

## 目次

1. はじめに.....	1
2. 外部共振器型半導体レーザーの原理.....	2
2.1 外部共振器型半導体レーザー .....	2
2.2 回折格子の設置方法.....	3
2.3 外部共振器型半導体レーザーの発振条件 .....	5
2.3.1 回折格子による条件 .....	6
2.3.2 共振器長による条件.....	8
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 .....	11
3.3 回折格子 .....	11
3.4 外部共振器型半導体レーザーの構成.....	13
3.5 外部共振器型半導体レーザーの発振.....	15
4. 外部共振器型半導体レーザーの特性.....	17
4.1. 出力光強度特性.....	17
4.2. 発振線幅 .....	18
4.3. 波長掃引特性 .....	23
5. まとめ .....	25

## 1. はじめに

近年の地球の環境破壊は顕著であり、世界全体で大きな問題となっている。代表例として温暖化、オゾン層破壊、酸性雨などが挙げられる。温暖化は二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、フロン(CFC<sub>13</sub>)、ハロン(CF<sub>3</sub>Br)、メタン(CH<sub>4</sub>)、一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)などが原因となっている。オゾン層破壊はフロン、ハロン、四塩化炭素(CCL<sub>4</sub>)、トリクロロエチレン(C<sub>2</sub>HCl<sub>3</sub>)、テトラクロロエチレン(C<sub>2</sub>CL<sub>4</sub>)、トリクロロエタン(C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl<sub>3</sub>)などが原因となっている。酸性雨は硫黄酸化物(SO<sub>x</sub>)、窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)などが原因となっている。これらの原因物質の濃度は数 ppb(10<sup>-9</sup>)~数十 ppt(10<sup>-11</sup>)と非常に微量である。近年では、環境問題に対する取り組みが重要であり、原因となるガスを検出しなければならない場面が増えてきた。そこで、大気中に存在する微量気体成分の高感度な測定方法が求められる。

微量気体成分を高感度に測定する方法として、吸収分光法がある。吸収分光法とは、原子分子の準位間と等しいエネルギーのレーザー光を照射し、光励起による吸収を利用して透過光強度を検出する方法である。

吸収分光法による微量気体成分の高分解能測定を行うためには、単一周波数発振で、数百 MHz 以下の狭い発振線幅、発振波長の広範囲の連続掃引が可能な光源が必要となる。しかし、一般的な半導体レーザーでは発振線幅が数 nm と広く、波長の連続掃引が困難であるため吸収分光法の光源として使用すること

は難しい。そこで、本研究では吸収分光法を行なうための光源として、発振線幅が狭くかつ連続した波長の掃引が可能である外部共振器型半導体レーザーを構築し、発振波長の掃引特性を測定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原理

### 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)は半導体レーザー(LD)と回折格子によって構成される。図 2.1 に ECDL の基本構成図を示す。回折格子に LD のレーザー光を入射し、0 次の反射光と 1 次の回折光に分光する。回折光を LD 内部に戻すことで、回折格子と LD 内部の後方端面との間に新たな共振器が形成されるため、共振器長が長くなる。また、回折格子の反射率は LD 内部の前方端面の反射率より高い。よって、レーザーの発振線幅の狭窄化が実現される。また、回折格子を調節して LD から回折格子へのレーザー光の入射角を変えることで、発振波長を連続的に掃引することが可能となる。

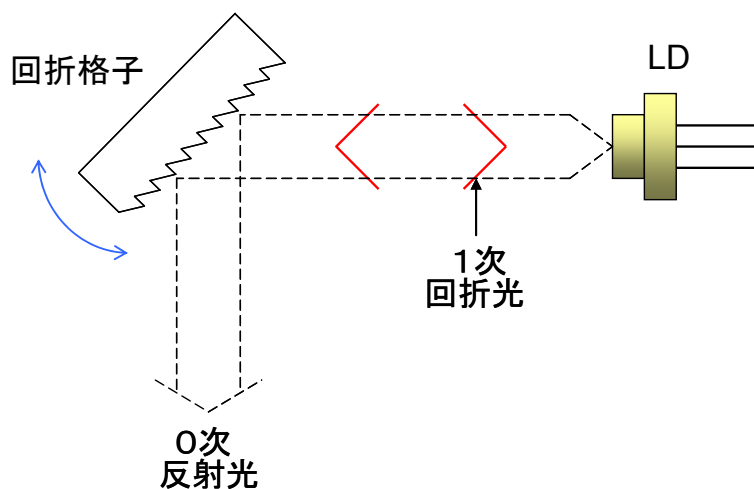


図 2.1 外部共振器型半導体レーザーの基本構成図

## 2.2 回折格子の設置方法

回折格子とは、多種の波長が混ざった光を波長ごとにわけける光学素子である。素子表面に多数の細かな溝が等間隔に刻まれており、白色光が入射すると、決まったある角度で光が強め合い、この強め合った光を取り出すことで波長の選択ができる。ECDL の回折格子の代表的な設置方法を図 2.2 に示す。Littrow 型は LD と回折格子のみで構成され、レーザーの回折光を直接 LD 素子に戻す方法である。特徴は共振器長が短く、出力光強度が高い点である。Littman 型は LD と回折格子、ミラーで構成され、LD を回折格子に照射し、回折光をミラーに反射させて間接的に LD 素子に戻す方法である。特徴は Littrow 型に比べて発振線

幅が狭く、入射角を変えても出射方向が一定である。本研究では、出力光強度の高い Littrow 型を用いて製作を行なった。

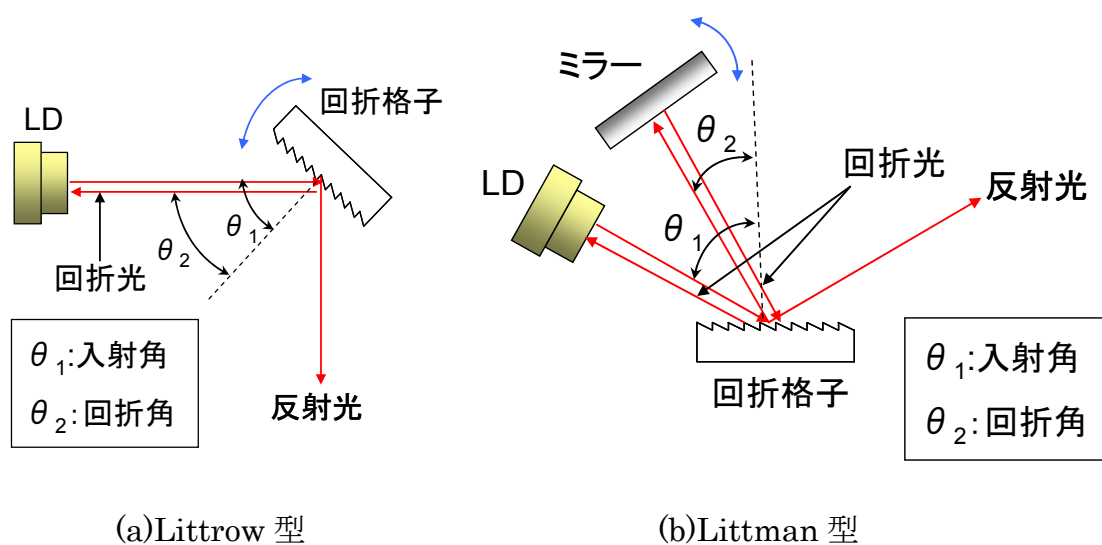


図 2.2 外部共振器型半導体レーザーの回折格子設置方法

### 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を発振させるためには、図 2.3 に示すようにレーザー媒質の利得スペクトルと共振器の縦モード、回折格子による分光スペクトルが一致する必要がある。媒質の利得スペクトルは、他の 2 つに比べて十分に広いため、ここでは共振器の縦モードと回折格子の分光スペクトルの 2 つの条件について検討を行う。

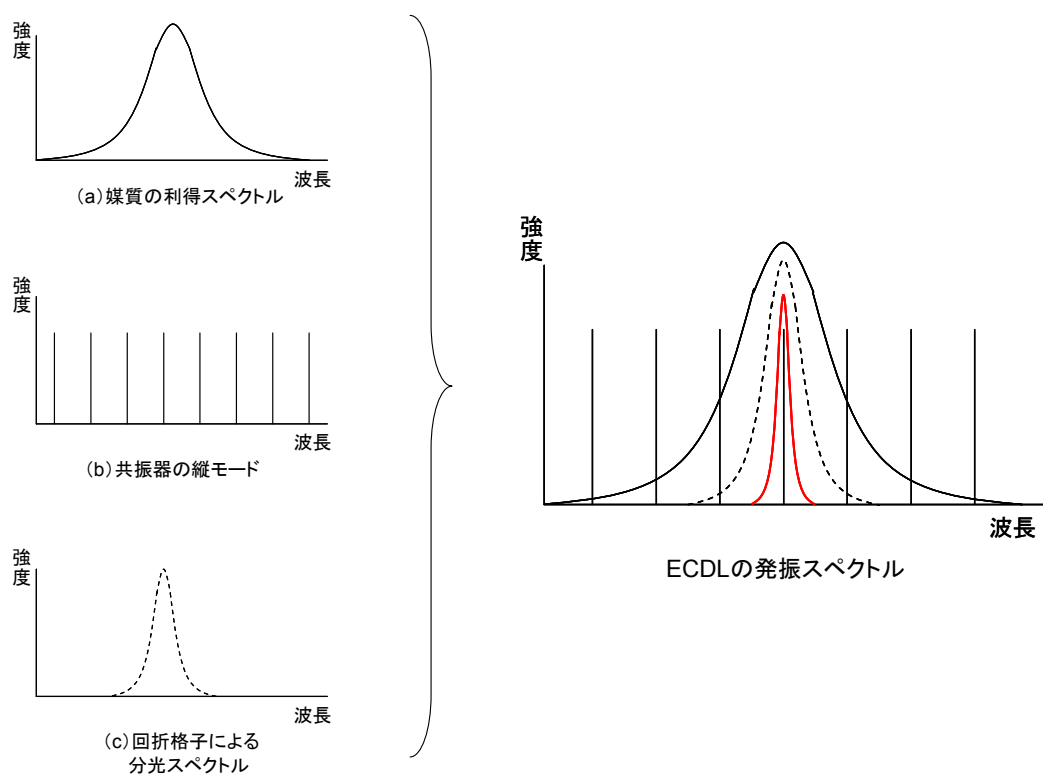


図 2.3 外部共振器型半導体レーザーの発振条件

### 2.3.1 回折格子による条件

回折格子によりレーザー光が強め合う条件は

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

で示される。ここで、 $d$  は回折格子の溝間隔、 $m$  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)のように、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

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

となり、回折格子による分光波長と入射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入射角の関係を図 2.4 に示す。

この結果より、回折格子の溝本数  $D=1800$  本/mm、回折格子の設置角  $\theta_1=45^\circ$ 、LD の波長  $\lambda=784\text{nm}$  となる。

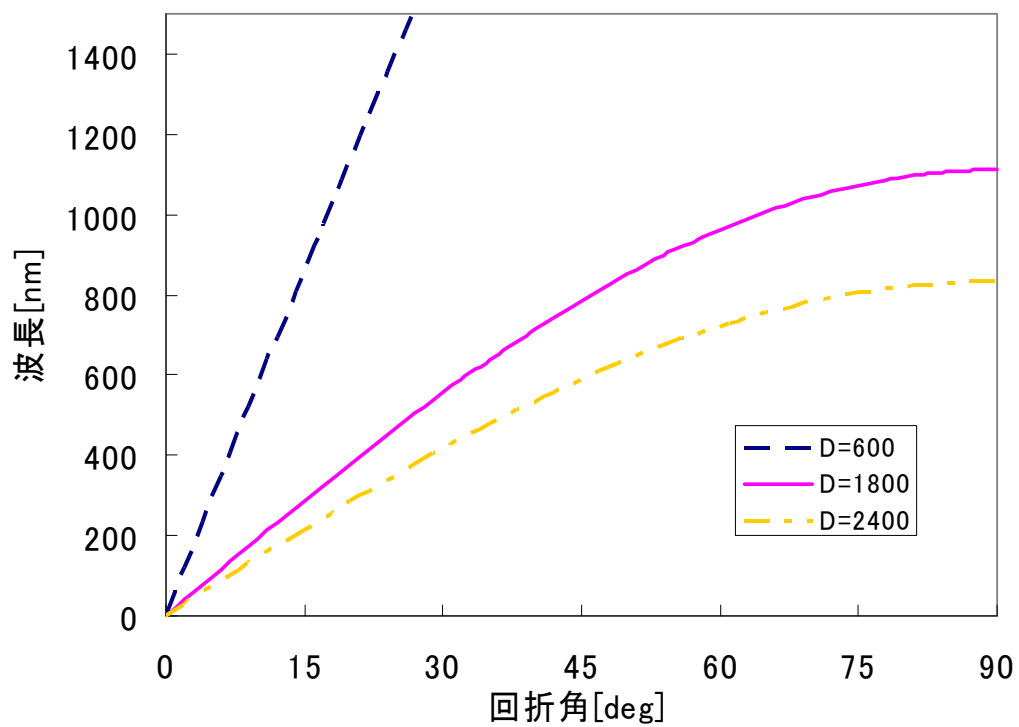


図 2.4 回折格子による分光波長と入射角の関係



### 2.3.2 共振器長による条件

共振器長の縦モード間隔である自由スペクトル領域(*FSR*)は次式で定義される。<sup>[1]</sup>

$$FSR = \frac{c}{2L} \quad (2.4)$$

ここで、 $c$ は光速、 $L$ は共振器長である。光の周波数と波長の関係は

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2.5)$$

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。

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad (2.6)$$

ここで、 $n$ は縦モードの次数である。LDの発振波長は784nmであるから共振器長は $L = n \cdot 392[\text{nm}]$ の条件を満たす必要がある。

### 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

近赤外域半導体レーザー(LD)は主に CD や MD などの光記録媒体との情報の読み出し、書き込み用光源として市販されている。LD は、pn 接合ダイオードからできている半導体素子である。ダイオードに順方向バイアスが印加されると、n 形領域からは電子、p 形領域からは正孔がそれぞれ活性領域に注入される。注入された電子と正孔が再結合して消滅する際に活性領域のバンドギャップエネルギーにほぼ相当する波長の発光が起こる。市販の LD の活性材料には一般的に GaAlAs 結晶などの直接遷移型半導体が用いられる。光共振器には、pn 接合に垂直な 2 枚の反射鏡からなるファブリ・ペロー共振器で構成される。また、市販の LD では一般的にダブルヘテロ構造が用いられている。クラッド材料を活性材料より広いバンドギャップをもつ材料を選ぶことで、バンドギャップ差によって生じたエネルギー障壁のために電子・正孔は活性層内( $\approx 0.1 \mu\text{m}$ )に閉じ込められる。また、活性・クラッド材料間の屈折差から、光は増幅作用のある活性領域に導波される。これらの理由より、低閾値・高効率の発振が可能となる。[2]

本研究では、2.3 で述べた条件を満たす LD として SHARP 製 GH0781JA2C を使用した。表 3.1 に LD の仕様、図 3.1 に LD の注入電流と波長の関係をそれぞれ示す。

表 3.1 半導体レーザーの仕様(Tc=25° )

発振波長	784nm
直流光出力	120mW
しきい値電流	30mA
スロープ効率	0.9mW/mA
ビーム広がり角(平行)	8.7°
ビーム広がり角(垂直)	16°

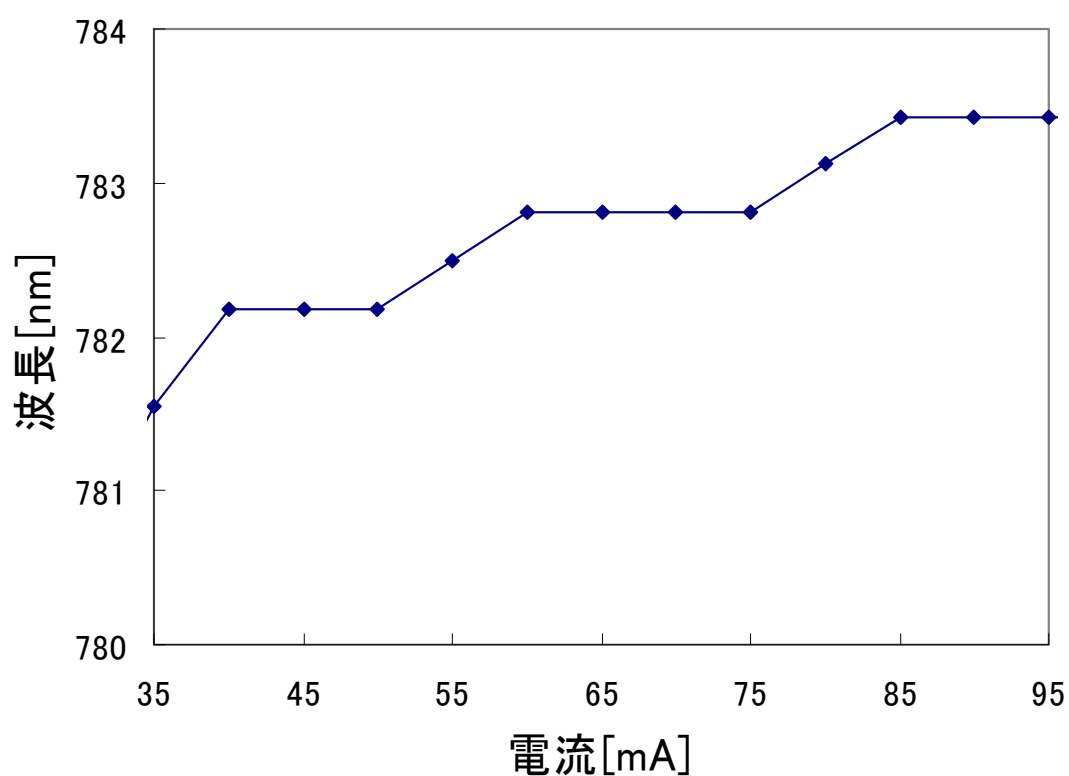


図 3.1 半導体レーザーの注入電流と波長

### 3.2 コリメートレンズ

LD の出射光は拡がって発振される。しかし、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 内部に戻す必要がある。そのため、拡がる出射光を平行光にしなければならない。そこで、平行光にするための光学素子として、コリメートレンズを使用した。コリメーションレンズは Thorlabs 製 LT110-P-B を使用した。

### 3.3 回折格子

回折格子は Thorlabs 製 GH13-18V を使用した。図 3.2 に回折格子の分光波長と回折効率の特性を示す。このグラフより、この回折格子は幅広い波長範囲において高い回折効率を有していることがわかる。LD の波長  $\lambda = 784\text{nm}$  において、図 3.2 より回折効率は約 65% である。

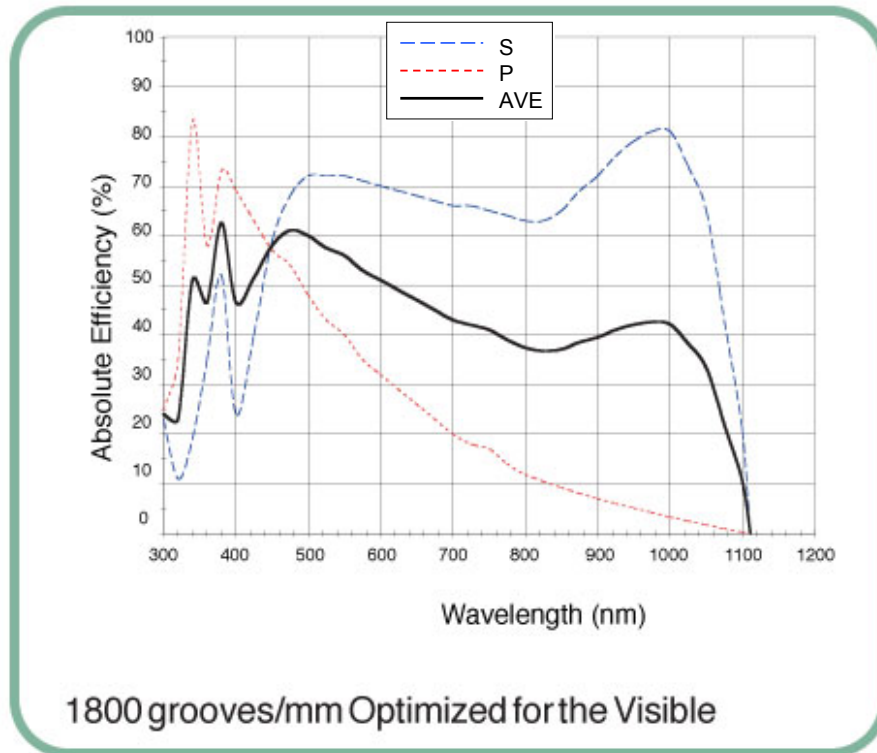


図 3.2 回折格子の分光波長と回折効率

### 3.4 外部共振器型半導体レーザーの構成

外部共振器型半導体レーザー(ECDL)の構成図を図 3.3、外観図を図 3.4 に示す。分光波長の分解能は回折角の可変量に依存する。そこで、回折格子の調節には $\theta$ 軸粗微動ステージ(シグマ光機製 KSP-406M)を用いた。この回転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。また、2.3.2の共振条件よりLDの位置精度も重要となる。そこで、LDのマウントには共振器長の微調整が可能なキネマティックマウント(Thorlabs 製 KSID)を用いた。このマウントは、上下・左右のあおり方向と前後の計3軸で調整を行なう。3軸はそれぞれ0.01mmの分解能で±5mmの範囲での動作が可能である。土台となるベースプレート(アルミ製)は、50mm×117mm×5mmとした。また、LDから回折格子までの実光路長は各素子を考慮し、最小の距離50mmとした。

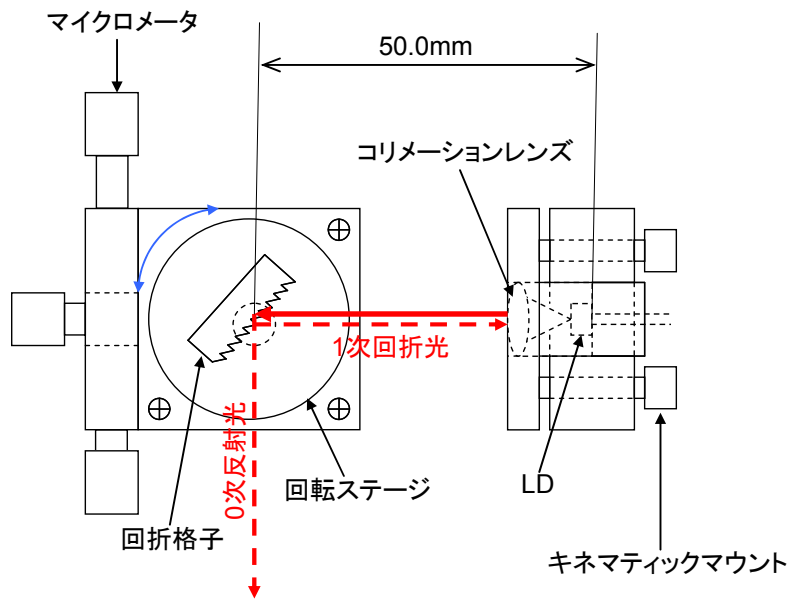


図 3.3 外部共振器型半導体レーザーの構成図

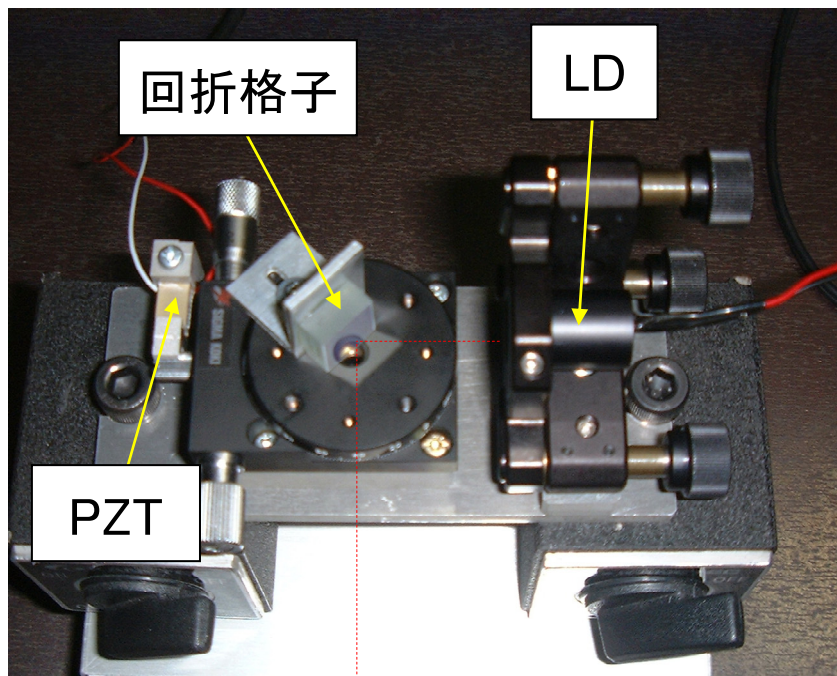


図 3.4 外部共振器型半導体レーザーの外観図

### 3.5 外部共振器型半導体レーザーの発振

ECDL を発振させるために、以下の手順で調節を行った。

#### ① コリメート

コリメートとは、LD のレーザー光をレンズによって平行光にすることである。

図 3.5 に示した方法でコリメートを行なった。LD の出射光とスクリーンに映される反射光の大きさが等しくなるように、コリメートレンズを専用スパナで調節した。また、このとき LD からスクリーンまでの距離は約 8m とした。

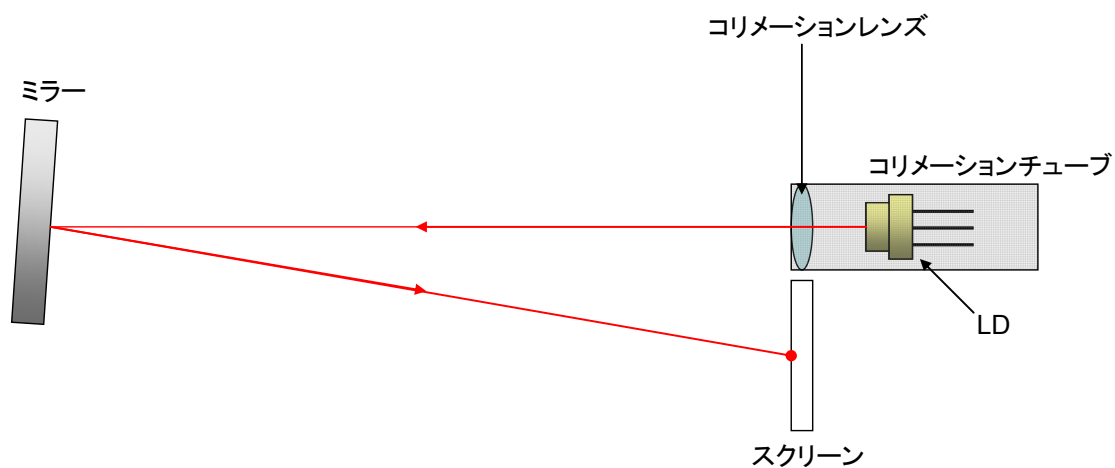


図 3.5 コリメート方法



## ②偏光

図 3.2 より、回折効率は偏光方向に大きく依存する。このため、偏光ビームスプリッター(PBS)を用いて S 偏光の光強度が最も強くなるように LD を光軸に対して回転させて調整する必要がある。図 3.6 に PBS による反射と透過の様子を示す。

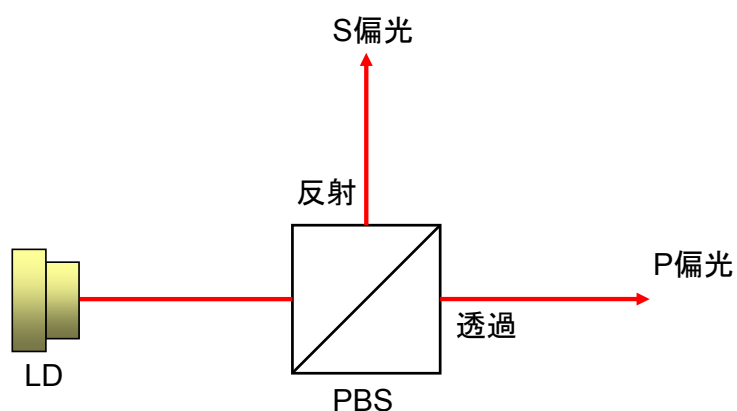


図 3.6 偏光ビームスプリッターによる偏光方向調整

## ③回折格子の設置

回折格子は、回折光が LD に戻るようにマイクロメータを調節して回折角が  $45^\circ$  となるよう設置した。また、反射光の強度が強くなるよに、キネマティックマウントで LD のあおり方向の調節を行なった。

## 4. 外部共振器型半導体レーザーの特性

### 4.1 出力光強度特性

出力光強度特性とは、注入電流とレーザー光強度の関係を示したものである。この特性からレーザー発振が始まる閾値や、発振状態での電流－光出力特性の傾きを示すスロープ効率(微分効率)などがわかる。スロープ効率は次式で定義される。<sup>[4]</sup>

$$\eta = \frac{\Delta P}{\Delta I} \quad (3.1)$$

ここで、 $\Delta I$  は電流の増加分、 $\Delta P$  は光出力の増加分である。

外部共振器型半導体レーザー(ECDL)と半導体レーザー(LD)の出力光強度の測定にパワーメータを使用した。図 4.1 に測定結果を示す。この結果から ECDL の閾値は 29mA、LD の閾値は 32mA となった。LD と比較して ECDL の閾値が低いことがわかる。また、ECDL のスロープ効率は 0.36W/A、LD のスロープ効率は 0.84W/A となり、LD と比較して ECDL のスロープ効率は小さいものとなった。

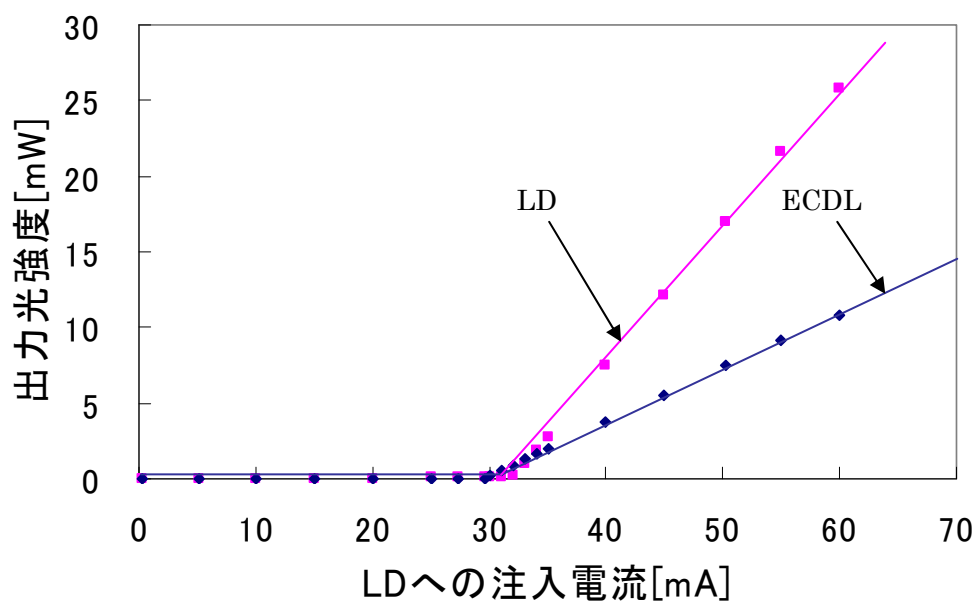


図 4.1 出力光強度の測定結果

## 4.2 発振線幅

- ・ 分光器による発振線幅測定

レーザーの発振線幅を Ocean Optics 製広帯域分光器 USB2000 で測定した。

図 4.2、図 4.3 に LD と ECDL の発振スペクトルをそれぞれ示す。LD の発振線幅は約 1nm、ECDL の発振線幅は約 0.6nm となった。この測定器の分解能は 0.6nm であるため、ECDL の発振線幅は測定器の分解能以下であることが考えられる。そのため、より高い分解能である光スペクトルアナライザを用いて測定を行なった。

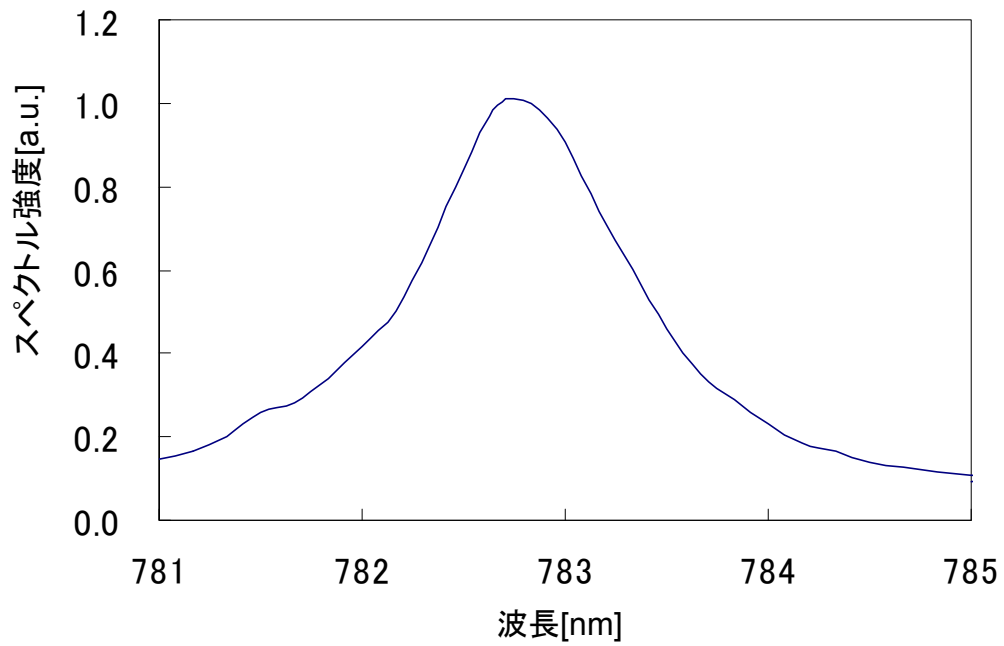


図 4.2 半導体レーザーの発振スペクトル

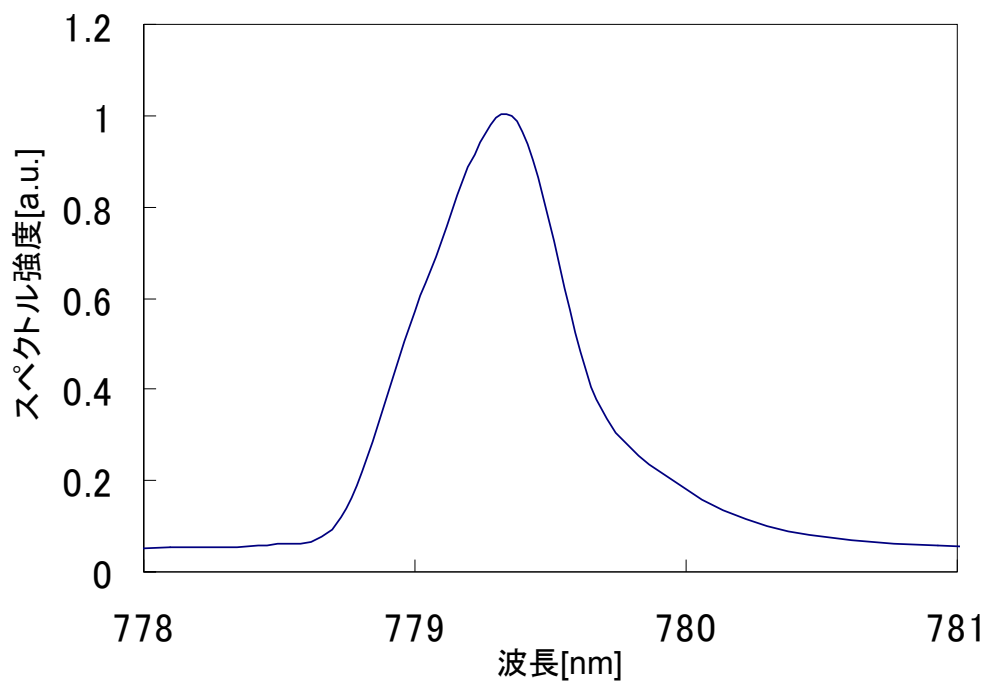


図 4.3 外部共振器型半導体レーザーの発振スペクトル

- ・ 光スペクトルアナライザによる発振線幅測定

Burleigh 社製光スペクトルアナライザ FPSA を用いて LD と ECDL の発振線幅の測定を行なった。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 LD の発振モードに共振させて、オシロスコープで線幅の測定を行なうものである。

表 4.1 の測定器の仕様を示す。PZT に印加する電圧によって共振器長を調節することができる。FP 共振器の FSR は 2GHz である。光スペクトルアナライザの測定分解能は次式で示される。<sup>[1]</sup>

$$\Delta \nu = \frac{FSR}{F} \quad (4.1)$$

ここで、 $F$  はフィネスである。フィネスとは FP 共振器の共振の鋭さを表す指標である。この値は共振器の反射率によって決まる。この FP 共振器のフィネスは 300 であり、測定分解能は約 6MHz である。

表 4.1 ファブリ・ペロー型スペクトルアナライザの仕様

<i>FSR</i>	2GHz
フィネス	300
測定分解能	約6MHz

光スペクトルアナライザによる LD と ECDL の発振線幅の測定結果を図 4.4、  
図 4.5 にそれぞれ示す。図 4.4 より、LD はマルチモード発振していることが確  
認できる。図 4.5 より、ECDL は単一モード発振していることが確認できる。  
ECDL の発振線幅は 12.2MHz であった。

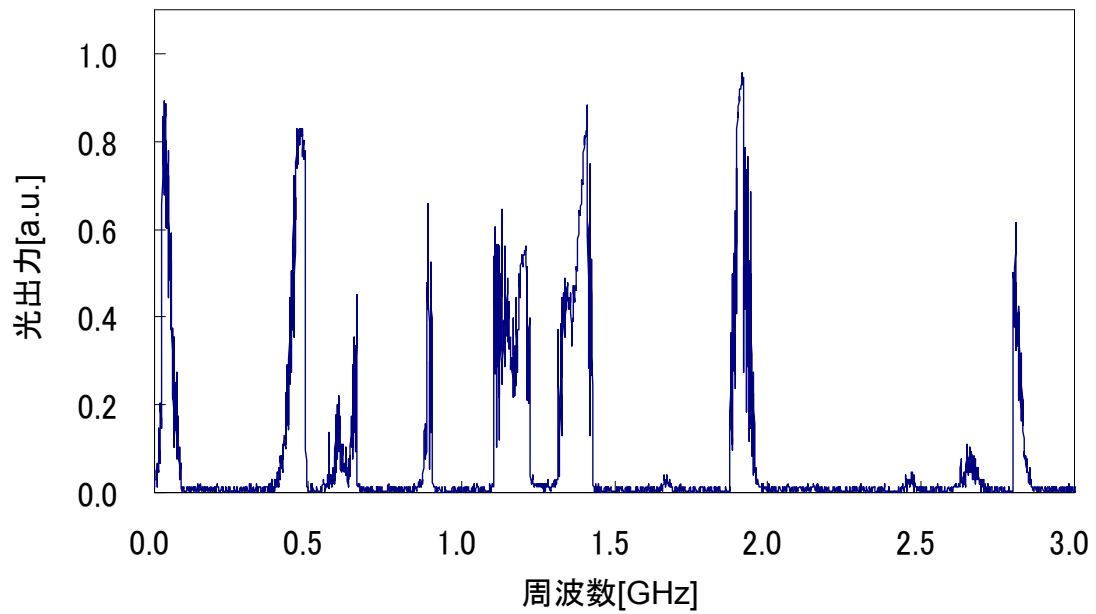


図 4.4 半導体レーザーの発振線幅測定結果

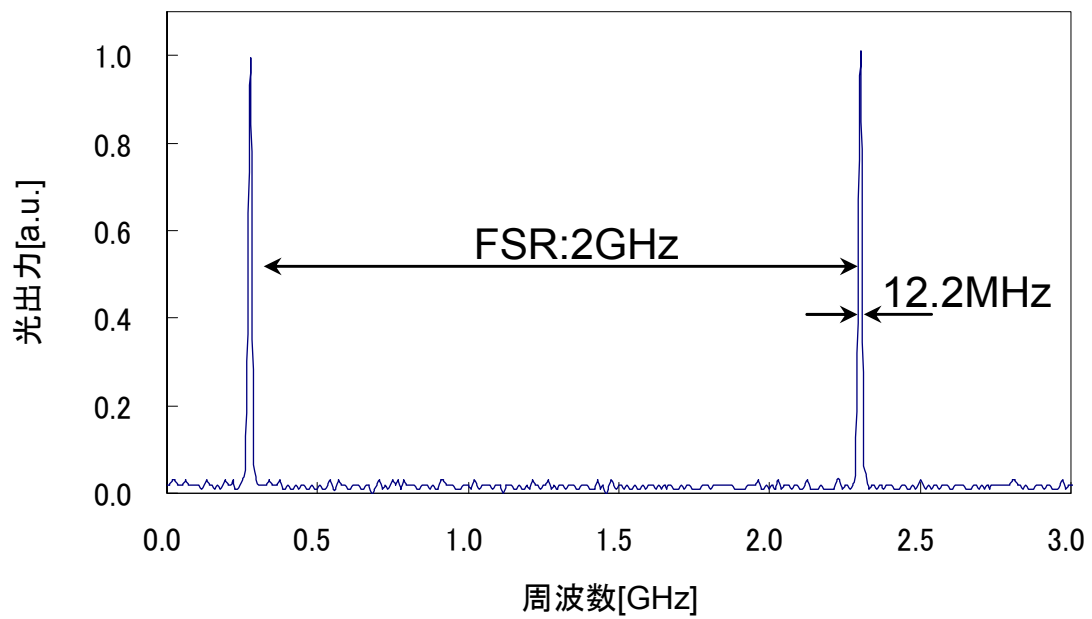


図 4.5 外部共振器型半導体レーザーの発振線幅測定結果

### 4.3 波長掃引特性

- ・ 波長掃引方法

ECDL の波長掃引は、マイクロメータを調節して回折格子の入射角を可変することで行なうことができる。しかし、手でマイクロメータを調節すると発振が不安定になる。これは指先の温度や振動によって共振器長が変化するためである。そこで、図 3.4 のように piezo 素子(PZT)をマイクロメータに取り付け、電圧印加によって調節を行なった。PZT は日本セラテック製 PAC166J を使用した。この PZT は 150V の印加で最大  $10\mu\text{m}$  変位する。

- ・ 波長掃引結果

図 4.6 に ECDL の波長掃引前の発振の様子、図 4.7 に波長掃引後の発振の様子をそれぞれ示す。図 4.6 の状態から PZT に電圧を加えていき、57V 印加されたときの様子が図 4.7 である。このとき、モードホップの発生が確認された。モードホップとは、温度や光出力の変化によって生じる LD の縦モードが飛び移る現象である。よって、ECDL の波長掃引幅は 0.9GHz であった。また、発振線幅は 15.3MHz であった。



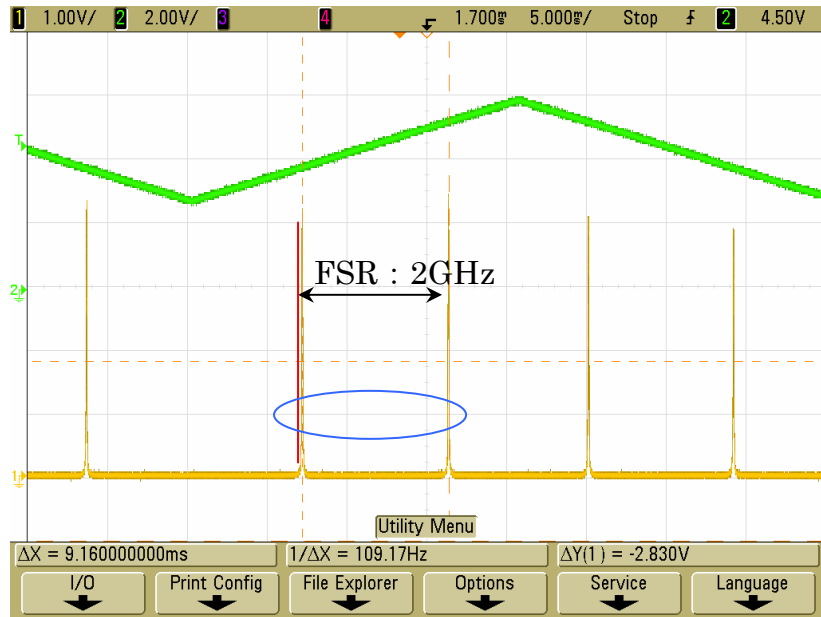


図 4.6 外部共振器型半導体レーザーの波長掃引前の発振状態



図 4.7 外部共振器型半導体レーザーの波長掃引後の発振状態

## 5. まとめ

外部共振器型半導体レーザー(ECDL)の共振条件の検討を行い、その共振条件を満たすような設計で ECDL の構築を行なった。また、構築した ECDL の出力光強度特性及び発振線幅、波長掃引量の測定を行なった。その結果、ECDL の閾値は 29mA、スロープ効率は 0.36W/A となり、発振線幅は 12.2MHz(単一モード発振)であった。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により、その最小吸収線幅はその分子にもよるがおよそ 1GHz とされている。よって、今回製作した ECDL の発振線幅は 12.2MHz であるため気体分子の吸収スペクトルを高分解能で測定することが可能である。また、構築した ECDL の連続波長掃引幅は 0.9GHz であった。微量気体成分の測定を行なうには最低でも波長を 10GHz 掃引する必要があるため、波長掃引幅は十分ではない。原因としては、波長掃引中にモードホップが発生し、発振状態が不安定となるためと考えられる。

今後は、温度調節器による温度制御や ECDL と光スペクトルアナライザの間にアイソレータを設置して戻り光の影響を防止するなどして、モードホップの低減を図る必要がある。

## 謝辞

本研究は平成 19 年 4 月から平成 20 年 3 月の約 1 年間にわたり、卒業研究として、富山商船高等専門学校電子機器実験室(由井研究室)において行なわれました。まず、研究全般にわたって多くのご指導、助言を頂きました由井四海先生に、お礼申し上げます。また、研究の方向性や考え方、工作作業の方法、実験器具の使用方法など、あらゆる面でご指導いただきました制御情報システム工学専攻 2 年鹿熊航太氏には、心からの謝辞を申し上げます。装置の製作にあたり、技術的に支援して下さった小竹外治技官、白川博樹技官にも感謝致します。

## 参考文献

- [1] 大津元一：入門レーザー，裳華房，1997
- [2] 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
- [3] 栖原敏明：半導体レーザの基礎，共立出版株式会社，1998
- [4] 山口一郎・角田義人：半導体レーザーと光計測，学会出版センター，1992