

全光制御モード同期法における

スペクトル線幅狭窄化と主縦モード間相互注入同期の観測

Spectral Linewidth Reduction and Observation of Mutual Injection Locking between Main Longitudinal Modes in All-Optical Mode Locking

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

Abstract : In all-optical mode locking of Fabry-Perot Laser diodes(F-P LDs), spectral linewidth reduction of F-P LDs is vital in realizing high stability and good reproducibility of the method. A method, which utilizes the reflection at the end of a short optical fiber, is investigated. By optimizing the length and the reflectivity of the short fiber, mutual injection locking between the main longitudinal modes with the aid of the cw light injection could be observed.

1. はじめに

今後の高度情報社会の展開において、40Gb/s を越える超大容量光通信システムの実現が強く望まれている。光通信システムの大容量化手法には、伝送速度の高速化と、波長分割多重による並列化の二つがある。現在のデバイス技術では 40Gb/s を越える電氣的信号処理が極めて困難であるため、研究開発の主流は波長分割多重による並列化へと移っている。しかし、信号処理速度の高速化は、通信分野のみならず、情報処理分野においても依然として重要な課題である。電氣的信号処理の制限を受けない、光信号処理による新しい高速化技術を開拓していくべきである。

開発すべき技術目標は多岐にわたるが、最も基本となるものは、波長帯 1.55 μm における制御性の良い、高繰り返し短光パルス発生技術であろう。

モード同期法はこのための代表的手段であり、能動、或いは受動モード同期によるファイバリングレーザーや半導体レーザーが研究されてきた。実用化の観点からは、半導体レーザーが最有力であり、可飽和吸収体を組み込んだ受動モード同期半導体レーザーによる高繰り返し短光パルス発生が報告されている^{2,3)}。

しかし、この手法は、デバイス構造が複雑な上に、繰り返し周波数の精密制御が困難であることや、同期引き込み

周波数範囲が狭いなどの問題がある。

我々は、cw 光を多縦モード発振の Fabry-Perot 型半導体レーザー(F-P LD)に注入することにより、全く新しい形態のモード同期が可能であることを実験的に見出した⁴⁾。基本的な物理機構は、cw 注入光を介して二つの主縦モードが相互注入し、その後、隣接縦モードが注入同期していくものである^{4,5)}。

本手法は、電氣的変調を用いず、光信号のみでファブリ・ペロー型半導体レーザーをモード同期させるものである。当研究室では繰り返し周波数 141GHz、パルス幅 1.5psec の光パルス発生に成功している⁴⁾。

また、可飽和吸収体を用いないため、単純構造のファブリ・ペロー型半導体レーザーを使用できる。更に、別個のファブリ・ペロー型半導体レーザー内での注入同期現象と組み合わせることによって、モード同期パルス列の繰り返し周波数を分周、或いは通倍することも原理的には可能であることが分かっている^{6,7)}。

全光制御モード同期法に関して検討すべき課題として、①再現性向上、②物理機構の解明と解析モデルの確立、③繰り返し周波数の分周と通倍、④電気信号への同期法、⑤同期引き込み範囲の拡大、⑥出力パルスの整形、変調、圧縮、⑦応用法、が挙げられる。これまで、④と⑦を除いた課題項目について検討を進めてきた。

最重要課題は、「①再現性向上」であり、全光制御モード同期法の動作原理を解明する上でも重要な点である。

ここでいう再現性向上とは、用いる F-P LD の個体差によらず、常に原理通りに動作するという意味である。

† 愛知工業大学 電気学科 情報通信工学専攻(豊田市)

† 南京郵電学院(中国 南京市)

†† 名古屋大学大学院 工学研究科(名古屋市)

†† 富士通株式会社 光開発推進部(川崎市)

実際には、原理通りに動作する F-P LD の割合は小さく、しかも実験系の状態によって動作状況が左右されるというのが実情である。再現性向上を図ることは、全光制御モード同期法を応用する上でも、また、動作機構を解明する上でも重要な点である。これまでの実験で、スペクトル線幅のばらつきが再現性に大きく影響していることが判明しているため、セルフォックレンズや短尺ファイバを外部共振器として用いる手法など、毎年、種々の観点から検討してきた^{6,8)}。

以上のことから、今回は、(1)再現性向上のための施策を詳細に実験検討すること、およびその上で(2)全光制御モード同期の動作機構を調べることで、この二点を中心にして検討を進めた。

(1)については、多縦モード発振の状態を保ったままで F-P LD のスペクトル線幅を狭窄化する手法を検討した。これまでの手法を踏襲して、LD チップの後方に結合した短尺ファイバの反射を利用する方法を詳細検討した。(2)については、(1)の施策を適用した実験系において、主縦モードの四光混合成分を観測することにより、相互注入同期の過程を観測した。

2. Fabry-Perot LD のスペクトル線幅狭窄化

2.1 LD の線幅

全光制御モード同期法では、①cw 注入光を介した二つの主縦モード間の相互注入同期、およびそれに続いて、②隣接縦モードの注入同期、が起きることを前提としている。

これらの同期現象は、被注入 F-P LD の各縦モードのスペクトル線幅に大きく依存するため、これによって LD チップの個体差が現れることになる。

今回の実験で使用した LD チップの特性諸元を表 1 に、およびその単体でのスペクトル線幅を測定した結果を図 1 に示す。この測定は、LD チップ出力を斜め研磨セルフォックレンズで集光し、入力コネクタを斜め研磨したファイバ型アイソレータに結合させてから、遅延自己ヘテロダイン法による線幅測定器(分解能 20kHz)にそのまま導いて行った。F-P LD は多縦モード発振しているので、線幅測定器の出力結果そのものが各縦モードのスペクトル線幅とは限らないが、大雑把な目安にはなる。

測定結果は、理論的な「スペクトル線幅が出力パワーの逆数に比例」、という関係には無く、モード間競合⁹⁾や LD 内部の欠陥による反射、などの影響で複雑な変化をする。一般には、スペクトル線幅は数 10MHz 以上である。このような LD チップであっても、実験系に適切な反射があると、それによってスペクトル線幅狭窄化が起きることがある。

そこで、LD チップの個体差を評価するために、まず、不要な反射を抑えた実験系の確立を進めた。

その次に、LD の後方に結合した短尺ファイバを利用したスペクトル線幅狭窄化の実験を行った。

表 1 使用した F-P LD チップの特性諸元

LD No.	チップ長 (共振器長)	端面処理	端面パワー 反射率		閾値 電流
			出力 側	モニ タ側	
Sample 1	300 μm	AR-CL	3.60%	31%	8.3mA
Sample 2		CL-CL	31%	31%	6.6mA
Sample 3					6.8mA

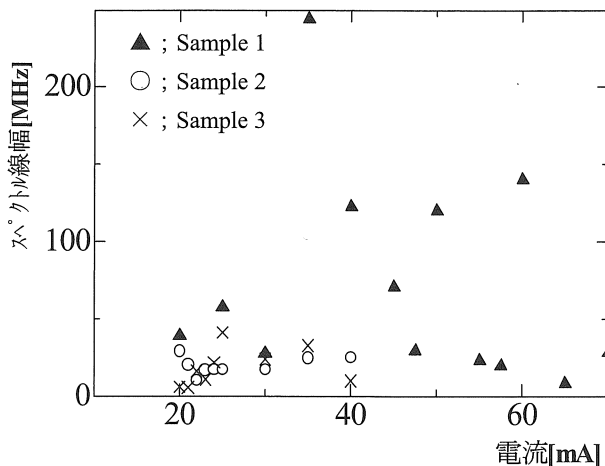


図 1 F-P LD 単体でのスペクトル線幅

2.2 不要な反射の抑圧

LD の特性は、微弱な外部反射によって変化してしまう。DFB-LD のような単一縦モード発振する LD での所要反射減衰量については実験報告がある¹⁰⁾。一方、全光制御モード同期法では、多縦モード発振の LD を用いるが、反射減衰量 64dB 程度から影響が現れるとの実験結果を得ている。実験系における反射をこのレベル以下に抑えるためには、細部にわたって反射抑圧対策を施す必要がある。

図 2 は代表的な光結合系において、反射が生じる箇所を示したものである。本実験では、各々に対して、次の処置を施した。

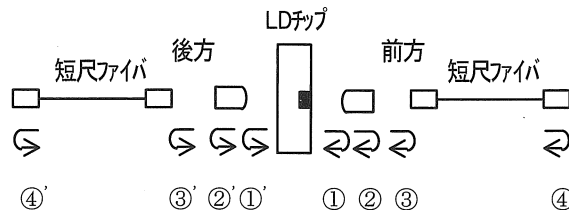


図 2 結合系における反射

①、①'、②、②': LD チップ側を 8° 斜め研磨したセルフォックレンズを用いた。両端は AR コートを施してある。

③、③': LD チップ側の端面を 8° 斜め研磨した SM ファイバを用いた。セルフォックレンズと SM ファイバのいずれも斜め研磨であるので、結合効率の最適位置を探すのに時間がかかる。また、こういう組み合わせで実現できる結合損失は、前方

6.5dB、後方 14dB 程度であり、凸レンズ処理のセルフフォーカスと垂直研磨コネクタの SM ファイバを用いた場合よりも 1.5dB 程度大きい。

[④]:この箇所では他の SM ファイバとコネクタ接続する形式にすると、特別な研磨(反射減衰量 SPC 研磨>40dB、UPC 研磨>45dB)を施しても、反射減衰量=2×結合損失+コネクタ接続の反射減衰量=2×6.5+45(UPC)であり、反射減衰量 64dB を確保できない。したがって、前方結合は、短尺ファイバではなく、アイソレータやサキュレータ(いずれも入力側コネクタ端は斜め研磨)で行う必要がある。アイソレータは反射減衰量 ≥ 50 dB のものを容易に入手できるので単独で使用しても問題は無い。一方、サキュレータでは、市販品の漏話減衰量 ~ 30 dB であるので、出力側に反射減衰量 20dB 程度の反射があると LD スペクトルに影響が出る。そこで、サキュレータの出力側ファイバをそのまま使用するのではなく、アイソレータを介して使用するようにした(後述の図 7 を参照)。

cw 光注入をする場合には偏波方向を合わせる必要があるため、前方結合には定偏波ファイバ(PANDA)を用いた。偏波が PANDA の slow 軸方向にあり、かつ斜め研磨によるビーム偏向が実験台に対して水平方向となるよう、図 3 の右図のようにコネクタと斜め研磨の方向を通常の場合よりも 90 度回転して使用した。

[④]:後方結合の結合損失が 14dB 程度のため、コネクタを SPC 研磨すれば反射減衰量 64dB を確保できる。一方、PC 研磨(反射減衰量>25dB)の場合は、反射減衰量=2×14+25=53dB であり、LD スペクトルに影響が出る。コネクタ端を開放した時のフレネル反射(反射減衰量 15dB)以上の反射を意図的に返す場合には、この程度の反射の影響は無視できる。

研磨やスペリスの設備の都合上、本実験の後方結合ファイバには偏波非保持 SM ファイバを PC 研磨して用いた。LD 単体特性を評価する場合には、LD チップ後方とセルフフォーカスとの間に不透明の紙を置いて測定を行った。

2.3 スペクトル線幅狭窄化における評価パラメータ

本方式では、多縦モード発振の状態を維持したままで、複数の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、複数のパラメータを評価する必要がある。今回は次の順序で最適条件を探した。

①狭窄化する条件を大雑把に探す

LD 出力を遅延自己ヘテロダイン法による線幅測定器に直接入力して評価した。各縦モードの状況は不明であるが、簡易かつ、素早く行える。下記の第 3 項と関連して、次の三つが重要な評価パラメータである。

- ①ピークパワー ②線幅 ③サイトモード抑圧比

但し、ここでいうサイトモード抑圧比は、一つの縦モード内における外部共振器モード間のパワー比である。①と②は四光波混合成分の発生のし易さと関係し、③は

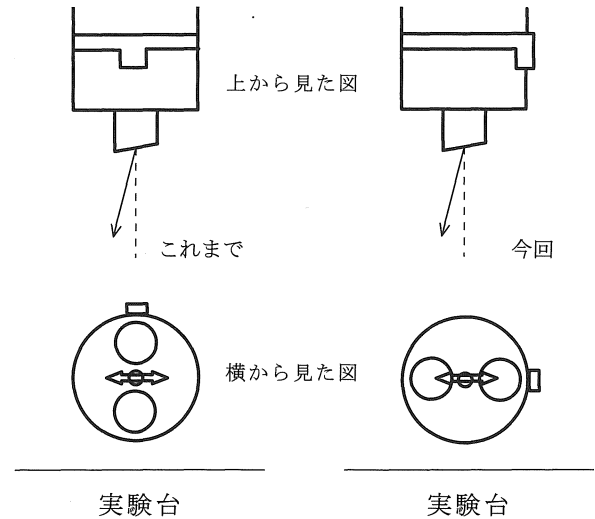


図 3 PANDA ファイバの斜め研磨方向

温度変化に対する設定条件の安定性に関係する。

種々の実験を行った結果、線幅は 10dB ダウン値で 10MHz 以下、サイトモード抑圧比は 15dB 以上、が目安であることが分かった。

②多縦モード発振の確認

上記第 1 項の狭窄化する条件下で、光スペアナを使用して確認する。

③縦モード毎のスペクトル線幅評価

波長可変 LD とのビーム信号を高速フォトダイオードで受光し、スペアナで観測した(図 5)。

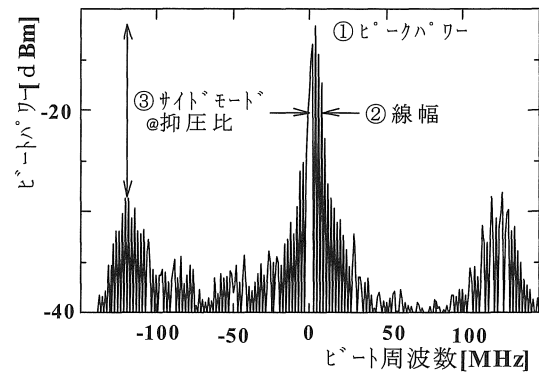


図 4 スペクトル狭窄化における評価パラメータ

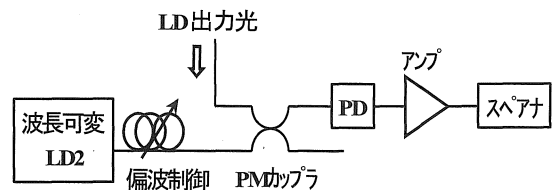


図 5 縦モード毎のスペクトル線幅評価

この測定系は、cw 光を注入した状態での四光混合成分を観測する場合にも使用できる。

3. 短尺ファイバのスペクトル線幅狭窄化

3.1 実験系

本方式では cw 注入光がある状態で F-P LD を使用するため、スペクトル線幅狭窄化の実験もその系で行う必要がある。しかし、上記で述べたように、前方結合系における微弱な反射が大きな影響を及ぼすので、確実に前方での反射を抑えた系で評価しておくことが重要である。

そこで今回は、図 6 の基準実験系でスペクトル線幅狭窄化の条件を調べ、その条件を図 7 の cw 光注入実験系に適用するという手順を踏んだ。

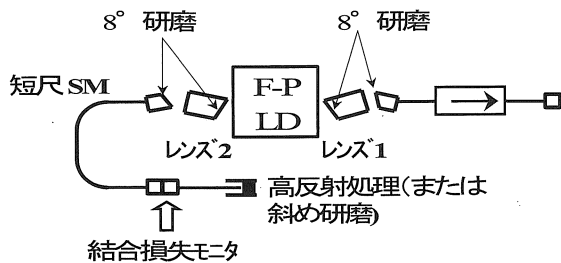


図 6 スペクトル線幅狭窄化の基準実験系

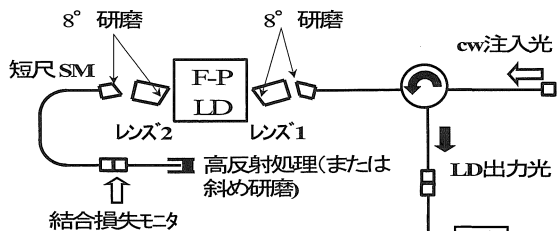


図 7 cw 光注入実験系でのスペクトル線幅狭窄化の評価

cw 光注入実験系で問題が生じたときは、基準系に戻して調べた。このようにすることによって、サキュレタの出力側にはアッテネータを入れなければならないことが分かった。

3.2 短尺ファイバの反射減衰量の効果

多縦モード発振を維持しながら狭スペクトル線幅とする手法として、1m 程度の短尺ファイバによるフル反射を利用できることを報告した⁸⁾。今回、第一に反射率を上げていったときの効果について実験検討を行った。

LD の後方に結合した短尺ファイバ (68cm) に、端面を高反射処理したファイバビッグテイルをコネクタ接続してスペクトル特性を観測するという手法で調べた。高反射処理のファイバビッグテイルは、FC コネクタ付きで長さ 10cm 前後の非定偏波 SM ファイバを用い、片端を垂直に切断してハダを塗り付けて製作した。条件を適当に変えることにより、反射減衰量を

2dB~3dB(波長 1530nm~1560nm)まで下げることができた。反射減衰量の値を変えて、三種類のビッグテイルを作成した。製作した高反射処理ファイバの反射減衰量の波長特性を図 8 に示す。

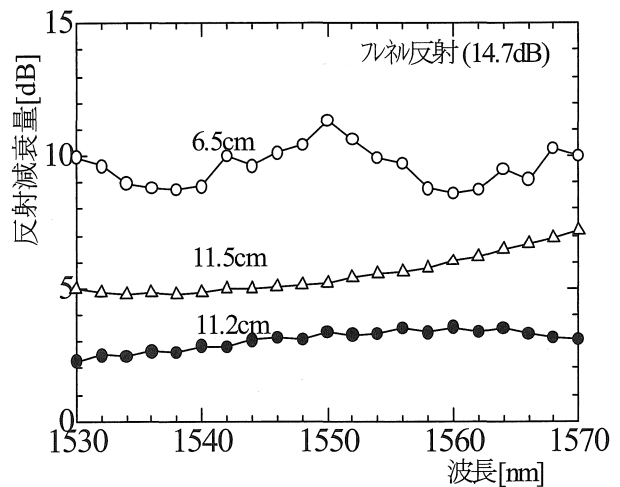


図 8 高反射処理ファイバの反射減衰量

1.55μm 帯の共振器長 300μm、端面処理 AR-CL の F-P LD(983)を用いて測定した例を図 9 に示す。

LD 出力を、そのまま遅延自己ヘテロダイン法による線幅測定器に導き、1th~7Ith の間でスペクトル線幅が狭窄化する電流値を調べた。

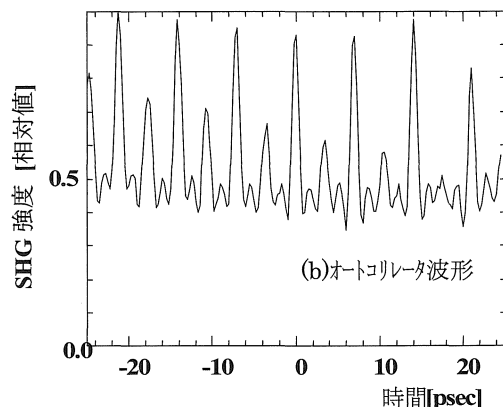
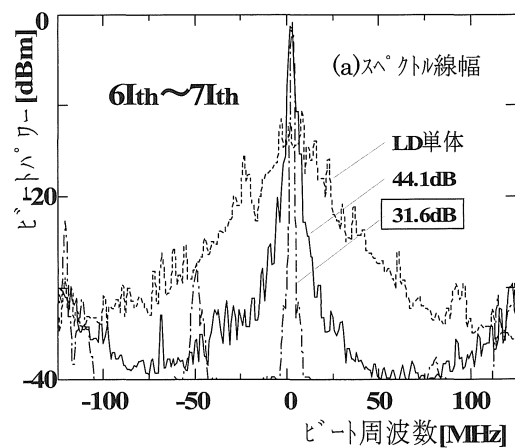


図 9 スペクトル線幅とオートコレラータ波形

同図(a)には、①LD 単体、②68cm 短尺ファイバ端を開放した時(反射減衰量 44.1dB)、③68cm 短尺ファイバに高反射処理ファイバを接続した時(同 31.6dB)の様子を示す。

電流値は 6Ith~7Ith である。実験した反射減衰量の範囲内(31.6dB~63.7dB)では、反射率が増すと共に、スペクトル線幅はより狭窄化していった。光スペアナでの観測により、多縦モード発振の状態が維持されていることを確認している。反射減衰量 31.6dB の場合についてオシロスコープ波形を観測した結果を図 9(b)に示す。縦モード周波数(~140GHz)に相当するビート信号が現れており、複数の縦モードのスペクトル線幅が狭窄化していることが分かる。

次に、LD と後方結合短尺ファイバとの距離を変えることにより、反射減衰量を 30dB~50dB の範囲で変化させてサイドモード抑圧比を測定した。結果を図 10 に示す。端面処理が AR-CL、CL-CL のいずれの LD においても、15dB 以上のサイドモード抑圧比となる反射減衰量の範囲は狭い。したがって、高反射処理ファイバを用いるのみでは、安定度が不足である。

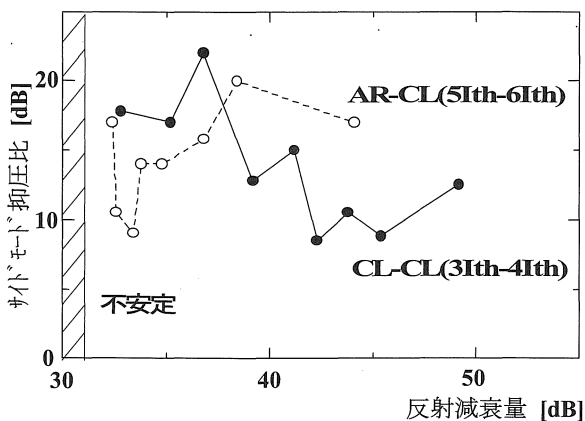


図 10 サイドモード抑圧比の反射減衰量依存性 (68cm SMファイバを使用)

3.3 短尺ファイバの外部共振器モード間隔の効果

前節の結果でサイドモード抑圧比が不足であることの原因は、外部共振器モード間隔が狭いためと考えた。

68cm 短尺 SM ファイバに高反射処理ファイバ(~10cm)を接続すると、外部共振器モード間隔は 130MHz 程度となる。

この外部共振器モード間隔を二倍以上にすることを目標として、両端 FC コネクタ付の短尺ファイバを製作した。その特性を表 2 に示す。

手持ちのファイバカッターとスプラインの構造寸法からは、最短で 16cm のものまで製作可能と見積もられたが、今回は余裕を見て 21cm までとした。この場合には、高反射処理ファイバを接続した時の外部共振器モード間隔は 300MHz 程度となる。

短尺化の効果を見るために、後方結合ファイバの長さを変

えて主縦モードのスペクトルを測定した結果を図 11 に示す。

図中に示した数値は、高反射処理ファイバを含めた全ファイバ長である。反射減衰量は 31dB~32dB とした。

ファイバ長を短くしていくと、サイドモードスペクトルの包絡線の形状は同じままで、共振器モード間隔が広がっていくため、サイドモード抑圧比が良くなることが分かる。

以後の実験は、長さ 21cm の短尺ファイバを用いて行うことにした。

表 2 短尺ファイバの製作と特性

番号	長さ	条件	@1536.87nm		1550.64nm	
			損失 (dB)	反射減衰量 (dB)	損失 (dB)	反射減衰量 (dB)
I	24cm	スプライス後	1.03	16.9	1	16.9
		斜め研磨後	1.16	16.9	1.04	16.9
II	21cm	斜め研磨後	0.97	-	1	-
		スプライス後	0.1	15.6	0.1	15.9
			0.66	15.9	0.48	16.1
斜め研磨後	0.20	-	0.25	-		

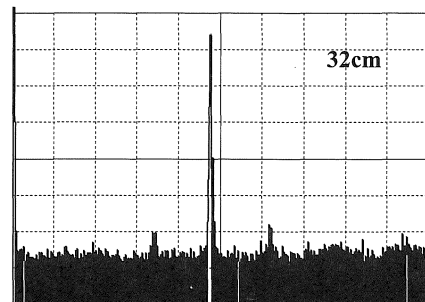
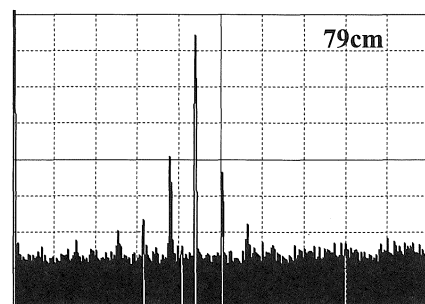
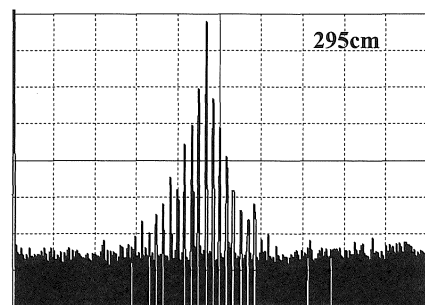


図 11 ファイバ長とサイドモード抑圧比 (V:5dB/div, H:200MHz/div)

4. cw 光注入時の動作特性

4.1 cw 注入光源の所要特性

非線形効果を有効に起こすためには狭いスペクトル線幅が要求される。本実験で用いた二台の波長可変 LD 光源 (TLD)の単体でのスペクトル線幅を、遅延自己ヘテロダイン法による線幅測定器で測定した結果を図 12 に示す。線幅の狭い TLD#1 を cw 注入光源、TLD#2 を縦モード毎のスペクトル観測用 (図 7 参照)として用いることにした。周波数安定度を分解能 100MHz の波長計で評価したところ、いずれの TLD も、1 時間での変動幅は 100MHz 以下であった。

cw 注入光を EDFA で増幅して用いる場合には、自然放出光雑音による SNR 劣化に注意する必要がある。実験した結果では、前方励起とすることにより、後方励起や両方向励起と比べて、出力パワーは下がるが、7dB~10dB の SNR 改善が図れた。

表 3 に実験結果をまとめた。後の実験では、TLD の出力レベルをできるだけ上げ、EDFA を前方励起で使用することにした。

表 3 cw 注入光の信号対雑音レベルの改善手段

項目	内容	SNR改善量	備考
1	波長可変の出力パワーを上げる	~5dB	出力パワーに比例
2	EDFA 励起方法	両方向励起→後方励起のみ	変化無し
	両方向励起→前方励起のみ	7dB~10dB	
合計		12dB~15dB	

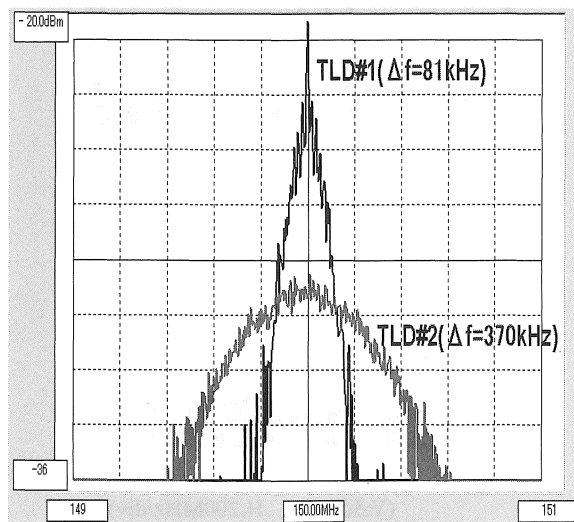


図 12 波長可変光源の線幅 (V:2dB/div,H:200kHz/div)

4.2 実験系

F-P LD のスペクトル線幅狭窄化措置、cw 光注入系、および各種測定系を含めた全体を図 13 に示す。同時に二項目以上の測定が行えるように、偏波保持ファイバカップラで信号を分岐している。

F-P LD チップはヘリウムチャンセルで $20 \pm 0.01^\circ\text{C}$ に温度制御すると共に、エアコン等の風が直接当たらないように、ヘリウムチャンセルや結合光学系と一緒にフードを被せた状態で使用した。

また、今回の実験は端面処理が AR-CL の LD チップを用いて行った。

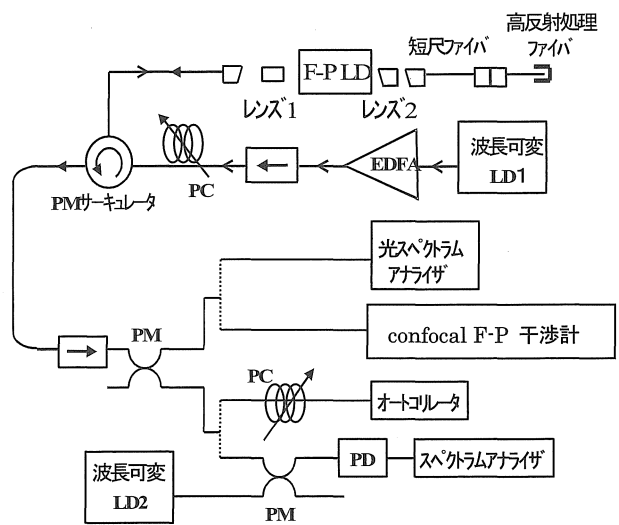


図 13 実験系

4.3 四光波混合成分と相互注入同期の観測

まず、cw 注入光無し状態で、confocal Fabry-Perot 干渉計 (フリースペクトルレンジ FSR=2GHz) 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。閾値電流を I_{th} として、 $2I_{th}$ くらいからスペクトル線幅が狭窄化する電流はいくつも見つかったが、エアコンなどによる温度変化の影響を受けにくいのは $7I_{th}$ 以上であった。

例として図 14 に $8.0I_{th}$ での様子を示す。LD の後方には 21cm 短尺ファイバを結合し、更に高反射処理ファイバを接続して反射減衰量を 38dB とした。

(a)光スペアナと(b)confocal Fabry-Perot 干渉計のデータからは、ほぼ同じパワの 7 本の縦モードが発振していることが分かる。また、(c)オートコレクタ波形には、縦モード間隔に対応した 7psec 周期の波形が現れている。

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を図 15 に示す。

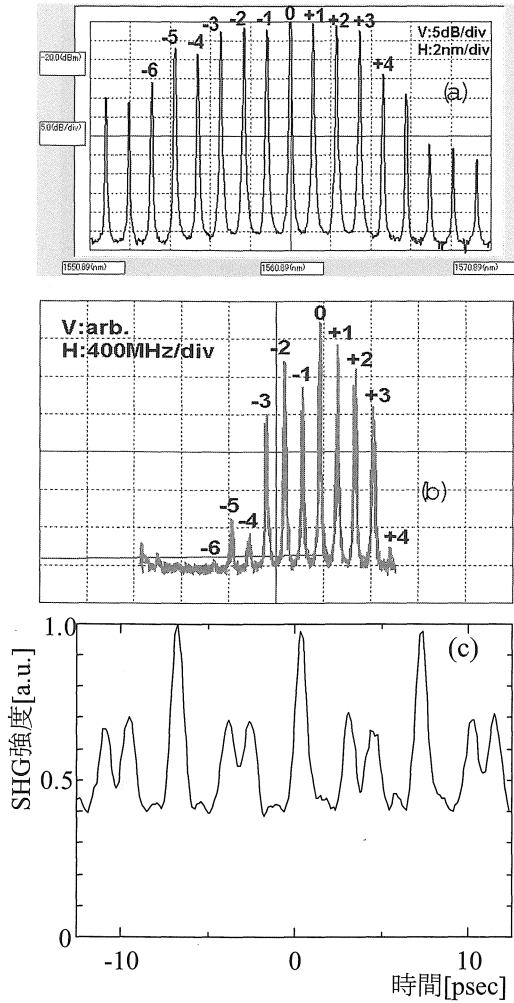


図 14 cw 注入光無しでのスペクトルとオートコリレータ波形

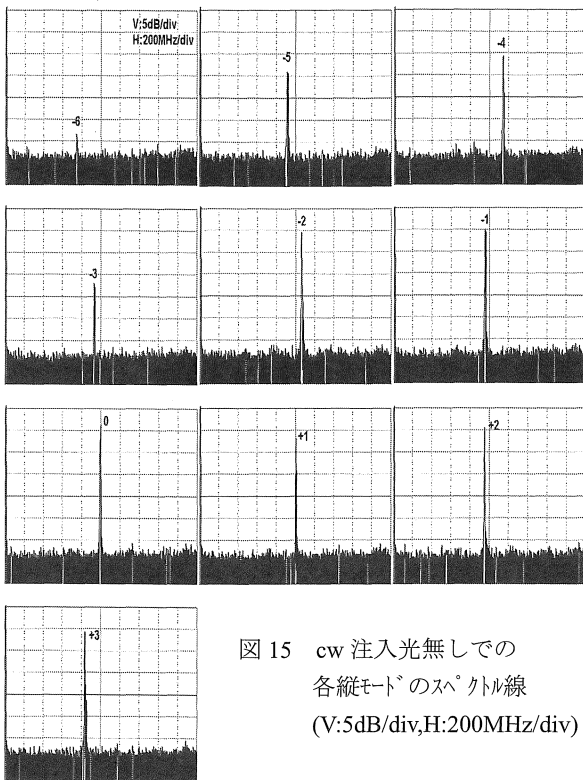


図 15 cw 注入光無しでの各縦モードのスペクトル線 (V:5dB/div, H:200MHz/div)

モード同期に関係するであろう全ての縦モード成分について、サイドモード抑圧比は 20dB 以上とれていることが分かる。スペクトル線幅の値は数 MHz 以下と見積もられた。F-P LD のみならず、TLD の周波数揺らぎもあるので、スペクトル幅を拡大しても、数 MHz 以下の様子は読み取れない。遅延自己ヘテロダイン法による線幅測定器に直接入力したところでは、500kHz 程度のスペクトル線幅であった

次に 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 13 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 0 モード周波数 f_0 と +1 モード周波数 f_{+1} の真ん中あたりに設定し、0 モード近辺に現れるはずの、cw 光を励起光、+1 モード光を信号光とした四光波混合成分 (FWM 成分) を観測した。その様子を図 16 に示す。

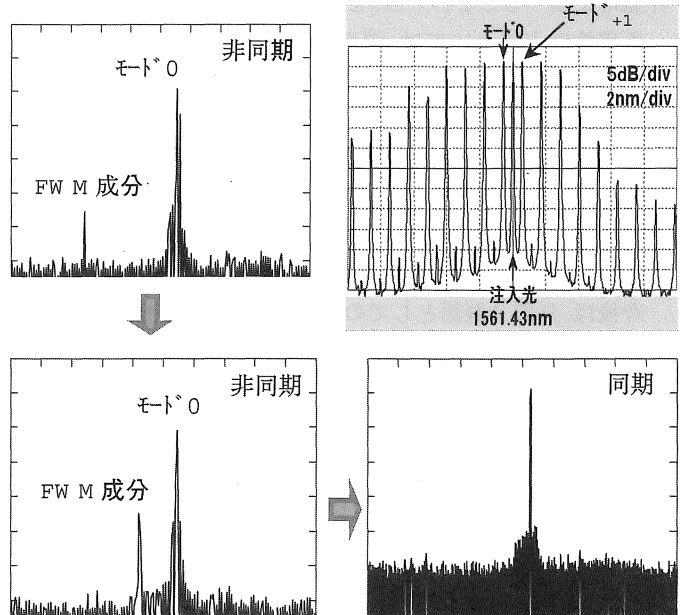


図 16 四光波混合成分の変化と相互注入同期の模様 (V : 5dB / div、H : 50 MHz / div)

cw 注入光の周波数が $(f_0+f_{+1})/2$ に近づくにつれて、FWM 成分のパワーが大きくなると共に、0 モード周波数 f_0 へと近づいていく。

FWM 成分と 0 モード周波数との差が数 10MHz になると、FWM 成分の強度は 0 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。この模様は、レーザー一般の注入同期過程と同じである¹¹⁾。

cw 注入光の周波数調整は、光スペクトルを見ながら粗く設定し、次に confocal Fabry-Perot 干渉計を見ながら細かく調整した。図 17 に同期時、図 18 に非同期時の、(a) 光スペクトル、(b) confocal Fabry-Perot 干渉計、(c) 0 モードのスペクトル、を対比して示す。同期時の confocal Fabry-Perot 干渉計の測定

データでは、cw 注入光は 0 モードと +1 モードの真ん中にあることが分かる。

LD の後方に結合するファイバの長さが 68cm の場合には、高反射処理ファイバを接続しても FWM 成分を観測することはできなかった。サイドモード抑圧比が下がるために、モード競合が生じて、等価的なスペクトル線幅が広がってしまうためと考えている。LD の後方に結合するファイバの長さを 21cm とし、高反射処理ファイバを接続することによって、ようやく FWM 成分を観測することができた。

4.3.1 まとめと今後の課題

cw 光注入による Fabry-Perot LD の全光制御モード同期法について、用いる F-P LD の個体差によらず常に原理通りに動作するという、再現性向上のための施策を詳細に実験検討すること、およびその上で全光制御モード同期の動作機構を調べることを、の二点を中心にして検討を進めた。

再現性向上については、端面を高反射処理した長さ数 10cm の短尺ファイバを外部共振器として用いる手法が有効であることが分かった。これにより、多縦モード発振を保ったままで、各縦モードのスペクトル線幅 1MHz 以下、サイドモード抑圧比 20dB とすることができた。また、cw 光注入時の四光波混合成分の発生状況を観測できるようになり、主縦モード間の相互注入同期の様子を観測することができた。

今後は、外部共振器としての短尺ファイバの最適化を図ると共に、全光制御モード同期の動作機構解明を進めたい。

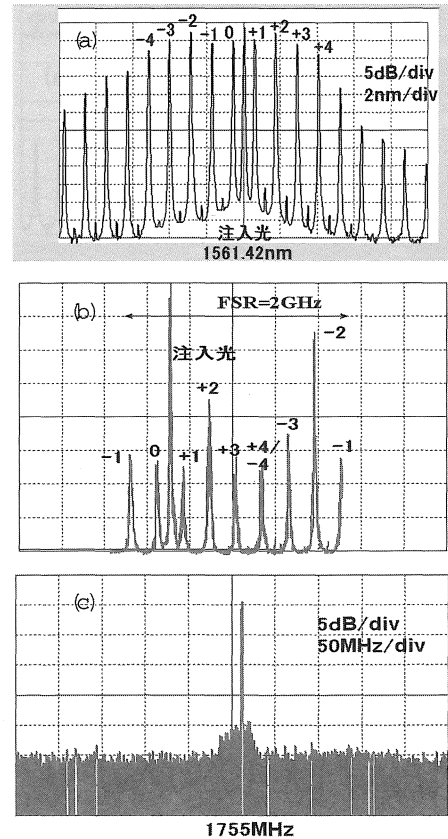


図 17 相互注入同期時のスペクトル

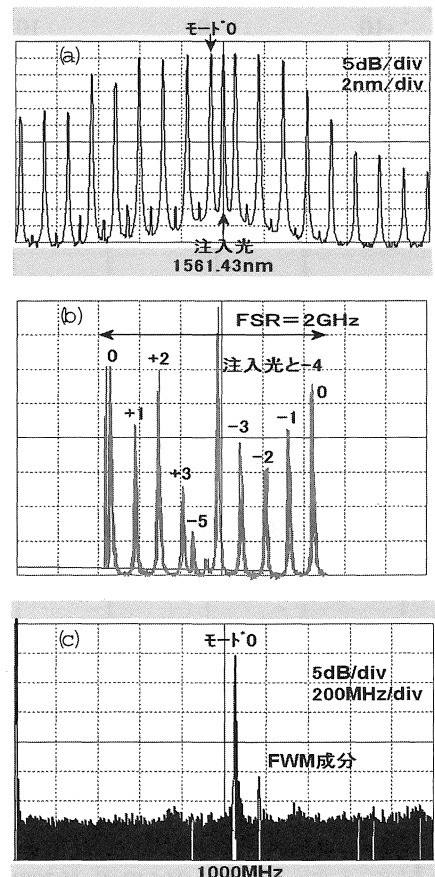


図 18 相互注入同期していない時のスペクトル

5. 参考文献

- [1]張吉夫他,「モード同期技術の進展」解説小特集号,レーザー研究,Vol.27,No.11,pp.734-767(1999).
- [2]S.Arahira, S.Oshiba, Y.Matsui, T.Kunii, and Y.Ogawa," 500 GHz Optical Short Pulse Generation from a Monolithic Passively Mode-Locked Distributed Bragg Reflector Laser Diode",*Appl.Phys.Lett.*,Vol.64,pp.1917-1919(1994).
- [3]J.F.Martins-Filho and C.N.Ironside,"Multiple Colliding Pulse Mode-Locked Operation of a Semiconductor Laser",*Appl.Phys.Lett.*,Vol.65,pp.1894-1896(1994).
- [4]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,No.2,pp.13-15(1999).
- [5]H.Kasuya, M.Mori, R.Goto, S.Suzuki, T.Goto, and K.Yamane, "All optical mode-locking of Fabry-Perot Laser Diode by injecting cw light at the center of two longitudinal modes",*Forth Optoelectronics and Communications Conference OECC'99*,pp.1329-1331(1999).
- [6]鈴木基仁, 水池秀仁, 森正和, 後藤俊夫, 後藤了祐, 山根一雄, "Fabry-Perot LD を用いた全光制御モード同期の発振特性とその応用",愛知工業大学研究報告,Vol.36-B,pp.209-216(2001).
- [7]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,Vol.37-B,pp.179-189(2002).
- [8]森正和, 濱田正敏, 松永雅規, 西澤典彦, 後藤俊夫, 後藤了祐, 丸橋大介,"cw 光注入における Fabry-Perot LD の全光制御モード同期における偏波特性とスペクトル線幅の狭窄化",愛知工業大学研究報告,Vol.39-B,pp.107-113(2004).
- [9]伊賀健一編著,応用物理学会編,「半導体レーザーの基礎」p.42,オーム社(1987).
- [10]R.W.Tkach and A.R.Chraplyvy,"Regimes of Feedback Effects in 1.5 μ m DFB Lasers",*J.Lightwave Technol.*,Vol.LT-4, pp.1655-1661(1986).
- [11]A.E.Siegman,"Lasers",pp.1130-1138,University Science Books(1986).

(受理 平成17年3月17日)