

# Fabry-Perot 型半導体レーザーにおける縦モード間注入同期 のための外部共振器の構造と制御

## Structure and Control of External Cavities for Injection Locking among Longitudinal Modes in Fabry-Perot Laser Diodes

森 正和†, 棚森 鶴‡  
Masakazu MORI, Tazuru TANAMORI

**Abstract:** An external cavity for Fabry-Perot laser diodes (F-P LDs), which reduces the linewidth of each longitudinal mode while maintaining multi-longitudinal oscillation, is investigated. A reflector module which consists of a polarization maintaining fiber and an Al-mirror is developed to form an external cavity. The external cavity is successfully applied to a 1.55 $\mu\text{m}$  F-P LD whose cavity length is 900 $\mu\text{m}$ , and the linewidths are reduced to about 1/20 of the original ones. The structure and the control method of the external cavity developed here can be applied to F-P LDs whose cavity length is from several hundred  $\mu\text{m}$  to several mm.

### 1. はじめに

通信や信号処理の分野では高速化を図ることは重要な課題である。現状では、電気信号処理で直接に扱えるのは 40Gb/s 辺りまでであり、それ以上では光信号処理に頼らざるを得ない。

既に 1990 年代には、半導体レーザー中の非線形効果を利用した高繰り返しの超短光パルス発生の研究開発が活発に行われている<sup>1-5)</sup>。それらの殆どは特別設計された光ケーブルを使用するものである。

一方、筆者らは通常構造の Fabry-Perot 型半導体レーザー (F-P LD) に連続光を注入するのみで高繰り返し光パルスを発生させる「全光制御モード同期法」を考案した<sup>6)</sup>。また、マイクロ波信号に同期させるための「サイドバンド光注入法」を開発した<sup>7)</sup>。いずれも縦モード間の注入同期現象を利用するものである。

筆者らの手法により、繰り返し周波数 100GHz 以上の光パルス列発生、およびそれに同期した低繰り返し光パルス列発生を実現することが原理的に可能である。しかし、現状では LD の単体特性に対する依存性が大きく、用いる F-P LD の単体特性によっては、全くモード同期しないという問題がある。

Fabry-Perot 型半導体レーザーの縦モード間でモード同期に必要な注入同期現象を発生させるためには、多縦モード発振で、且つ、狭スペクトル線幅の状態を維持することが不可欠である。筆者らはこれまでに、偏波保持(PM)ファイバと反射器で

構成した外部共振器を能動制御する手法が有効であることを確かめている<sup>8)</sup>。今回は、外部共振器の構造改良とその制御結果について報告する。

### 2. 外部共振器の構造

LD のスペクトル線幅を狭窄化するための外部共振器に課せられる条件としては、(1)共振器長が可変である、(2)反射減衰量が可変で柔軟可能である、が挙げられる。

(1)の共振器長が可変であることの中には、共振器長を LD チップの光学長の整数倍に設定する機能(便宜上、共振器長調整機能と呼ぶ)と、反射光の位相を調整する機能(位相調整機能と呼ぶ)の二つが含まれる。前者では可変範囲が数 mm 以上あることが必要であり、後者では 10nm 程度以下のステップで可変であることが要求される。

(2)の反射減衰量の柔軟性を可能とするためには、LD と偏波保持シングルモードファイバの固有モード間の結合を利用するのが便利である。

上記の条件を満足し、かつ温度変動や機械的振動に影響されにくくするためには、短共振器長とする方が有利である。また、外部共振器内や、LD との結合光学系における不要な反射を抑えることも重要である。以上の検討の下に、図 2.1 に示す外部共振器構造とした。

反射減衰量を正確に設定できるよう、一端にビーム径 0.44mm $\phi$  のコリメータを接続した短尺の斜め研磨 PM ファイバと Al ミラーで反射系を構成した。この反射系を、ND フィルタと非球面レンズを経由して LD の後方出力に結合させた。

† 愛知工業大学 工学部 電気学科(豊田市)

‡ 愛知工業大学大学院 工学研究科(豊田市)

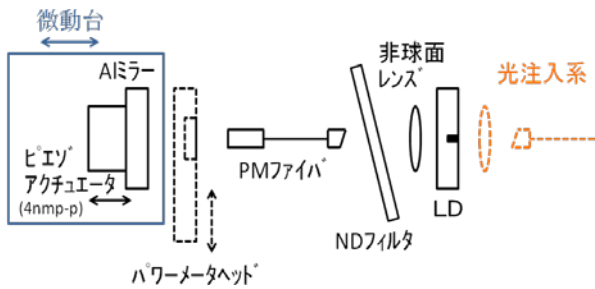


図 2.1 外部共振器の構造

PMファイバと Al ミラーの間にパワーメータヘッド(Thorlabs, S132C)を挿入し、NDフィルタで反射減衰量を調整した。

Al ミラーはヒエゾアクチュエータ(Piezomechanik、HESt 150/15-8/4)を介して、基本ステップ 20nm で±8mm まで移動可能な微動台(駿河精、KS101-20HD)に取り付けた。微動台の制御は、共振器長を掃引する時は 20nm ステップ、共振器長をフィードバック制御する時は 1nm ステップ(20 分割マイクロステップ 駆動)で行った。20nm ステップ 駆動と 1nm ステップ 駆動は、マイクロステップドライバ(テクトライフ、KR-535M)をパソコン制御で切り替えて使用した。この構成により、位相調整機能(1nm≪波長)と共振器長調整機能(8mm≧LD チップの光学長≒数 mm)の両方を兼ねることが出来る。ただし、ヒエゾアクチュエータは共振器長をフィードバック制御するための摂動を付加するものであり、往復の光学長の摂動が 200Hz で 4nm<sub>p-p</sub> となるように設定した。

短尺 PM ファイバをできるだけ短く加工した結果、外部共振器の光学長は片道で約 12cm(PM ファイバ部 5.7cm、空中部 3.8cm)となった。PM ファイバ部にヒエゾ素子で光学長摂動を付加するという以前の構成<sup>8)</sup>と比較すると、光学長を 1/2 以下にすることができた。

PM ファイバと Al ミラーで構成された反射系単体での反射減衰量の特性を図 2.2 に示す。反射減衰量は 1.9dB であり、Al ミラーの相対位置を±1.7mm 変化させたときの反射減衰量の変化は±0.1dB であった。

外部共振器を LD と結合させたときに、ND フィルタの表面や斜め研磨 PM ファイバ端で不要な反射が生ずることがあった。この不要な反射は、回折格子分光器(アソリツ、MS9710B、分解能 0.07nm)で観測した縦モードの強度分布

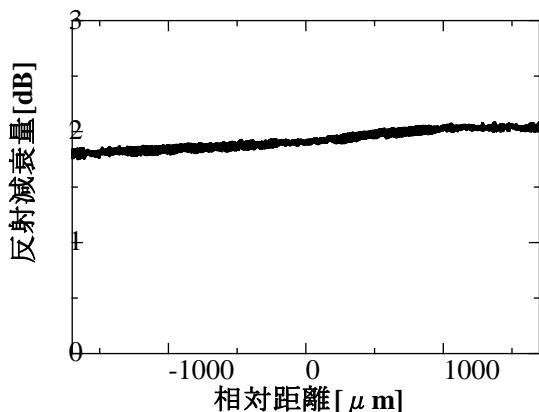


図 2.2 反射系単体での反射減衰量

が不均一になることから見分けられる。ND フィルタや斜め研磨 PM ファイバ端を、ビーム径が小となる焦点近傍に配置し、且つ光軸に対して傾けることによって抑圧できた。

また、機械的振動に対する注意も必要である。特に、非球面レンズ、ND フィルタ、および斜め研磨 PM コネクタ端が機械的振動を拾わないような配置と支持方法が重要であった。

### 3. 外部共振器の組み込みと制御

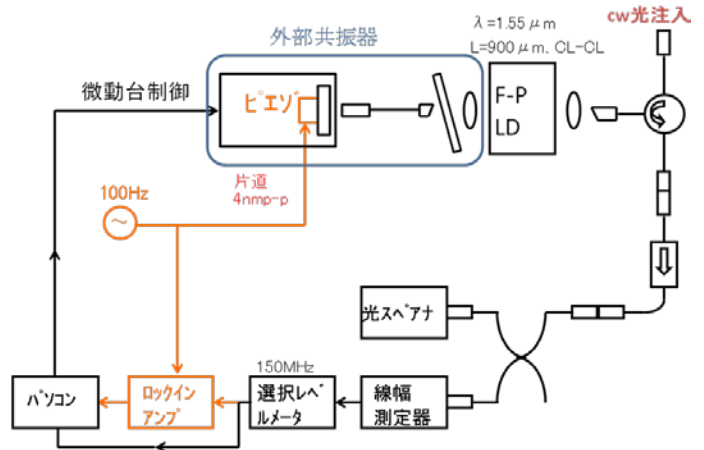


図 3.1 外部共振器の制御系

前記構造の外部共振器を、波長 1.55μm 帯の F-P LD(共振器長  $L=900\mu\text{m}$ 、閾値電流  $I_{th}=17.1\text{mA}$ 、両端面劈開)に適用した。このとき、LD 後方出力と外部共振器との結合損失は 4dB であった。LD の前方出力を遅延自己ヘテロダイン方式の線幅測定器<sup>9)</sup>(アドバンテス、Q73351、分解能 20kHz)に入力し、シフト周波数(150MHz)における相対パワーを観測することにより、スペクトル線幅の状態を一括モニタする手法を採った<sup>8)</sup>。外部共振器の制御系を図 3.1 に示す。

駆動電流 45mA(2.6 $I_{th}$ )、反射減衰量 46dB とし、相対共振器長を±1,700μm の範囲で変化させたときの 150MHz 成分のパワー変化を図 3.2 に示す。外部共振器が無い LD 単体でのパワー(図中の赤)に対して 10dB 以上大きくなっている。広範囲の図 3.2(a)では、LD の光学長(=3,200μm)を周期とする変化が見える。一方、狭範囲の図 3.2(b)では、反射光の位相<sup>8,10)</sup>により、半波長を周期として変化する。

手で 150MHz 成分のパワーが最大となる相対共振器長にもって行き、ヒエゾアクチュエータに摂動(≒4nm<sub>p-p</sub>)を加えて、150MHz 成分のパワーが最大となるように、Al ミラーと PM ファイバコネクタの間隔を 1nm ステップで調節するフィードバック制御を行った。制御を ON→OFF→ON とした時の様子を図 3.3 に示す。ON 時には、周囲温度の揺らぎによる光学長変動が補償されていることが分る。また、制御を OFF→ON

に切り替えると、スペクトル線幅が狭窄した状態へと速やかに復帰している。

フィードバック制御のステップの大きさや速度は実験環境に応じた最適化を行った。制御ステップが大きいと、縦モード周波数の変化を無視できなくなる。一方、制御ステップが小さいと室温変化の影響を補償できなくなる。制御速度についても同様な制約がある。低速度とすれば、雑音を抑圧して制御信号を検出できるが、室温変化の影響を補償できなくなる。種々の条件下で実験した結果、制御ステップ 1nm、制御速度 4 サイクル/秒という値に落ち着いた。

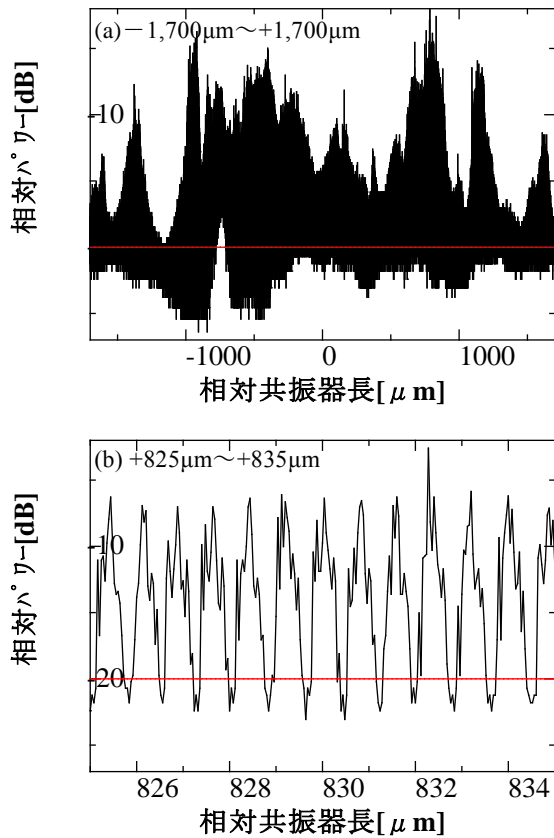


図 3.2 共振器長による線幅モードパワーの変化

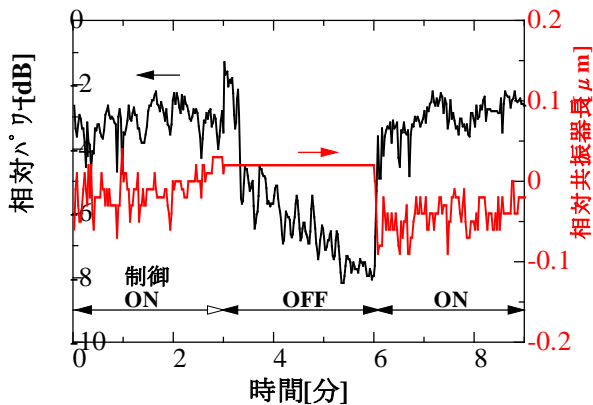


図 3.3 外部共振器の制御例

#### 4. 共振器長の最適化

F-P LD を多縦モード発振状態とするためには、外部共振器の共振器長を LD の光学長  $nL$  の整数倍とする必要がある。これを最適共振器長と呼ぶことにする。この節では、最適共振器長を実験によってどう決定するかについて検討する。

厳密には、Al ミラーによる反射で位相が  $\pi$  ずれるため、共振器長は  $nL$  の整数倍から  $\pm\lambda/4$  だけずらす必要がある。但し、 $\lambda$  は中心発振波長である。ここでは、このずれは位相調整すべき量として扱い、最適共振器長は  $nL$  の整数倍であると考えことにする。

簡単化のため、LD の全出力パワーを  $P_0$  とし、縦モード  $M$  本が同じパワー  $P_0/M$  で発振している場合を考える。線幅測定器において、各縦モードは自分自身とのみ干渉するから、線幅測定器の出力信号パワー  $P_{LW}$  は次式のように  $M$  に逆比例する。

$$P_{LW} \propto M \left( \frac{P_0}{M} \right)^2 \propto \frac{1}{M} \quad (4.1)$$

このように、各縦モードでスペクトル線幅の狭窄化が同程度に起きるとすれば、発振縦モード数が少ないほど線幅測定器の出力信号は大きくなる。すなわち、LD の光学長  $nL$  以上に相対共振器長を掃引したとき、線幅測定器の出力が最大となる共振器長が最適共振器長ということにはならない。したがって、多縦モードで、且つ狭スペクトル線幅になる最適共振器長は、縦モードのスペクトル強度を観察しながら決定せねばならない。

最適共振器長においては、各縦モードで LD 端面での反射光と外部共振器からの反射光の位相が合う。 $N$  を自然数として、共振器長が最適共振器長から  $\pm nL/N$  だけずれていれば、二つの反射光は  $N$  モード毎に位相が合うことになり、縦モードパワーも  $N$  モード毎に強くなる。これを利用して、最適共振器長を実験から割り出すことができる。

このことを確かめるために、波長  $1.55\mu\text{m}$  帯の F-P LD (共振器長  $L=900\mu\text{m}$ 、閾値電流  $I_{th}=17.1\text{mA}$ 、両端面劈開) を用いて実験した。前節と同様に、LD の前方出力を遅延自己ヘテロダイン方式の線幅測定器に入力し、シフト周波数 (150MHz) における相対パワーを観測することにより、スペクトル線幅の状態を一括モードして制御に用いた。

駆動電流  $45\text{mA}$  ( $2.6I_{th}$ )、反射減衰量 23dB とし、相対共振器長を  $\pm 1,700\mu\text{m}$  の範囲で変化させたときの 150MHz 成分のパワー変化を図 4.1 に示す。

数千  $\mu\text{m}$  の範囲で見ると LD の光学長  $nL$  を周期として変化している。このことから、 $nL=3,200\mu\text{m}$  と求められた。

最適共振器長を見つけるために、各相対共振器長における発振スペクトルを観測した。図 4.1 の②③④は、それぞれ 2 モード毎、3 モード毎、および 4 モード毎に縦モードパワーが強くなる発振状態である。その発振スペクトルの例を図 4.2(a)-(d) に示す。 $N$  モード毎に縦モードパワーが強くなる時の外部共振器長は、F-P LD の光学長  $nL$  の整数倍から  $\pm nL/N$  だけずれている。このことから、狭スペクトル線幅で多縦モード発振とするための外部共振器の最適長は、図 4.1 の矢印近辺 ( $-350\mu\text{m}$ ) であることが分かった。

最適共振器長近辺における 150MHz 成分のパワーは、図 4.1 で特に大きくはなっていない。しかし、外部共振器の反射光の位相により、半波長を周期として変化する。これを利用して位相調整制御を行う。

実験では、中心波長近辺の 15 本程度の縦モードが、狭線幅で、且つ多縦モード発振するのは、 $-350\mu\text{m} \pm 75\mu\text{m}$  の範囲であった。

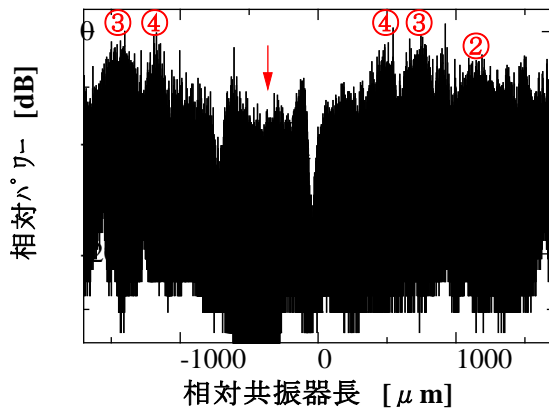


図 4.1 共振器長による線幅モードパワーの変化

## 5. 反射減衰量の最適化

外部共振器長を上記の最適位置に初期設定し、スペクトル線幅の一括出力が最大となるように共振器長をフィードバック制御した。スペクトル線幅の相対変化は、confocal F-P 干渉計(Technical Optics, SA-300, FSR=300MHz, finesse=250)で観測したスペクトル強度の変化から見積もった。

相対スペクトル線幅の反射減衰量依存性を図 5.1 に示す。26dB よりも大きい反射減衰量では、共振器長のフィードバック制御が困難であった。実線は文献 10 に基づいた計算値であり、実験結果と大略合っている。

反射減衰量の減少と共に相対スペクトル線幅は減少し、23dB 辺りから変化は鈍くなった。また、反射減衰量 20dB 以下では、縦モード間の強度ばらつきが大きくなると共に、一つの縦モードが数本に分裂する状態が見られるようになった。

反射減衰量を 23dB とし、共振器長をフィードバック制御することにより、狭スペクトル線幅で、且つ多縦モード発振の状態を 40 分以上維持できることを確認した。反射の

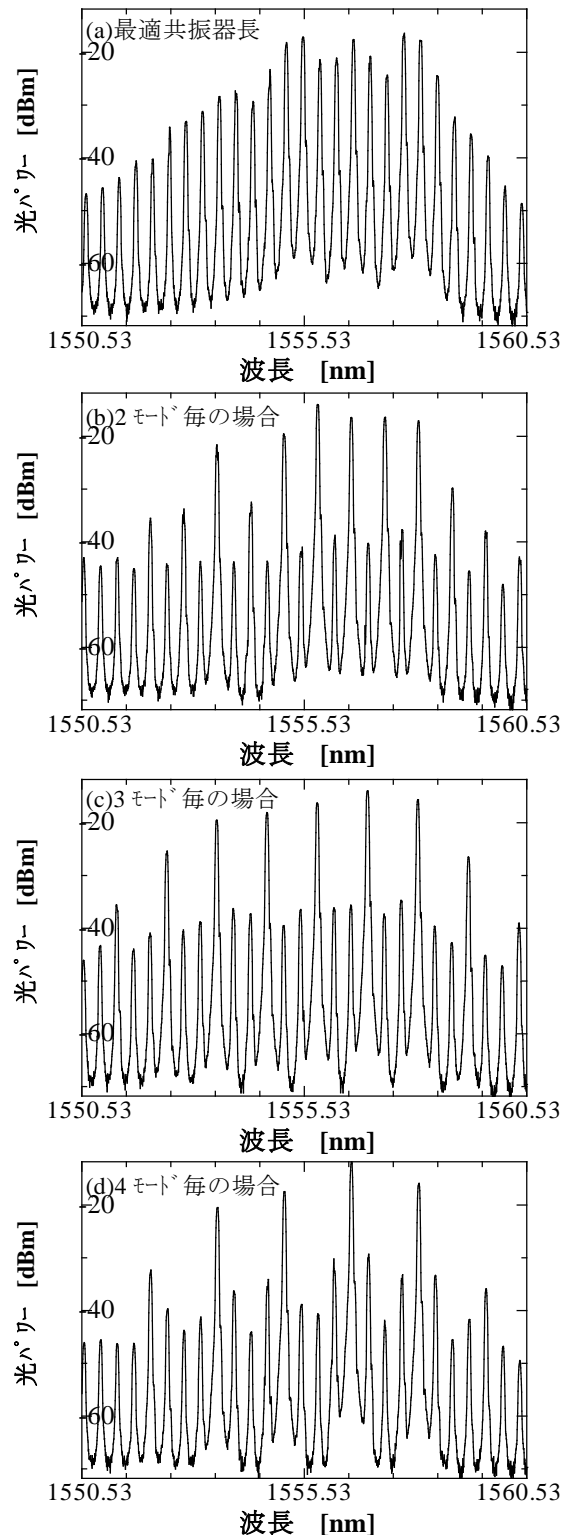


図 4.2 発振スペクトルの例

有無による発振スペクトルの変化の様子を図 5.2 に示す。このとき、外部共振器による反射があると必ずパワーが低下する縦モード(図 5.2 の+3 モード)があった。この原因は、LD チップ内部の欠陥による反射があるためと考えている。

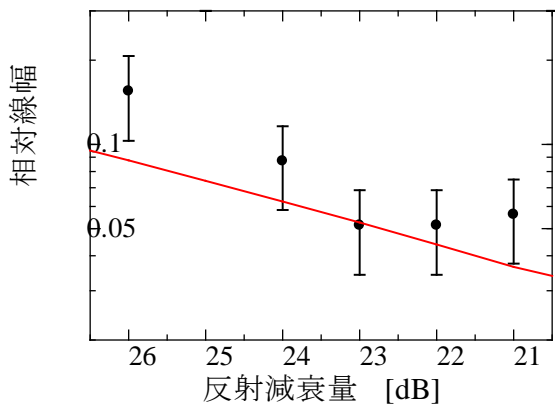
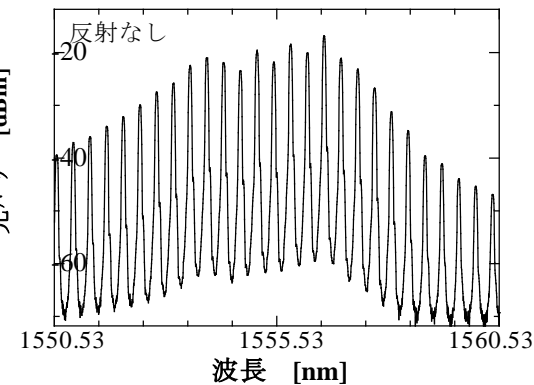
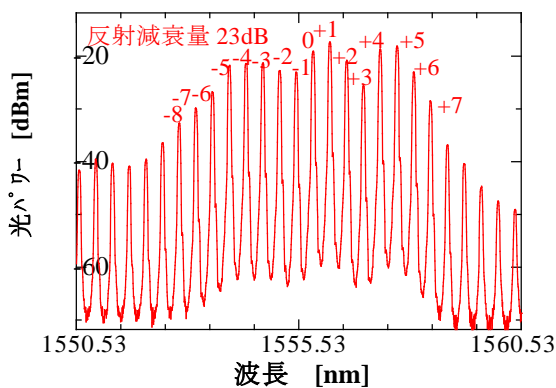
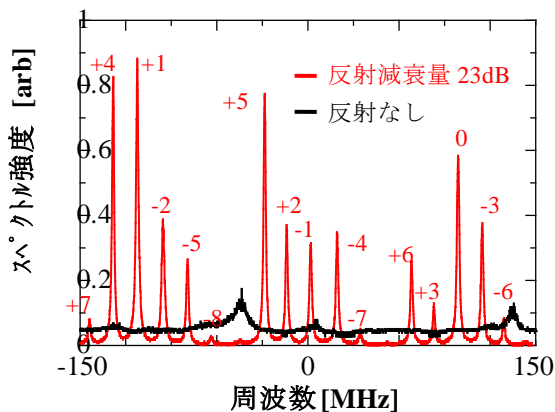


図 5.1 相対線幅の反射減衰量依存性



(a)回折格子分光器(分解能 0.07nm)による観測



(b)confocal F-P 干渉計(FSR=300MHz、  
finesse= 250)による観測

図 5.2 反射の有無による光スペクトルの変化

最適共振器長の近辺で位相調整制御を行い、多縦モード発振で、且つ狭スペクトル線幅の状態とすると、閾値電流は最も低くなる。実験では、これ以後は位相調整制御を停止しても、この状態が維持される傾向が見られた。

以上のように、外部共振器を能動制御することにより、任意の電流値において多縦モード発振で、且つ狭スペクトル線幅の状態を維持できることが分かった。

## 6. 結論

Fabry-Perot型半導体レーザを、多縦モード発振で、且つ狭スペクトル線幅とすることを目的として、外部共振器の構造と制御法を検討した。

一端にコリメタを接続した短尺の偏波保持光ファイバとAlミラーで反射系を構成し、コリメタとAlミラーの間隔を可変とする構造が有効であることが分かった。また、遅延自己ペロタン方式の線幅測定器を用いて、縦モードの線幅を一括測定することにより共振器長を制御する手法が有効であることを確かめた。

本研究で開発した外部共振器は、チップ長が数百 $\mu\text{m}$ ～数mmのFabry-Perot型半導体レーザに適用可能である。また、任意の電流においても多縦モード発振で、且つ狭スペクトル線幅の状態とすることができるものである。

今後は、この外部共振器を全光制御モード同期法やサイドバンド光注入法に適用し、縦モード間注入同期の実験を進める予定である。

## 参考文献

- 1) S.Arahira, S.Oshiba, Y.Matsui, T.Kunii, and Y. Ogawa,"500GHz Optical Short Pulse Generation from a Monolithic Passively Mode-Locked Distributed Bragg Reflector Laser Diodes",*Appl.Phys.Lett.*,vol.64,pp.1917-1919(1994).
- 2) H.Schoell and H.Burkhard,"Ultra High Repetition Rate Optical Pulse Generation by Continuous Light Injection into a Continuous Wave Operated Distributed Feedback Laser",*Jpn.J.Appl.Phys.*,vol.34,pp.L1358-L1361(1995).
- 3) X.Wang, H.Yokoyama, and T.Shimizu,"Synchronized Harmonic Frequency Mode-Locking with Laser Diodes through Optical Pulse Train Injection",*IEEE Photon. Technol.Lett.*,vol.8, pp.617-619(1996).
- 4) K.Sato, I.Kotaka, Y.Kondo, and M.Yamamoto,"Active Mode Locking at 50GHz Repetition Frequency by Half-Frequency Modulation of Monolithic Semiconductor Lasers Integrated with Electroabsorption Modulators",*Appl.Phys.Lett.*,vol.69,pp.2626-2628(1996).
- 5) Y.Katagiri and A.Takada,"Sub-Terahertz Optical Pulse Sources Utilizing Harmonic Colliding-Pulse Mode-Locked Semiconductor Lasers with Periodic Absorber Configura-

tion”, 2<sup>nd</sup> Optoelectronics & Communication Conference (Seoul), pp.662-663(1997).

6) H.Kasuya, M.Mori, R.Goto, T.Goto, and K.Yamane, "All Optical Mode Locking of Fabry-Perot Laser Diode via Mutual Injection Locking between Two Longitudinal Modes", *Appl. Phys. Lett.*, vol.75, pp.13-15(1999).

7) 森正和, 棚森鶴, 近藤蔵人, 「変調サイドバンドを持つ光注入による Fabry-Perot LD の縦モード間注入同期の実験検討」, 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, C-4-29 (2011).

8) 森正和, 松平成暁, 中瀬達寛, 西澤典彦, 後藤了祐, 丸橋大介, 「外部共振器の能動制御による多縦モード発振半導

体レーザのスペクトル線幅狭窄化」, 愛知工業大学研究報告, No.42B, pp.43-53(2007).

9) T.Okoshi, K.Kikuchi, and A.Nakayama, "Novel Method for High Resolution Measurement of Laser Output Spectrum", *Electron. Lett.*, vol.16, pp.630-631(1980).

10) L.Goldberg, H.F.Taylor, A.Dandridge, J.F.Weller, and R.O.Miles, "Spectral Characteristics of Semiconductor Lasers with Optical Feedback", *J. Quantum. Electron.*, vol. QE-18, pp.555-564(1982).

(受理 平成 25 年 3 月 19 日)