

cw 光注入による 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

Polarization Characteristics and Spectral Linewidth Reduction in All-Optical Mode Locking of Fabry-Perot Laser Diodes by cw Light Injection

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‡††
Masakazu MORI, Masatoshi HAMADA, Masanori MATSUNAGA, Norihiko NISHIZAWA, Toshio GOTO,
Ryosuke GOTO, and Daisuke MARUHASHI

Abstract: The polarization characteristics of four-wave mixing components generated by cw light injection in Fabry-Perot laser diodes were experimentally investigated. Only TE components were detected irrespective of the polarization of the injected cw light. Also, in order to apply the all-optical mode locking technique to a wide variety of laser diodes, methods to reduce the spectral linewidths of Fabry-Perot laser diodes were investigated. A simple method, which utilizes the reflection at the end of optical fibers coupled to LD rear facets, proved to be useful in spectral linewidth reductions.

1. はじめに

注入同期技術は、光源スペクトルの制御法として広く用いられている手法である。表 1 に示すように、注入同期は大きく分けると、一方向注入同期と、相互注入同期の二つに分かれる。

注入同期といわれる手法の多くは一方向注入同期であり、master から slave に光が注入される形態である。主として、単一モード化や線幅狭窄化のための手段として利用される。

これに対して、相互注入同期では、master と slave の区別が無く、お互いが引き込み合うという形態をとる。異なる光源の間で相互注入同期する場合や、ひとつの光源内の異なった縦モードの間で相互注入同期する場合がある。発振周波数が異なった状態で起きる相互注入同期現象は、一方向注入同期には無い特徴を持つ。我々は、波長多重通信(WDM)システムにおける波長安定化や、全光制御モード同期法^{1),2)}、高繰り返しモード同期パルス³⁾の分周や通信といった応用を検討してきている。

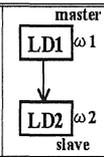
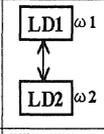
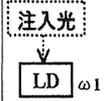
全光制御モード同期法は、高周波電気信号を使わずに、光信号のみで Fabry-Perot 型半導体レーザ (F-P LD) をモード同期させる手法であり、原理的に 100GHz 以上の高繰り返し光パルス列の発生が可能である。我々は、全光制御モード同期法に関する検討を続けてきているが、今回は、偏波特性、および再現性に関する検討を行った。ここでいう再現性向上とは、用いる

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。全光制御モード同期法を応用する上でも、また、動作機構の違い³⁾を解明する上でも重要な点である。そこで、種々の観点から検討してきている^{2),4),5)}。

偏波による特性変化については、注入 cw 光と、発生する四光波混合成分の両方の偏波に着目して検討した。偏波特性を通常の一方向性注入同期と同様に考えるのが普通であるが、まずは実験によって確かめてみるべきである。今回は、注入 cw 光の偏波方向を調節すると同時に、発生する四光波混合光の偏波を分離観測できるようにして実験を行った。

一方、再現性向上については、これまでに種々の実験を繰り返した結果、F-P LD のスペクトル線幅のパラメータの影響が最も大きいという結論となった。既に、この対策の一つとして、結合用ファイバのフレズネ反射と Fabry-Perot 型 LD の縦モード周

表 1 注入同期の形態

分類	形態	同期時	応用例
一方向注入同期	異なるLD間 	$\omega_1 = \omega_2$	単一モード化 線幅狭窄化
	異なるLD間 		線幅狭窄化 波長安定化
相互注入同期	同一LD内の縦モード間 	$\omega_1 \neq \omega_2$	WDM波長安定化
			全光制御モード同期 分周、通信

† 愛知工業大学 工学部 情報通信工学科(豊田市)
‡ 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)

波数間隔とを整数比にするという手法を提案し、その効果を確認している⁹⁾。しかし、この手法はポリマシブの研磨に時間がかかることや、光軸合わせがむずかしいなどの問題があった。そこで、今回は、より簡便に LD のスペクトル線幅を狭帯化できる手法を検討した。

2. cw 注入光の偏波による特性の変化

図 1 に実験系を示す。注入 cw 光の偏波方向を調整できるようにするため、回転ファイバコイル型の偏波制御器 PC1 と偏波非保持のサキュレータを用いた。結合用 PANDA ファイバの途中にコネクタ接続点①を設け、ここでコネクタを外して、偏波方向を TE 方向、或いは TM 方向に調節して、その後コネクタを接続した。偏波状態のモニタは、コネクタ付き U プラケットの内部で検光子を回転させて、出力光パワーを測定することにより行った。U プラケットの出力部には 50/125 マルチモードファイバを用いて挿入損失を小さくした。このモニタ系では、入力側、出力側のコネクタが平坦研磨でも、斜め研磨でも挿入損失はほとんど変化しなかった。また、このモニタ系により偏波消光比 34dB までのモニタが可能であった。

cw 注入光の偏波方向を調節しても、①でコネクタ接続する時に、コネクタのガタによってずれてしまう可能性がある。これにより、例えば、TM 偏光で、大パワーを F-P LD の縦モード周波数に合わせて注入するような場合には、不要な TE 偏光成分によって注入同期してしまうことがあり得る。従って、コネクタ接続後も偏光状態をモニタできるように、F-P LD の後方出力を PANDA ファイバに結合させ、その偏波成分を定偏波アイソレータでモニタできるようにした。F-P LD の縦モード強度が最小(或いは最大)になるように定偏波アイソレータの方向を調節すれば、cw 注入光の TM(或いは TE)成分の強度が分かる。

cw 光の偏波方向調整と同様な手法を用いて、F-P LD の出力光の偏波成分を測定した。偏波非保持サキュレータを通過した F-P LD 出力光をコネクタ接続点②でモニタしながら、回転ファイバコイル型の偏波制御器 PC2 で直線偏波に変換する。これを偏波依存アイソレータに通して観測することにより、TE 成分と TM 成分を分離して観測した。

F-P LD には、1.55 μm 帯、共振器長 300 μm、端面処理が AR コート劈開のものを用い、閾値電流の 2 倍の直流パルス電流で使用した。

コネクタ接続点①で評価した cw 注入光の偏波消光比は 30dB 以上であった。一方、F-P LD の出力光の偏波成分を観測する系自体の偏波消光比は、コネクタ接続点②で評価して 16dB と、多少低い値であった。この理由は、回転ファイバコイル型の偏波制御器 PC2 の特性が波長に依存性するためである。

cw 注入光を TM 方向とし、その周波数を縦モードのほぼ中心から長波長側の縦モード周波数に近

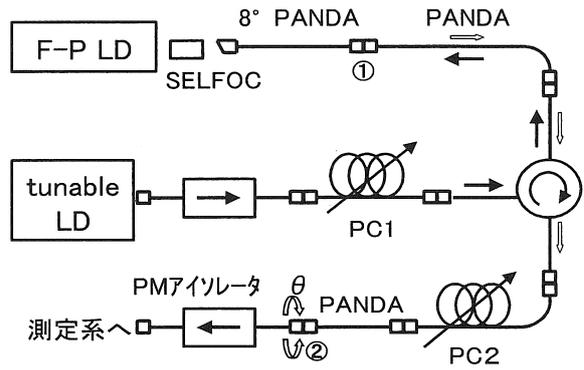


図 1 偏波特性の実験系

づけていったときの様子を図 2 に示す。このデータは、光サキュレータ出力を直接に光パワーで観測したものであり、全ての偏波成分を含んでいる。cw 注入光の周波数が縦モード周波数に近づくにつれて、四光波混合成分が強く現れるようになっていく。これは、①Fabry-Perot 共振器による強調効果、および②ビート周波数が小さくなることによって非線形効果そのものが大きくなるためである。

cw 注入光を TE 方向、或いは TM 方向として出力光の偏波成分を観測した結果を図 3 に示す。実験においては、四光波混合成分が強く出るように、cw 注入光の波長を主縦モードの中心から長波長側にずらして観測した。TM 注入では四光波混合光の生成効率が低いいため、cw 光の波長を TE 注入の場合よりも縦モードに近づけねばならなかった。同図(a)は TE 注入の場合、同図(b)は TM 注入の場合について、それぞれ F-P LD の出力スペクトルを示す。TE 注入、TM 注入の何れにおいても、四光波混合成分(図中の↓)は、測定系の感度内で TE 成分のみであることが分かる。すなわち、F-P LD に cw 光を注入して発生する

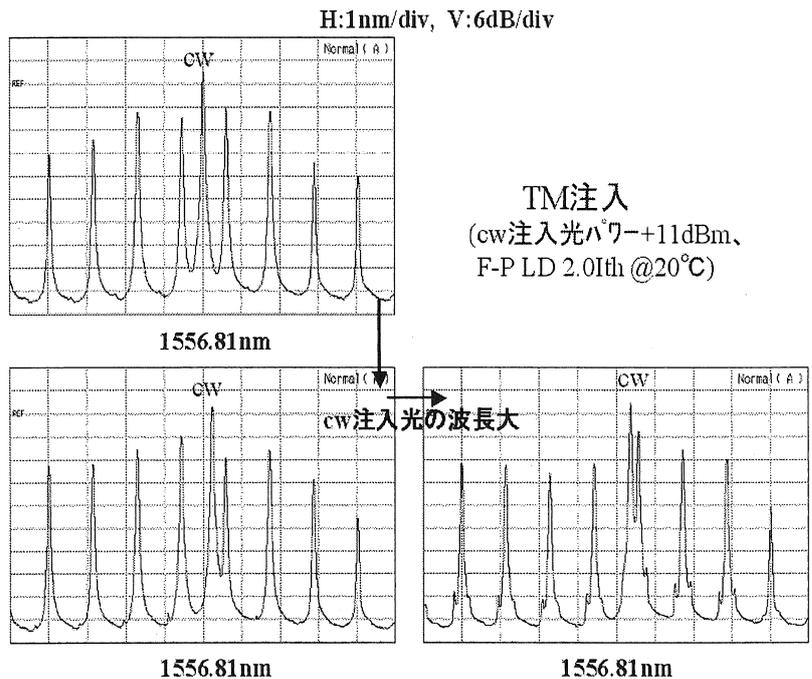


図 2 TM cw注入光でのスペクトル

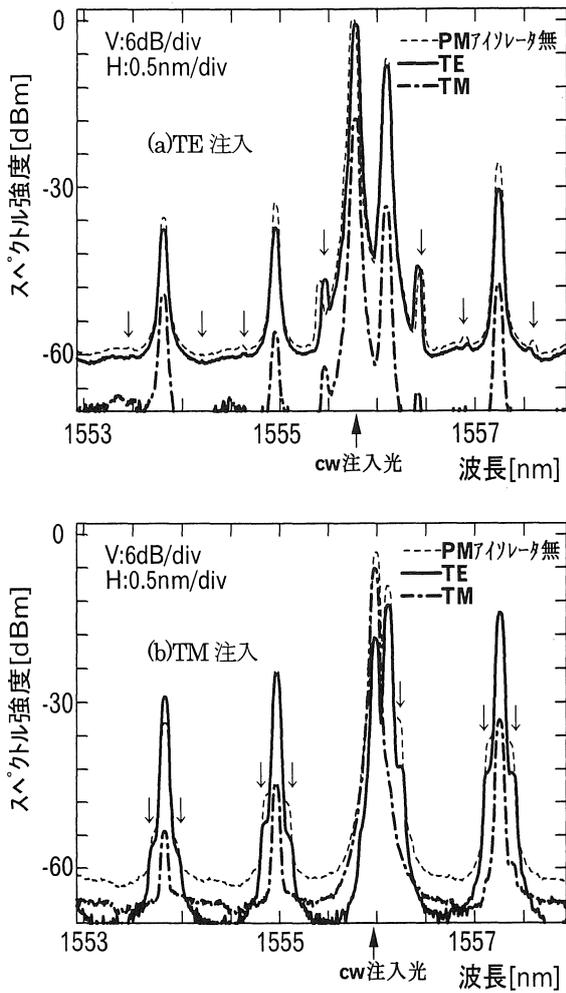


図3 スペクトルの偏光成分

四光波混合光は、cw 光の偏光方向によらず、TE 成分のみであった。

3. LD のスペクトル線幅狭窄化

現状の全光制御モード同期法には、用いる LD 毎に動作特性が大きく変化してしまうという問題がある。結合用セルフォックレンズを外部共振器として利用することにより、ある程度の LD 特

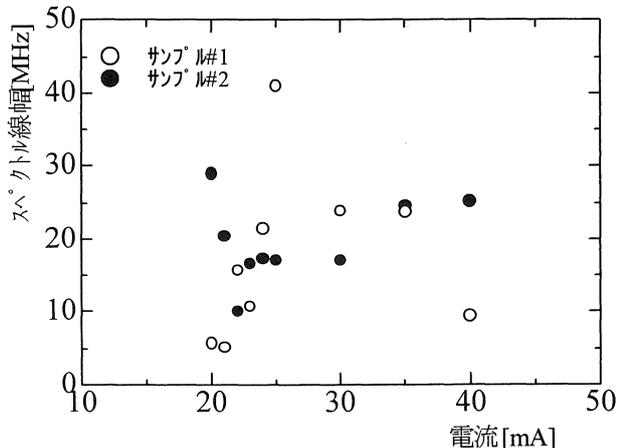


図5 スペクトル線幅の電流依存性

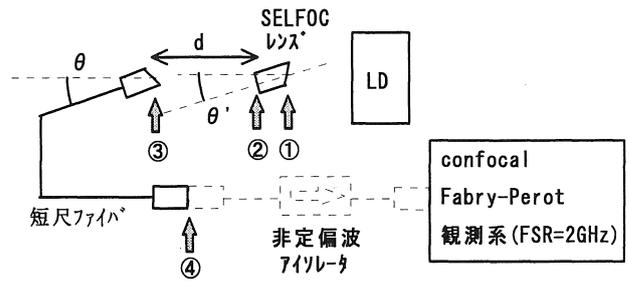


図4 LD との結合光学系

性は、個々の個体差を吸収できるが、完全ではない。そこで、いくつかの発振スペクトル線幅狭窄化の手法を検討した。

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されている。注意すべき点は、我々の現在の目的にとっては、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ことが要求されるということである。

一般には、結合光学系における不要な反射があると、発振スペクトル線幅は広がる。そこで、まずは、それらの不要な反射を抑圧することが不可欠である。これについては、種々の条件下で発振スペクトルの形状やスペクトル線幅を調べながら検討した。その結果、次の反射抑圧法を施すべきであることが分かった(図4)。

(1)結合用セルフォックレンズの LD 側端面①は斜め研磨($\sim 8^\circ$)、反対側端面②は AR コート。

(2)結合用短尺ファイバの LD 側端面③は斜め研磨($\sim 8^\circ$)、反対側端面④は反射減衰量が 64dB 以上となるような処理が必要。

セルフォックレンズと短尺ファイバの両方を斜め研磨とするため、結合損失は通常よりも約 1.5dB 増加した。今回の実験では、前方 ~ 6.5 dB、後方 ~ 14.0 dB であった。

スペクトル線幅の代表例として、 $1.55 \mu\text{m}$ 帯の F-PLD チップ (共振器長 $300 \mu\text{m}$ 、端面処理 CL-CL)、および New Focus 製 Tunable LD のデータを図5と図6示す。スペクトル線幅の測定は、ファイバ出力を分解能 20kHz の遅延自己ヘテロダイン法による線幅測定器に

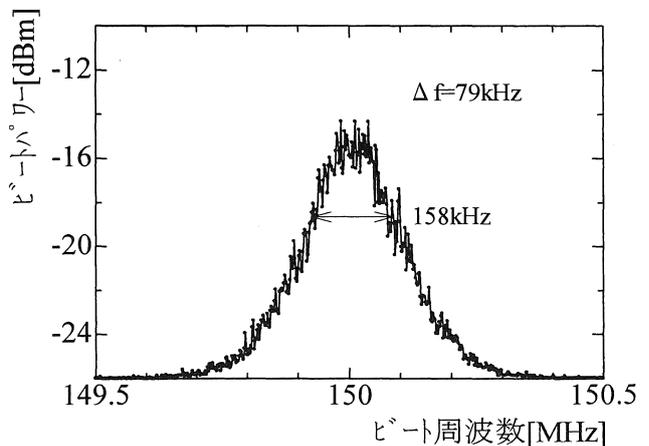


図6 Tunable LD のスペクトル線幅

そのまま導いて行った。F-P LD は一般には多縦モードで発振しているため、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。

このデータのように、1.55 μm 帯の F-P LD チップは、単体では数 10MHz 程度のスペクトル線幅であり、そのままでは全光制御モード同期法に必要な相互注入同期が起きにくいことが分かる。また、注入光源に使用する Tunable LD のスペクトル線幅も重要なパラメータである。設定波長によってスペクトル線幅が広がる Tunable LD もあるので、使用前に確認しておく必要がある。

3・1 FSR 可変のスペクトル線幅狭窄化法

スペクトル線幅を狭窄化する手法の一つとして、既にセワックレンズを外部共振器として用いる手法を提案し、その有効性を確認している⁹⁾。しかし、実際問題としては、個々の F-P LD によって縦モード周波数間隔は異なるから、セワックレンズのフリー空間共振長 (FSR) が LD の縦モード周波数間隔と整数比になるように、研磨と FSR 測定とを繰り返さねばならない。また、狭窄化が起きる駆動電流の大きさは、周囲温度や cw 注入光パワーによって変化するため、実験条件を大きく変えねばならない場合には、この手法では融通性が無い。そこで、FSR が可変なスペクトル線幅狭窄化法を検討した。

まず、図 7 に示すように、FSR が可変な flat F-P 干渉計を持った σ 型共振器を考えた。多縦モードで発振するスペクトル線幅狭窄化を実現するためには、次の条件が成り立てばよい。

- (1) F-P LD の縦モード周波数間隔 Δf_{LD} は、σ 型共振器の共振周波数間隔 Δf_{σ} の整数倍であること。
- (2) flat F-P 干渉計は、通過スペクトル線幅 = FSR / フィネス $\leq \Delta f_{\sigma}$ の関係を満たすこと。

共振器長 300 μm の F-P LD を用いて実験を行ったところでは、 $\Delta f_{LD} \sim 140\text{GHz}$ 、 $\Delta f_{\sigma} = 10\text{MHz}$ 、FSR の最小値 = 1.04GHz、フィネス = 23 であった。通過スペクトル線幅 = FSR / フィネス = 45MHz > $\Delta f_{\sigma} = 10\text{MHz}$ となり、(2) が満たされていない。そのため、図 8 に示したように、一縦モード内に Δf_{σ} (約 10MHz) 間隔で複数本のサブモードが発生するという結果になった。

ファイバ長を切り詰めれば、 $\Delta f_{\sigma} = 20\text{MHz}$ までは実現可能と見積もられたが、それでも (2) は満たされない。この問題を解決するには、σ 型共振器の共振周波数間隔 Δf_{σ} を現状の 4 倍以上に大きくすること、すなわち、σ 型共振器の共振器長を現状の 1/4 以下にすることが必要である。このためには、FSR が可変なファイバ型 F-P 干渉計など、特別なデバイスが必要となる。

3・2 後方結合ファイバの反射を利用する方法

次に、LD の後方に結合した短尺ファイバのフル反射 (図 4 の④) を利用する手法を検討した。この手法の利点は、簡便であること、反射減衰量をモタできること、および LD との距離 d を調節することによって共振周波数を微調整できるという点である。後方の結合損失 ~ 14dB であるため、この手法での反射減衰量の最小値は、 $2 \times (\text{後方の結合損失}) + \text{フル反射損失} = 2 \times$

14dB + 15dB = 43dB となる。

実験には共振器長が 300 μm の F-P LD を用いた。端面処理はへき開へき開 (CL-CL)、および AR コートへき開 (AR-CL) の二種類である。二種類の F-P LD の間で、狭窄化の定性的な傾向に差は見られなかった。

図 9(a) は LD (CL-CL) の後方に結合した 1.1m 短尺定偏波 (PM) ファイバのフル反射によるスペクトル線幅の変化を示したものである。LD と短尺ファイバとの結合損失を変えることにより、反射減衰量を変化させながらスペクトル線幅を観測した。LD には閾値電流の二倍の直流電流を流している。

LD 単体では 10MHz 程度のスペクトル線幅になっている。反射

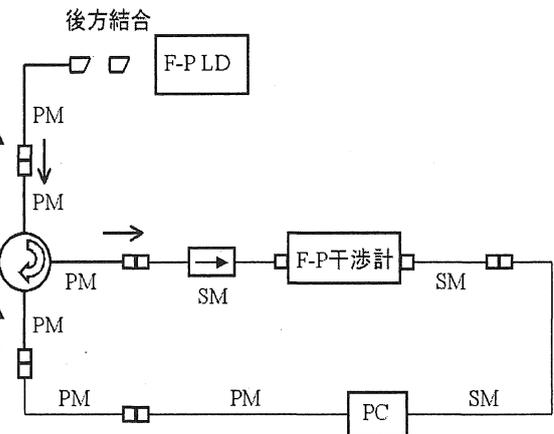


図 7 σ 型共振器

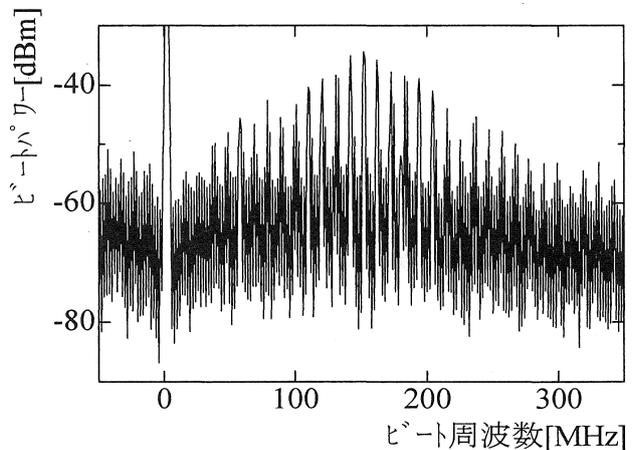


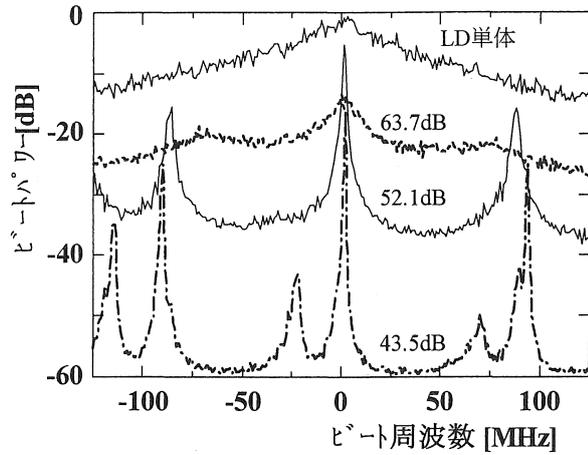
図 8 σ 型共振器でのスペクトル

減衰量 64 dB 付近からスペクトル線幅に影響が出始め、反射減衰量 52dB 以下ではスペクトル線幅の著しい狭窄化が見られるようになっていく。反射減衰量 43.5dB では約 100kHz まで狭窄化した。尚、反射減衰量 43.5dB において、メインピークから約 25MHz だけ低周波側にあるサブピークは、電気信号の周波数 0MHz で折り返された成分であり、本質的なスペクトル成分ではない。

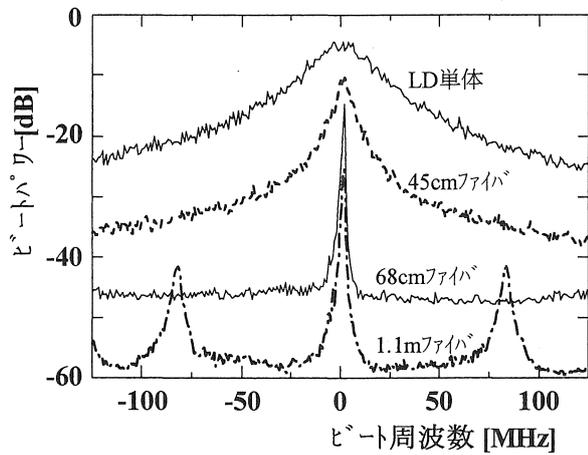
回折格子分光器で主縦モード、および二本の副モードを個別に取り出してスペクトル線幅を観測し、それら全てにおいて狭窄化が起きていることを確認した。

この例では、LD 単体のスペクトル線幅が広いため、そのままでは全光制御モード同期は全くかからない。しかし、短尺ファイバ

で反射を返すことによりスペクトル線幅が狭窄化し、適当な条件下では全光制御モード同期がかかるようになることを期待できる。



(a) 1.1m PMファイバでのスペクトル線幅



(b) 反射減衰量 43dB でのスペクトル線幅

図9 後方結合ファイバによる反射を利用したときのスペクトル線幅

実験では、ファイバ端に反射ミラーを取り付けて、より反射を返すようにすると、更にスペクトル線幅が狭窄化していった。この点は、DFB LD などの単一縦モード発振 LD と対照的である。後者では、スペクトル線幅が狭窄化する反射減衰量の範囲は、数 dB の狭い領域に限定されている⁹⁾⁷⁾。

図 9(a)の各状態での出力光スペクトルを confocal F-P 干渉計 (FSR=2GHz, フィネス=100)で測定した結果を図 10 に示す。confocal F-P 干渉計による観測では、反射減衰量 52.1dB の場合と 43.5dB の場合とでは、スペクトル幅に殆ど差が現れない。

図 9(b)は、LD (AR-CL)の後方に結合した短尺ファイバの長さを変えてスペクトル線幅の変化を測定した結果を示したものである。反射減衰量は全ての場合について約 43dB である。LD には閾値電流の七倍の直流電流を流している。

長さ 68cm、および 1.1m のファイバでは 100kHz 程度まで狭窄化されていることが分かる。長さ 1.1m のファイバでは、共振周波数間隔が 100MHz 程度となるため、それらの間でのモード競合が生じて不安定となる可能性がある。すなわち、ファイバ長としてはなるべく短い方が安定となる。今回は、以後の実験は 68cm ファイバを用いて行った。

LD (AR-CL)の後方に結合した 68cm ファイバのフル反射がある状態で、LD の駆動電流を変化させながらスペクトル線幅が狭窄化するところを探した。図 11 は閾値電流の 6.1 倍の様子を示したものである。線幅測定器の出力のみで考えると、スペクトル線幅は 100kHz 程度までに狭窄化されているように見える。しかし、このときの光出力をオシロスコープで観測しても、同図右上に示したように、縦モード間のビート信号は観測されなかった。このことは、複数の縦モードのスペクトル線幅が狭窄化された状態ではないということを意味する。

そこで、更に電流を流して、スペクトル線幅が狭窄化するところを探した。図 12 は、閾値電流の 6.4 倍の電流を流したときの様子を示したものである。スペクトル線幅は図 11 の状態から極

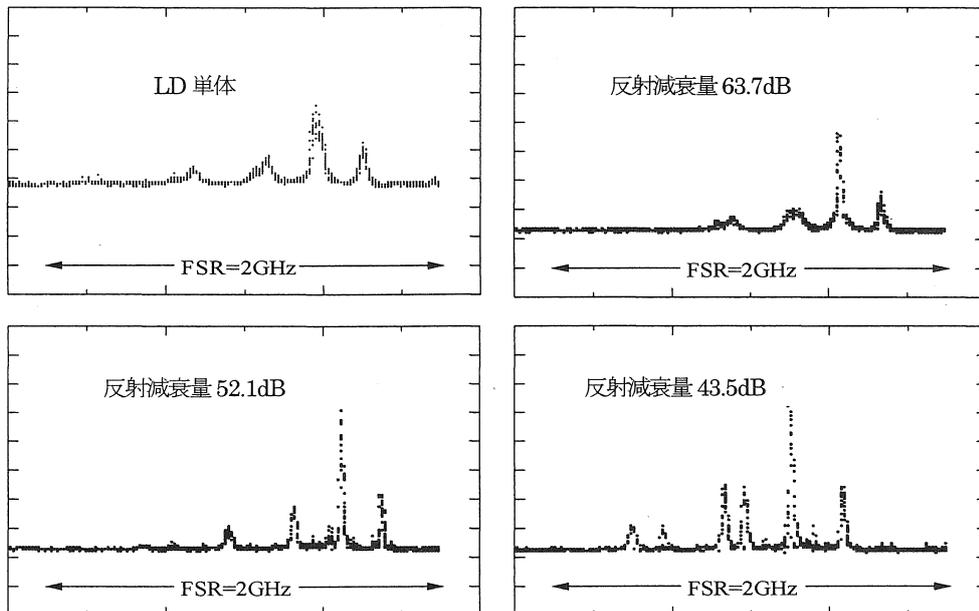


図 10 1.1m PMファイバでのスペクトル(confocal F-P 干渉計)

端に狭くなっているわけではないが、オシロスコープで観測した光出力には、140GHz の縦モード間のビート信号成分を見ることが出来る。また光スペクトルは同図右下のようになっているので、多縦モード発振で、なおかつスペクトル線幅が狭い状態、すなわち、全光制御モード同期法で必要とされる状態を実現できていることが分かる。

このほかにも、電流を調節したり、ファイバ端にミラーを取り付けて、フル反射よりも大きな反射を返す実験を

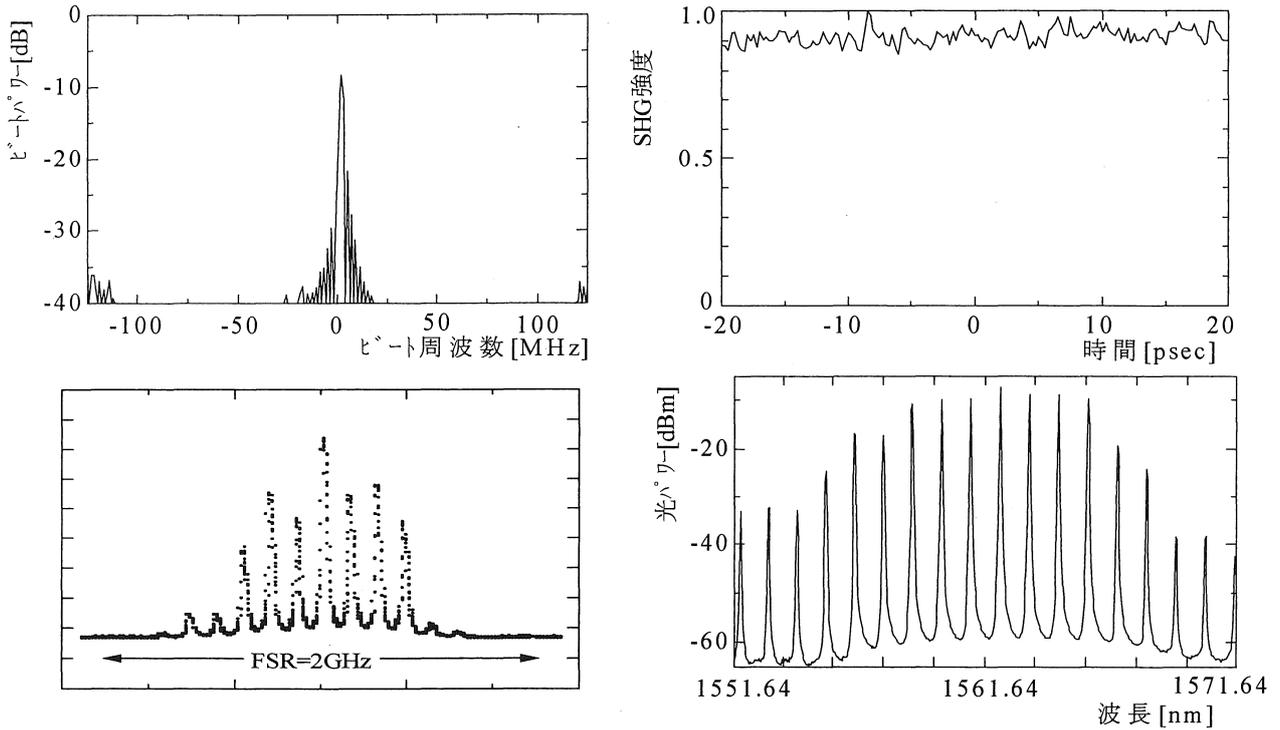


図 11 スペクトルと時間波形(61.3mA)

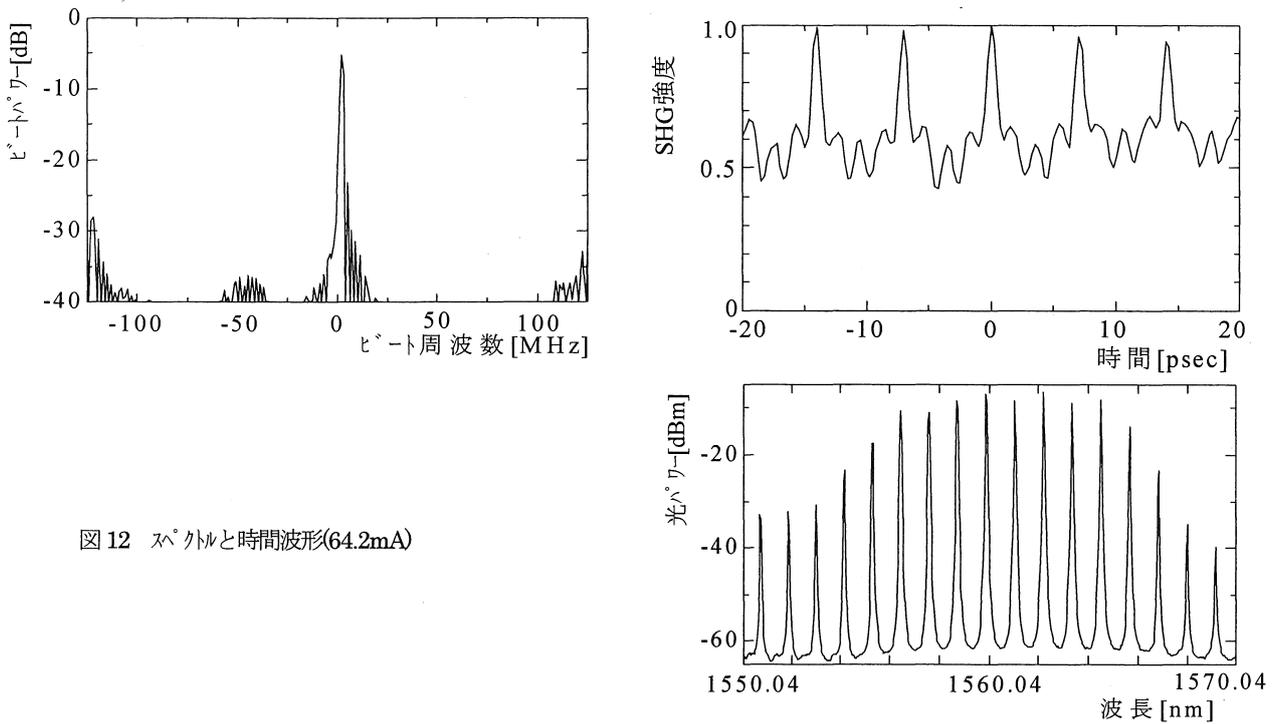


図 12 スペクトルと時間波形(64.2mA)

行った。条件によっては、図 13 のような 140GHz、或いは 280GHz のビート成分が見られる状態が現れた。

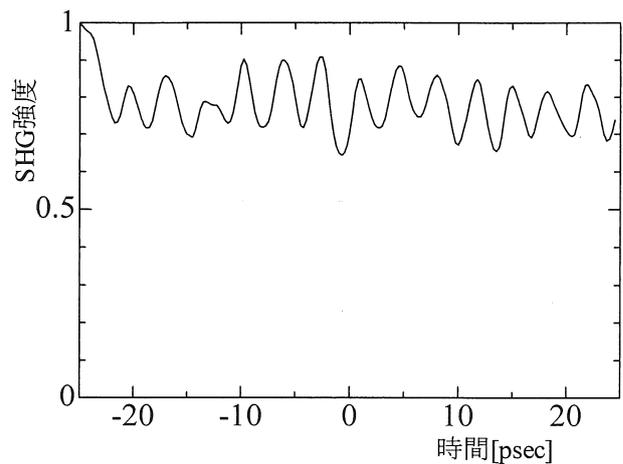
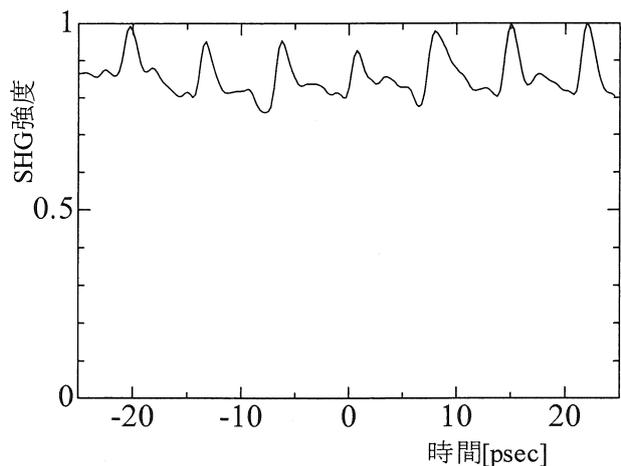
4. まとめと今後の課題

cw注入光の偏波による特性の変化、およびLDチップ単体の特性バラツキを吸収する手法について検討した。

偏波による特性変化については、注入cw光の偏波方向を調節すると同時に、発生する四光波混合光の偏波を分離観測できる

ようにした。実験の結果では、cw注入光の偏波方向によらずに、発生する四光波混合成分はTE成分が殆どであった。今後は、更に精密な実験を繰り返して、全光制御ビート同期法の新規応用へと結びつけていきたい。

LDチップ単体の特性バラツキを吸収する手法については、Fabry-Perot LDの後方に結合した1m程度の短尺ファイバのフル反射を利用する手法を検討した。単体での発振スペクトル線幅が数10MHzであっても、100kHz程度までに狭窄化でき、その結果、縦ビート間の



びート信号が観測できるようになることが分かった。今後は、この手法を用いてcw光注入による高繰り返し光パルスの発生実験を行うと共に、より小型、且つ確実なスペクトル線幅狭窄化法を検討していきたい。

謝辞

本論文は、文部科学省 平成 15 年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(2)、課題番号 14550042「多縦モード半導体レーザーにおける相互注入同期とその応用に関する研究」)の助成を受けて行われた研究の成果の一部である。記して謝意を表す。

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", *Appl.Phys.Lett.*, Vol.75, No.2, pp.13- 15, July 1999.
- [2]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, Oct.1999

[3]K.Sato, "100GHz optical pulse generation using Fabry-Perot laser under continuous wave operation", *Electron.Lett.*, vol.37, no.12, pp.763- 764, June 2001.

[4]水池秀仁, 鈴木基仁, 森正和, 後藤俊夫, 山根一雄: 外部共振器を用いた Fabry-Perot LD の自己モード同期による高繰り返し光パルス列の生成, 2000 年電子情報通信学会秋の大会, C-4-5, 9 月 2000.

[5]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 を用いた撻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, 3 月 2001.

[6]R.W.Tkach and A.R.Chraplyvy, "Regimes of feedback effects in 1.5 μ m distributed feedback lasers", *J.Lightwave Technol.*, vol.LT-4, pp.1655-1661, Nov.1986.

[7]D.Lenstra, B.H.Verbeek, and A.J.Den Boef, "Coherence collapse in single-mode semiconductor lasers due to optical feedback", *IEEE J.Quantum Electron.*, Vol.QE-21, No.6, pp.674-679, June 1985.

(受理 平成 16 年 3 月 19 日)