

1. はじめに	2
2. 外部共振器型半導体レーザーの原理	3
2.1 外部共振器型半導体レーザー	3
2.2 半導体レーザーの種類	4
2.3 回折格子の設置方法	5
2.4 外部共振器型半導体レーザーの発振条件	7
2.4.1 回折格子による条件	8
2.4.2 共振器長による条件	10
2.5 ピボットポイント	12
2.6 掃引量誤差の導出	14
3. 外部共振器型半導体レーザーの製作	17
3.1 半導体レーザー	17
3.2 コリメートレンズ	19
3.3 回折格子	19
3.4 ミラー	21
3.5 外部共振器型半導体レーザーの構成	22
4. 外部共振器型半導体レーザーの特性	24
4.1 外部共振器型半導体レーザーの発振	24
5. まとめ	26

1. はじめに

レーザー分光法の研究は、主に原子・分子を対象に行なわれてきた。レーザーは光を増幅し、空間的にコヒーレントな光を容易に実用的な強度で発生させることができ、指向性や収束性に優れている。また、ナノ秒～フェムト秒程度の時間幅の短いパルス光を得ることが可能で発生する電磁波の波長を一定に保つことができる。これらは分光用光源として理想的な特性であり、特に色素レーザー、半導体レーザーなどの可変波長レーザー光を原子・分子に照射して吸収蛍光・イオン化等の分光的応答を検討すると、従来になく高感度で高分解能のスペクトル計測ができ、原子分子の挙動を精密に観測できる。吸収スペクトルや励起スペクトルを測定する線型レーザー分光も従来の光源を用いる分光にくらべて感度と分解能が高いが、非線型レーザー分光ではさらに高い感度と分解能を得られる。レーザー分光法には、レーザー・ラマン分光法、レーザー誘起蛍光分光、飽和吸収分光、CARS などのほか、二光子分光、偏光分光、コヒーレント過渡現象分光、共鳴イオン化分光、光音響分光などの様々な方法がある。これらを高精度に行うには、スムーズな連続チューニング、低雑音、狭いスペクトル線幅が要求される。このような要求を満たす単一縦モードのレーザー光源として、外部共振器型半導体レーザーが挙げられ、比較的安価に組むことができ、カスタマイズしやすいという長所を持つ。

本研究では、回折格子の配置方法は狭いスペクトル線幅を持ち、波長掃引時に射出方向が変化しない Littman 型外部共振器型半導体レーザーの構築を目的とする。

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。その動作原理は、LD からのレーザー光を回折格子によって1次の回折光と0次の反射光に分光するものである。回折光を LD 内部に戻すことによって、LD と回折格子の間に共振器が形成される。これにより、ECDL では LD より共振器長を長くとることができ、光共振器の反射率を高くできるため発振線幅を狭くすることができる。また、回折格子からの回折角を変えることによって波長の連続掃引が可能となる。

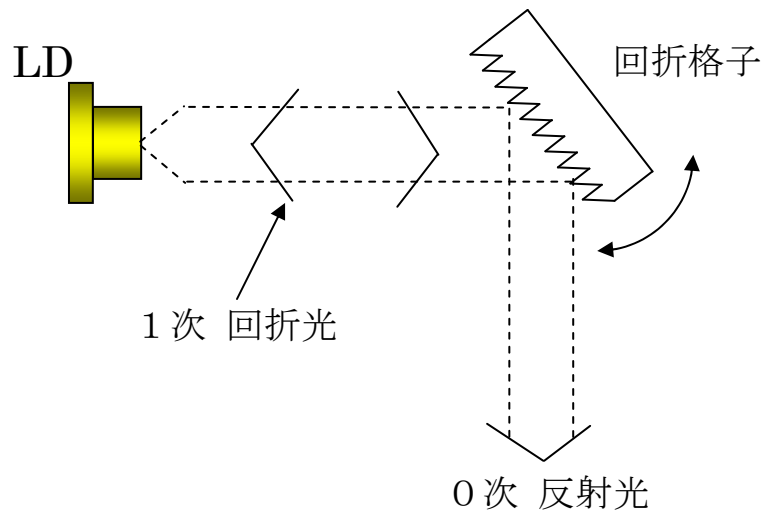


図 2.1 外部共振器型半導体レーザーの基本構成図

2.2 半導体レーザーの種類

- ・ ファブリ・ペローダイオードレーザー

高反射率の鏡を二枚対向させ、フィードバックをこれらの鏡で行わせてレーザー発振を起こす。出力する光信号の波長の幅が広く、構築費用が低コストで済む。ファブリ・ペローダイオードレーザーのモードは制御が難しいので、予測不可能な波長調節の可能性がある。一般的なダイオードレーザーがファブリ・ペローレーザーである。

- ・ 分布帰還型レーザー

レーザーダイオード素子の内部に微細な回折格子を設けることにより、特定の波長の光のみを反射させることができ、単一発振モードの条件も揃い易いため、分光法の応用に適している。しかしながら、各波長で違う分布帰還型レーザーを必要とする。また、非常に高価な機器である。

- ・ 外部共振器型ダイオードレーザー

外部共振器型ダイオードレーザーの開発は、原子分光法のダイオードレーザーシステムの出発点である。一般的なダイオードレーザーはマルチモードで発振しているが、複雑なレーザーシステムを用いることで単一モードにすることができる。実用的なレーザー分光法の応用のため、モードホップ無しでの単一モードの連続的な調節が要点となる。しかし、システムの多重安定性のため不規則なモードホップが起こる。このレーザーシステムは科学的な応用に適している。

- ・ Littrow 型拡張型共振器ダイオードレーザー

反射防止被膜ダイオードレーザーの使用で、外部共振器型レーザーが大幅に改善された。しかしながら、工業への応用のために共振器に限界点を設け、特性条件に妥協しなければならない。

- ・ Littman 型拡張型共振器ダイオードレーザー

Littman 型共振器の概念は、外部共振器の内部で回折格子を 2 回通るという長所を持つ。これにより、外部共振器の広い選択性とより良い波長調節反応が得られる。しかしながら、この配置による光出力は回折格子での損失のため小さくなる。

2.3 回折格子の設置方法

回折格子とは、様々な波長を持つ光を波長ごとにお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角度で光が強め合い、この強めあ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、回折光をミラーで反射させて間接的に LD に戻す方法である。特徴は Littrow 型と比べて発振線幅が狭く、波長掃引時に射出方向が常に一定である。

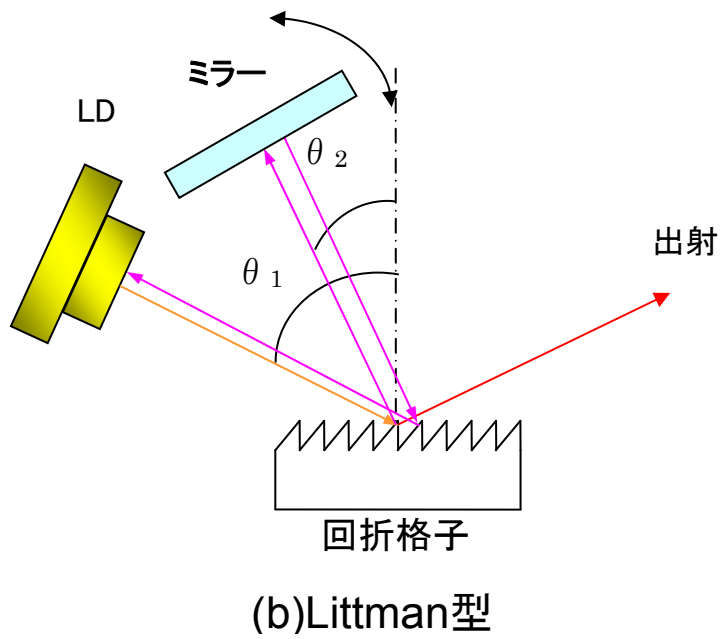
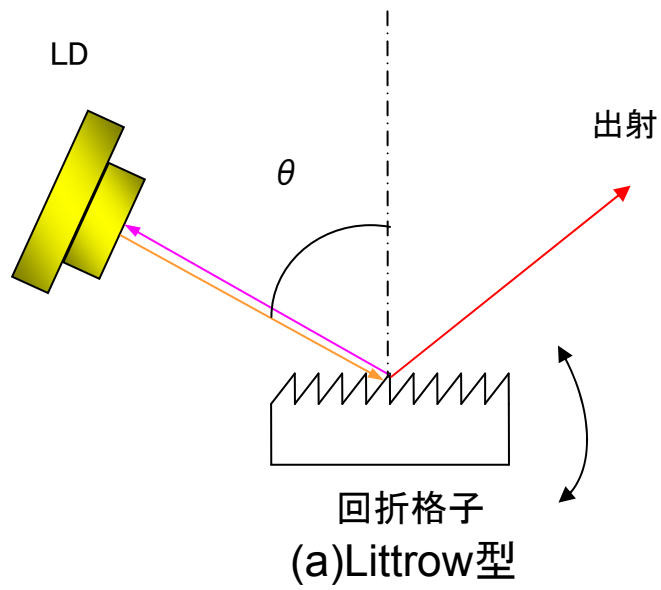


図 2.2 外部共振器型半導体レーザーの回折格子設置方法

2.4 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。ここでは、レーザー媒質の利得スペクトルの幅は他の2つに比べて十分に広いため、回折格子と共振器長による2つの発振条件について検討を行う。

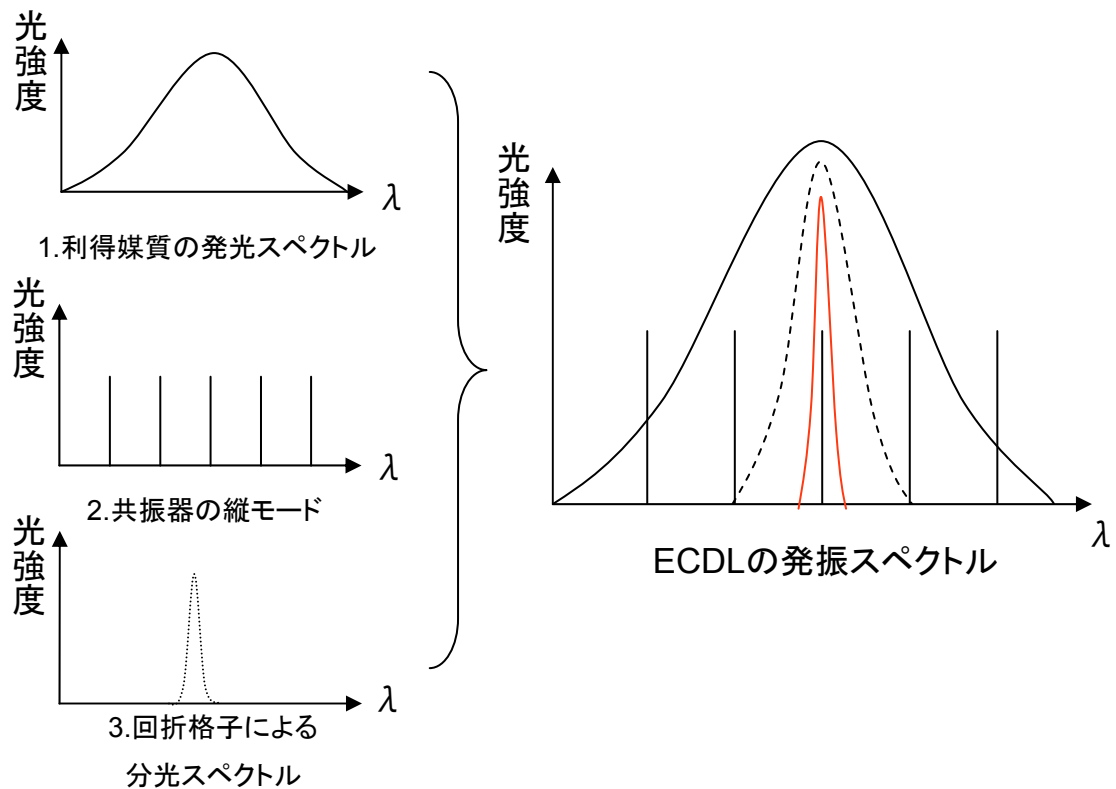


図2.3 外部共振器型半導体レーザーも発振条件

2.4.1 回折格子による条件

回折格子の原理を図 2.4 に示す。回折格子は、様々な波長を持った光(白色光)を各波長ごとにおける光学素子である。単純な回折格子は、多数の平行スリットが等間隔で配列された構造をしていて、白色光が回折格子に入射すると各波長ごとにある決まった角度で光が強めあい、その強め合った光を取り出すことで波長の選択が可能である。

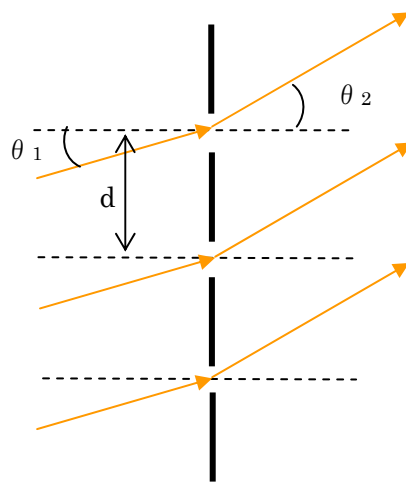


図 2.4 回折格子の原理

回折格子によりレーザー光が強めあう条件は

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

で示される。ここで、 d は格子溝間隔、 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、 m は回折次数、 λ は回折格子により分光された波長である。

式(2.1)より、格子溝本数 $D(=1\text{mm}/d)$ を 1800 本/mm、回折次数 $m=+1$ 、LD から照射された波長 $\lambda = 784\text{nm}$ としたときの入射角と回折角の関係を図 2.5 に示す。 θ_1 の値を 60° としたとき、 θ_2 の値は 33.0° である。

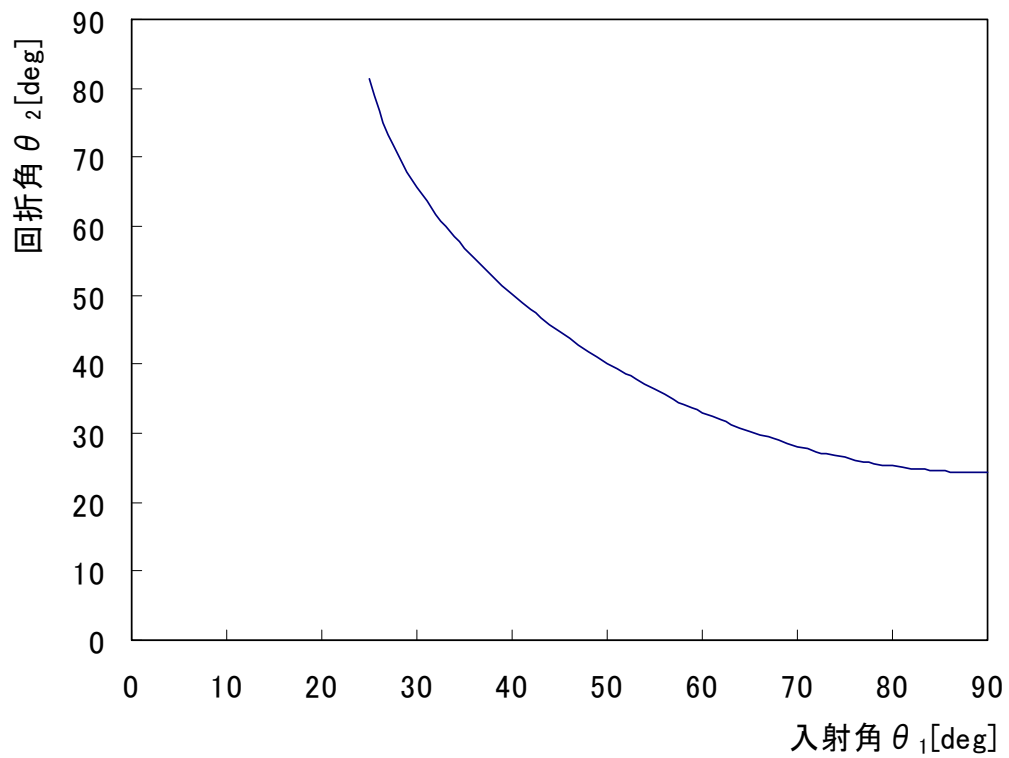


図 2.5 入射角と回折角の関係

2.4.2 共振器長による条件

図2.6に共振器の構成を示す。定在波の端の位置では振幅は常に0なので、もう1枚ミラーを置くことで定在波を乱さないようにする。これにより2枚のミラー間に光が閉じ込められた状態ができ、共振器が構成される。このとき両ミラー間の間隔は光の半波長の整数倍である。言い換えれば、この条件を満たす光のみが共振器中に存在を許される。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る。このような固有の形態をモードと呼ぶ。ここではz軸方向に沿った形態なので縦モードと呼ばれる。隣り合うモード間の共振周波数間隔を自由スペクトル領域(FSR)と呼ぶ。

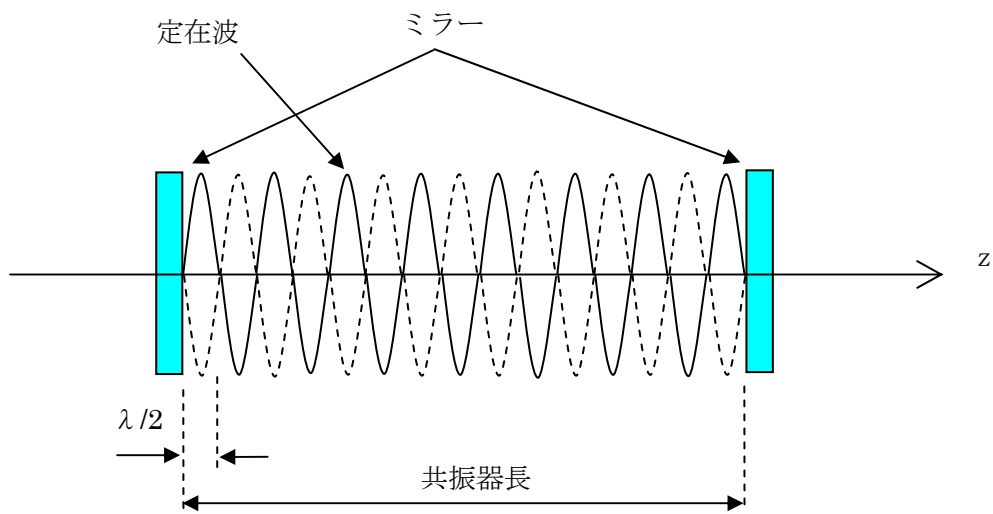


図2.6 共振器の構成

共振器長の縦モード間隔であるFSRは次式で定義される。

$$FSR = \frac{c}{2L} \quad (2.2)$$

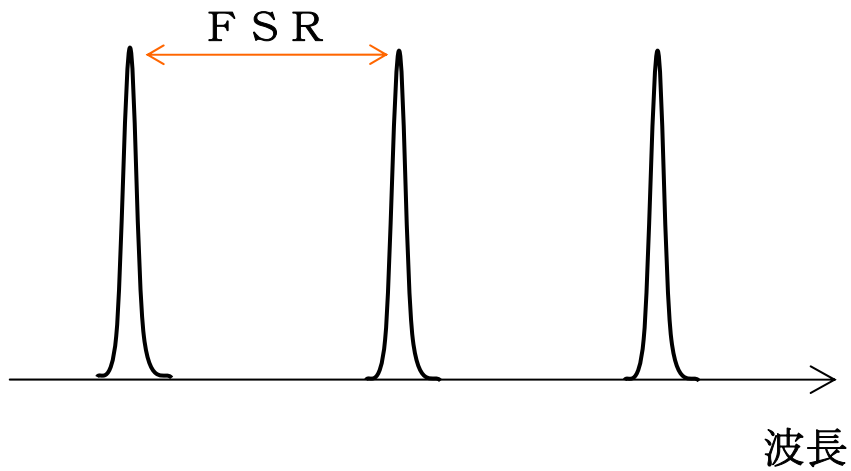


図2.7 ECDLの共振器による縦モードのスペクトル

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次式で示される。

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2.3)$$

式(2.2)と式(2.3)より、共振器長と縦モードの波長の関係は次式で示される。

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad (2.4)$$

ここで n は縦モードの次数(165816)である。

共振器長は、

$$L = L_1 + L_2 \quad (2.5)$$

となり、ここで L_1 はLDと回折格子間の距離(45mm)、 L_2 は回折格子とミラー間の距離である。また、 $\lambda = 784\text{nm}$ のとき $L_2 = 20\text{mm}$ である。

2.5 ピボットポイント

外部共振器型半導体レーザーで波長掃引をする際に、波長掃引の誤差を無くすために共振器長における変化と回折角の変化を同じにしなければならない。平面上のある点を中心にしてミラーを動かすと上記の条件を満たす点が存在する。この点をピボットポイントとする。

回折光とミラーの交点を通る回折光の法線は次式で示される。

$$y = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{d} - \sin \theta_1\right)^2}} \left\{ \left(\frac{\lambda}{d} - \sin \theta_1\right)x + \left(n \frac{\lambda}{2} - L_1\right) \right\} \quad (2.6)$$

ここで 2 つの波長 λ_1 、 λ_2 において式を立て、連立方程式を解くことでピボットポイントが求まる。導出した座標は LD の光が回折格子に当たる点を座標の原点としたとき、x 座標 -43.2mm、y 座標 -4.3mm である。

$\lambda = 784\text{nm}$ のとき、 L_2 は 20mm、ミラーの中心とピボットポイント間の距離は 38.6mm となる。

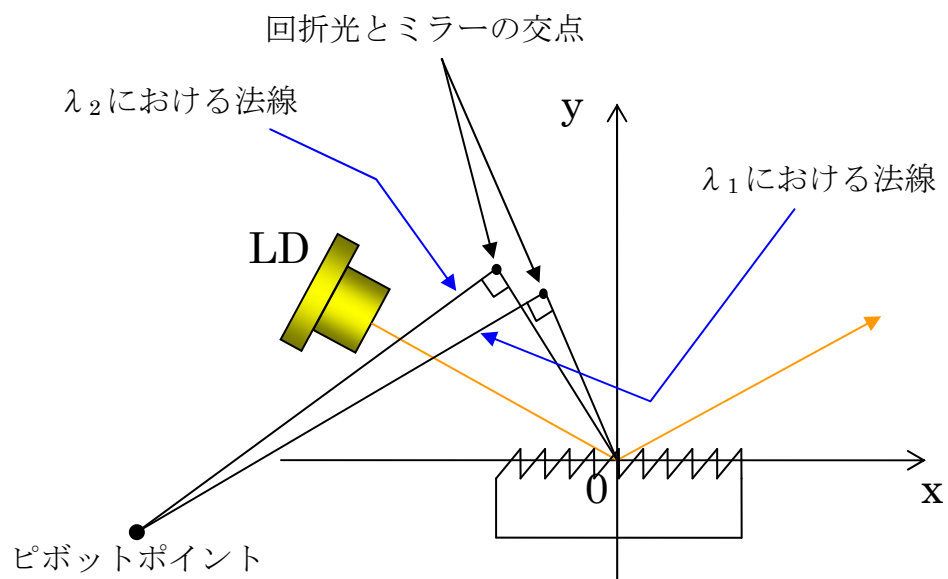


図 2.8 ピボットポイントの導出

2.6 掃引量誤差の導出

連続掃引量は次式で示される。

$$\Delta \nu = \left| \nu_a - \nu_o \right| \quad (2.7)$$

ここで $\Delta \nu$ は連続掃引量、 ν_a は回折角または共振器長が変化したときの周波数、 ν_o は基準点 (波長784nm) における周波数である。吸収分光法に必要とされる掃引量は10GHz以上であるため、本研究では100GHzの連続掃引を目標とする。式(2.1)、(2.3)、(2.7)より、100GHz掃引するための角度の変位は 0.025° となった。

回折角と共振器長の波長の差による掃引量誤差は

$$\Delta \nu_e = \left| \Delta \nu (\theta_2) - \Delta \nu (L_2) \right| \quad (2.8)$$

で示される。 $\Delta \nu_e$ は掃引量誤差、 $\Delta \nu (\theta_2)$ は回折角の変化による掃引量、 $\Delta \nu (L_2)$ は共振器長の変化による掃引量である。図2.9に掃引量誤差と回折角の関係を示す。また、基準点より100GHz掃引時の最大掃引量誤差は694kHzとなる。これは縦モード間隔2.3GHzに対し非常に小さいためモードホップしにくい。

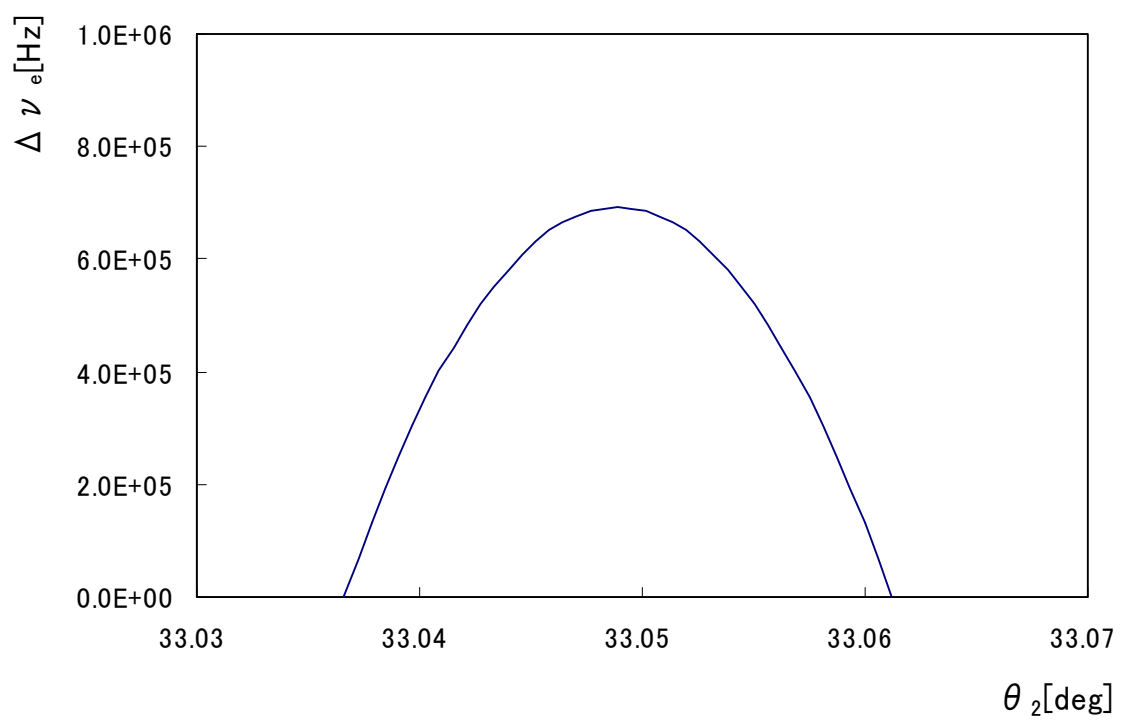
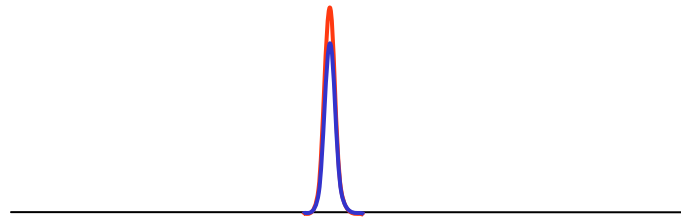
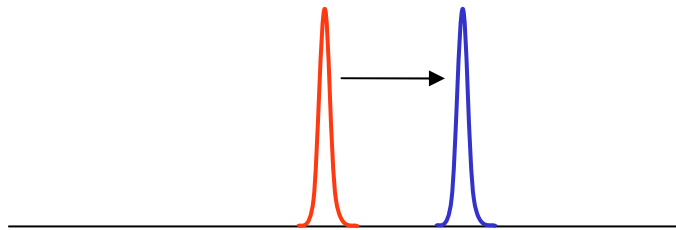


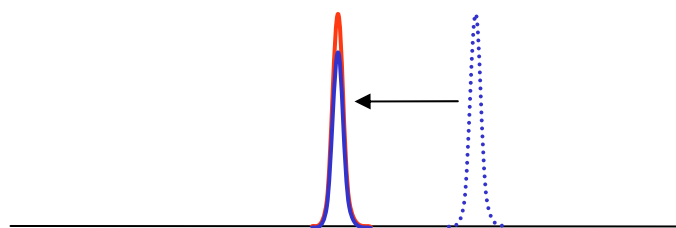
図2.9 掃引量誤差と回折角の関係



(a) 掃引前のモードの様子



(b) 掃引時のモードの様子



(c) 掃引後のモードの様子

図2.10 掃引量誤差によるモードの様子

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。図 3.1 に LD の基本構造図、図 3.2 に p-n 接合のバンド図を示す。LD は、p-n 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を用いられる。光共振器には、p-n 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持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(≒ $0.1 \mu\text{m}$)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。

本研究では、2.4 項で述べた条件を満たす LD として SHARP 製 GH0781JA2C を使用した。

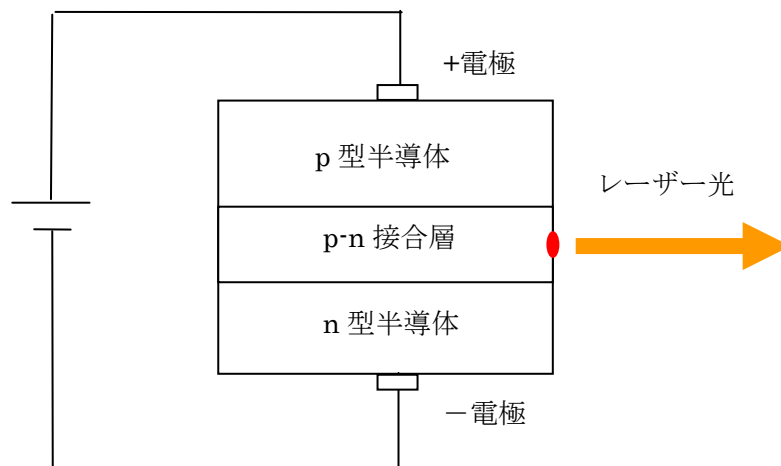


図 3.1 LD の基本構造図

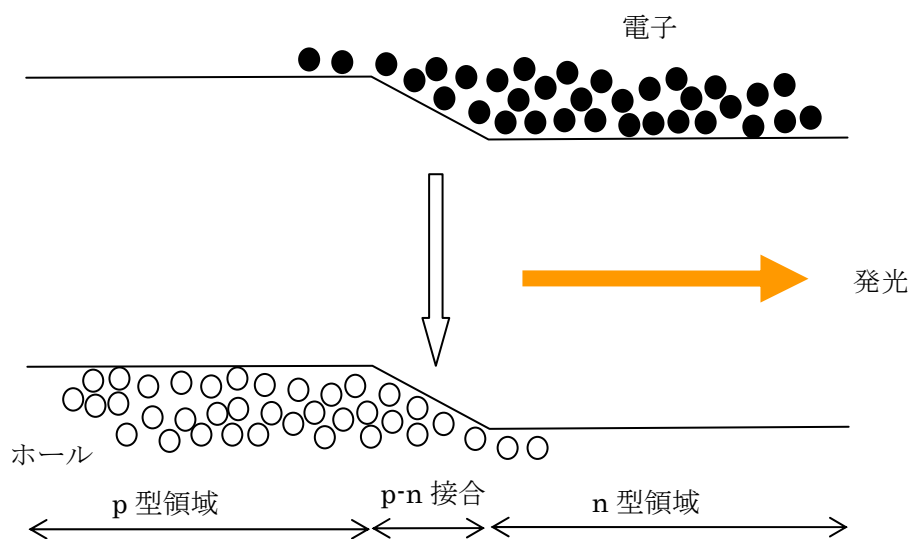


図 3.2 p-n 接合のバンド図

3.2 コリメートレンズ

LD の出射光は広がって出射される。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よく 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。コリメートレンズは Thorlabs 製 LT110-P-B を使用した。仕様は、波長範囲 600~1050nm、焦点距離 6.24mm である。

3.3 回折格子

回折格子は Newport 製 05RG1800-500-1 を使用した。仕様は、溝本数 1800 本/mm、公称ブレイズ角 26.7° 外形 $12.5 \times 12.5 \times 6$ mm である。この回折格子はルールドグレーティングタイプであり、特定の波長を対象にブレイズ化でき、一般に効率性に優れている。特に高い分解能を必要とするシステムに非常に有効である。回折格子に光が入射するとき、入射面に平行な偏光成分 P 偏光(P-Plane)と入射面に垂直な偏光成分 S 偏光(S-Plane)では反射率が異なる。図 3.3 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 $\lambda = 784$ nm において、図 3.3 より回折効率は約 90%である。

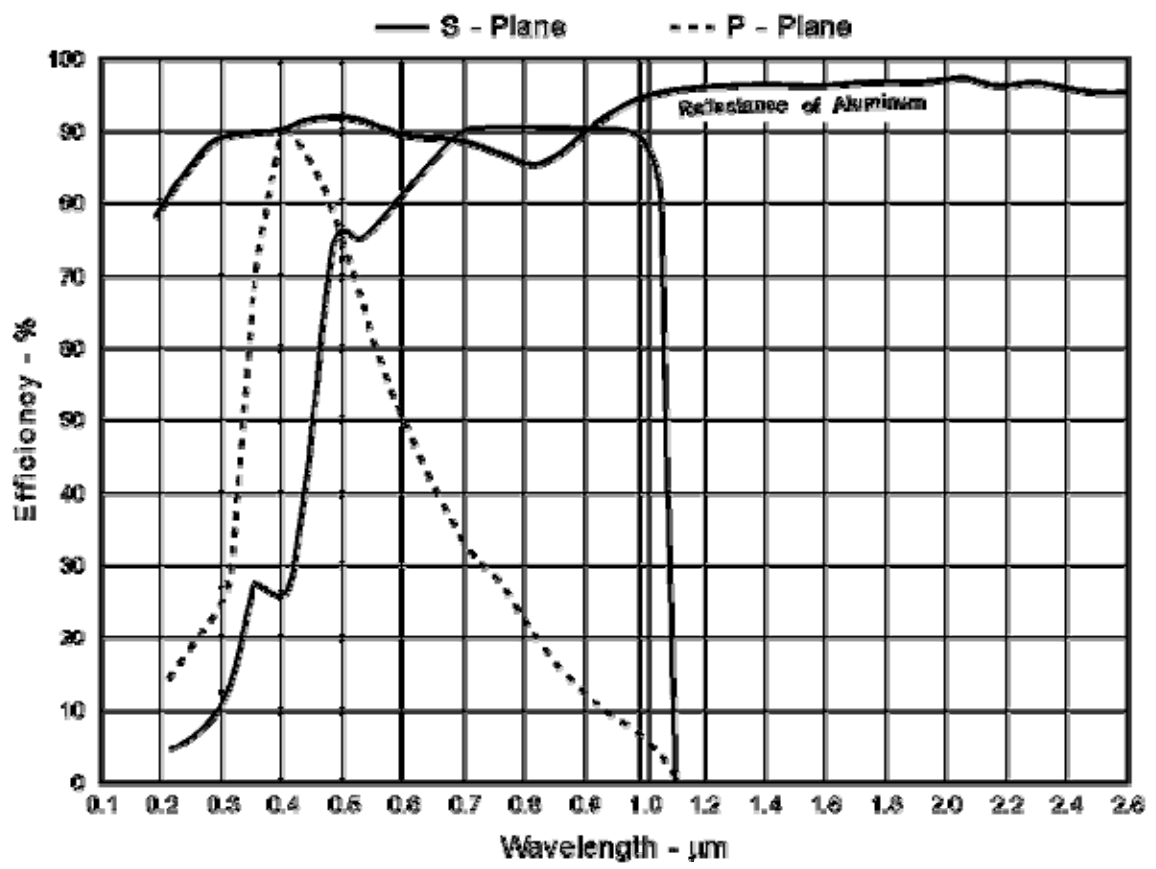


図 3.3 回折格子の分光波長と回折効率

3.4 ミラー

ミラーはシグマ光機製 TFA-15S03-10 を使用した。外形は 15×15×3 である。このミラーは、平面基板に真空蒸着によりアルミニウム膜をコーティングした全反射ミラーであり、保護膜としてフッ化マグネシウムをオーバーコートしてある。可視域から近赤外域までの高い反射特性を持ち、角度依存性もほとんどない。図 3.4 にミラーの分光波長と反射率の特性を示す。このグラフより、このミラーは幅広い波長範囲において高い反射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 より反射率は約 75% である。

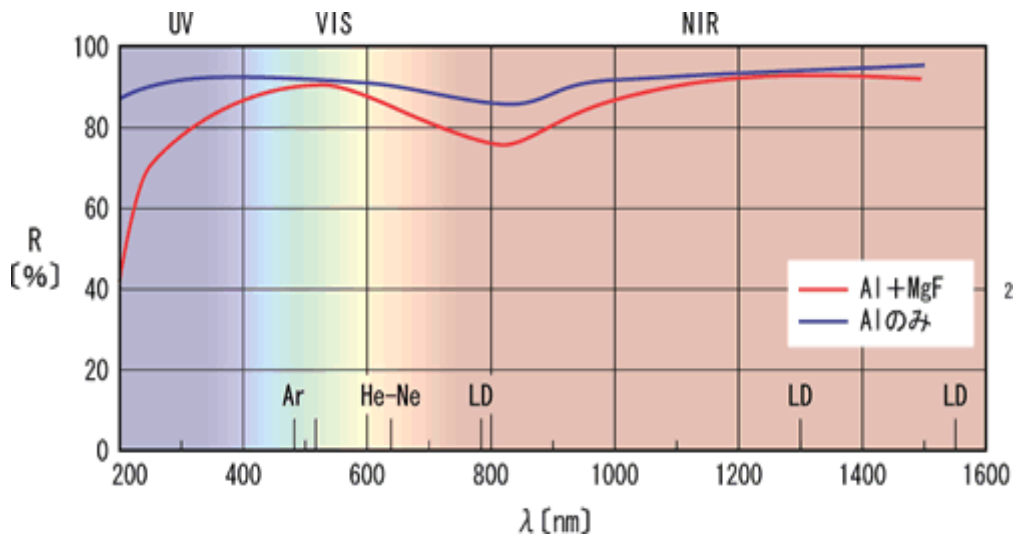


図 3.4 ミラーの分光波長と反射率

3.5 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 3.5、外観図を図 3.6 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、ミラーの調節には θ 軸回転ステージ(シグマ光機製 KSP-406M)を使用した。この回転ステージはマイクロメータによって40秒の位置分解能でミラーの調節が可能となる。また、2.4.2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 KS1D)を使用した。このマウントは、上下・左右のあおり方向と前後の計3軸で調節を行なう。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。

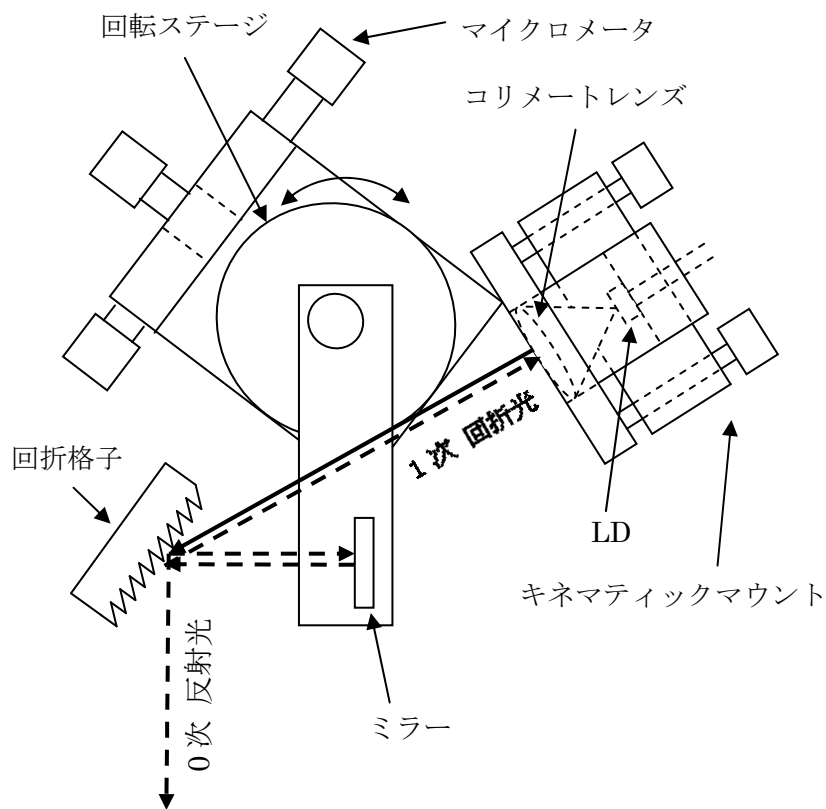


図 3.5 外部共振器型半導体レーザーの構成図

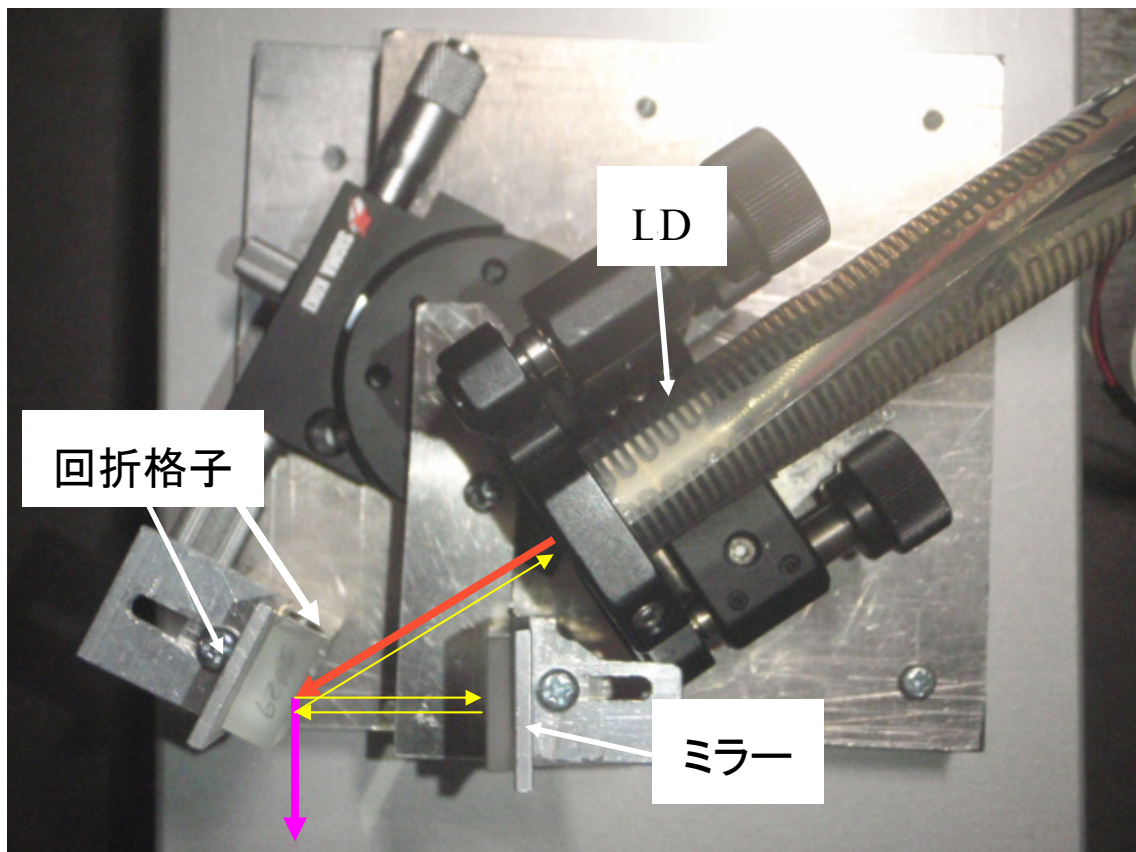


図 3.6 外部共振器型半導体レーザーの外観図

4. 外部共振器型半導体レーザーの特性

4.1 外部共振器型半導体レーザーの発振

Burleigh 社製光スペクトルアナライザ FPSA を用いて外部共振器型半導体レーザー (ECDL) の発振の様子の観察を行なった。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。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。

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

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示す指標である。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。

光スペクトルアナライザによる ECDL の発振の様子を図 4.1 に示す。図 4.1 より、ECDL は単一モード発振していることが確認できる。しかし、実際は不安定だったため、ECDL の発振は確認できたが、線幅の測定はできなかった。

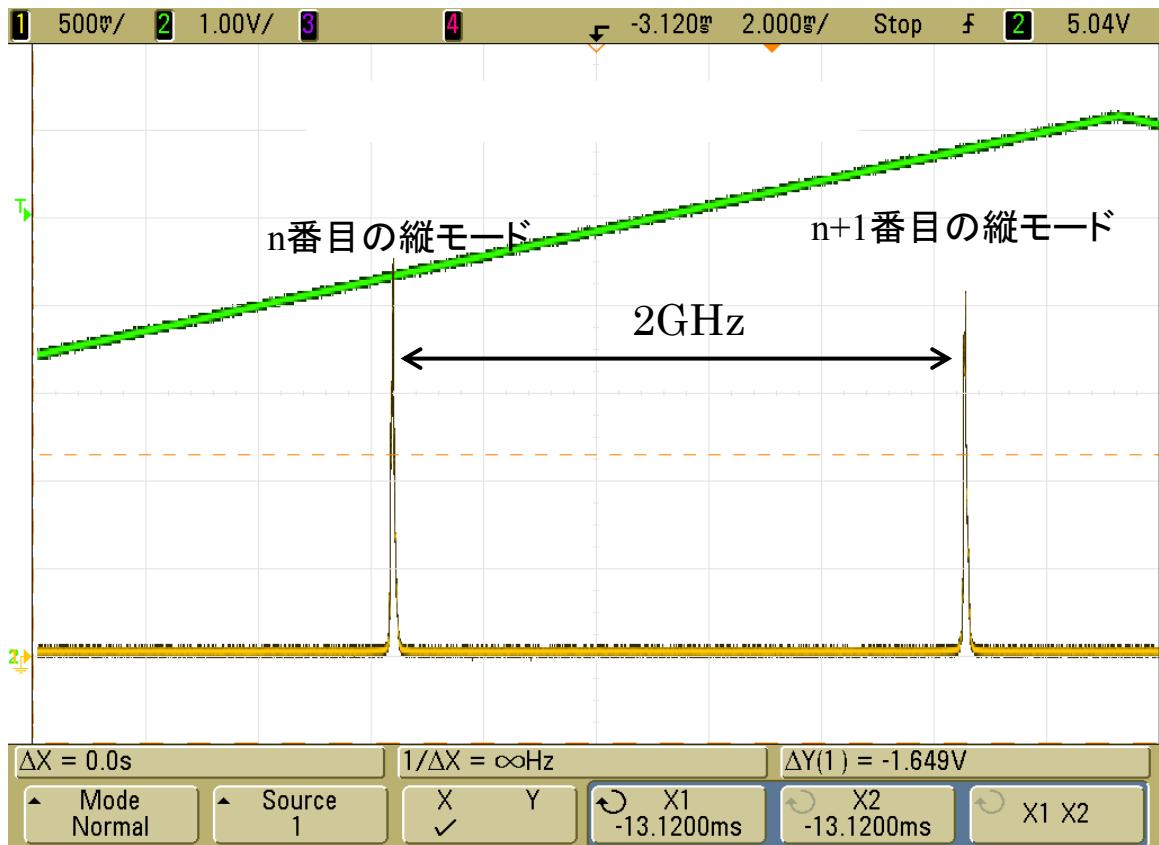


図 4.1 外部共振器型半導体レーザーの発振の様子

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ピボットポイントの導出を行った。さらに、ピボットポイント導出時の座標から各寸法を取り決め ECDL の設計・構築を行った。また、構築した ECDL を発振させその様子を観測した。その結果、構築した ECDL は単一モードで発振していることを確認できた。しかし、実際は不安定だったため、ECDL の発振は確認できたが、線幅の測定はできなかった。不安定となった要素として、機器周辺の温度によって部品が膨張したり、振動による共振器長のずれ、LD の共振器と ECDL の共振器が混ざり合った複合共振器などによる影響だと考える。

今後は、光強度の測定や発振線幅の測定、ECDL に圧電素子を取り付け連続掃引量の測定を行う必要がある。また、回折格子にも 3 軸マウントを使用して、より回折光を半導体レーザー (LD) に戻すようにする。その他にも、掃引量誤差を抑えたピボットポイントの導出や、発振時の不安定要素 (温度、振動、複合共振器、外部の光など) の改善法の検討が必要である。

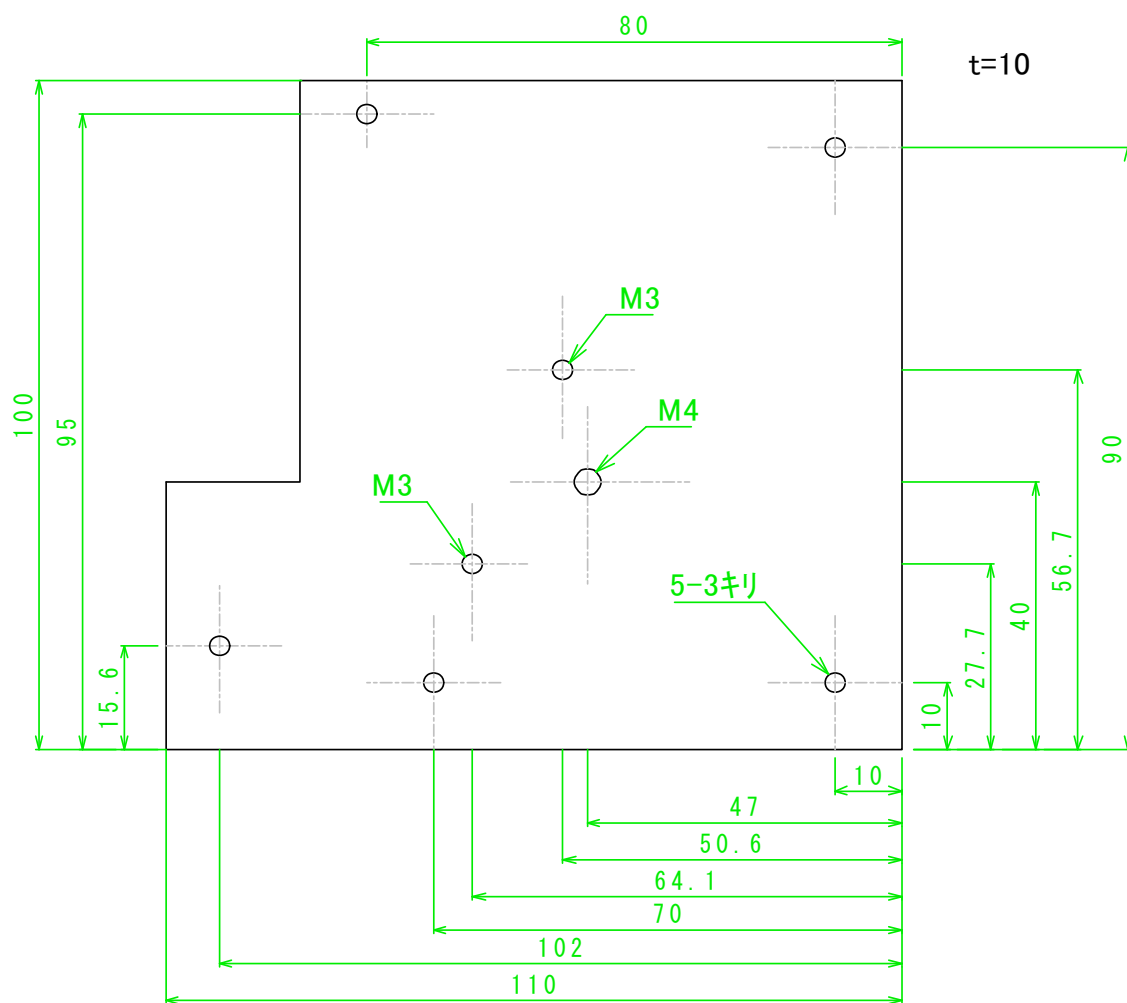
謝辞

本研究は平成 20 年 4 月から平成 21 年 3 月の約 1 年にわたり、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 1 年大田光輔氏に心から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いたします。

参考文献

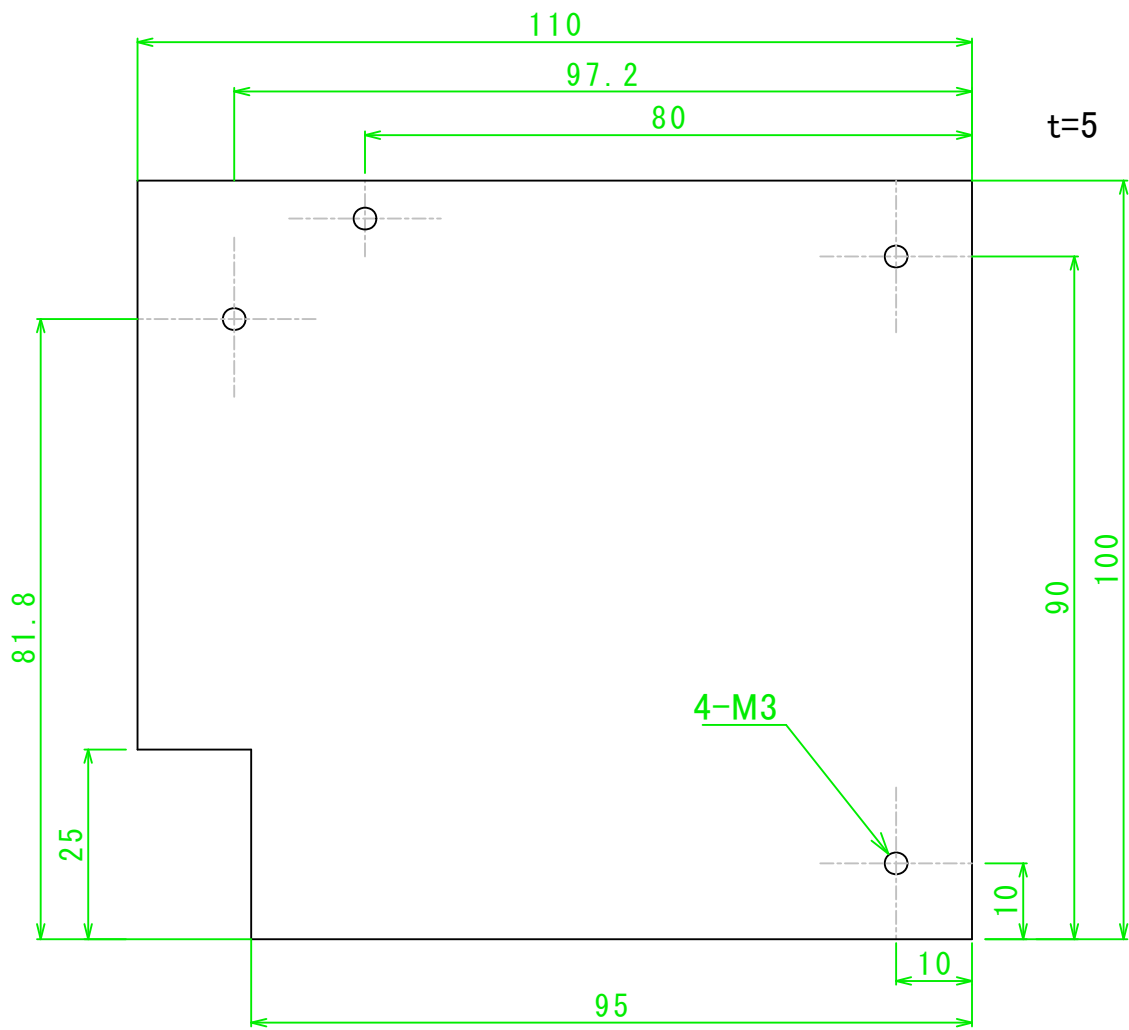
- [1] 平田照二：わかる半導体レーザーの基礎と応用，CQ 出版社，2001
- [2] 栖原敏明：半導体レーザーの基礎，共立出版，1998
- [3] 大津元一：入門レーザー，裳華房，1997

付録
図面一覧



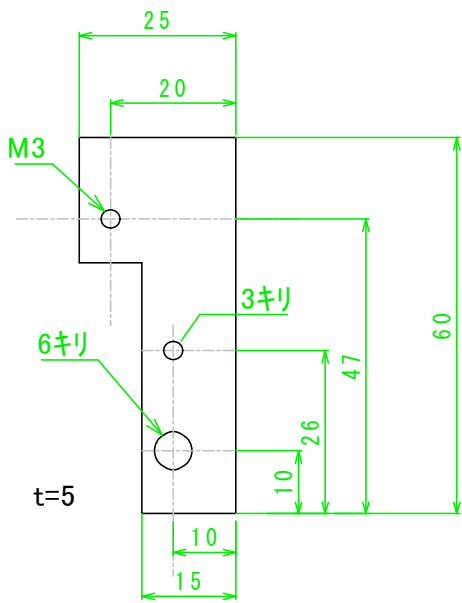
ベースプレート

図1 各種部品寸法図1

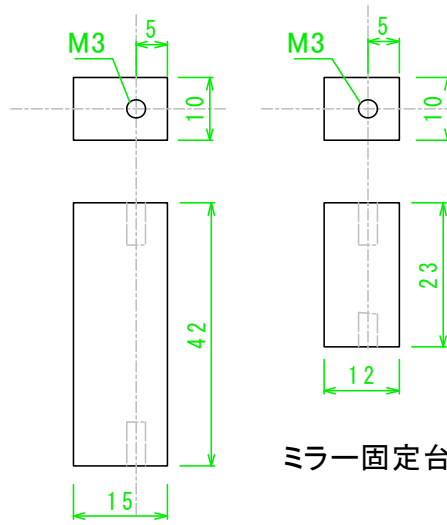


ピエゾ素子取付プレート

図2 各種部品寸法図2

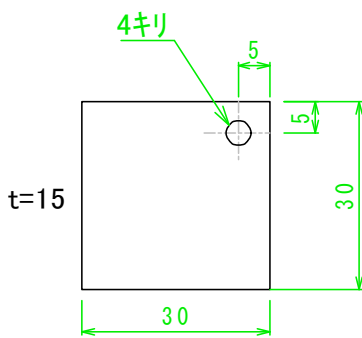


ピボットポイントプレート

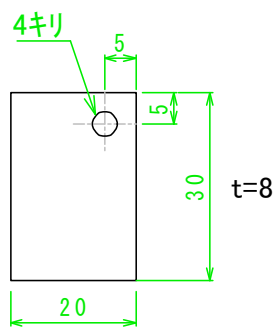


回折格子固定台

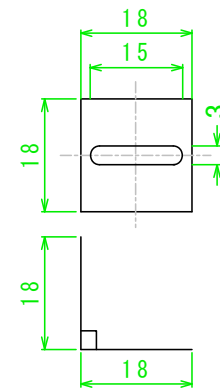
ミラー固定台



マウント固定台1



マウント固定台2

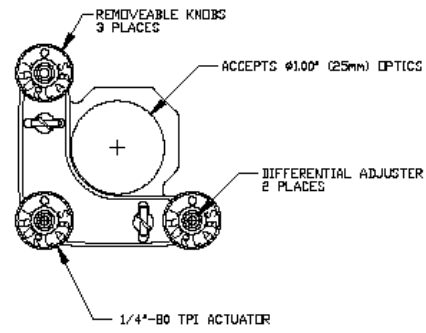
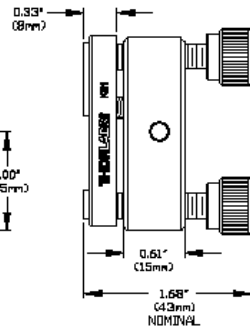
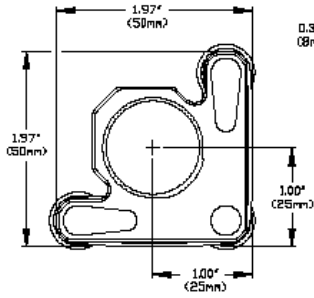
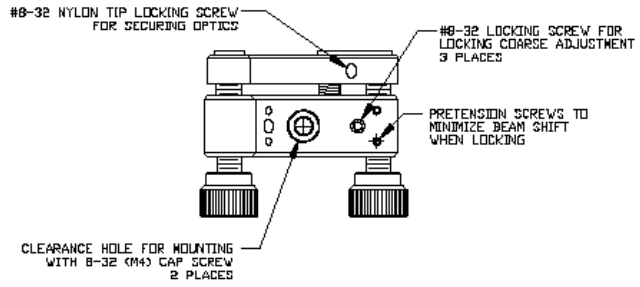


回折格子・ミラーマウント

図3 各種部品寸法図3

COPYRIGHT © 2003 by THORLABS INC.

ADJUSTER	RESOLUTION
COARSE	8.4 mRAD
DIFFERENTIAL	660 μRAD



DIFFERENTIAL ADJUSTERS ACTUATED BY 1/16" BALL DRIVER FOR FINE ADJUSTMENT AND 5/64" BALL DRIVER FOR COARSE ADJUSTMENT.

INFORMATION ONLY, NOT FOR MANUFACTURING.

THORLABS		PO BOX 366
		NEWTON NJ
TITLE: ULTRA STABLE DIFF. KINEMATIC MOUNT		
TOL: 3 SIG. DIMS EXCEPT AS NOTED		
DRAWN: J. J. J. CHECKED: J. J. J. DATE: 11-11-03		
SCALE:	AS SHOWN	1" = 1"
MATERIAL:	N/A	
REV:	02/08/02	REV: 1 OF 1
PWD NO:	1777-KDA	PART NO: K010

図 4 キネマティックマウントの寸法

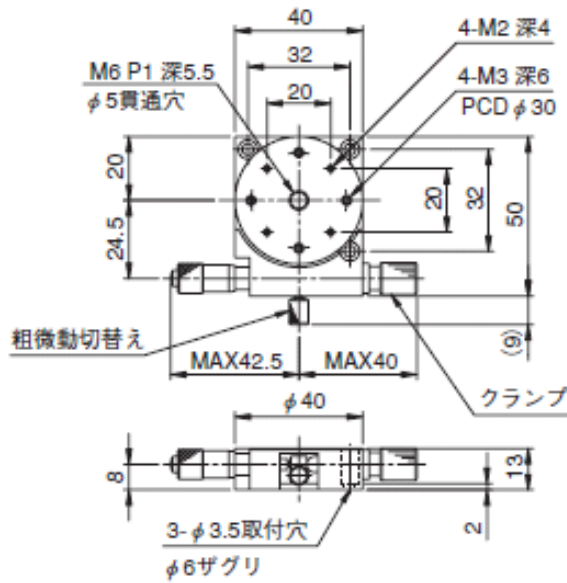


図 5 回転ステージの寸法