

富山商船高等専門学校 専攻科
平成 19 年度

特別研究報告



研究題目

Littrow 型外部共振器半導体レーザーシステムの特性

指導教員 _____ 由井 四海

提出者 _____ 制御情報システム工学専攻

_____ 鹿熊 航太 [mc06603]

平成 20 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の原理	- 2 -
2.2 回折格子の配置方法	- 3 -
2.3 外部共振器型半導体レーザーの発振条件	- 4 -
2.3.1 回折格子による条件	- 5 -
2.3.2 共振器長による条件	- 7 -
3. 外部共振器型半導体レーザーの製作	- 8 -
3.1 半導体レーザー	- 8 -
3.2 定電流電源	- 8 -
3.3 コリメートレンズ	- 10 -
3.4 回折格子	- 11 -
3.5 偏光ビームスプリッター	- 11 -
3.6 NDフィルタ	- 12 -
3.7 ベースプレートの設計	- 13 -
3.8 外部共振器型半導体レーザーの構築	- 13 -
3.9 外部共振器型半導体レーザーの調整	- 15 -
3.10 ピエゾ素子	- 16 -
3.11 温度制御器	- 17 -
3.12 ピボットポイント	- 18 -
4 外部共振器型半導体レーザーの特性	- 20 -
4.1 出力光強度特性	- 20 -
4.2 レーザーの発振線幅測定	- 23 -
4.3 温度制御器による発振特性の測定	- 27 -
4.4 波長掃引特性の測定	- 28 -
5. おわりに	- 30 -
5.1 まとめ	- 30 -
5.2 考察	- 30 -
5.3 今後の課題	- 31 -

付録	- 32 -
外部共振器の図面一覧	- 32 -
謝辞	- 35 -
参考文献	- 35 -

1.はじめに

近年の地球環境の悪化は顕著であり、中でも環境問題で最も注目されているのが地球の温暖化である。温暖化は二酸化炭素(CO₂)を始めとし、フロン(CFCL₃等)、ハロン(CF₃Br等)、メタン(CH₄)、一酸化二窒素(N₂O)などの温室効果ガスが原因となっており、世界各地で起こる異常気象の多くが温暖化によって発生していると考えられている。その他の大気問題ではオゾン層破壊、酸性雨なども挙げられ、オゾン層の破壊はフロン、ハロン、四塩化炭素(CCl₄)、トリクロロエチレン(CICH=CCl₂)、テトラクロロエチレン(C₂Cl₄)、トリクロロエタン(C₂Cl₃H₃)が原因であり、南極上空では4年連続して最大のオゾンホールが観測されている。また、酸性雨は硫黄酸化物(SO_x)、窒素酸化物(NO_x)などにより引き起こされ、ヨーロッパや北米などの幅広い範囲で被害が確認されている。

これらの環境問題を防止するためには、物質の濃度分布や物質構成の解析技術が重要となる。さらに、先に示した原因物質の濃度は数 ppb から数十 ppt と非常に微量であるため高感度な測定技術が求められる。

一般的な測定技術の1つとして吸収分光法がある。吸収分光法とは気体分子のエネルギー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、透過光強度を検出する方法である。

吸収分光法による高分解能測定を実現するためには、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、発振波長の広範囲の連続掃引が求められる。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、そのままでは吸収分光法の光源として使用することは難しい。本研究ではこれらの特性を改善した、Littrow 型外部共振器半導体レーザーの製作を目的とする。

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の原理

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レーザーであり、図 2.1 にその基本構成図を示す。レーザー光を回折格子によって1次の回折光と0次の反射光に分光し、回折光をLD内部へ戻すことによって、回折格子とLD内部の共振器後方端面との間に共振器を形成する。この共振器の共振器長 L_2 はLD内部の共振器長 L_1 に比べて長く、共振器の反射率 R_G もLD内部の共振器の反射率 R_f よりも高い。この2つの条件によって発振線幅の狭窄化が実現される。また、回折格子への入射角を変えることにより波長の連続掃引が可能となる。

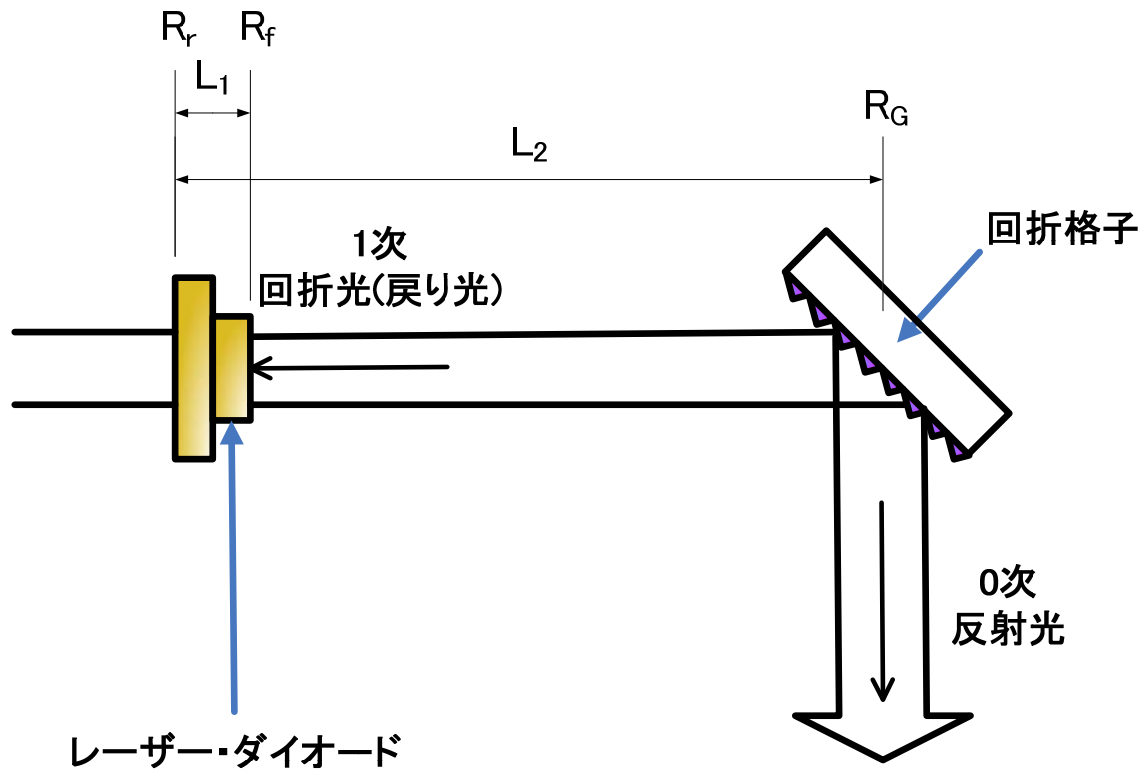


図 2.1 外部共振器型半導体レーザーの基本構成

2.2 回折格子の配置方法

回折格子とは素子表面に細かな溝が等間隔に刻まれた光学素子である。回折格子の配置方法には図 2.2 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いる。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る。特徴は共振器長が短いことにより光出力が高い点である。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て、LD 内部へ回折光を戻す。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。特徴は出射光方向を常に一定とすることができ、共振器長が長いいため、Littrow 配置に比べて発振線幅を狭くすることができる点である。本研究では光出力の高い Littrow 配置で ECDL を構成した。

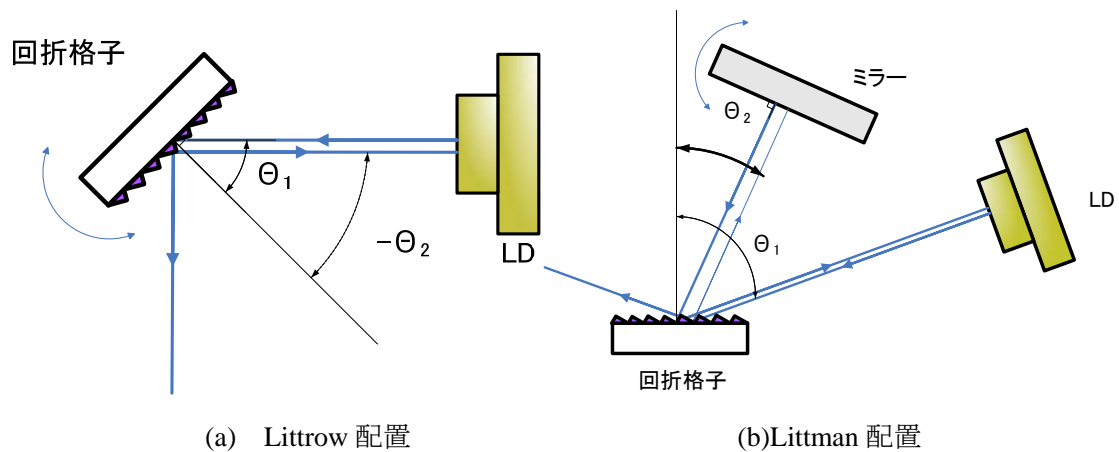


図 2.2 外部共振器型半導体レーザーの回折格子設置方法

2.3 外部共振器型半導体レーザーの発振条件

ECDLが発振するためには、図 2.3 の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される波長と共振器長による2つの発振条件について検討を行なう。

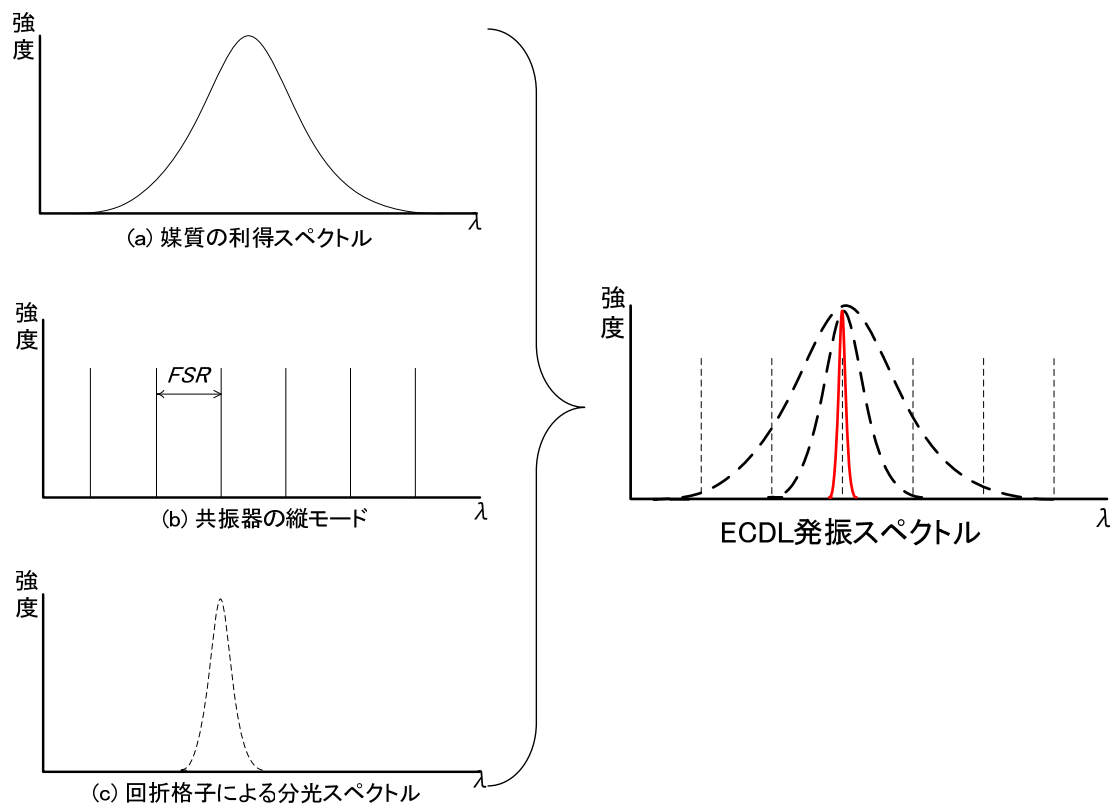


図 2.3 外部共振器型半導体レーザーの発振条件

2.3.1 回折格子による条件

回折格子による分光は図 2.4 のように行なわれ、分光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、

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

ここで、 d は格子溝間隔、 m は回折次数、 θ_1 は回折格子への入射角、 θ_2 は回折格子からの回折角、 λ 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 2.5 に示す。この結果より、 $D=1800$ 本/mm、 $\theta_1=45^\circ$ 、 $\lambda=784\text{nm}$ を ECDL の値とした。

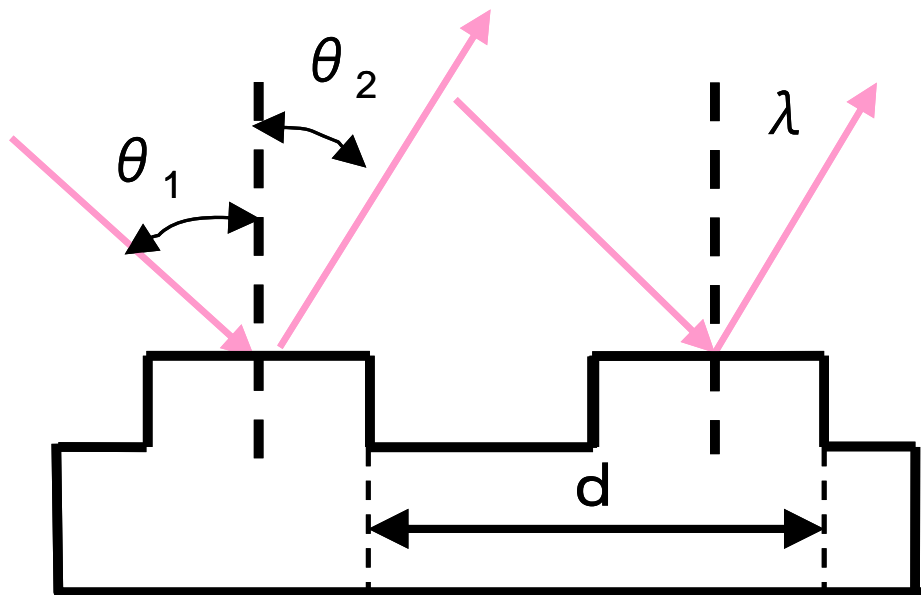


図 2.4 回折格子による分光原理

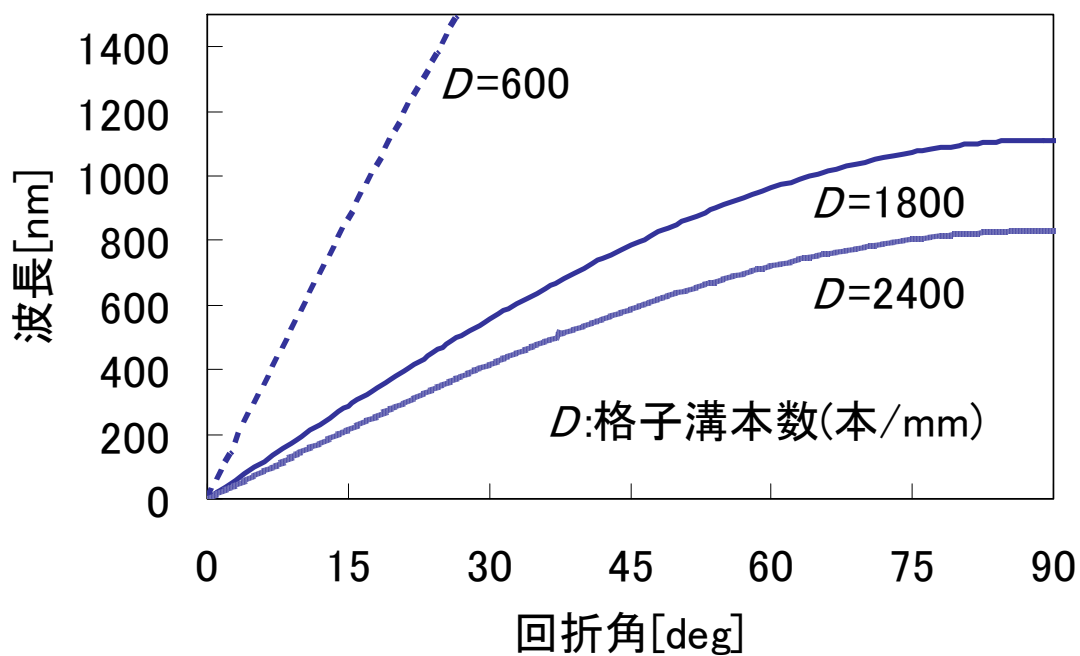


図 2.5 回折格子の回折角と分光波長

2.3.2 共振器長による条件

共振器の縦モード間隔である自由スペクトル領域 (*FSR*) は次式のように定義される。[4]

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

ここで、 c は光速、 L は共振器長である。光の波長と周波数の関係は、

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

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。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。

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。^[2] また、市販の LD は活性層($\approx 0.1 \mu\text{m}$)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(DH)構造を用いている。DH 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に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。本研究ではこの波長域の LD である GH0781JA2C(シャープ製)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 ($T=25^\circ\text{C}$)

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 定電流電源

LD への注入電流が変化すると共振器内のキャリア密度が変化する。^[4] これはすなわち、共振器内の屈折率の変化に相当する。また注入電流の変化は同時に温度変化をも引き起こす。したがって、注入電流の変化は LD の発振波長を変化させる要因となる。つまり安定した LD 発振を行なうためには電流電源の定電流制御が必須となる。そこで定電流電源をオペアンプによるフィードバック回路を利用し、自作することにした。

図 3.1 に自作した定電流電源の回路図を示す。この回路の動作は LD に流れる電流が増加した場合、トランジスタに流れるコレクタ電流(I_C)が増加する。このとき、エミッタ側の電流(I_E)が同時に増加するため、フィードバック回路の入力となる R7 の抵抗(10Ω)にかかる電圧も同様に増加する。R7 にかかる電圧はフィードバック回路の信号として作動し、最終段に設置されているオペアンプの比較動作により増加した電圧分の調整が行われる。よ

ってベース電流(I_b) が低下するため、 I_c も同時に減少し、LD への電流を一定に保つことができる。

図 3.2 に定電流電源の時間安定性を測定した結果を示す。また表 3.2 にそのときの測定条件を示す。結果として、電流値は 0.597mA 降下し、80mA の初期電流値に対する変動率は -0.746% となった。光学実験を行なう上での計測時間を 1 時間と仮定したところ、その変動率は約-0.35% 程度となり、LD の電流-波長特性から、十分に安定した発振が行える。

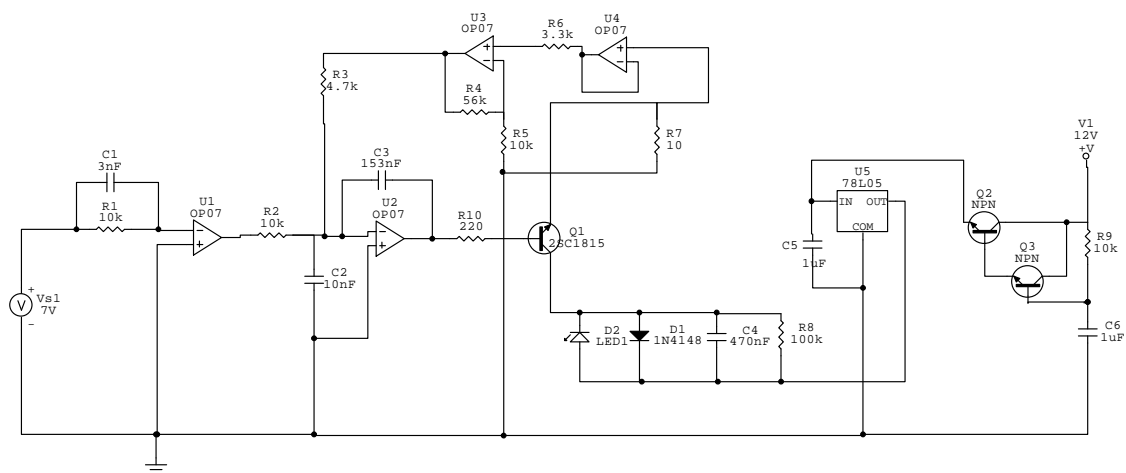


図 3.1 製作した定電流電源回路図

表 3.2 時間安定性の測定条件

測定機器	デジタルマルチメータPC5000(SANWA)
測定分解能[μ A]	0.01
出力電流[mA]	80
測定時間[h]	5
測定間隔[s/plot]	2

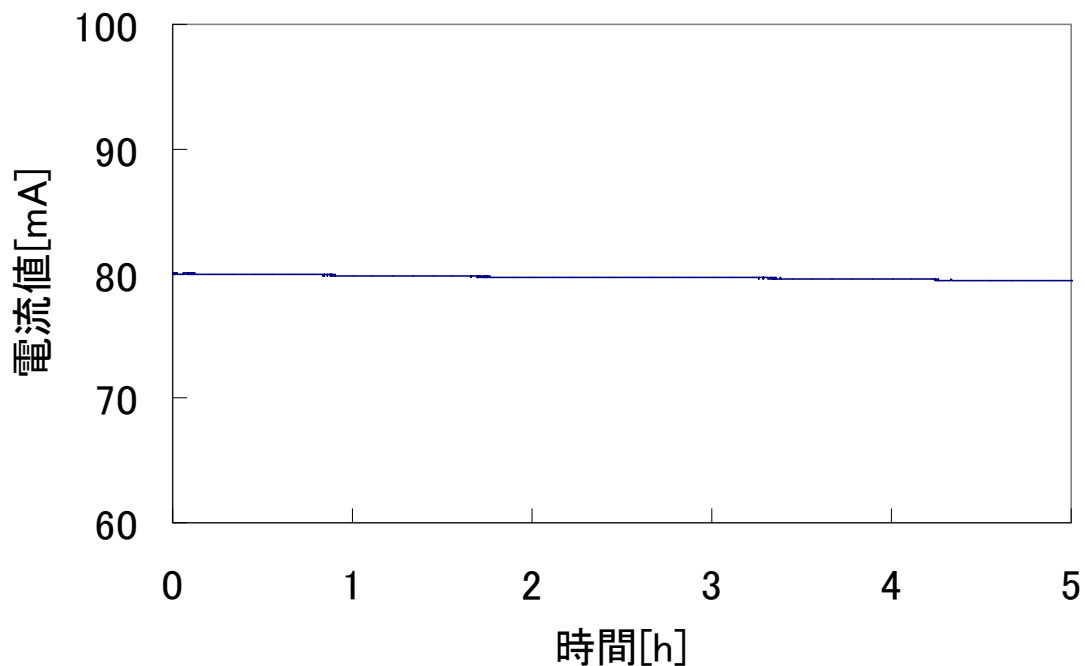


図 3.2 定電流電源の時間安定性測定結果

3.3 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る。

コリメートチューブ内に LD とコリメートレンズを入れ、専用スパナー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 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 を選択した。

$$NA = \sin \theta_{\perp} \quad (3.1)$$

3.4 回折格子

回折格子には Thorlabs 製 GH13-18V を用いた。図 3.3 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 3.3 より $\lambda=785\text{nm}$ の S 偏光で回折効率は約 65% である。

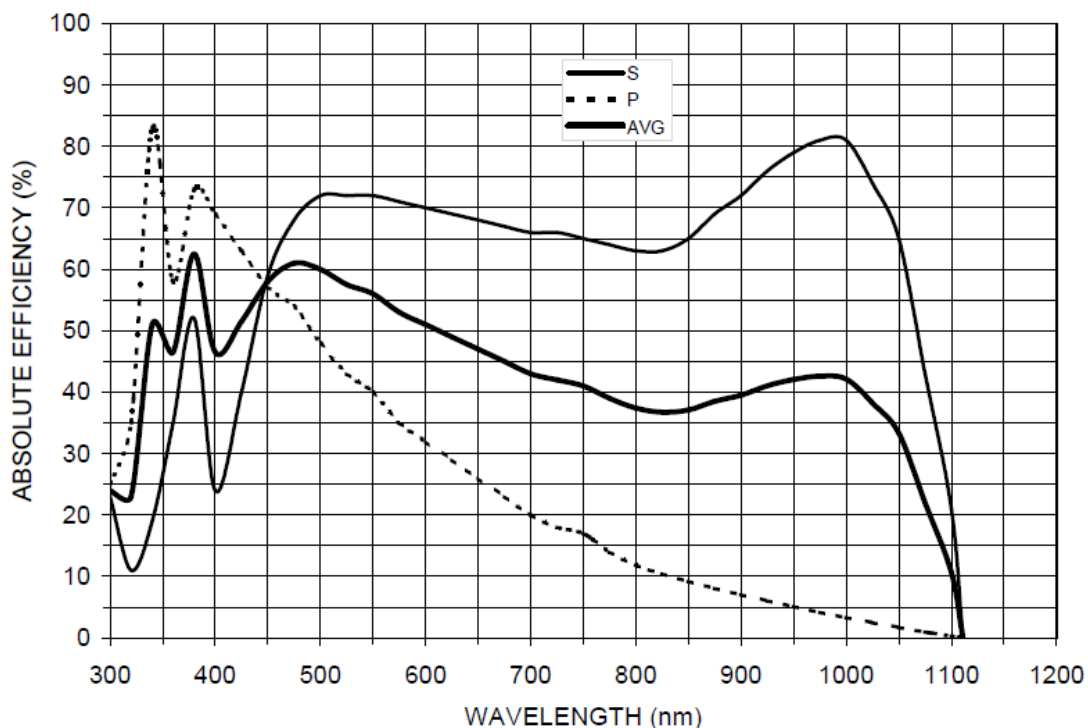


図 3.3 分光波長と回折効率

3.5 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° に反射された S 偏光の輝度が最も高くなるようする。

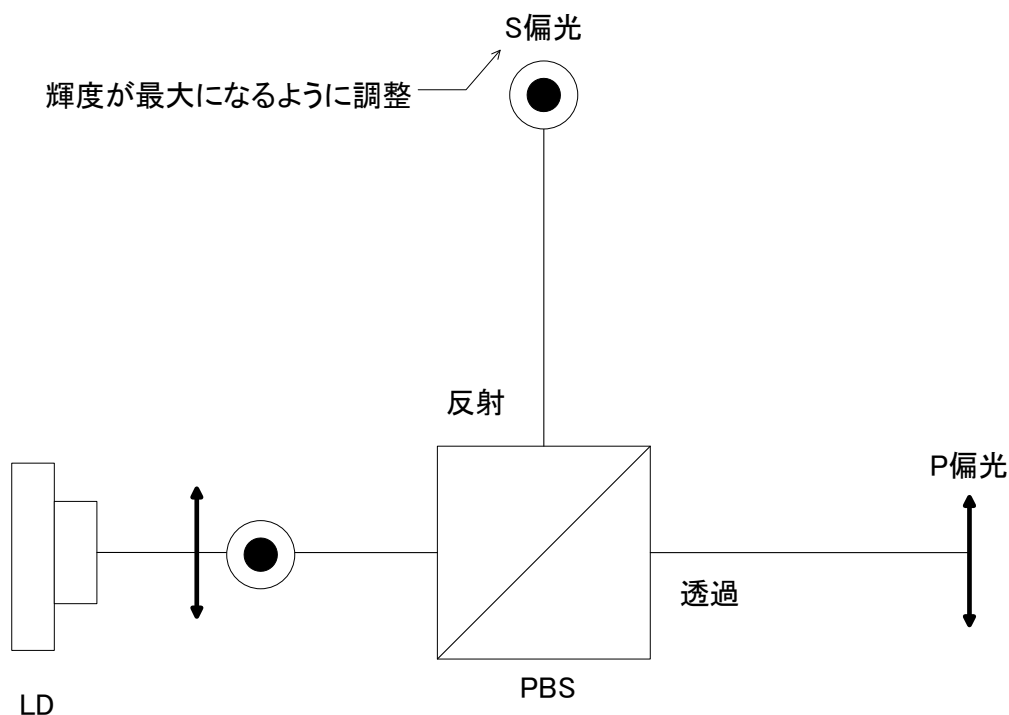


図 3.4 PBS による偏光方向調整

3.6 NDフィルタ

レーザーの光強度が強い場合、光強度を検出する測定器は飽和する。そこで、光強度を調整するために吸収型 ND フィルタを用いた。ND フィルタは任意の波長帯の中では波長を選ぶことなく、光量を一定の割合で落とすことができる。また、ND フィルタの特性値は一般的に、透過率ではなく光学濃度(OD)で定義される。光学濃度を定義することにより、フィルタを複数枚重ね合わせたときの全体の減衰率を求めることが対数の和減算で求められるため計算が容易になる。光学濃度と透過率の間には式(3.2)が成り立つ。

$$OD = \log_{10} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (\text{但し、} T \leq 1) \quad (3.2)$$

ここで、 OD は光学濃度、 T は透過率を表す。式(3.2)より透過率を求めると、

$$T = \frac{1}{10^{OD}} \quad (3.3)$$

となるため、仮に光強度によって測定機器が飽和を起こした場合でも ND フィルタを用いて補正を行なうことが可能となる。今回は光学濃度: $OD=0.15、0.3、0.4、0.6、0.9、2.5$ の 6

種類の吸収型 ND フィルタ(Edmund 製 ND-03~07SET)を組み合わせ測定時に最適な光強度に調整した。

3.7 ベースプレートの設計

ECDL の発振を得るためには、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、キネマティックマウント(Thorlabs 製 KS1D)と θ 軸租微動ステージ(シグマ光機製 KSP-406M)を利用した。KS1D の外形寸法は $50 \times 50 \times 43\text{mm}$ 、KSP-406M の外形寸法は $59 \times 40 \times 13\text{mm}$ である。(詳細図面は・付録「外部共振器の各構成部品設計図一覧」参照)

ベースプレートは $50 \times 117 \times 5\text{mm}$ アルミ製で、キネマティックマウントと θ 軸租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。またベースプレート端にはマグネットベースを取り付けるネジ穴が空いており、マグネットベースにより、ECDL のセットアップ作業を迅速に行なうことが可能である。

3.8 外部共振器型半導体レーザーの構築

図 3.5 に構築した ECDL の概略図と図 3.6 にその外観を示す。式(2.3)より、回折角の僅かな変化でも分光される波長は大きく変化することがわかる。例えば、回折角 $\theta_1=45^\circ$ で分光される波長は $\lambda \approx 785.67\text{nm}$ であるが、 θ_1 が 0.1° 変化した場合、波長 $\lambda \approx 787.04\text{nm}$ となり、約 1.37nm 変化する。つまり、分光波長の選択精度はこの回折角の可変量に大きく依存している。そこで、回折角の調整には θ 軸租微動ステージを用いた。このステージはマイクロメータによって最小分解能 40 秒で回折角を調整することが可能である。

また、2.3.2 項より外部共振器の FSR は離散的な値しか取ることができないため、LD の位置精度も重要である。式(2.7)より共振器長が 392nm の整数倍であるときに共振器が共振を起こすため、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を用いている。このマウントは上下・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、 $400 \mu\text{m}$ /回転の精度で $\pm 5\text{mm}$ の範囲内で動作する。

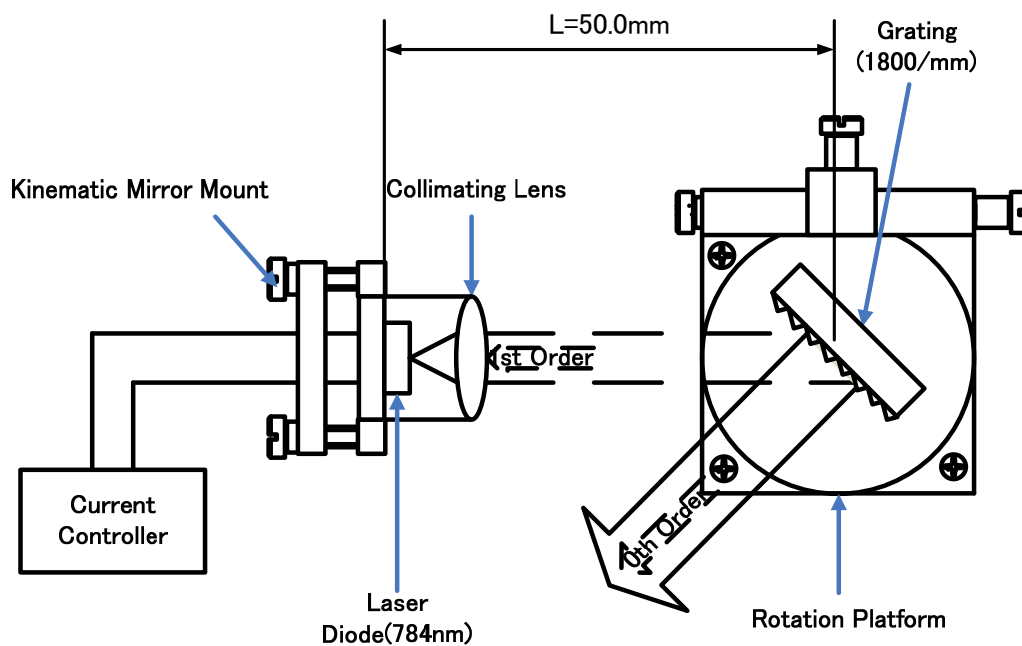


図 3.5 外部共振器型半導体レーザーの概略図

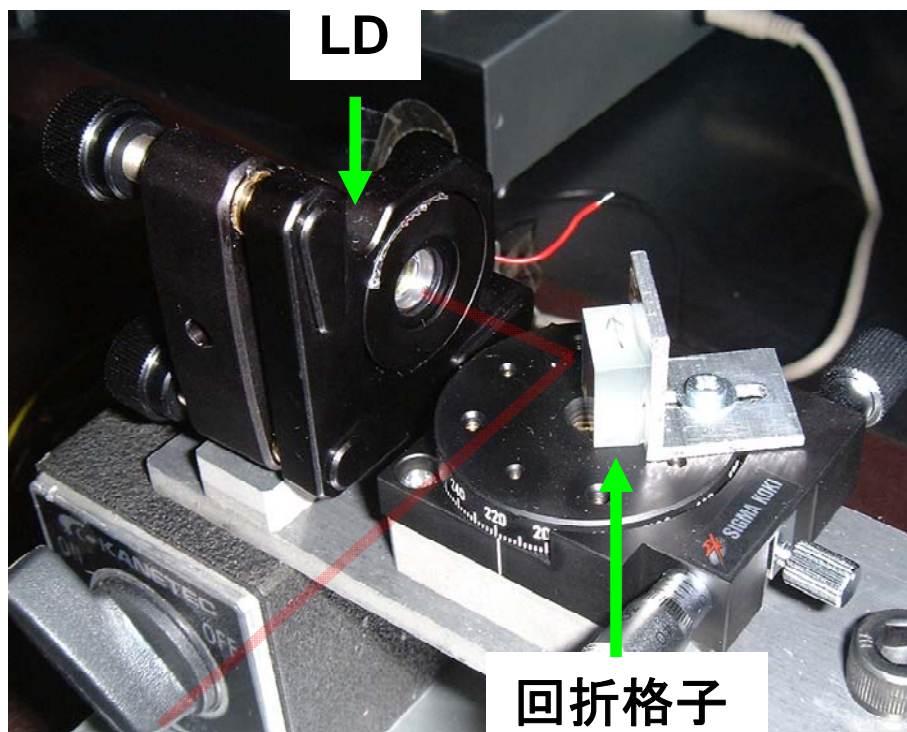


図 3.6 外部共振器型半導体レーザーの外観

3.9 外部共振器型半導体レーザーの調整

ECDL の発振条件は 2.3.1 項と 2.3.2 項で示したように、回折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調整が必要となる。しかし、今回は全て手作業で調整を行なう。次の手順で発振条件の調整を行なった。

[ECDL の調整方法]

- ① 全ての調整ネジを可動範囲の中間位置になるように調整
- 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整
(粗微動調整ネジを解除(緩める)する)
- 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、上下の順で調整
- 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整

以上の手順によって回折格子からの出射光の輝度を目で見ても最大に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。

3.10 ピエゾ素子

ECDL を発振状態にする調整は手動で可能だが、連続した波長掃引を手動で行なうことは振動や熱が LD に伝わることによるモードホップが起きるので難しい。そこで回折角の変位量を調整するために、 piezo素子(PZT)を用いた。今回使用した PZT は日本セラテック製 PAC166J である。150V を印加することで $10\mu\text{m}$ 変化する。これを図 3.7 のように θ 軸粗微動ステージの粗微動切替えネジの頭にセットする。PZT の駆動には PZT ドライバー(Direct Industry 製 NV/40IS)を使用した。

PZT にはヒステリシス特性があるため、使用の際には 0V~150V の電圧上昇(または 150V~0V 電圧降下)の一方のみで駆動させなければならない。

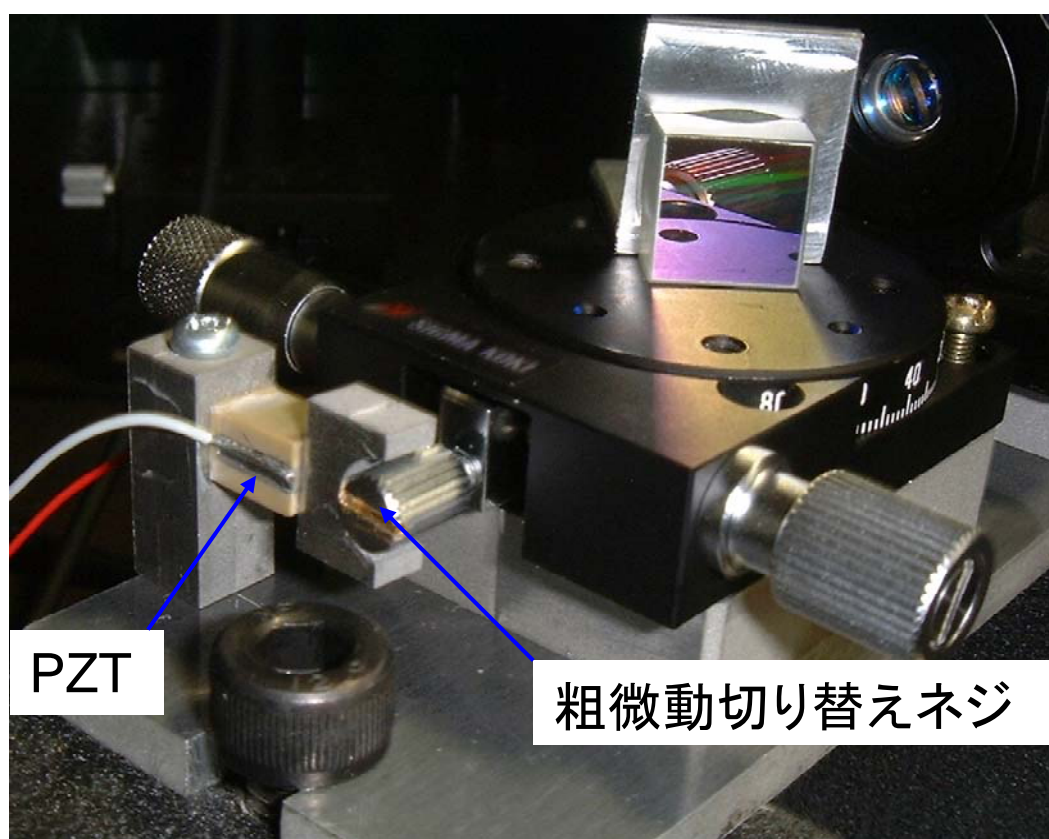


図 3.7 θ 軸粗微動ステージへの piezo素子取り付け

3.11 温度制御器

LD は温度が上がると結晶格子間隔が熱膨張で広がるため、エネルギーバンドが低下する。²⁾ エネルギーバンドの低下は発振波長とも関連があり、温度上昇とともに発振波長は長波長化することが確認されている。そこで、温度特性による影響を減少させ、ECDL の発振を安定に保つため、温度制御器(オムロン製 E5CN)を使用した。図 3.8 に温度制御システムの構成図を示す。E5CN は 2 自由度 PID 制御を行い、制御対象を設定温度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ の精度で一定に保つことができる。検出部の温度センサには白金測温抵抗体(Heraeus 製 FK222-100-A)を採用し、コリメーションチューブ表面に取り付けることで LD の温度を検出できる。また、ヒーターにはフィルムヒーター(Kyohritsu 製 FH-80)をコリメーションチューブに巻きつけて利用した。

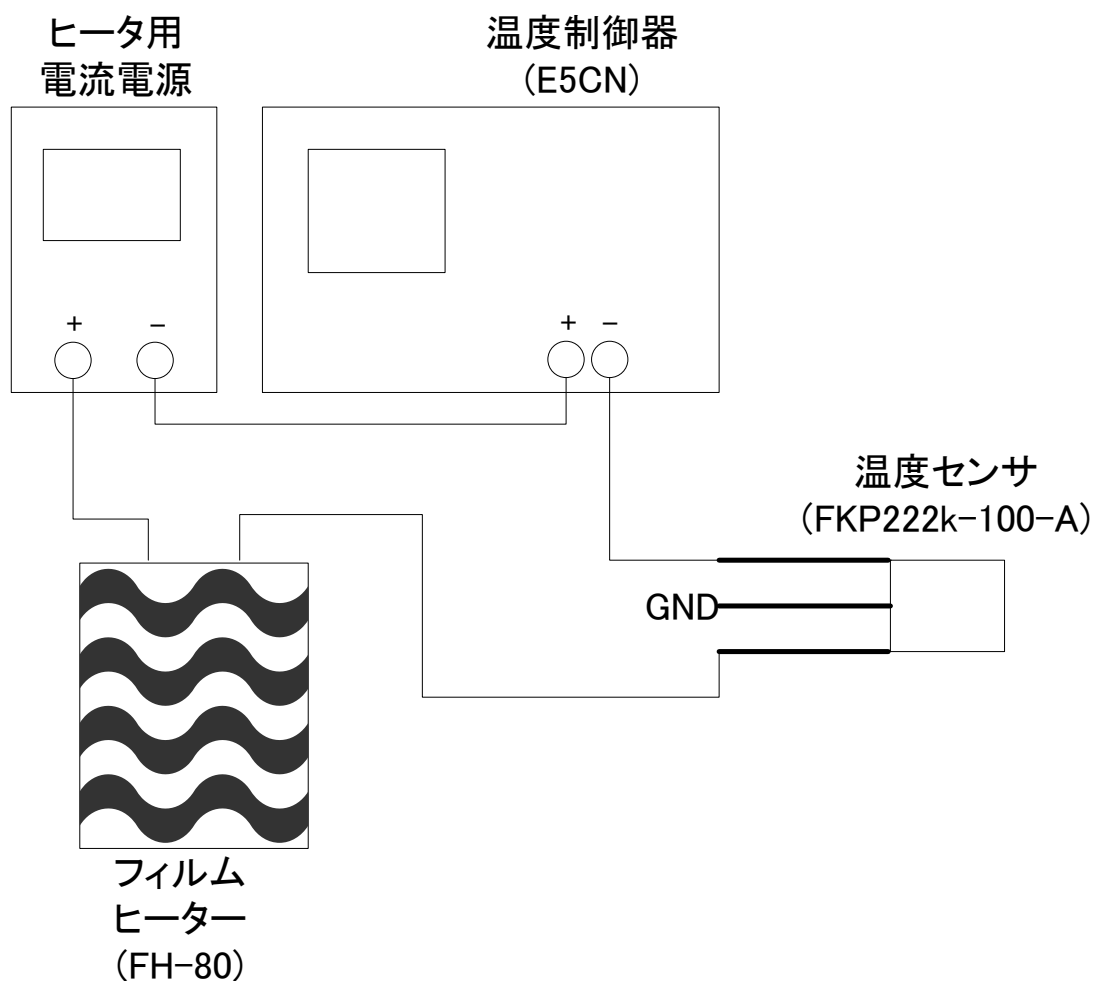


図 3.8 温度制御システム構成図



図 3.9 フィルムヒーター装着例

3.12 ピボットポイント

モードホップの発生を防止する次の手段として、ピボットポイントがある。ピボットポイントとは、2章で示した ECDL の発振に必要な回折格子による分光条件と、共振器長による共振条件を同時に満たしたまま、波長を選択できる点である。図 3.10 のように、ピボットポイントを中心として回折格子を動かすことで、波長掃引中のノイズとなるモードホップを発生させず、掃引を続けることができる。

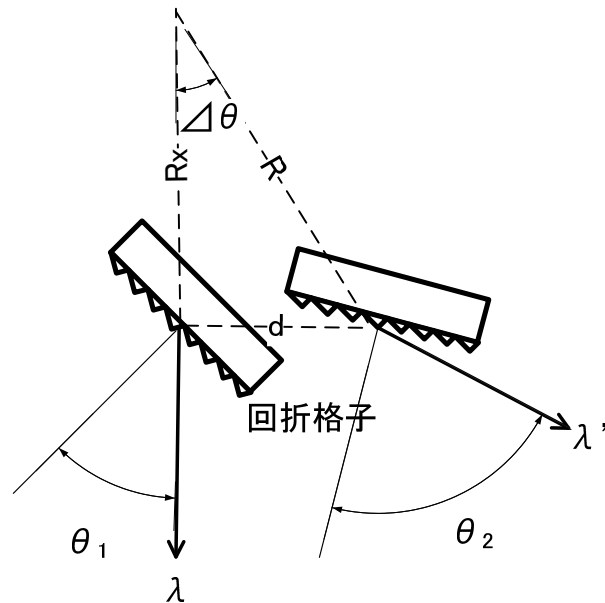


図 3.10 ピボットポイント概要図

ピボットポイントの座標は次のように求めた。共振器長 L が 50mm であるときの FSR は式(2.4)より $FSR=3 \times 10^9$ となる。また発振波長 $\lambda=784\text{nm}$ を式(2.5)によって周波数に変換すると $\lambda=784\text{nm} = \nu=382.653\text{THz}$ となる。ここで発振周波数 ν に存在する縦モード本数 n は

$$n = \frac{\nu}{FSR} \quad (3.4)$$

であり、 $n=127551$ 本となる。目標とする発振周波数の掃引量 $\Delta\nu$ は 10GHz であるから、 $\Delta\nu$ を式(3.5)で波長変換すると、 $\Delta\lambda=20.5\text{pm}$ となる。

$$\Delta\lambda = \frac{c}{\frac{c}{\nu - \frac{1}{2}\Delta\nu} - \frac{c}{\nu + \frac{1}{2}\Delta\nu}} \quad (3.5)$$

よって掃引後の発振波長は

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda \quad (3.6)$$

となり $\lambda'=784.0205\text{nm}$ となる。 λ を式(2.4)により再び周波数変換を行なうと、掃引後の発振周波数 $\nu \approx 384\text{THz}$ となる。掃引による共振器長の変化量は微小であるため、 n は掃引前、掃引後でほぼ等しいとすると、掃引後の FSR' は次式で求められる。

$$FSR' = \frac{\nu'}{n} = \frac{c}{2(L + \Delta L)} \quad (3.7)$$

ここで、 ΔL は図 3.10 に示すように、掃引で変化した共振器長差である。式(3.7)より ΔL を求めると、 $\Delta L=1.31 \times 10^{-5}\text{m}$ となる。最後に掃引で変動した回折格子の角度差 $\Delta\theta$ を求める。回折格子によって選択される分光波長を式(2.3)より求めると

$$\Delta\theta = |\theta_1 - \theta_2| = \left| \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2d}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{\lambda'}{2d}\right) \right| \quad (3.8)$$

となる。ここで θ_1 は掃引前の回折角、 θ_2 は掃引後の回折角である。よって式(3.8)より $\Delta\theta=0.014911^\circ$ となる。回折角による波長の変化の回折角差 $\Delta\theta$ 、共振器長の共振器長差 ΔL より、図 3.10 のように近似すると

$$\Delta\theta = \frac{\Delta L}{R_x} \quad (3.9)$$

となり、式(3.9)によりピボットポイントの座標を求めるとその座標はレーザーの照射される回折格子端面から $R_x=50.2\text{mm}$ 、 $\Delta L=1.51 \times 10^{-5}\text{m}$ の位置となる。

ピボットポイントを ECDL に実装するために、外部共振器の改良を行なった。図 3.11 にピボットポイントの設計により再構築した ECDL 外観を示す。ベースプレートを延長して、 θ 軸微調整ステージを取り付けて、アームを伸ばし、先端に回折格子を設置した。(ピボットポイント実装用部品の詳細図は付録参照)

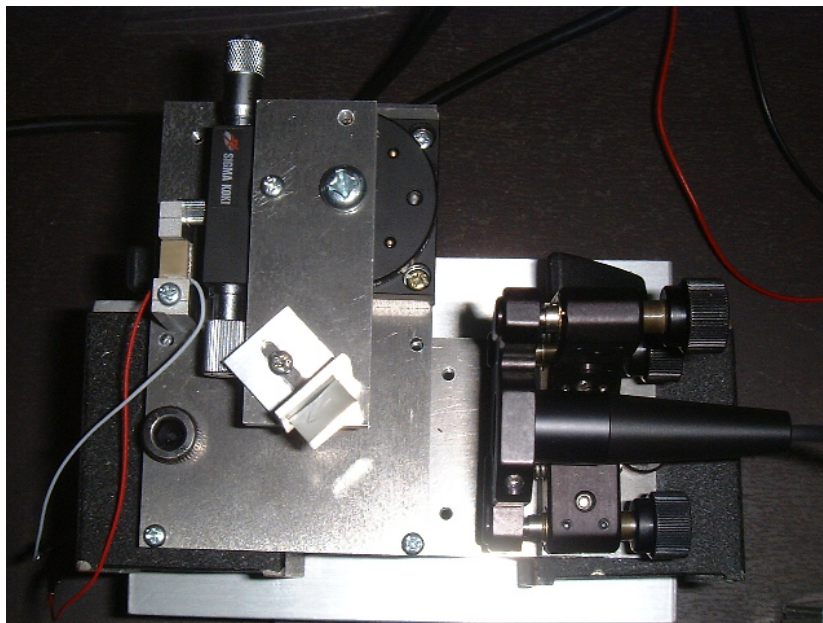


図 3.11 ピボットポイントにより再構築した外部共振器型半導体レーザー外観

4 外部共振器型半導体レーザーの特性

製作した ECDL の評価を行なうため、各特性値を測定した。測定は出力光強度特性、レーザー線幅特性、波長掃引特性の 3 つを行なった。

4.1 出力光強度特性

- ・ 閾値、スロープ効率

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、半導体レーザー(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(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。^[2]

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

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

・パワーメータ

出力光強度を測定するため、パワーメータを自作して測定を行った。パワーメータのフォトダイオード(PD)には Hamamatsu 製 S2387-1010R を用いた。この素子の受光感度は 785nm 付近の波長において 0.45A/W である。パワーメータでは光強度が電圧として出力されるため、可変抵抗値より PD による光励起値を求め光出力に換算した。光強度を測定する時に PD への入射光が強い場合、出力電圧がオペアンプの電源電圧である 9V を上回り、出力が飽和する可能性がある。この場合、ND フィルタによる出射光の減衰が必要となる。図 4.1 にパワーメータの回路図を示す。可変抵抗 R1 により、出力のゲインが調整できる。また、光入力に対する PD の動作を高速化させるため、スイッチ S1 により逆バイアスがかかることもできる。

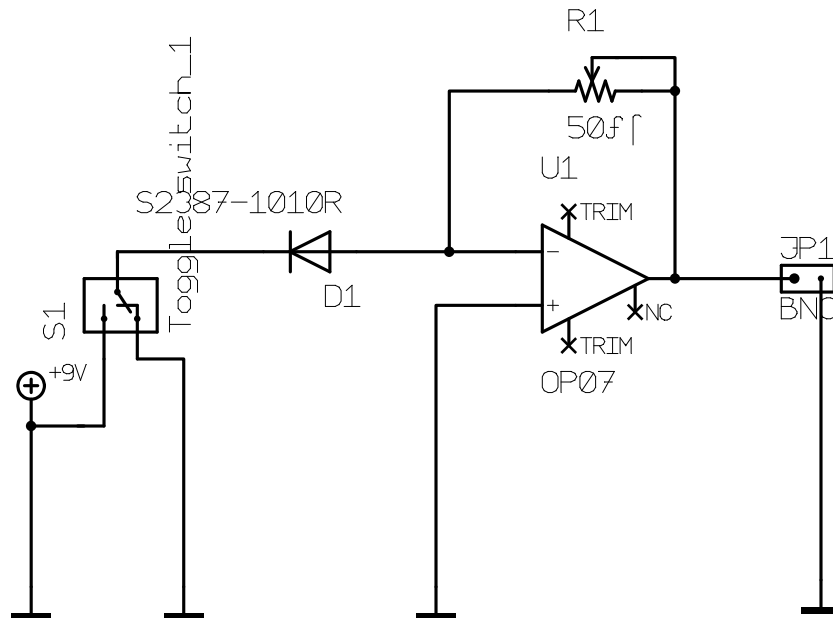


図 4.1 パワーメータ回路図

・出力光強度特性の測定

出力光強度の測定は次の手順で行なった。

[出力光強度測定手順]

- 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
- 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 Ω 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。)

$$\text{光学濃度 } \tau \text{ の ND フィルタを使用した場合の補正式 } P_{Offset} = \frac{P}{\frac{1}{10^\tau}} \quad (4.4)$$

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 4.2 に出力光強度特性の測定結果を示す。この結果から、ECDL の閾値は 27mA、LD の閾値は 35mA となった。LD 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 のスロープ効率 0.75W/A と比べて小さい結果となった。

ECDL の閾電流密度は、一般的に式(4.5)で示され、

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

ここで d は活性層厚み、 η_i は内部量子効率、 Γ は活性層の光閉じ込め係数、 α_i と α_b はそ

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_o はゲインを生じる必要電流密度である。 L_1 、 L_2 、 R_G 、 R_f は図 2.1 に示す長さ及び反射率である。 L_2 が L_1 より長く R_G は LD の前方端面反射率 R_f より大きいため、閾電流密度は小さくなる。実験結果も同様の傾向を示している。

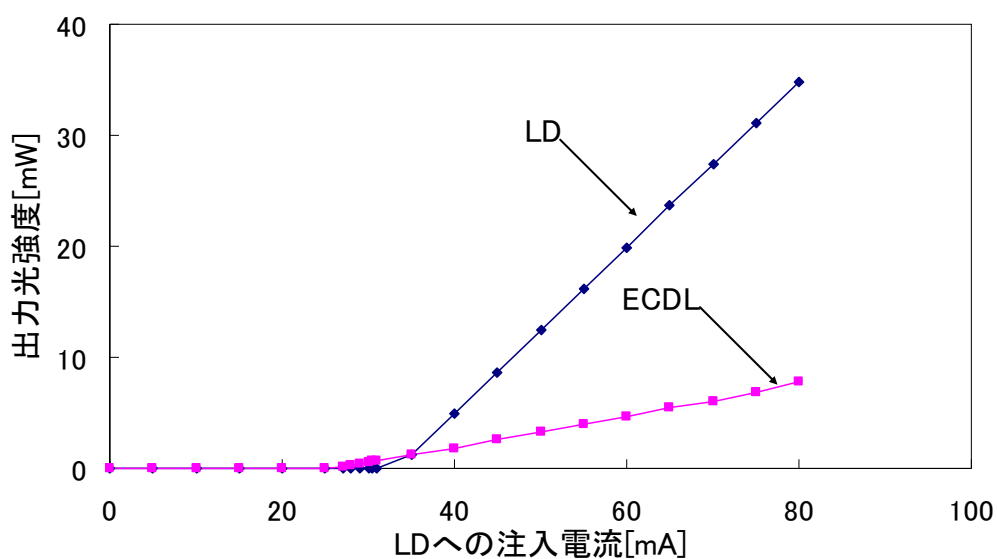


図 4.2 出力光強度の測定結果

4.2 レーザーの発振線幅測定

・分光器による測定

レーザーの発振線幅を小型ファイバ分光器 USB2000(Ocean Optics 製)で測定した。図 4.3 と図 4.4 に LD と ECDL の発振スペクトルを示す。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を以下である可能性が考えられる。そのため、より高い分解能の光スペクトルアナライザを用いて測定を行なった。

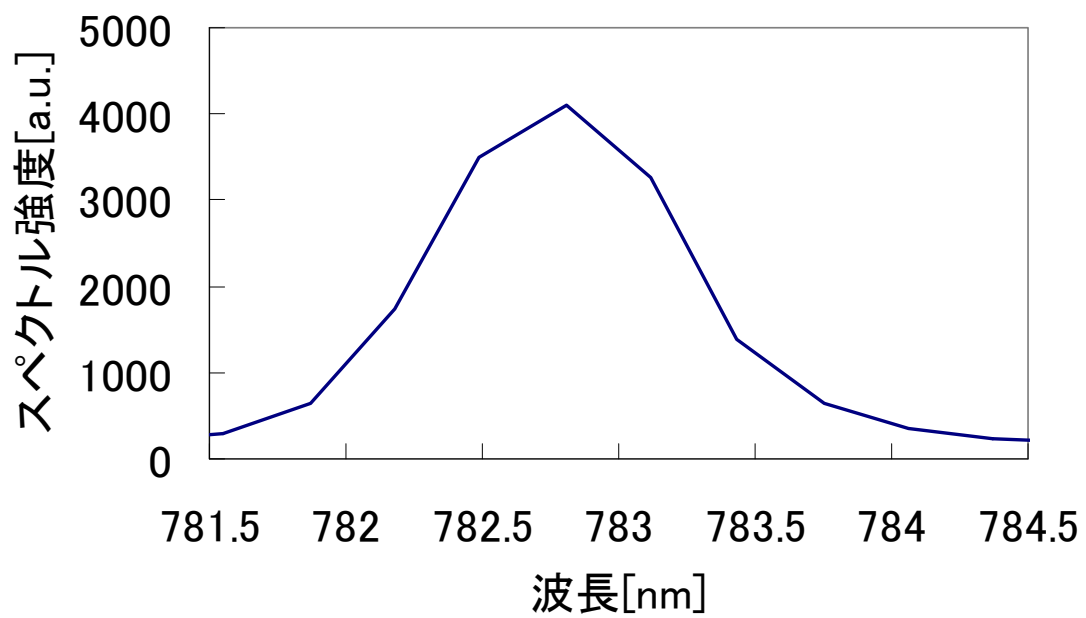


図 4.3 半導体レーザーの発振スペクトル

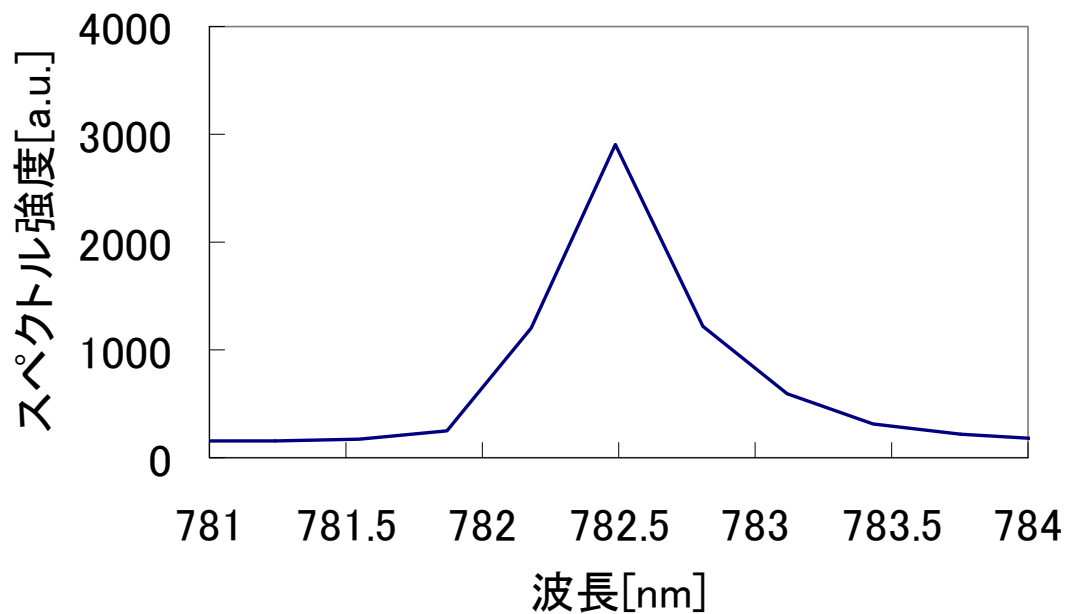


図 4.4 外部共振器型半導体レーザーの発振スペクトル

・ファブリ・ペロー型スペクトルアナライザによる測定

Burleigh 社製光スペクトルアナライザ(FPSA)を用いて LD と ECDL の発振線幅測定を行った。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、オシロスコープで線幅の測定を行なうものである。線幅測定は次の手順で行なった。

[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。
- ②FPSA に LD ・ ECDL の出力光を入射する。
(FPSA に対して直線上に出力光を入射すること)
- ③FPSA の調整ネジを縦横軸(前面)→あおり軸(背面) →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 の時間間隔を測定
- 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)の時間間隔を測定
- ⑥FSR、FWHM の測定時間より、周波数変換した FWHM を求める。

表 4.1 に測定器の仕様を示す。PZT に印加する電圧により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。式(4.3)に光スペアナの測定分解能を示す。^[3]

$$\Delta\nu = \frac{FSR}{F} \quad (4.6)$$

ここで、 F はフィネスと呼ばれ、共振器の反射率で決まる値である。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

FSR	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発振線幅測定結果

光スペクトルアナライザによる LD の発振線幅測定結果を図 4.5 に示す。マルチモード発振していることが確認できる。ECDL の発振線幅測定結果を図 4.6 に示す。ECDL の発振モードは単一モードであることがわかる。その発振線幅は 10.4MHz であった。

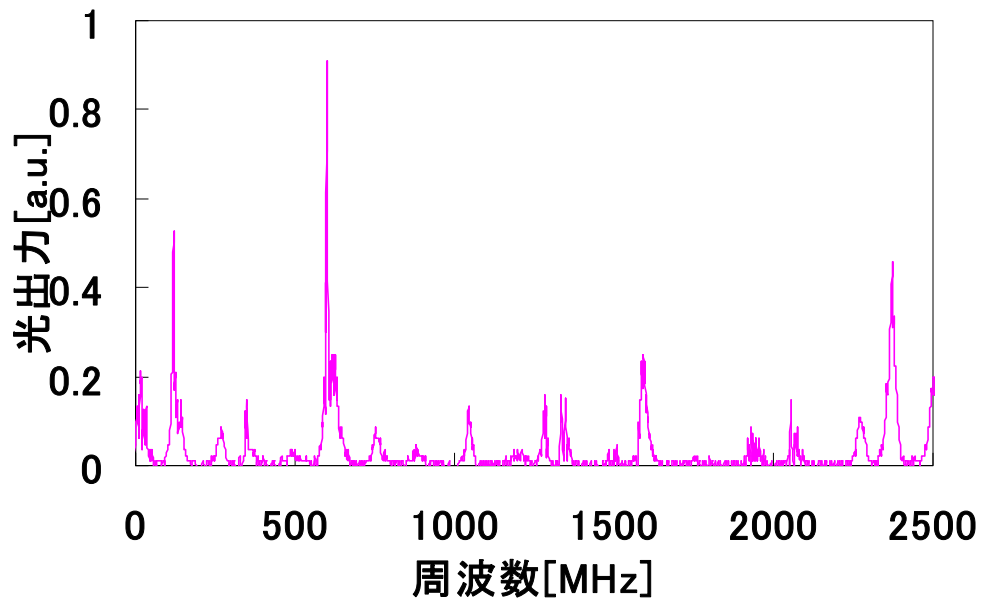


図 4.5 半導体レーザーの発振線幅測定結果

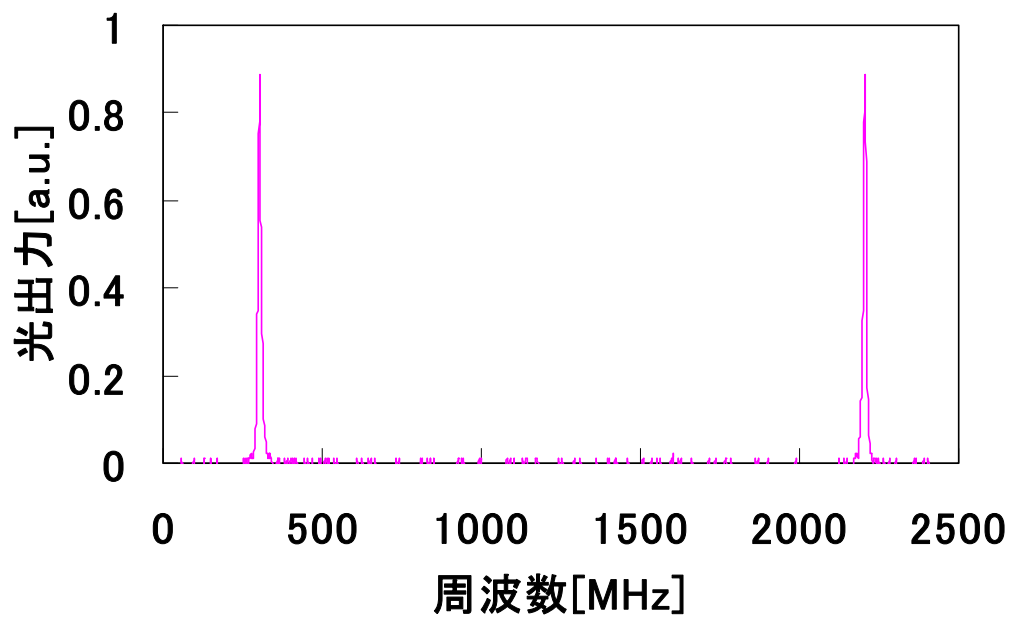


図 4.6 外部共振器型半導体レーザーの発振線幅測定結果

4.3 温度制御器による発振特性の測定

温度制御器による発振への影響を測定するため、発振状態の評価パラメータとして次のような特性値を設けた。

- ・発振周波数安定度

5 秒あたりに中心スペクトルが変化した周波数範囲を発振周波数安定度の目安とした。測定の手順は次のように行なった。

[発振周波数安定度測定手順]

- ① 温度制御器・ヒーター用電源のスイッチを ON にし、設定温度で安定させる。
- ② ECDL の発振状態(特に FSR)を観測できるように、FPSA を調整する。
- ③ オシロスコープの[Disply]キーを押して、画面メニュー左下の[∞preset]を on にする。
- ④ ストップウォッチまたはカウントダウンタイマーで 5 秒間計測を行なう。
- ⑤ 5 秒後に RUN/STOP ボタンを押し、変動した周波数の時間間隔を[CURSOR]モードで測定する。
- ⑥ FSR の時間間隔を測定する。
- ⑦ FSR の時間間隔より変動した周波数範囲の時間間隔を周波数変換する。

実験では室温(温度制御なし)、+40℃、+50℃の 3 種の設定温度で測定した。各温度でそれぞれ 3 回の測定を行ない、周波数安定度の平均値と温度の関係を求めた結果を図 4.7 と表 4.2 で示す。図 4.7 より、温度が高温になるほど、発振周波数安定度は悪くなる傾向がみられた。特に 40℃・50℃の測定では表 4.2 より各回の実験結果にバラツキがみられ、発振が安定していないことがわかる。

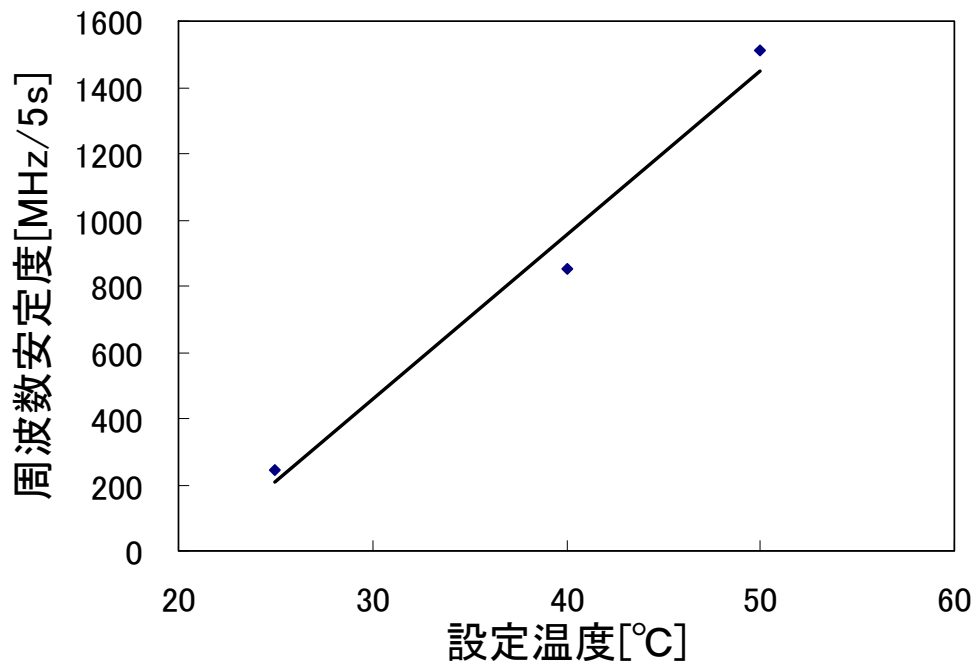


図 4.7 各設定温度と発振周波数安定度の平均値

設定温度[°C]	5秒間での発振周波数変動[s/5s]	発振周波数安定度[MHz/5s]	FSR[s]	平均周波数安定度[MHz/5s]
25	1.20E-03	2.51E+02	9.56E-03	246.73
	1.10E-03	2.39E+02	9.20E-03	
	9.00E-04	2.50E+02	7.20E-03	
40	5.10E-03	1.19E+03	8.60E-03	851.30
	2.70E-03	6.00E+02	9.00E-03	
	4.30E-03	7.68E+02	1.12E-02	
50	6.60E-03	1.40E+03	9.40E-03	1512.93
	8.20E-03	1.93E+03	8.50E-03	
	4.70E-03	1.21E+03	7.80E-03	

表 4.2 周波数安定度測定結果

4.4 波長掃引特性の測定

piezoelectric material (PZT)による波長掃引特性を測定した。ただし、PZT は印加電圧 0V による初期変位量のバラツキが大きいと考えたため、使用の際には 50V を初期入力電圧とした。PZT を用いた波長掃引特性は次のように測定した。

[PZT による波長掃引測定手順]

- 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 の安定した発振(FSR)を確認する。
- ③ オシロスコープの[CURSOR]モードで X1 ラインを中心スペクトルにセットする。
- ④ PZT ドライバーの印加電圧を増加させ、波長の掃引を確認する。
- 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 ドライバーの電圧印加を中断する。
- 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 の時間間隔(Δx)を測定する。
- ⑦ FSR の時間間隔を測定する。
- ⑧ 測定したライン間の時間軸を周波数変換する。

図 4.8 に PZT による波長掃引特性測定結果を示す。この測定では PZT への印加電圧 116V でモードホップが発生し、波長掃引量は 1.02GHz となった。また PZT のヒステリシス特性の影響が少なかったため、再現性が高く安定した掃引制御を行えることがわかった。



図 4.8 PZT による波長掃引量測定結果

5. おわりに

5.1 まとめ

外部共振器半導体レーザー(ECDL)を構築するために必要な共振条件を検討し、定電流電源やコリメートレンズ、微調整ステージを用いることにより手動調整が可能で安定した発振が行なえる発振波長 784nm の外部共振器型半導体レーザー(ECDL)の製作を行った。また、パワーメーターと光スペクトラムアナライザを用いて、製作した ECDL の各特性の測定を行なった。今回製作した ECDL の特性は閾値 27mA、発振線幅 10.4MHz(単一モード発振)となった。連続した波長の掃引幅は 1.06GHz であった。

5.2 考察

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 10.4MHz であるため吸収線スペクトルを高い分解能で測定でき、気体測定が可能となる。

複数の組成気体で構成され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 になる。現状の ECDL では掃引幅が 1GHz 程度であるため、このような測定対象気体に吸収分光を行なう場合、掃引幅の改善が必須となる。具体的な対策として、ピボットポイントの設計を行なった。しかし、ピボットポイントを設計し、外部共振器の再構築を行なった結果、波長の掃引幅は低下した。この原因としては、周運動になるピボットポイントの動作を、式(3.9)のように $\tan \angle \theta$ で近似したことや製作時に加工による寸法誤差が生じたことなどが考えられる。また外部共振器の構成部品数が多くなったため、装置にかかる振動の影響が大きくなった可能性がある。

また掃引量を改善するためにはモードホップの発生を抑制することが挙げられる。モードホップの発生原因の 1 つに LD の温度特性があるため、その対策として、LD に温度制御を行った。温度制御による LD の周波数安定度を測定したところ、高温にすることにより周波数安定度は悪化した。原因としては温度制御器の $\pm 1^{\circ}\text{C}$ という温度制御器の精度が、LD の温度特性に対して影響を与えるため、モードホップを多発させているのではないかと考えられる。また、温度センサの取り付け位置も、LD 素子自体ではなく、LDが入っているコリメートチューブ外部を計測しているため、LD 素子自体の温度とセンサの検出温度に誤差が生じていたのではないかと考えられる。

FP 光スペクトラムアナライザの受光する位置によって、発振周波数が変化することが確認された。これはスポット光の位置によって発振波長が変わることを表しており、文献によると発振波長 787nm のレーザーではスポット光の受光位置が 0mm から $\pm 2 \mu\text{m}$ 変化することで $\pm 0.5\text{nm}$ ($\Delta\nu \approx$ 約 49GHz) の範囲で変化した事例がある。^[4] これは連続掃引可能な範囲を超えており、受光位置の変化(出射光方向の変化)がモードホップを引き起こす要因であることを示している。

また回折格子には分光分解能があり、これは式(5.1)で求められる。

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{N} \quad (5.1)$$

ここで、 λ は中心波長、 N はレーザーが当たる回折格子の格子総数である。レーザーのスポット光面積を 2mm とすれば、本研究では $N=3600$ であるため、 $\Delta\lambda \approx 0.22\text{nm}$ ($\Delta\nu \approx 107\text{GHz}$) となる。よって回折格子分解能以下の連続した波長掃引は不可能であるとも考えられる。

5.3 今後の課題

今後の課題としては発振周波数の安定化が必要となる。その具体策としてレーザーと測定器の間に光アイソレーターを入れて戻り光の影響を減少させることや、LD の片端面に無反射コーティングを施して、複合共振器を形成させないなどが考えられる。また、連続した波長掃引幅を拡大させるためには、現在使用しているピエゾ素子(PZT)よりも変位量が大きな PZT アクチュエータに変更することが考えられる。

本研究で得られた特性を評価するには現状の ECDL で吸収分光法を行ない、吸収スペクトルの測定ができるか検証する必要がある。そして、発振線幅や掃引量に不備があるとなれば、測定に必要な特性値を得るために、適宜 ECDL を改良することが求められる。

・ベースプレート

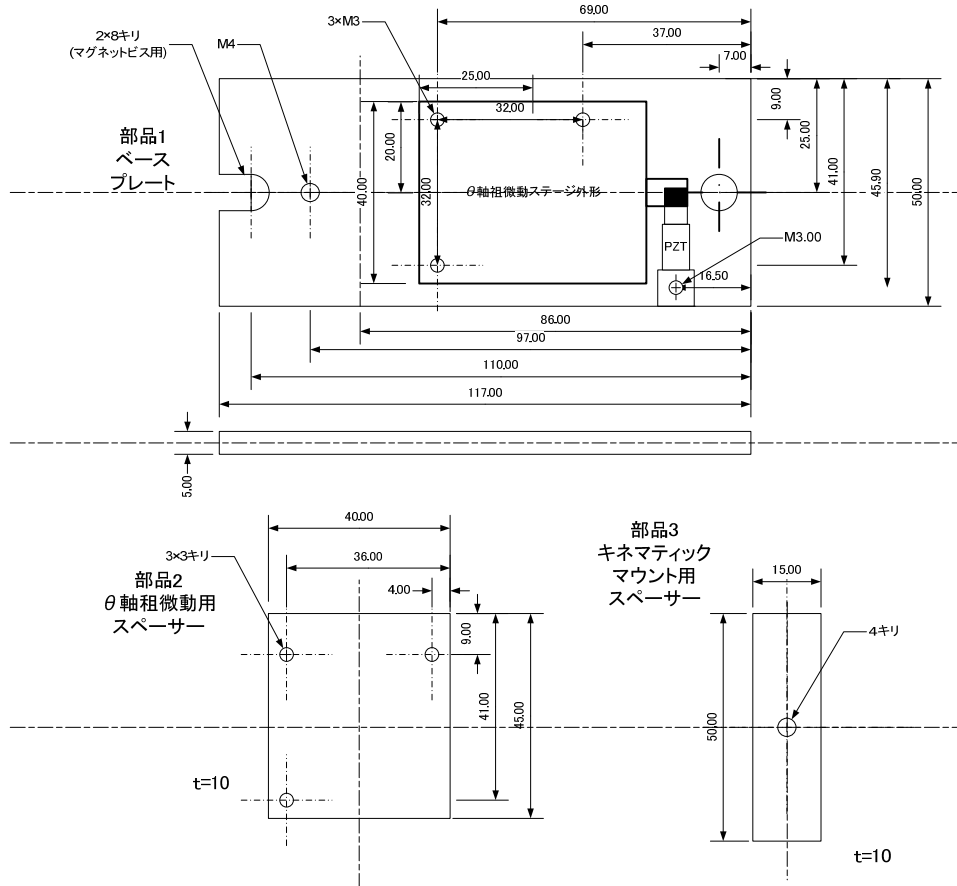


図3 ベースプレート各寸法図

・回折格子マウント

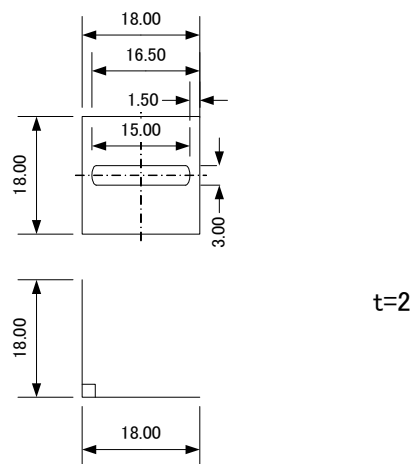


図4 回折格子マウント寸法図

・ピエゾ素子用軸受け

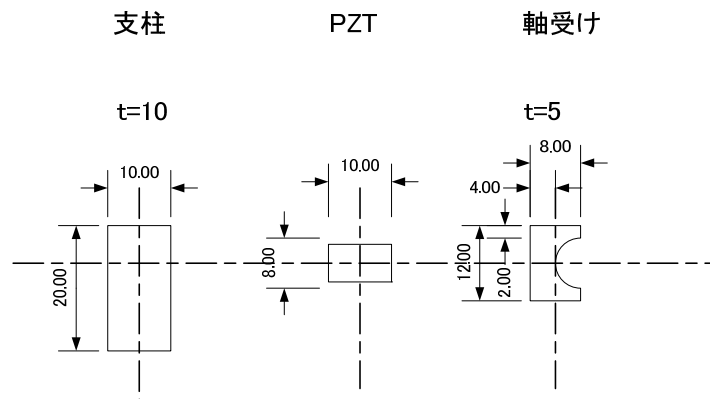


図5 ピエゾ素子用軸受け各寸法図

・ピボットポイント用取り付け部品

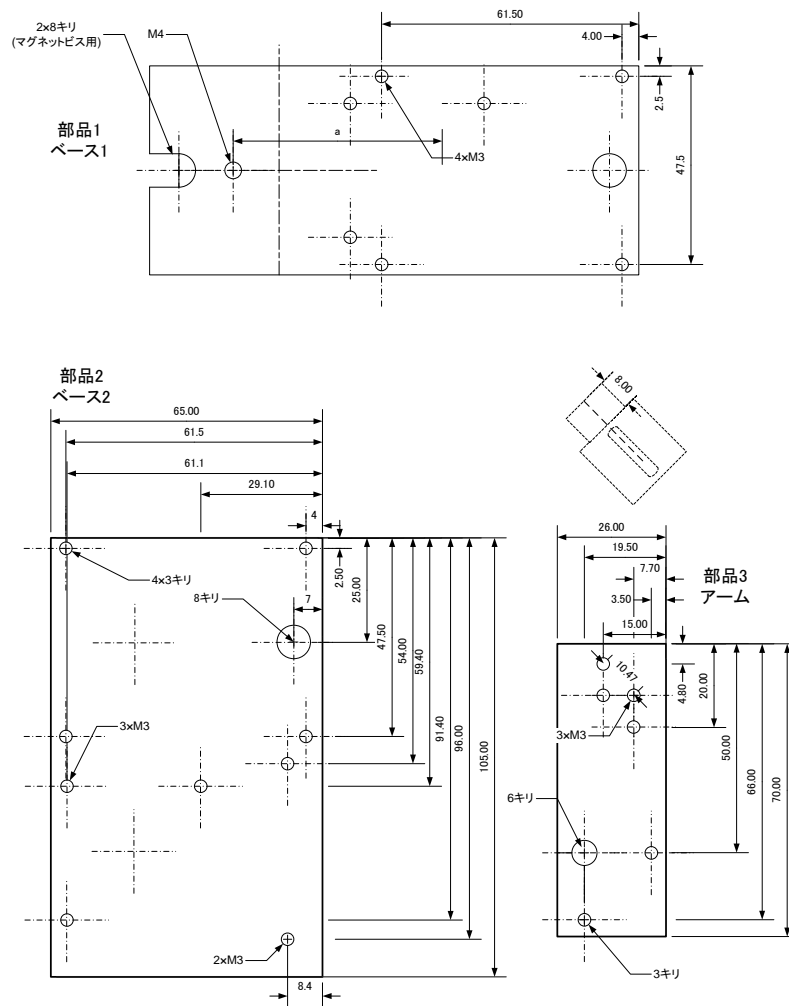


図6 ピボットポイント用取り付け各部品寸法図

※ベース1は穴位置を改造したもので ECDL のベースプレートがそのまま利用可能

謝辞

本研究は平成18年4月から平成20年2月にわたり、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、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。由井四海先生には電子制御工学科時代より3年間もの間多大なご指導、助言を頂きました。心より深く感謝致します。また装置の製作にあたり、技術的に支援して下さった、磐田忠三元技官、小竹外治技官、白川博樹技官にも感謝致します。電子制御工学科5年の大田光輔学生には実験のサポートなどをして頂きました。感謝するとともに本研究の引継ぎとして今後のご発展を願っております。

参考文献

- [1] 清水忠雄：レーザ入門，森北出版，1996
- [2] 平田昭二：わかる半導体レーザの基礎と応用，CQ出版社，2001
- [3] 大津元一：入門レーザー，裳華房，1997
- [4] 山本智一：共振器内分散特性を利用した大気微量成分高感度検出用光源の開発，千葉大学修士論文，1995