

Fabry-Perot 型半導体レーザーを用いた 全光制御モード同期法における動作安定性の向上に関する研究

Study to Improve Stabilities in All-Optical Mode Locking of Fabry-Perot Laser Diodes

濱田 正敏†, 水野 敏紀†, 森 正和†, 西澤 典彦†, 後藤 俊夫††, 後藤 了祐†††, 丸橋 大介†††
Masatoshi HAMADA, Toshiki MIZUNO, Masakazu MORI, Norihiko NISHIZAWA, Toshio GOTO,
Ryosuke GOTO, and Daisuke MARUHASHI

Abstract : All-optical mode locking of Fabry-Perot laser diodes by cw light injection is a useful method to obtain high repetition (> 100Gbit/s) pulse trains. The lasing linewidth of the Fabry-Perot laser diode is one of the key parameters to realize stable mode locking operation. So far, we have observed the mutual injection locking of the main modes by using a short optical fiber as an external cavity. In this report, we improved the structure of the external-cavity, and succeeded in observing the injection locking of side modes as well as the mutual injection locking between main modes.

1. はじめに

高度情報通信ネットワーク社会においては、電気的処理を一切使用しない、フォトニックネットワークの形成が切望されている。現在、各研究機関において、この目的に向けた光デバイスの研究・開発が活発に行われている。

システムを大容量化する手法には、信号処理の高速化と光パルスの並列化がある。単一チャネル当たりの伝送速度が 40Gbps を超えると、電気的処理による速度制限を強く受けてしまい、光通信システムの潜在的な超高速性や柔軟性を十分に生かすことができない。そこで、現段階では、WDM(波長分割多重)や DWDM(高密度波長分割多重)による並列化が主流である。また、次世代の OTDM(光時分割多重)システムでの利用を考えると、電気的処理を一切使用しない、新しい高速化技術を開拓していくべきである。

我々は、1999 年に全光学的なモード同期法である全光制御モード同期法を提案している¹⁾。同手法では特別構造のデバイスを用いることなく、Fabry-Perot 型半導体レーザーを使用することにより、100GHz 以上の高繰り返しパルス光を発生させることができる。実用化に向けては、いくつかの課題が考えられるが、我々は、再現性向上を最重要課題として検討を進めてきた。なお、ここでいう再現性とは、レーザーの個体差によらず、原理通りに動作するという意味

である。

種々の実験により、スペクトル線幅のばらつきが動作特性に影響することを明らかにし、各種スペクトル線幅狭窄化法を講じた結果、主縦モード間での相互注入同期の観測にまで至っている^{2),3)}。しかし、時間的安定性に欠けていた。そこで、結合光学系におけるモデル検討を行い、パラメータを最適にして、その効果を実験的に確認した。さらに、最適化した結合光学系を全光制御モード同期法の実験系に組み込み、cw 光注入時のスペクトル変化を観測した。

2. Fabry-Perot 型レーザーのスペクトル線幅狭窄化法

スペクトル線幅狭窄化については、コヒーレント光伝送方式の研究などに関連して、従来からも多くの研究がなされている。これらは、単一縦モード発振の実現を目的とする研究がほとんどである^{4),5)}。ここで注意すべきは、全光制御モード同期法においては、単にスペクトル線幅を狭くすればよいのではなく、多縦モード発振の状態を維持しながら、なおかつ複数の縦モードのスペクトル線幅を狭くする必要があるということである。これまでに、F-P LD 後方における短尺偏波保持ファイバ(短尺 PMF)を外部共振器として用いることにより、スペクトルが狭線幅となることを明らかにしている^{2),3)}。しかし、時間的安定性に欠けており、実験条件によっては、所望のスペクトル線幅を得られないことがあった。

そこでまず、結合光学系のモデル検討を進めた^{6),7)}。外部共振器モデルを単純化するために、図 2.1 に示すような、反射率が R_0 , R_I , R_{ext} のミラで構成された外部共振器モデルを考える。ここでは、 $R_{ext} \ll R_I$ を前提とする。LD に戻る割合が小さければ(反射減衰量が大きければ)、LD 端面と

† 愛知工業大学大学院 研究工学科(豊田市)

†† 名古屋大学大学院 工学研究科(名古屋市)

††† 中部大学 総合工学研究所(春日井市)

†††† 富士通株式会社 光開発推進部(川崎市)

外部反射体との間の多重反射を考慮する必要は無い。したがって同図のように、右端面での反射は、LD 端面での反射と、外部反射器での一回反射とのベクトル合成になる。よって、反射光の振幅を A 、空気中での位相変化量を θ_1 とすると、以下の式で表すことができる。

$$A = \sqrt{R_1} + (1 - R_1)\sqrt{R_{ext}}e^{i\theta_1} \quad (2.1)$$

なお、LD 内での位相変化量を θ_2 、外部反射によって共振器一巡での位相変化量を θ とすると、外部共振器全体での位相変化量は以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_2 + \frac{(1 - R_1)\sqrt{R_{ext}}}{\sqrt{R_1}} \sin \theta_1 \\ &= \frac{4\pi nl}{\lambda} + \frac{(1 - R_1)\sqrt{R_{ext}}}{\sqrt{R_1}} \sin\left(\frac{4\pi L_{ext}}{\lambda}\right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

モード発振するためには、 $\theta = 2\pi I$ を満たせばよい。発振周波数は以下の式で決まる。

$$\frac{4\pi nl}{\lambda} + \frac{(1 - R_1)\sqrt{R_{ext}}}{\sqrt{R_1}} \sin\left(\frac{4\pi L_{ext}}{\lambda}\right) = 2\pi I \quad (2.3)$$

ここで、 I は自然数である。この式の解の数を調べると、表 2.1 のように三つの領域に分かれる。ただし、同表の R_a 、 R_b は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} R_a &= \frac{(nl)^2 R_1}{L_{ext}^2 (1 - R_1)^2} \\ R_b &= \left(\frac{3\pi}{2}\right)^2 R_a \end{aligned} \quad (2.4)$$

一方、狭窄化されたスペクトル線幅は、 $|d\theta/d\lambda|$ が最大の時に得ることができるので、式(2.2)より以下の式が得られる。

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = -\frac{4\pi nl}{\lambda^2} \left[1 + \gamma \cos\left(\frac{4\pi L_{ext}}{\lambda}\right) \right] \quad (2.5)$$

なお、パラメータ γ は次式で与えられる。

$$\gamma = \frac{(1 - R_1)\sqrt{R_{ext}}L_{ext}}{\sqrt{R_1}nl} \quad (2.6)$$

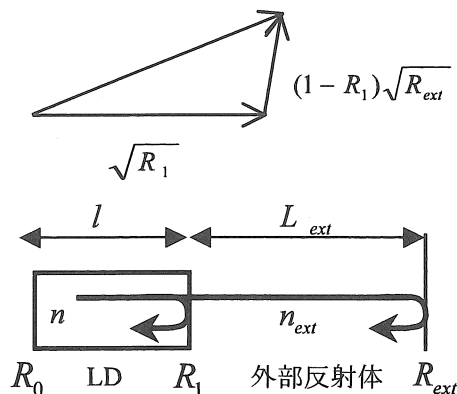


図 2.1 LD と外部共振器モデル

Re _{ext} の範囲	一つの縦モード内のモード数	備考
Re _{ext} < R _a	1	
R _a < Re _{ext} < R _b	1 または 3	反射光の位相による
R _b < Re _{ext}	3 以上	

表 2.1 外部反射率による領域

また、 $\Delta\lambda_0$ を単体時、 $\Delta\lambda_{1/2}$ を狭窄化後のスペクトル線幅とすると、どの領域かによらずに、パラメータ γ を用いて狭窄化されたスペクトル線幅を表すことができる。

$$\Delta\lambda_{1/2} = \frac{\Delta\lambda_0}{(1 + \gamma)^2} \quad (2.7)$$

したがって、最もスペクトル線幅が狭い状態とするためには、 $R_{ext} < R_b$ の条件下で、 R_{ext} を R_b になるべく近づけ、かつ反射光の位相制御を行えばよい。本研究での実験系からは、外部共振器の長さ L_{ext} が他の要因(サイトモード抑圧比)で先に決められ、それによって許容される最大の反射率が決まることになる。

表 2.2 に計算例を示す。LD の共振器長 $l=300\mu\text{m}$ では、線幅狭窄化係数 $1/(1+\gamma)^2$ は 30 程度になる。 l が長くなると、それに応じて外部共振器の反射率を大きくし、Q 値を上げねばならない。 $l=900\mu\text{m}$ では、後方結合損失を下げる方策が不可欠であることが分かる。本研究の用途からは、多縦モード発振の状態を維持したままで、各縦モードのスペクトル線幅を狭窄化せねばならない。したがって、(2.3) 式の位相条件を、同時に複数の縦モードが満たさねばならない。そのため、外部共振器の光学長 $n_{ext}L_{ext}$ は、F-P LD の光学長 nl の整数倍でなければならないという条件が新たに付け加わる。すなわち、反射光の位相調節のみでなく、外部共振器の光学長を調整できる機構が不可欠である。

n	l [μm]	R1	後方結合距離 [cm]	短尺ファイバL [cm]	短尺ファイバの結合損失 [dB]	高反射処理ファイバL [cm]	高反射処理ファイバの反射減衰量 [dB]	外部共振器 Lext [cm]	Ra [dB]	外部共振器の反射減衰量 [dB]	Rb [dB]	γ	線幅狭化係数 (1 + γ) ²
3.5	300	0.3	1.0	9.7	14.4	2.2	3.1	18.3	46.7	31.9	33.2	-	-
3.5	300	0.3	1.0	9.7	14.4	2.2	5.1	18.3	46.7	33.9	33.2	4.3	28.6
3.5	300	0.3	1.0	9.7	14.4	2.2	5.2	18.3	46.7	34.0	33.2	4.3	28.1
3.5	900	0.3	1.0	9.7	14.4	4.3	4.5	17.8	36.9	33.3	23.5	1.5	6.3
3.5	900	0.3	1.0	9.7	14.4	5.5	2.5	19.6	37.7	31.3	24.3	2.1	9.6
3.5	900	0.3	1.0	9.7	14.4	3.5	14.0	16.7	36.3	42.8	22.9	0.5	2.2

表 2.2 スペクトル線幅狭化の計算例(9.7cm 短尺ファイバ使用時)

3. 基本光学系の構成

結合光学系におけるファイバの短尺化および、SELFOC Lens を外部共振器として利用することにより、サイトモード抑圧比が向上することが分かっている。特にファイバの短尺化は、温度変動などに対する安定性向上の観点からも有効な措置である。また、2 節での検討結果より、反射光の位相、外部共振器長の調節も必要である。本節では、これらの要素技術について行った検討結果を述べる。

3.1 短尺ファイバ

結合光学系において、ファイバ長は外部共振器長を決める上で特に重要なパラメータの一つである。ファイバをより短尺化することにより、外部共振器モードの周波数間隔が広がるため、より安定となり、かつ、スペクトル線幅は狭くなる。

これまでは両端コネクタ付の市販ファイバコートを短く切断し、スライスして用いていた。しかし、この手法では、長さ 15cm 以下にすることが困難であり、なおかつ、スライス保護部があるために扱いにくい。より短尺化して、かつ、偏波保持ファイバも自由に扱えるように、フェルルへの取り付けから

長さ [mm]	製作時(両端 flat)		一端斜め研磨後	
	損失 [dB]	損失 [dB]	損失 [dB]	反射減衰量 [dB]
73	0.08	0.52	0.04	42.4
97	0.28	0.35	0.19	38.8
108	0.55	0.38	0.53	39.3

表 3.1 短尺 SM ファイバの特性

長さ [mm]	端の研磨状態		損失 [dB]
	端1	端2	
75	平坦	90° 回転斜め8° 研磨	0.05
115	同上	同上	0.22
243	同上	同上	0.22

表 3.2 短尺 PM ファイバの特性

コネクタ組み立てまでを行うようにした。

表 3.1 と表 3.2 に製作した両端コネクタ付短尺ファイバの特性を示す。損失と反射減衰量は共に実用上問題が無い値である。製作可能な最短のファイバ長は、両端コネクタ付で長さ 7cm 程度、両端フェルル付のみで 4cm 程度までに向上した。

3.2 反射器

短尺ファイバを外部共振器として用いる場合、共振器の Q 値を上げるために、その一端の反射率を大きくする必要はある。これまでは、片端コネクタ付ファイバピグテイルのファイバ端にハンダを塗布して用いていたが、全長が 10cm 程度と長くなる、反射率に波長依存性がある、および所望の反射率が得にくいという問題があった。そこで、市販のインライン型光固定減衰器の出力側にアルミ箔(λ=0.45μm を四枚程度重ねたもの)を塗布して 100%反射とする構成を検討した。アルミ箔を密着させるため、コネクタアダプタを介して光コネクタのフェルルを押し付ける構造とした。入力部から反射点までの距離は光固定減衰器の長さ等に等しく、2.2cm である。

減衰量 1dB、2dB、3dB、5dB の市販光固定減衰器を用いて反射器を製作した。それらの反射減衰量の波長依存性を図 3.1 に示す(#1~ #8)。波長依存性が小さく、良好な特性が得られた。同図の S7 は、両端フェルル付のみの 3.7cm 短尺ファイバを用いて構成した反射器である。アルミ箔はフェルル

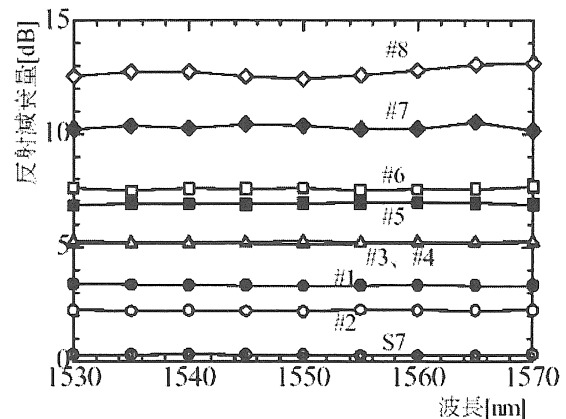


図 3.1 反射器の特性

だけの突合せで押し付けているが、反射減衰量 0.3dB が安定に得られた。

3.3 位相調整機構

2 節の結果から、外部反射を用いてスペクトル線幅狭窄化を行う場合には、反射光の位相を調節しなければならない。反射光の位相は、外部反射器を構成する光学系の長さのみでなく、式(2.3)に示すように、LD の発振波長にも依存する。光学系が長くなればなるほど、僅かな温度変化でも数波長程度の変化が生ずることになる。したがって、上述のように、光学系を短尺化することが有効である。一方、長期間に渡る安定性確保の上からは、能動的な調整機構が不可欠である。そこで、外部共振器として使用する短尺ファイバの F-P LD 側コネクタを微動ステージ(駿河精機製、分解能 25nm)に取り付け、F-PLD との距離を変えて位相調整する構成にした。なお、温度を一定 (20°C) に保つために、温度コントローラ(ILX Lightwave 製、設定分解能 0.001deg、温度安定度(24h) ±0.005deg) を使用した。この場合の位相制御の分解能は、 $25\text{nm} \times 2(\text{往復}) / 1550\text{nm} \times 360\text{deg} = 12\text{deg}$ となる。なお、将来的には、微動ステージの自動制御を考えている。

使用した LD は、発振波長 1.55μm 帯、共振器長 300μm、端面処理 (AR-CL: 低反射コーティングへき開) のものである。図 3.2 に駆動電流による主縦モード発振周波数の変化の測定例を示す。周波数変化は約 1GHz/mA である。端面処理が異なる別の三個の LD について調べた結果もほぼ同様な値であった。

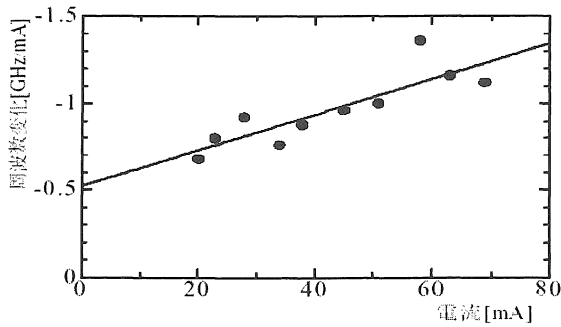


図 3.2 1.55μm F-PLD の駆動電流による発振周波数の変化例

$L_{ext} = 30\text{cm}$ の短尺ファイバを用いた場合について、1mA の電流変化による位相変化を周波数変化 1GHz/mA として見積もると、次のようになる。ただし、屈折率 $n_{ext} = 1.45$ 、発振波長 λ 、発振周波数 ν とした。

$$\frac{2n_{ext}L_{ext}\Delta\lambda}{\lambda^2} \times 2\pi = \frac{2n_{ext}L_{ext}\Delta\nu}{c} \times 2\pi$$

$$= \frac{2 \times 1.45 \times 0.3 \times 1 \times 10^9}{3 \times 10^8} \times 2\pi$$

$$= 2.9 \times 2\pi [\text{rad/mA}]$$

1mA の電流変化で 2.9 波長分の位相変化が生ずる。位相変化を 0.1 波長程度に抑えるためには、電流変動を 30μA 以下にする必要がある。外部共振器の短尺化を行えば、この条件は緩くなる。

3.4 光学長可変機構

複数の縦モードについて、スペクトル線幅狭窄化の条件が同時に満たされるためには、外部共振器の光学長 $n_{ext}L_{ext}$ は、F-P LD の光学長 nl の整数倍でなければならない。共振器長が 300μm の F-P LD では、 $nl \sim 1\text{mm}$ となる。共振器長 900μm までを加えるように考えると、外部共振器の光学長を数 mm まで可変できるようにしておく必要がある。そこで、図 3.3 のような構成を検討した。

同図(a)の構成では、大口径・短焦点距離のレンズで光ビームを空中で数 cm 飛ばし、その間にガラス板を入れて光学長を変化させる。厚いガラス板の角度を変えれば、光学長を連続的に変化させることができる。図 3.4 に光学長変化の計算例を示す。一方、顕微鏡用カバーガラスなどの薄いガラス板の枚数を一定角度で増やしていくと、離散的に変化させることができる。

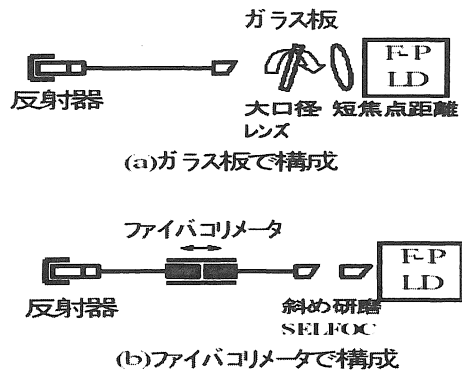


図 3.3 外部共振器長可変系の構成

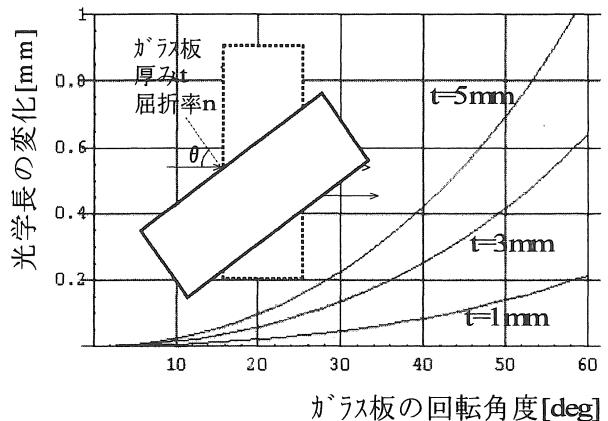


図 3.4 ガラス板による光学長変化(計算)

実験では、厚さ 5mm のガラス板を連続変化用に、厚さ 0.145mm のカーガラスを離散変化用に用いることとした。また、焦点距離 10mm と 15mm のレンズを組み合わせて結合系を構成した。光ビームは空中を 5.5cm 飛んでいる。この手法では、ガラス板の回転に伴ってビームの方向がずれるため、そのつど光軸を合わせ直さねばならず、かつ、損失が増える傾向にある。

図 3.5 に LD との結合損失を測定した結果を示す。損失が 1[dB]増加することを目安とすると、 $\pm 30\text{deg}$ までが許容範囲であり、光学長の連続可変量は 0.3mm 程度となる。

大口径・短焦点距離のレンズは SELFOC Lens などと比べると焦点距離が長いので、結合損失に関しては、ビーム方向の距離変化に対する許容度が大きい。そこで、前節の位

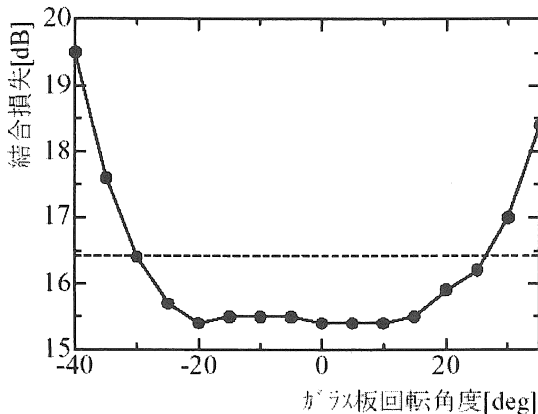


図 3.5 ガラス板回転に伴う結合損失の変化

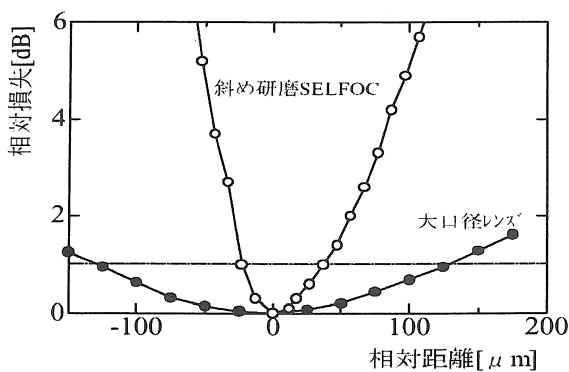


図 3.6 結合損失のビーム方向距離依存性

相調整用微動ステージのみを用いて、共振器長をどれくらい変えられるかを調べた。その結果を図 3.6 に示す。損失増加 1dB 以内とすると、可変長は 0.25mm 程度となり、ガラス板の回転による変化量とほぼ同じ値が得られることが分かった。

一方、(b)の構成では、市販のファイバコリメータを用いれば挿入損失 1dB 程度で数メートルの光学長変化が容易に得られる。ただし、図 3.3 のように、ファイバコリメータの本体部分のみで 5cm ほどあるため、外部共振器としての短尺ファイバ

は、最短でも 20cm になってしまう。定偏波ファイバ化など、製作に関わる基礎技術のレベルを考えて、今回は、この手法は使用しなかった。

3.5 位相調整の効果

短尺ファイバには長さ 73mm~210mm、反射器には 3.2 節で述べた構造のもの、および高反射処理ファイバを用い、種々に組み合わせて実験を行った。一般的傾向として、外部共振器長が短くなると、発振スペクトル強度が 1 縦モードおきに強弱を繰り返す状態となった。これは、LD の光学長 nl と、外部共振器の光学長 $n_{ext}L_{ext}$ とが整数比から大きくずれたためであり、光学長可変機構が完全に機能すれば解消できると考えている。微動ステージで LD と外部共振器との距離 L_{ext} を増加させ、主縦モードのスペクトル線幅を観測することにより、反射光の位相の影響を調べた。観測例を図 3.7 に示す。短尺ファイバは長さ 97mm の非定偏波ファイバ、反射器は長さ 115mm・反射減衰量 6.5dB の高反射処理ファイバである。外部共振器モードの数は 1 本または 2 本であり、スペクトルの状態は、 L_{ext} の増加に対して周期的に変化した(周期=800nm~900nm)。外部共振器モードの数が 1 本で、かつ狭スペクトル線幅とするには、 L_{ext} の値をある値を中心として $\pm 150\text{nm} \sim \pm 200\text{nm}$ の範囲に制御すべきであることが分かった。尚、この状態で、中心縦モードを含む 12 本の縦モード(モード -7~+4)のスペクトル線幅が狭窄化していることを確認した(図 3.8)。

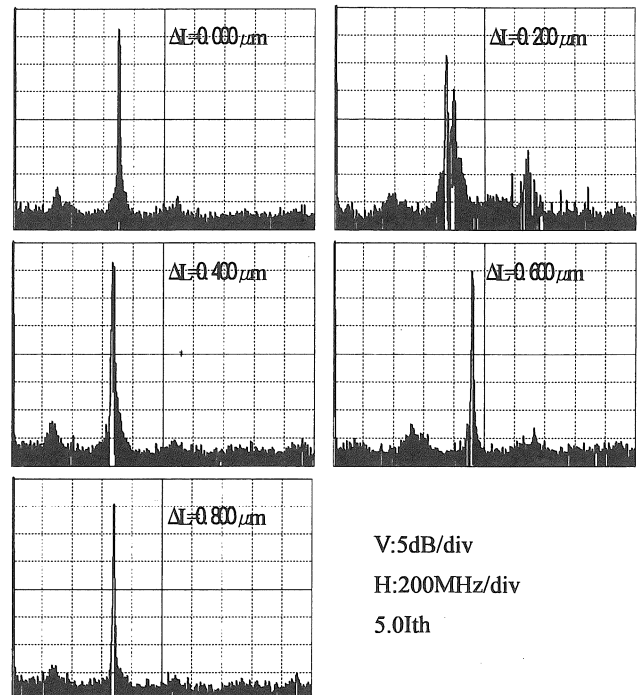


図 3.7 中心縦モードのスペクトル線幅の変化

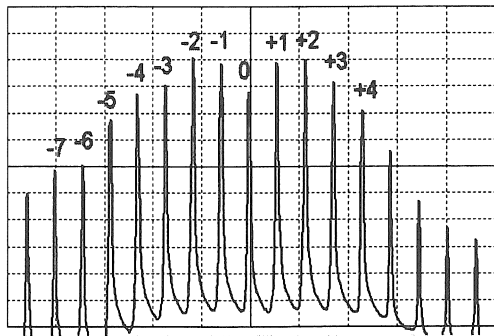


図 3.8 狭窄化した縦モード
(V:5dB/div, H:2nm/div, 中心波長=1558.76nm, 5.0Ith)

3.6 光学長調整の効果

短尺ファイバとして長さ 24.3cm の定偏波ファイバ、反射器には長さ 2.2cm・反射減衰量 7.7dB の固定減衰器型反射器を用いた場合について、外部共振器の光学長調整の効果を実験で調べた。最初に、挿入するカーガラスの枚数を変えながら、そのつど、最もスペクトル線幅が狭窄化するように駆動電流を調節すると共に、微動ステージで位相調整を行って、最適の駆動電流、カーガラス枚数、および微動ステージの位置を決めた。そのときのスペクトルの様子を図 3.9 (a) に示す。駆動電流は 6.7Ith である。縦モード毎にスペクトルの様子を調べた結果、サイドモード抑圧比は 25dB 以上あることが分かった。一方、最適状態からガラス板(t=5mm)を回転させ、光学長を最適状態から+0.3mm としたときのスペクトルの様子を図 3.9 (b)に示す。この場合にも、駆動電流の調節と、微動ステージによる位相調整は行っているが、スペクトル線幅は良好な状態にはならなかった。

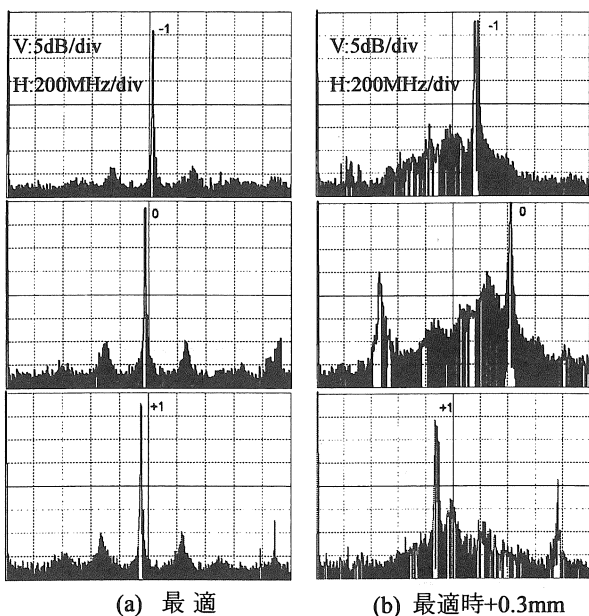


図 3.9 外部共振器の光学長調整の効果

4. cw 注入による F-P 型半導体レーザのスペクトル変化

3 節で取りあげた基本光学系を組み合わせ外部共振器を構成し、種々の条件下でスペクトル線幅狭窄化について実験検討を行った。図 4.1 に実験系を示す。まず、結合光学系においては、外部共振器長を調整するためにガラス板とカーガラスを挿入しているため、LD の後方ビームは光学長に換算して 5.5cm 程度の空間を飛ぶ構成となっている。また、結合損失は斜め研磨 SELFOC Lens の場合と比べて、約 1dB 増加して、15.5dB である。なお、F-P LD チップには、発振波長 1.55μm 帯、共振器長 300μm、端面処理 AR-CL、発振閾値電流 Ith=10mA のものを用いた。発振スペクトルの観測は光スペクトラムアナライザ(波長範囲 600~1750nm、波長分解能 0.07nm)と confocal Fabry-Perot 干渉計(free spectral range FSR=2GHz, finesse=100)を用いて、波長可変レーザ LD2 とのビートをとることにより、縦モード毎に、そのスペクトル構造を高分解能(数 MHz)で分離評価を行った。

まず、cw 注入光が無い状態で、confocal Fabry-Perot 干渉計で観測しながら、スペクトル線幅が狭窄化する電流を探した。ただし、confocal Fabry-Perot 干渉計によるスペクトル観測では、一つの縦モード内で数 100MHz 離れた複数の外部共振器モードが発振している場合でも、単一外部共振器モードに見えてしまう場合があるため、個々の縦モード毎に波長可変レーザでスペクトル線幅を観測することが不可欠である。微動ステージにて反射光の位相調整(距離換算で±400nm 程度)を行うことにより、どの電流値においてもスペクトル線幅は狭窄化できることが分かった。ただし、エアコンなどによる温度変化の影響を受けにくく、長時間安定である電流は 6Ith 以上であった。

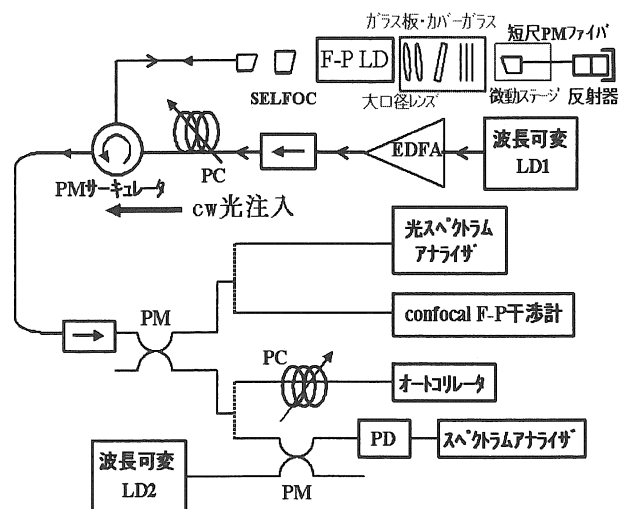


図 4.1 スペクトル線幅狭窄化の観測系

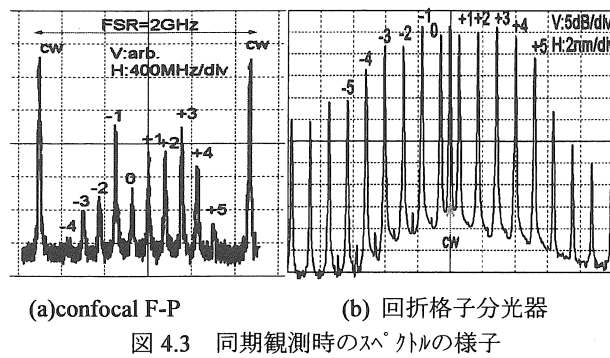
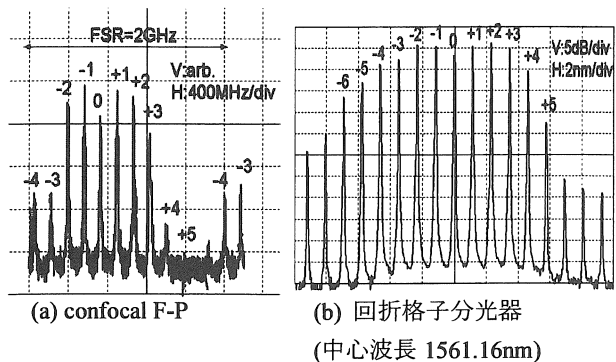
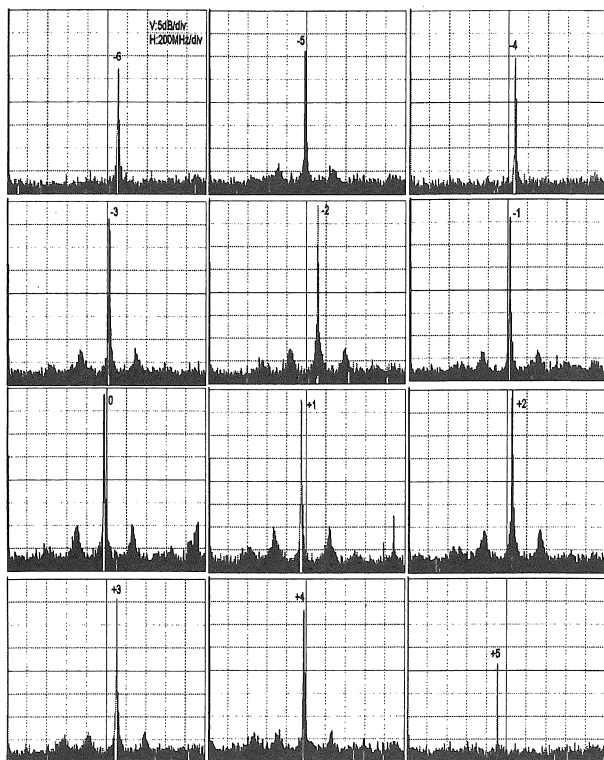


図 4.3 同期観測時のスペクトルの様子



(c) 各縦モードスペクトル線幅

図 4.2 cw 注入光無しでのスペクトル狭窄の様子 (I=6.7Ith)

例として図 4.2 に 6.7Ith での様子を示す。LD の後方には 24.3cm の PANDA ファイバを結合し、反射減衰量 7.7dB の反射器を接続している。同図の(a)confocal Fabry-Perot 干渉計による観測、(b)回折格子分光器による観測、のデータからは、ほぼ同じパワーの 12 本の縦モードが発振していることが分かる。同図(c)は、この状態で、各縦モードのスペクトル線幅を分離測定した結果である。発振中心波長近辺の縦モード 12 本(モード -6~モード +5)のスペクトルが狭窄化しており、サイドモード抑圧比は 25dB 以上あることが分かる。各縦モードのスペクトル線幅は数 MHz 以下と見積もられる。F-P LD のみならず、ビート観測用の波長可変光源の周波数揺らぎもあるので、スペクトルアナライザのレンジを拡大しても、数 MHz 以下の様子は読み取れない。遅延自己ペロウ法による線幅測定器に直接入力したところでは(全体の平均的なスペクトル線幅が観測される)、500kHz 程度であった。

4.1 主縦モード間の相互注入同期の観測

cw 光を注入し、主縦モード(モード番号を 0、+1 と表記する)の四光混合成分を観測する実験を行った。cw 光のパワーは、図 4.1 の EDFA 出力側に接続された偏波制御器の出力端で測定して+7.5dBm であった。cw 注入光の周波数を主縦モード(0 モードと+1 モード)の中心付近に設定し、0 モードのスペクトル変化を観測した。全光制御モード同期の第一段階では、cw 注入光を励起光、+1 モード光(0 モード光)を信号光とする四光波混合(FWM)成分が 0 モード(+1 モード)近辺に現れて、それらを介して主縦モードが相互注入同期するはずである。cw 注入光の周波数調整は、光スペクトラムアナライザで観測しながら粗く設定し、次に主縦モード(0 モード、または+1 モード)のスペクトルを波長可変レーザーとのビートで観測しながら(分解能~数 MHz)、FWM 成分が主縦モード成分に一致するように細かく調整した。図 4.3 に主縦モードが相互注入同期した時の、(a) confocal Fabry-Perot 干渉計、(b)回折格子分光器、によるスペクトル観測の結果を示す。

confocal Fabry-Perot 干渉計の観測結果では、見かけ上は cw 光が 0 モードと+1 モードの間にはない。この実験条件の下では、たまたま 0 モードと+1 モードの周波数間隔が FSR(free spectral range)=2GHz の奇数倍+150MHz 程度であったためである。その真中の周波数は、n を自然数として $[2GHz \times (2n+1) + 150MHz] / 2$ を 2GHz で割り算した余りの 1GHz+75MHz となり、見かけ上は 0 モードと+1 モードの間から FSR の 1/2 だけずれた位置になる。

図 4.4 に主縦モードが相互注入同期するときのスペクトル変化を示す。注入光の周波数が主縦モードの真中に近づくにつれて、FWM 成分のパワーが徐々に大きくなる。FWM 成分と主縦モード周波数との差が 200MHz 程度まで小さくなると、両者のビートでキャリア密度が変調されるため、主縦モード成分を挟んで、FWM 成分と対称な位置に別のスペクトル成分が発生するようになる。FWM 成分と主縦モード周波数との差が数 10MHz になると、FWM 成分の強度は主縦モードの強度とほぼ同程度になり、遂には相互注入同期が起きる。なお、FWM 成分が 2 本表れる場合があるが、1

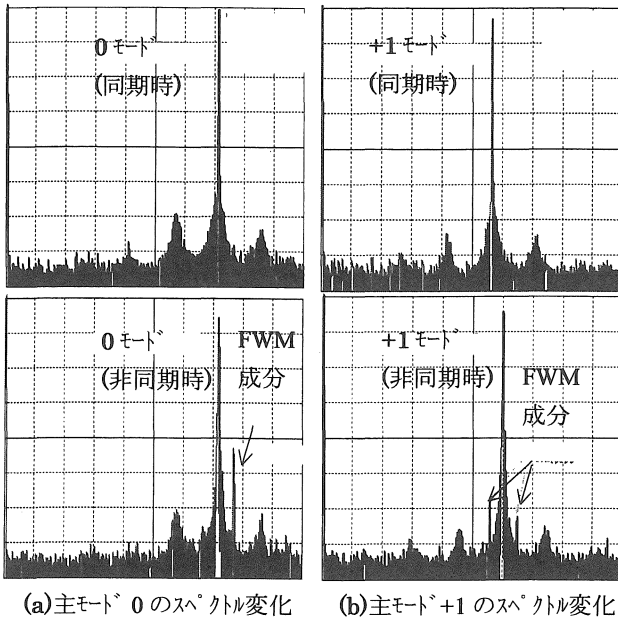


図 4.4 主モード間(0/+1)の相互注入同期とスペクトル変化
(V:5dB/div, H:200MHz/div)

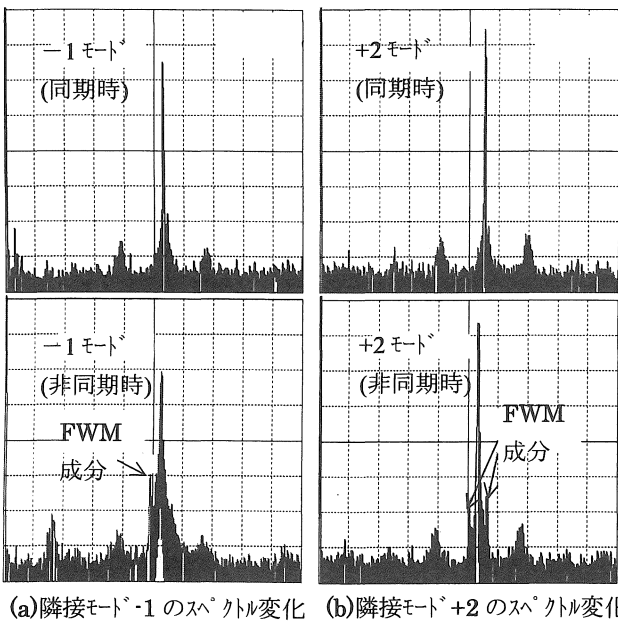


図 4.5 隣接モード(-1/+2)の注入同期とスペクトルの変化
(V:5dB/div, H:200MHz/div)

本は FWM 成分のキャリア変調によって二次的に生じたビート成分である。

4.2 隣接縦モードの注入同期の観測

全光制御モード同期の第二段階では、主縦モード間(0モードと+1モード)の FWM 成分が隣接縦モード(-1モードと+2モード)の周波数位置に現れて、それらを介して-1モードと+2モードが注入同期するはずである。図 4.5 に、主縦モードが相互注入する前後の状態における、-1モードと+2モードのスペクトルの様子を示す。主縦モード間の FWM 成分は、注入 cw

光の周波数に無関係に-1モードと+2モードの周波数位置に現れるはずである。したがって、非同期時に見える FWM 成分は、図 4.4 で主縦モードが非同期の場合に現れる FWM によるものであり、隣接縦モードの注入同期過程に対しては無関係である。ここでは、図 4.5 に見える FWM が隣接縦モードの周波数に一致するように cw 光周波数を設定すると線幅が狭くなることから、隣接縦モードの注入同期が起きていると考えた。

また、注入 cw 光のパワーを上げていくと、各縦モードのスペクトルに雑音成分が重畳したような状態となり、FWM 成分が全く観測できなくなることがあった。各縦モードとその近傍の FWM 成分との間で低周波ビート成分が発生したり、キャリア密度変化や熱的变化に伴って光学長が変化することなど、種々の要因が重なっていると思われる。このような場合でも、反射光位相の調整用に用いている微動ステージにより、共振器長を数 10 μm 単位のステップで調節することによって回避できることがあった。微動ステージを用いて反射光位相の制御のみでなく、共振器長の調整もできるのであれば光学系を簡易化できるため、もう少し詳しく状況を調べていく必要がある。

今回のスペクトル線幅狭窄化措置によって、より安定、かつ確実に相互注入同期や注入同期を実現できるようになったが、長時間に渡って安定動作させるためには、反射光の位相制御と共振器長の制御とを自動化することが不可欠である。RIN (relative intensity noise) の変化などを検出して制御する方法を検討していきたい。

5. まとめと今後の課題

cw 光注入による Fabry-Perot 型半導体レーザー (F-P LD) の全光制御モード同期に関して、用いる F-P LD の個体差に依存せず、安定にモード同期を実現するための方策を検討した。多縦モード発振を維持したままで、各縦モードのスペクトル線幅を狭窄化する方法として、短尺ファイバを外部共振器として用いる方法の定量的な検討を進めた。外部共振器による線幅狭窄化の特性を計算モデルで見積もると共に、反射光の位相条件など、実現に必要な諸条件を調べた。実験に当たっては、短尺ファイバ、および反射器のより短尺化を図ると共に、反射光の位相調整の効果、光学長可変の効果を実験で確認しながら進めた。これらの結果、狭スペクトル線幅 (<1MHz) の状態を、より確実に、かつ安定に実現できるようになった。また、主縦モード間の相互注入同期の様子のみでなく、それに続く隣接縦モードの注入同期の様相まで観測できるようになった。

今後は、光学長可変機構のさらなる最適化と詳細な物理機構の解明、および反射光の位相調整の自動化によって、長時間のモード同期状態を実現させたい。

6. 参考文献

- 1) 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", *Applied Physics Lett.*, **75**, No.1, pp.13-15(1999).
- 2) 鈴木基仁, 水池秀仁, 森正和, 後藤俊夫, 後藤了祐, 山根一雄, "cw 光注入による Fabry-Perot LD の全光制御モード同期法の特性と二分周動作への応用", 愛知工業大学研究報告, **37-B**, pp.179-189(2002).
- 3) 濱田正敏, 水野敏紀, 森正和, 西澤典彦, 後藤俊夫, 後藤了祐, 丸橋大介, "Fabry-Perot 型半導体レーザーにおける短尺ファイバを用いたスペクトル線幅狭窄化の安定性", 第4回 レザ-学会中部若手研究発表会(2004).
- 4) G Lin and P. Hsueh, "Spectral Characteristics of a Regenerative Semiconductor Optical Amplifier Mutually Injection Locked with a Fabry-Perot Laser Diode", *Applied Optics*, **43**, pp.153-159(2004).
- 5) G. Lin and J. Wu, "Linewidth Reduction and Wavelength Tuning of an Erbium-Doped Fiber Laser by Use of a Single-Mode-Selected and Side-Mode-Suppressed Fabry-Perot Laser Diode", *Applied Optics*, **42**, pp.5477-5482(2003).
- 6) L.Goldberg, H.Taylor, A.Dandridge, J.Weller, and R.Miles, "Spectral Characteristics of Semiconductor Lasers with Optical Feedback", *IEEE Journal of Quantum Electron.*, **QE-18**, No.4, pp.555-564(1982).
- 7) T.Fujita, S.Ishizuka, K.Fujito, H.Serizawa, and H.Sato, "Intensity Noise Suppression and Modulation Characteristics of a Laser Diode Coupled to an External Cavity", *IEEE Journal Quantum Electron.*, **QE-20**, No.5, pp.492-499(1984).
- 8) R.W.Tkach and A.R.Chraplyvy, "Regimes of Feedback Effects in 1.5- μm Distributed Feedback Lasers", *IEEE Journal of Lightwave Technol.*, **LT-4**, pp.1655-1661(1986).
- 9) レザ-学会編, 「先端レザ-テクノロジー」, 日経技術図書, pp.319-343(1992).
- 10) J.Herrmann and B.Wilhelmi 著, 小林孝嘉訳, 「超短光パルスレザ-」, 共立出版(1991).
- 11) 張吉夫他, "「モード同期技術の進展」解説小特集号", レザ-研究, **27**, No.11, pp.734-767(1999).

(受理 平成18年3月18日)