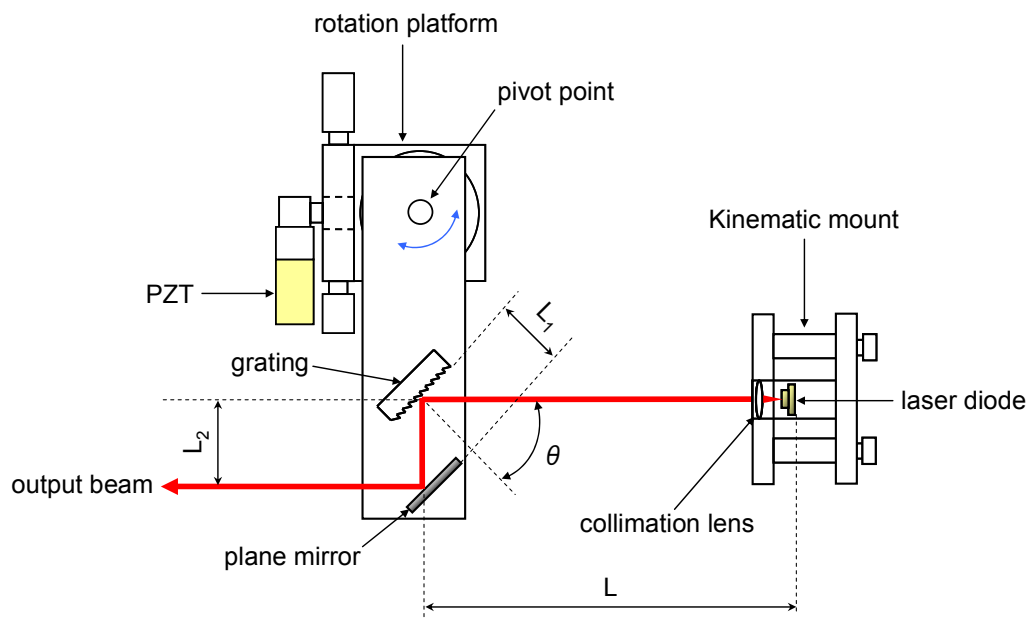


図 3.3 外部共振器型半導体レーザーの構成

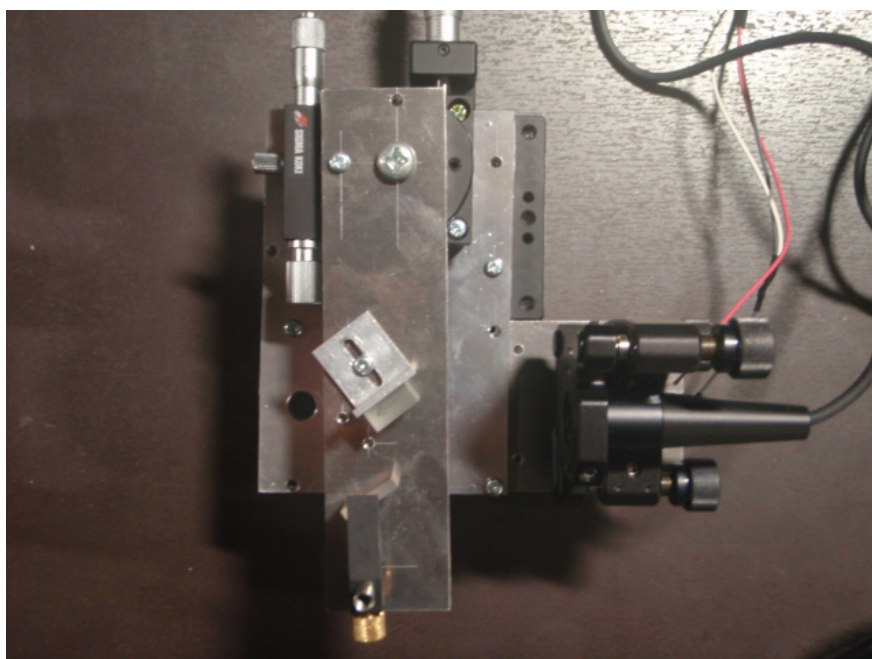


図 3.4 外部共振器型半導体レーザーの外観

### 3.6 外部共振器型半導体レーザーの発振

ECDL の発振条件は 2.3.1 項と 2.3.2 項に記したように、回折格子への入射角と共振器長による 2 つの条件を満たす必要がある。実際にこれらの条件を満たすためには非常に繊細な光学素子の調節が求められる。ECDL の発振手順を以下に記す。

#### [ECDL の発振手順]

- ① 全ての調節ネジを可動範囲の中間位置になるように調整する
- ② 入力電流は LD の閾値よりやや低い電流値(≒28mA 程度)に設定する。(赤外線検出カードを用いて出射光が目で確認できる輝度になるように定電流源の出力を任意に調整する。)
- ③ 回折格子からの戻り光が LD の中央に入るように(目視で確認しながら)θ 軸粗微動ステージを粗動で調節する。(粗微動調節ネジを緩める)
- ④ 回折格子からの出射光の輝度が増加するようにキネマティックマウントの左右、上下の順で調節する。
- ⑤ 回折格子からの出射光の輝度が増加するように θ 軸ステージを微動で調節する。

以上の手順により、回折格子からの出力光のビーム径が目視で最大となるように調整を行なった。この調整によって最も輝度が高い状態を ECDL が発振している状態とすることにした。

## 4.外部共振器型半導体レーザーの特性

### 4.1 発振線幅

発振スペクトルの観測には光スペクトルアナライザ(Burleigh 製 SA-Plus-200-09)を使用した。この装置は、ファブリ・ペロー(FP)共振器の片側に取り付けられたピエゾ素子(PZT)による共振器長の変化を用いてレーザーの発振モードと共振させ、オシロスコープで線幅の測定を行うものである。表 4.1 に装置の仕様、図 4.1 に発振スペクトルの測定構成をそれぞれ示す。この FP 共振器の FSR は 2GHz、フィネスは 300 であり、測定分解能は約 6MHz である。また、発振線幅の測定手順を以下に記す。

[レーザーの発振線幅測定手順]

- ① オシロスコープ、FP 共振器用 PZT ジェネレータ、バイアスコントローラーの電源を ON にする。
- ② FPSA に LD・ECDL の出力光を入射する。
- ③ FPSA の調整ネジを縦横軸(前面)→あおり軸(背面) →FP 共振器調整軸(最後部)の順にオシロスコープでの出力電圧が最大になるよう調整する。
- ④ オシロスコープの[CURSOR]モードで FSR 時間を測定する。
- ⑤ オシロスコープの[Quick Meas]モードで[+Width]を選択、発振スペクトルの半値全幅(FWHM)時間を測定する。
- ⑥ FSR、FWHM 時間より、周波数変換した FWHM を求める。

ECDL の発振スペクトルを図 4.2、発振線幅を測定したものを図 4.3 にそれぞれ示す。図 4.2 より単一モード発振していることがわかり、図 4.3 より発振線幅は 10.4MHz であることがわかる。

表 4.1 ファブリ・ペロー型スペクトルアナライザの仕様

|       |       |
|-------|-------|
| FSR   | 2GHz  |
| フィネス  | 300   |
| 測定分解能 | 約6MHz |



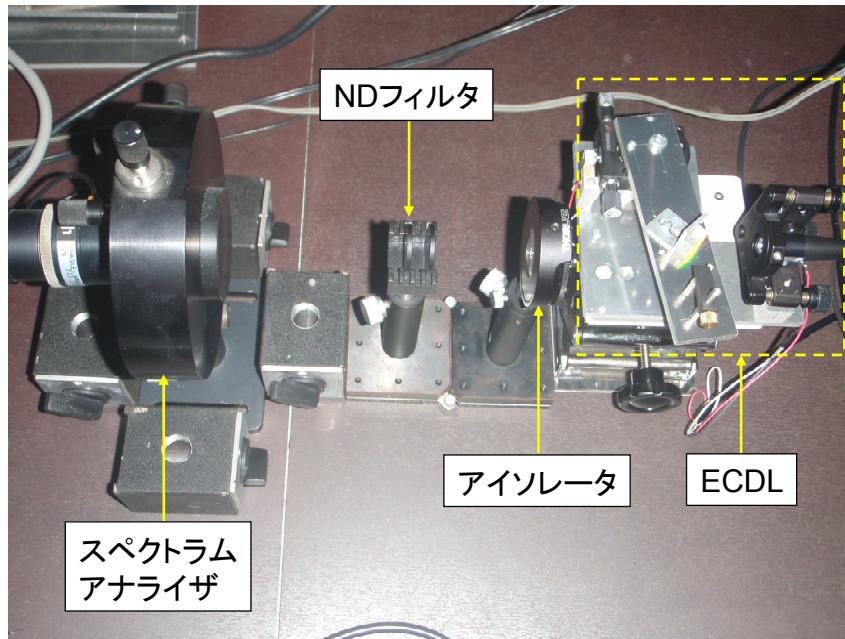


図 4.1 発振スペクトルの測定構成

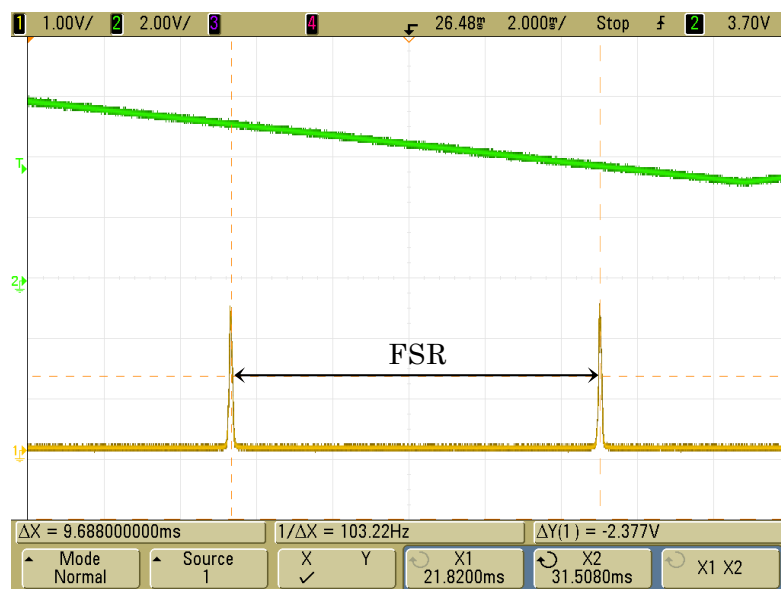


図 4.2 発振スペクトル

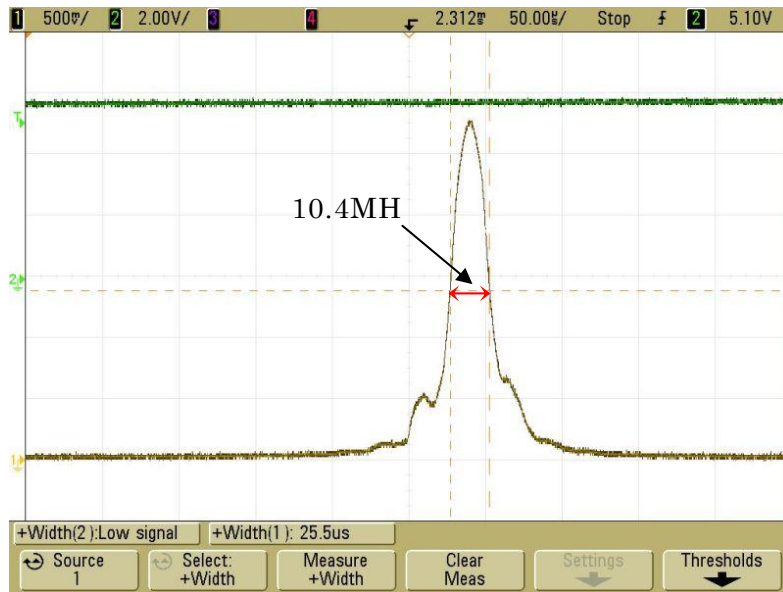


図 4.3 発振線幅の測定結果

## 4.2 波長掃引特性

piezo素子(PZT)の印加電圧を変化させることにより、波長掃引を行うことができる。PZTは電圧と変位量の関係にヒステリシス特性があるため、初期変位量のばらつきが大きいと考えられる。そこで、PZTの使用の際には初期入力電圧を50V以上とした。波長掃引量を測定は4.1と同様にして光スペクトルアナライザを用いた。また、PZTによる測定手順を以下に記す。

[PZTによる波長掃引量の測定手順]

- ① PZTドライバーの電源をONにし、50Vに設定する
- ② オシロスコープ上で、ECDLの安定発振(FSR)を確認する
- ③ [CURSOR]モードでx1ラインを中心スペクトルでセットする
- ④ PZTドライバーの印加電圧を増加させ、波長のシフトを確認する
- ⑤ 測定中のスペクトル以外に新たなスペクトルが発生(モードホップ)した場合、PZTドライバーの印加を中断する。
- ⑥ x2ラインを掃引した中心スペクトルの位置にあわせ、x1-x2ライン間の時間軸( $\Delta x$ )を測定する。
- ⑦ 測定したライン間の時間軸を周波数変換する。

図 4.3 に波長掃引の測定結果を示す。連続掃引量は 2.2GHz であった。また、このときの PZT の印加電圧は 53→148V であった。95V の電圧印加における掃引量の理論値は約 2GHz なので、測定した掃引量は理論通りの結果となった。

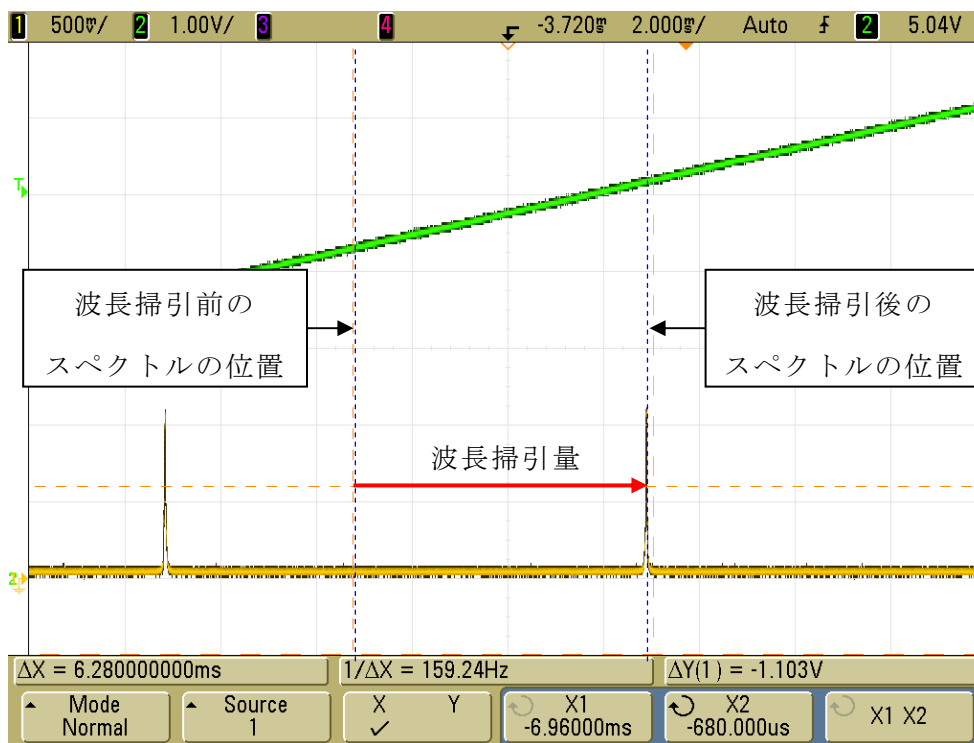


図 4.3 外部共振器型半導体レーザーにおける波長掃引量の測定結果

#### 4.3 出力光強度特性

出力光強度特性とはレーザー光強度と注入電流の関係を示したもので、L-I 特性とも呼ばれ、LD の最も基本的な特性である。この特性からレーザー発振が始まる閾値や、スロープ効率などがわかる。スロープ効率は次式で定義される。<sup>[1]</sup>

$$\eta = \frac{\Delta P}{\Delta I} \quad (4.1)$$

ここで  $\Delta P$  は光出力変化分、 $\Delta I$  は LD への注入電流変化分であり、L-I 特性の傾きを表す。

ビームの出力強度特性は、自作のパワーメータを用いて測定した。測定は以下の手順で行なった。

[出力光強度の測定手順]

- ① LD のコリメートを行なう。
- ② LD を発振させ、PD の中心に光が入射するように PD の設置位置を調整する。
- ③ パワーメータの出力端子をデジタルテスタ (SANWA 製 CD731) に接続し、テスタの測定モードを DCV に設定する。
- ④ パワーメータの OP 電源 SW を ON にする。
- ⑤ 定電流電源を測定上の最大入力電流に設定し、パワーメータの出力が OP の入力電圧を超えないようにパワーメータの可変抵抗で調整する。可変抵抗で調整できない場合は ND フィルタを使用して適度に強度を下げる。
- ⑥ 入力電流を 0 に設定し、5mA ごとにパワーメータの出力電圧を測定する。
- ⑦ 測定終了後、パワーメータの電源を OFF にし、可変抵抗値を  $\Omega$  モードで測定する。  
パワーメータの出力を電圧—電流—電力の順に変換する。次式に変換式を示す。

$$\text{電圧—電流変換 } I = \frac{V}{R} \quad (4.2)$$

$I$  は変換出力電流、 $V$  はパワーメータ出力電圧、 $R$  は可変抵抗値である。

$$\text{電流—電力変換 } P = \frac{I}{I_{Basic}} \quad (4.3)$$

- ⑧  $I_{Basic}$  は PD データシートにある波長により参照する分光感度電流である。(ND フィルタを使用した場合、式(4.4)より出力光強度補正を行なう。)

光学濃度  $\tau$  の ND フィルタを使用した場合の補正式

$$P_{Offset} = \frac{P}{10^\tau} \quad (4.4)$$

$P_{Offset}$  は補正後の出力光強度である。

- ⑨ 外部共振器型半導体レーザー (ECDL) においても同様の手順で測定を行なう。

図 4.4 に測定結果を示す。ECDL の発振閾値は 27mA であり、LD 単体と比べて ECDL の閾値が低いことがわかる。また、ECDL のスロープ効率は 0.14W/A であり、LD 単体と比べて小さいことがわかる。

ECDL の閾電流密度は、次式で示される。<sup>[3]</sup>

$$J_{th} = \frac{d}{\eta_i \Gamma} \left\{ \frac{L_1}{L_2} \alpha_i + \frac{1}{2L_2} \log_e \left( \frac{1}{R_G R_r} \right) + \alpha_b \right\} + \frac{J_0 d}{\eta_i} \quad (4.5)$$

ここで  $d$  は活性層厚み、 $\eta_i$  は内部量子効率、 $\Gamma$  は活性層の光閉じ込め係数、 $\alpha_i$  と  $\alpha_b$  はそれぞれ LD 内部共振器と外部共振器の単位長あたりの導波ロス、 $J_0$  はゲインを生じる必要電流密度である。一方、スロープ効率  $\eta$  は次式で示される。<sup>[3]</sup>

$$\eta = \frac{\Delta P}{\Delta I} = \frac{0.62 \eta_i}{\lambda} \left( \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} \right) \quad (4.6)$$

ここで、 $\Delta P$  は出力の変化、 $\Delta I$  は注入電流の変化、 $\alpha_m$  である。 $\alpha_m$  は次式で表される。

$$\alpha_m = \frac{1}{2L} \log \left( \frac{1}{R_f R_r} \right) \quad (4.7)$$

上記の式より、ECDL では共振器長  $L$  が長くなり、また、回折効率が LD 前方端面の反射率より高いため、発振電流閾値・スロープ効率はそれぞれ低くなることがわかる。実験結果も同様の傾向を示している。

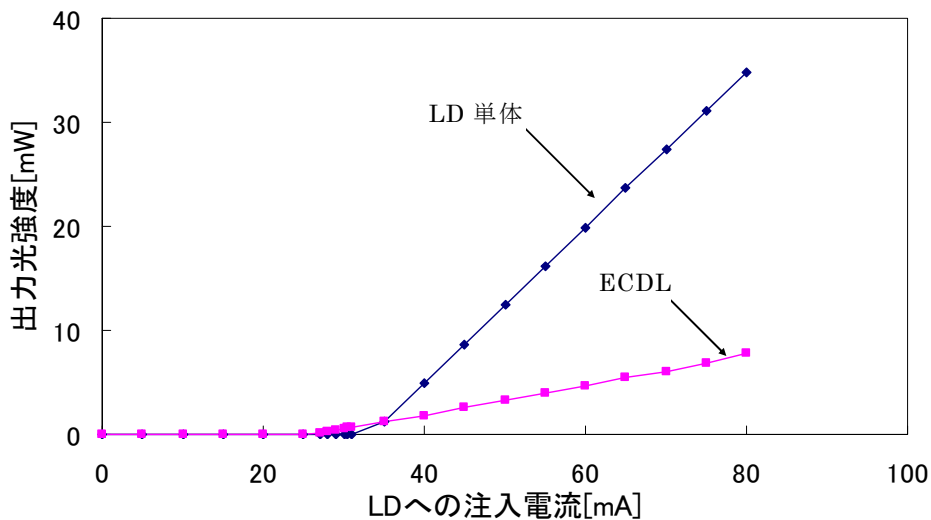


図 4.4 外部共振器型半導体レーザーの出力光強度特性

#### 4.4 出力光方向の変動特性

回折格子への入射角  $\theta$  を  $\pm 5^\circ$  変化させたときのビーム方向の変動量を測定した。測定には CCD ラインセンサ(Thorlabs 製 LC1-USB)を使用した。この CCD ラインセンサの測定分解能は  $7\mu\text{m}$  である。ビーム方向変動量の測定構成を図 4.5 に示す。また、測定手順を以下に示す。

[ビーム方向変動量の測定手順]

- ① ECDL の出力ビームを CCD ラインセンサに入射する。
- ②  $\theta$  軸粗微動ステージのマイクロメータによる手動調節で、回折格子への入射角  $\theta$  を 1 度ごとに変化させる。
- ③ CCD ラインセンサの測定結果において強度がピークとなるセル番号を確認し、入射角  $\theta$  の変化に伴うビーム方向の変動量を測定する。

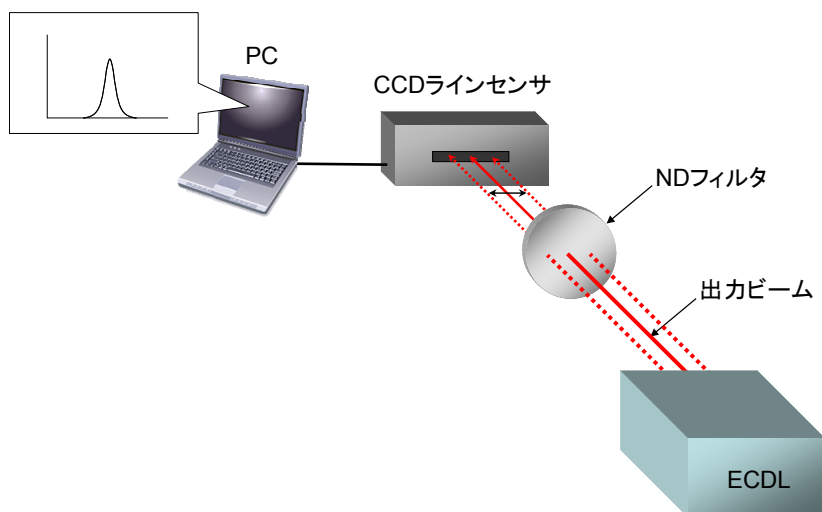


図 4.5 外部共振器型半導体レーザーにおけるビーム方向変動量の測定構成

変動量の測定結果を図 4.6 に示す。式(2.7)から求めた理論値とよく合っていることがわかる。また、このときのビーム角の誤差量を求めたものを図 4.7 に示す。図 4.7 より、ビーム角は $\pm 0.01^\circ$  の範囲内で収まっていることがわかる。

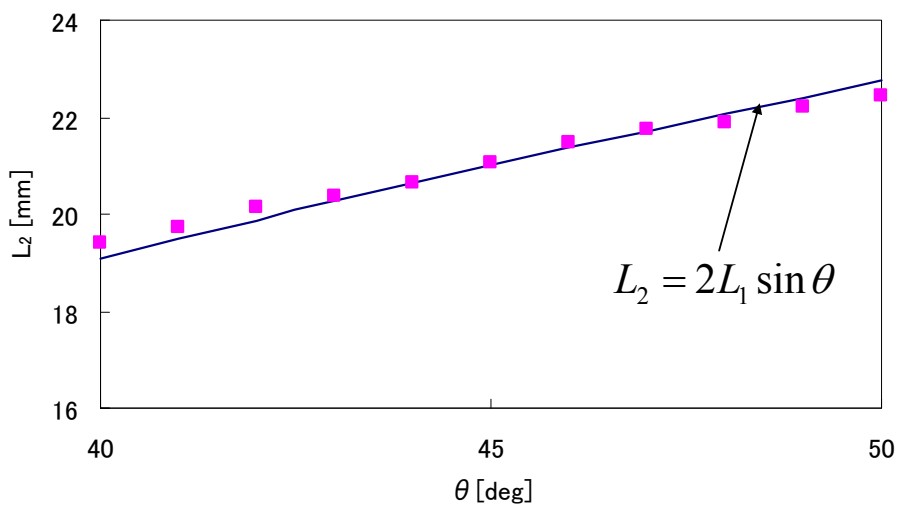


図 4.6 外部共振器型半導体レーザーにおけるビーム変動量の測定結果

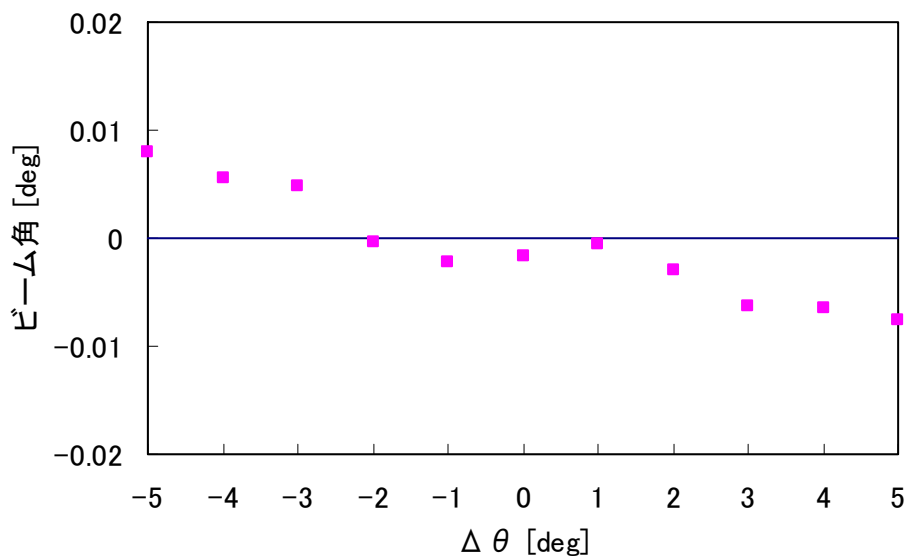


図 4.7 外部共振器型半導体レーザーにおけるビーム角の変位

## 5.まとめ

波長掃引に伴うビーム角度の変動を抑制した Littrow 型外部共振器型半導体レーザー (ECDL) を製作した。また、この製作した ECDL において、発振線幅、波長掃引量、出力光強度特性、ビーム角の変位量の測定を行なった。その結果 ECDL の発振電流の閾値は 27mA、発振線幅は単一モード発振で 10MHz、波長掃引量は 2.2GHz となった。また、回折格子への入射角を  $\pm 5^\circ$  変化させたときのビーム角の変位は、 $\pm 0.01^\circ$  の範囲内に収まっている。この結果より、波長掃引に伴う出力ビーム角の変動は十分に抑制されたといえる。

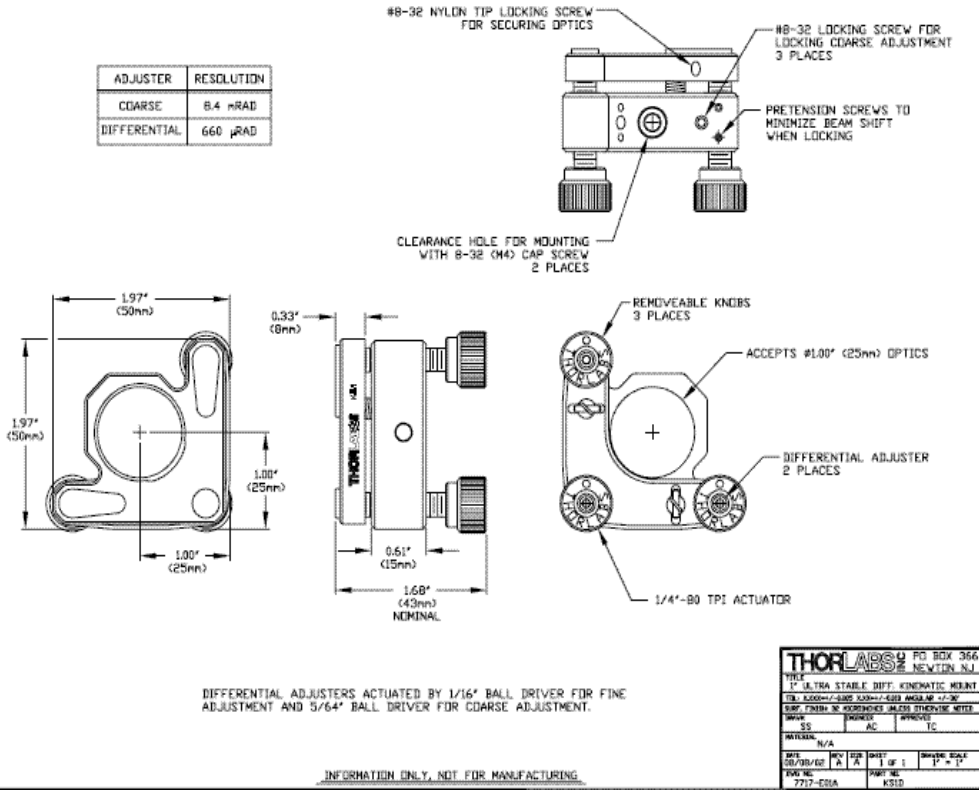
低圧力下の気体分子では吸収線幅はドップラー広がりによって決定されるため、マクスウェル・ボルツマンの速度分布より、その最小吸収線幅は分子種にもよるがおよそ 1GHz となる。今回製作した ECDL では、発振線幅が 10MHz であるため吸収線スペクトルの高い分解能で測定することが可能である。また、複数の組成気体で構成されている微量気体に関しては、衝突における均一広がりによって吸収線幅が決定するので、その最小線幅は 10GHz となる。今回設計・製作を行なった ECDL での波長掃引量は 2.2GHz であるので、微量気体の吸収分光法に用いるための光源としては更に改善が必要となる。

今後は波長掃引量を更に増やし、実際の吸収分光法に使用できる光源として開発する必要がある。また、ECDL の発振スペクトルを安定させるために振動や温度による外乱を軽減することも必要である。外乱については、動吸振器や温度調節器を用いて外乱を低減することができると考えられる。また、現在の構成では LD 内部の共振器と回折格子との共振器が ECDL 内に構成されているため、複合共振器が形成されている。これはモードホップを発生させる原因となっており、解決するためには LD の片端面に無反射コーティングを施して複合共振器の形成を防ぐことが求められる。



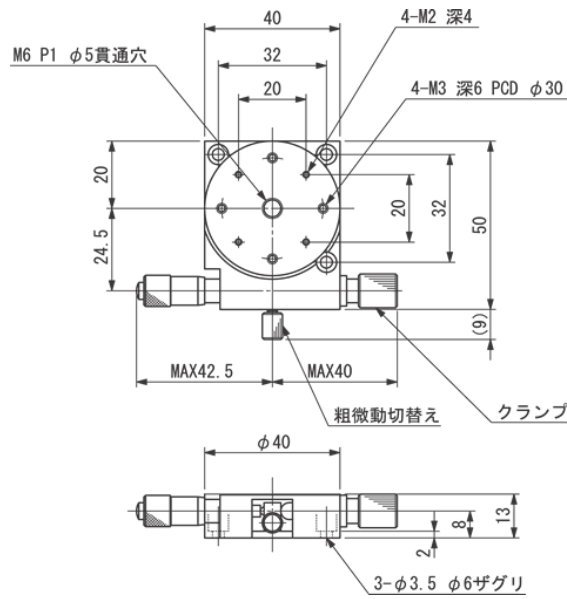
付録

COPYRIGHT © 2003 by THORLABS INC.



(HP Thorlab KS1D データシートより)

図 1 キネマティックマウント(Thorlabs 製 KS1D)寸法図



(HP SIGMA 光機 KSP-406M データシートより)

図 2 θ 軸粗微動ステージ(シグマ光機製 KSP-406M)寸法図

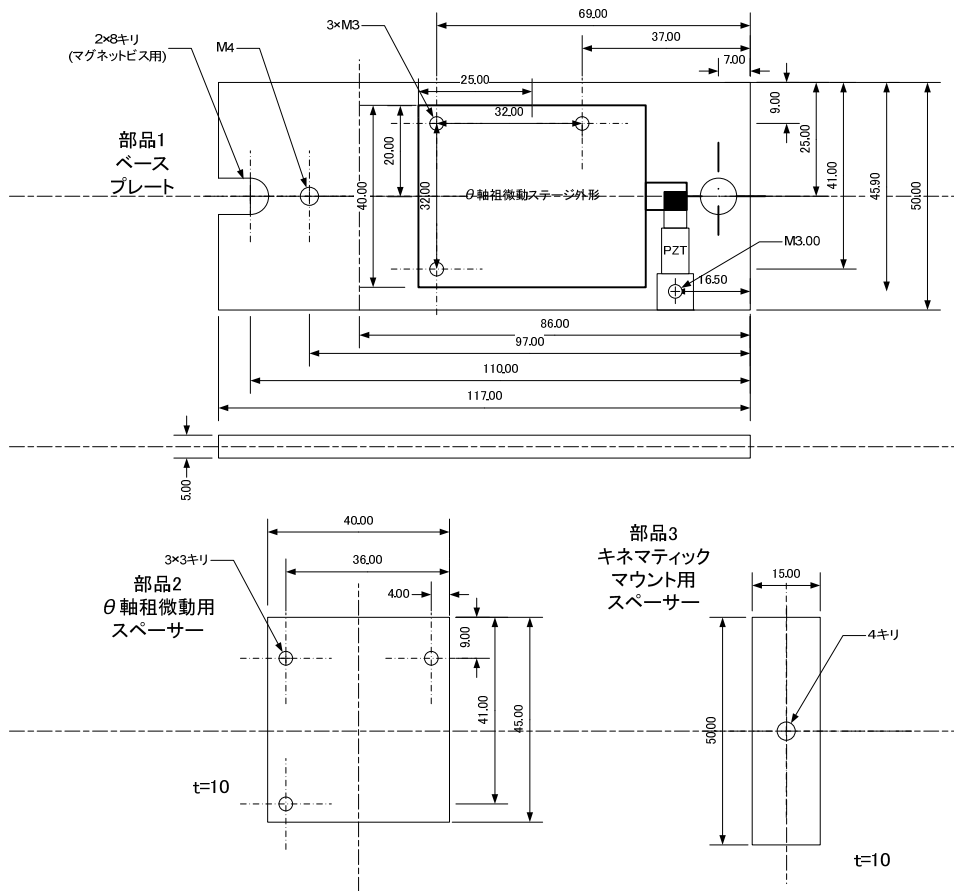


図 3 ベースプレート各寸法図

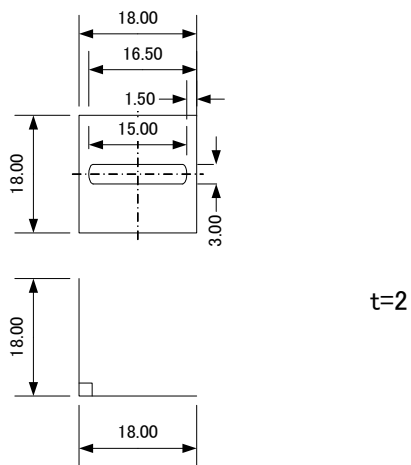


図 4 回折格子マウント寸法図

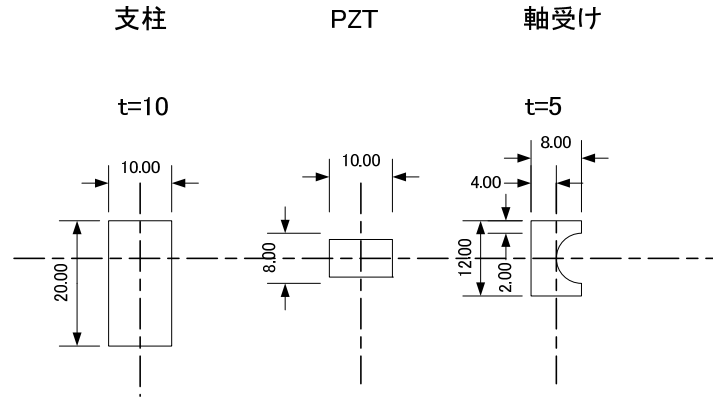


図5 ピエゾ素子用軸受け各寸法図

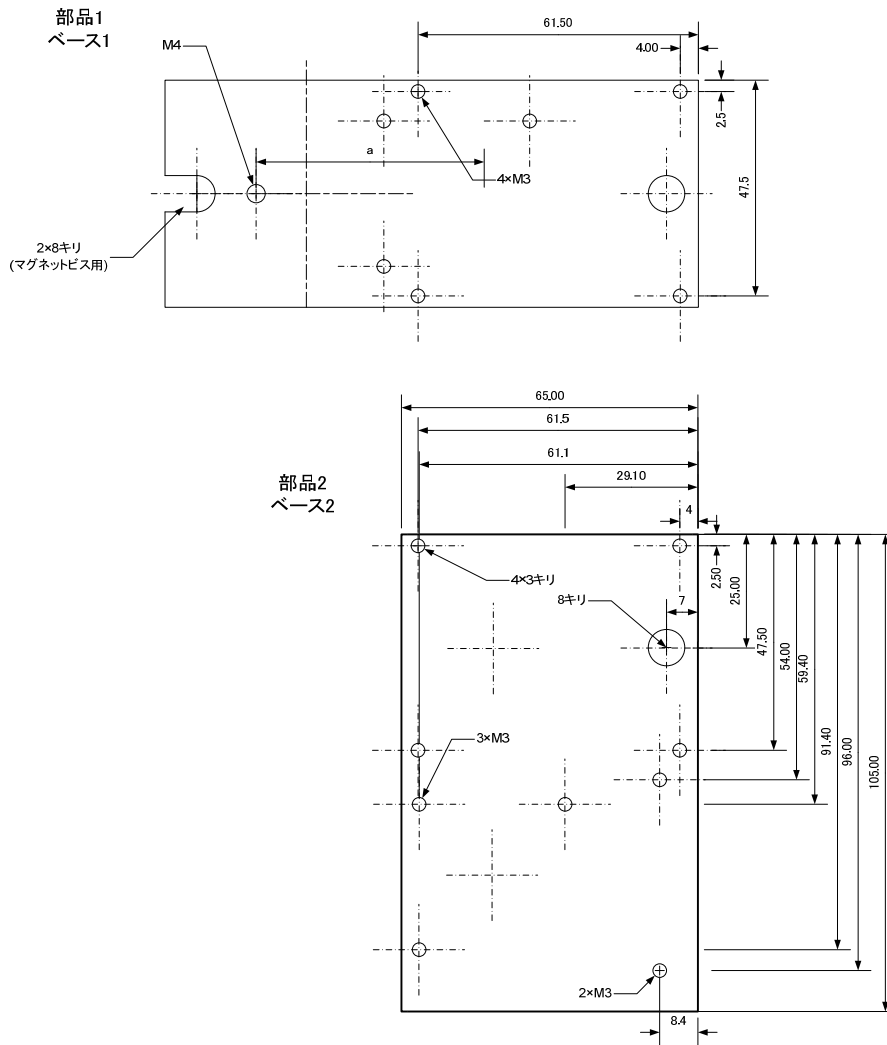


図6 ピボットポイント用取り付け各部品寸法図

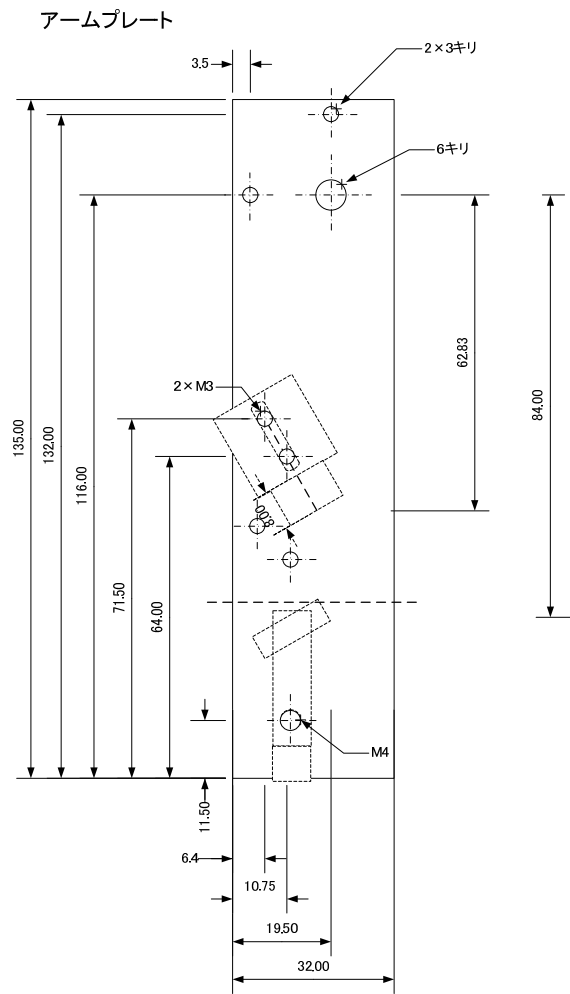


図 7 回折格子取り付け用アームプレート寸法図

## 謝辞

本研究は平成 20 年 4 月から平成 22 年 2 月にわたり、富山高等専門学校射水キャンパス電子機器実験室(由井研究室)において、専攻科課程および学位申請研究の一環として行われました。本研究を進めるにあたり、3 年間もの間ご指導を頂いた由井四海先生に深く感謝致します。また、日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂いた由井研究室の同期・後輩の皆様に感謝します。また、装置の製作にあたり、技術的に支援して下さった白川博樹技官にも感謝致します。

## 参考文献

- [1] 鹿熊航太, 由井四海, “Littrow 型外部共振器半導体レーザーの特性” H19 年度電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集, D-22 (2007)
- [2] 清水忠雄: レーザ入門, 森北出版, 1996
- [3] 平田昭二: わかる半導体レーザーの基礎と応用, CQ 出版社, 2001
- [4] 大津元一: 入門レーザー, 裳華房, 1997
- [5] A.S.Arnold, J.S.Wilson and M.G.Boshier, Review of Scientific Instruments, 1236, 69 (1998)
- [6] A.Takamizawa, G.Yonezawa, H.Kosaka, and K.Edamatsu, Review of Scientific Instruments, 046102, 77 (2006)