

# 3nm 帯域幅の干渉フィルタを用いた 外部共振器型半導体レーザーの試作

量子・物質工学科 岸本研究室  
0813081 根岸昂平

## 1. 目的と背景

$^{87}\text{Rb}$  のレーザー冷却用の光源(780nm)として半導体レーザーダイオード(LD)と、3nm 帯域幅の干渉フィルタを用いた外部共振器型半導体レーザー(ECDL)[1]を試作する。一般的な ECDL には、反射型回折格子を用いた Littrow 配置や Littman 配置があるが、回折格子を用いることで、外部共振器を形成し狭線幅を得る。その時、発振波長の安定化が重要となるが、これらの構造は振動に弱い。一方で、干渉フィルタを用いた ECDL は、後述するキャッツアイ反射配置をとることができるので振動に強く長期安定性がある。また、透過型の構造のため、波長掃引してもアライメントが動かない利点がある[2,3]。

## 2. 原理

### 2-1 ECDL の構造

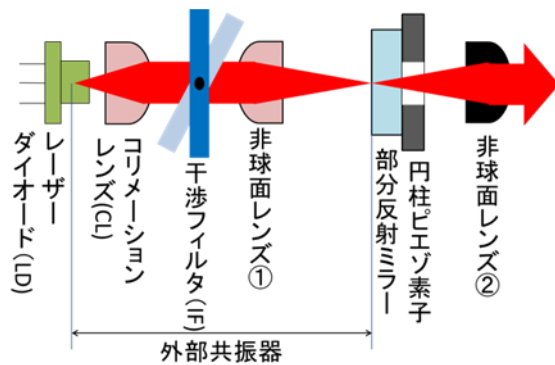


図1. 干渉フィルタを用いたECDL概略図

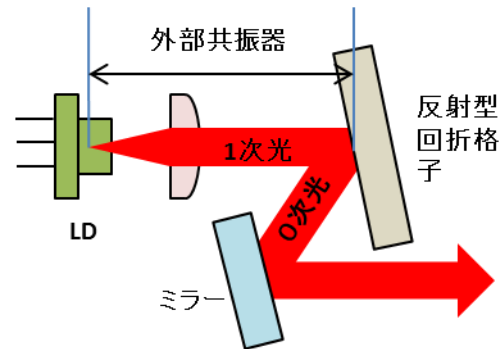


図2. Littrow型ECDL概略図

図1に、干渉フィルタを用いた ECDL の概形を示す。まず、LD から広がって出た光はコリメーションレンズ(CL)で平行光となり、干渉フィルタ(IF)を通り波長を選択され、非球面レンズ①によって、円筒型ピエゾ素子付きの部分反射ミラー(Output Coupler: OC)表面に集光する。OC で光の一部を LD に戻し、外部共振器となっている。そして、OC から出てきた光を非球面レンズ②によって平行光に戻し、出力する。波長掃引するためにフィルタを傾けても、透過型の構造のため光軸がずれない。

比較のため、図2に、反射型回折格子を用いた Littrow 型 ECDL 概略図を示す。LD から出た光を反射型回折格子で1次光をLDに戻すことによって波長選択及び、外部共振器を形成し、0次光を出力する。反射型の構造のため、Littrow 型 ECDL では波長掃引するためにグレーティングを回転させると光軸がずれてしまう。

## 2-2 干渉フィルタ

図3に干渉フィルタの概念図を示す。干渉フィルタは異なる屈折率の物質の誘電体多層膜から成り、境界条件とフィルタ内での光路差の関係からフィルタ中心透過波長 $\lambda(\theta)$ は入射角 $\theta$ 、実行屈折率 $n_{eff}$ 、垂直入射での最大中心透過波長 $\lambda_{max}$ を用いて次式で書ける[1]。

$$\lambda(\theta) = \lambda_{max} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{n_{eff}^2}} \quad (1)$$

干渉フィルタを光軸に対して傾ける事により、透過波長帯をスイープできる。

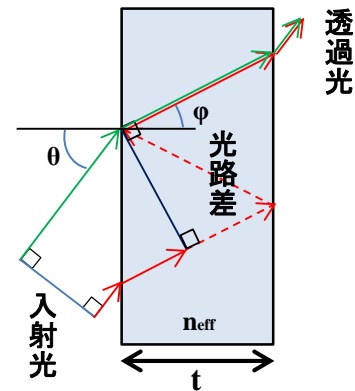


図3. 干渉フィルタの概念図

## 2-3 キャッツアイ配置

非球面レンズ①、②はLDとOC表面に焦点を結ぶよう置かれている(図1)。この配置をとることで、振動によりLDの角度が微小に振れたり、上下左右に振れたりしても、OC表面に焦点を結んでいることにより、反射光はLDにフィードバックされる。また、外部共振器長が微小に振れたとしても、円筒ピエゾのフリーストローク範囲内ならば、フィードバック可能であり、振動に強い外部共振器となっている。

## 2-4 発振波長の選択

図4に、レーザー発振波長選択の要因を示す。LDゲインカーブを $G_D$ 、LD内部共振によるLD端面の透過率を $T_D$ 、外部共振によるOCの透過率を $T_{cavity}$ 、IFの透過率を $T_{filter}$ と置くと、OCから出力される全体の透過率 $T_{total}$ は、次式で表せる[1,4]

$$T_{total} = G_D \cdot T_D \cdot T_{cavity} \cdot T_{filter} \quad (2)$$

$T_D$ 、 $T_{cavity}$ は次式より求められる。

$$T_D, T_{cavity} = \frac{1}{1 + F \sin^2(\delta(\nu)/2)} \quad (3)$$

Fはフィネスであり、

$$F = \frac{4\sqrt{r_1 r_2}}{(1 - \sqrt{r_1 r_2})^2} \quad (4)$$

( $r_1, r_2$ は共振器ミラーでの振幅反射係数であり、 $T_D$ の場合はLD素子結晶の前と後ろの端面、 $T_{cavity}$ の場合はLD素子結晶の後ろ端面とOC表面での振幅反射係数)

$\delta(\nu)$ は共振器端面での反射による位相シフトであり、光の振動数 $\nu$ 、屈折率 $n$ 、共振器長 $L$  ( $T_D$ の場合はLD素子結晶の厚み、 $T_{cavity}$ は外部共振器長)を用いて

$$\delta(\nu) = 4\pi n L \nu / c \quad (5)$$

$G_D, T_{filter}$ に関してはスペックシートを参考にする。今回用いたLDはARコート無、干渉フィルタは最大透過率90%半値全幅3nm、エッジの半値幅0.3nmの物を用いた。

まず、 $T_{cavity}$  の縦モードが選択発振波長に立つように共振器長を設定する。次に、ECDL は最も透過損失の少ない波長で発振するため、非対称的な  $G_D$  の傾斜（図4では右肩上がり）と急峻なエッジのある  $T_{filter}$  の端（図4では右端）を利用して、選択発振波長での透過率を最も高くする。ただし、選択発振波長における  $G_D$  のパワーが十分に高く、且つ、選択発振波長が LD 内部共振によるモードホップが起きない波長範囲内になるように LD の温度を設定する必要がある。

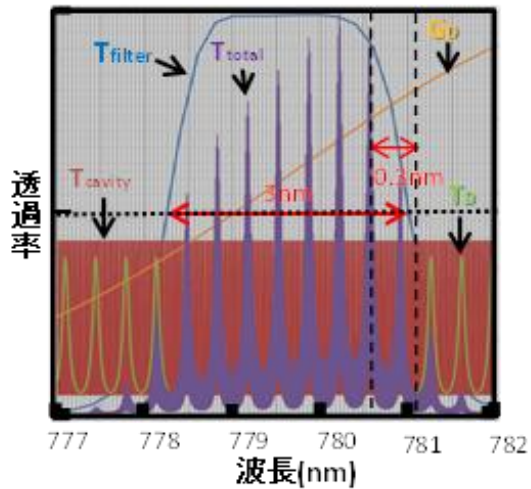


図4. 発振波長選択要因の概略図

### 3. 結果と考察

#### 3-1 設計と調整方法

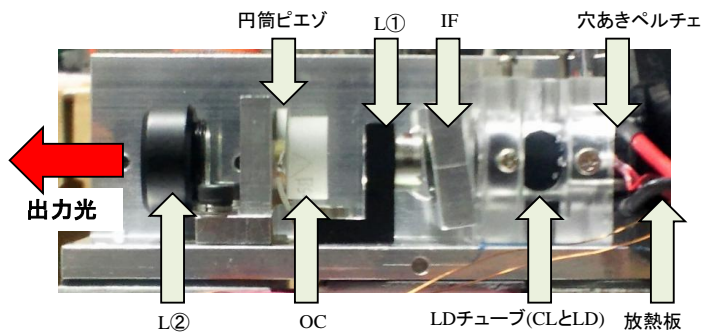


図5. 作成したECDL

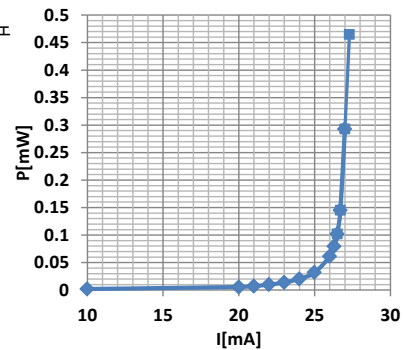


図6. 自励によるI-P特性 ( $\lambda=780\text{nm}$ )

[1]を元に、実際に ECDL を作成した(図 5)。LD チューブのマウントは熱伝導率の低いアクリルで作成し、ECDL の L 字土台に伝熱しないようにし、穴あきペルチェによって放熱板に熱を逃がす構造にした。

OC 及び、非球面レンズ①は L 字のマウントに固定し、マウントごと手で位置、角度調整を行い、あおり角に関しては L 字部分を垂直とした。キャッツアイ配置を取る際、OC 表面に焦点を結ぶことが重要であるが、OC 表面のレイリー長を計算したところ、約 0.03mm と見積もられ、実際に手で調整可能だった。発振波長が 780nm の外部共振器長になるよう OC 位置を調整したが、その方法は、自励による発振を避けるため LD 電流値を閾値(26.3mA)以下に設定し(図 6)、パワーメーターを用いて波長 780nm の出力を測定しながら、OC 位置を微調整し、OC からの反射光で光帰還が起こる位置を探し、その近傍で高くなる位置に OC マウント位置を固定した。

干渉フィルタは直径 10mm の軸棒に固定し、手で回転させる方法とり、微調可能だった。固定方法は、軸棒をネジで加締める方式をとったが、加締める際にフィルタがずれることを考慮しなければならなかった。

### 3-2 飽和吸収信号

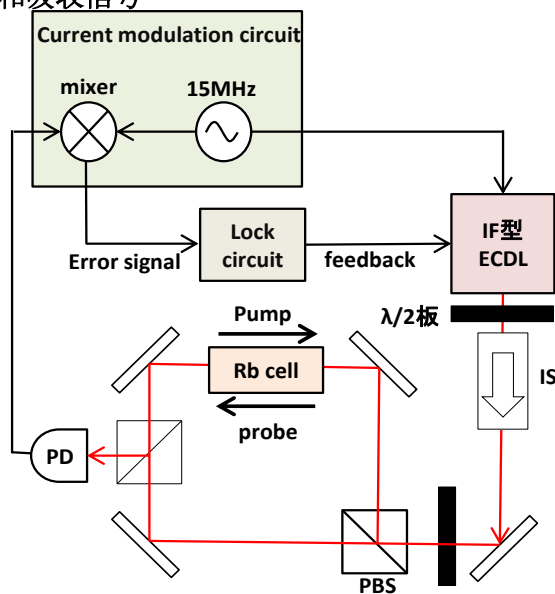


図7. 光学系のブロック図

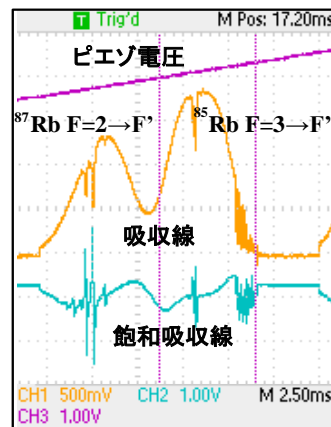


図8. <sup>87</sup>Rb飽和吸収信号

図7に光学系のブロック図を示す。偏光ビームスプリッター(PBS)を用いて pump 光と probe 光に分けて Rb セルに対向させ、PBS を用いて probe 光を取り出し、フォトディテクター(PD)で検出した。干渉フィルタ角度、LD 電流値、LD 温調を調整したところ、飽和吸収線を検出することができた (図8)。

次に、飽和吸収ロックを行うため、カレントモジュレーション回路で IF 型 ECDL に 15MHz のサイドバンドを立てた。PD の AC 信号からカレントモジュレーション回路内のミキサーを介してエラーシグナルを取り出し、ロック回路を介して IF 型 ECDL の部分反射ミラーについている円筒ピエゾ素子 (PZT) にフィードバックした。

ロックした状態で、定盤を叩いてみたところ、現在の設計では、研究室で作成した Littrow 型 ECDL と同程度のノイズが乗った。キャッツアイ配置をとることで耐震性の向上が期待されるが、今回試作した構造ではそれが不十分だった。

### 3-3 今後の予定

より振動に強い構造にすることで、簡易な設計を維持しつつ、耐震性をもたせる。また、今回用いた LD は AR コート無しのもののため、モードホップフリーレンジが 1-2GHz 程度[4]と予想され、実際同程度のレンジに調整できた。今後、PZT と同期して電流にもフィードフォワードを行うことで、モードホップフリーレンジを広げる予定である。

## 4. 参考文献

- [1]D.J.Thompson&R.E.Scholten,Rev.Sci.Instrum.**83**,023107(2012)
- [2]P.Zorabedian&W.R.Trutna,Jr.,Opt.lett.**13**,826(1988)
- [3]Matthias Scholl. Interference filter stabilized external cavity lazer(2010)
- [4]Sebastian D. Saliba,Mark Junker, Lincoln D. Turner, and Robert E. Scholten, APPLIED.Opt.**48**,6692(2009)