

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ーのスペクトル線幅狭窄化

Reduction of Spectral Linewidths of Multi-Longitudinal-Mode Laser Diodes with Actively Controlled External Cavities

森 正和†, 松平 成暁†, 中瀬 達寛†, 西澤 典彦‡, 後藤 了祐‡†, 丸橋 大介‡†
Masakazu MORI, Naruaki MATSUHIRA Tatsuhiko NAKASE, Norihiko NISHIZAWA,
Ryosuke GOTO, and Daisuke MARUHASHI

Abstract : External cavities to reduce spectral linewidths of multi-longitudinal-mode laser diodes are studied experimentally. The external cavities are made of polarization maintaining fiber collimators, and their relative optical lengths can be varied up to $900 \mu\text{m}$ in 25nm step. By actively controlling the external cavities, fluctuations of the optical lengths due to the room temperature variation can be compensated, and reduction of spectral linewidths of multi-longitudinal-mode laser diodes is realized. This technique is useful for realizing all-optical mode locking by cw light injection.

1. はじめに

高度情報通信ネットワークには、大容量光伝送システムが必要不可欠である。既に、単一波長で 40Gb/s の光伝送システムの実用化が始まっているが、更なる大容量化が望まれている。光伝送システムの大容量化には主に、時間領域で信号処理の高速化を図る手法(時分割多重)と、光波長の違いを利用して光パルスを並列化する手法(波長分割多重)が用いられる。いずれの手法でも、単一波長当たりの信号処理速度が数十 Gb/s 程度になると、電気的信号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困難となる。そこで、電気的処理によらない、新しい信号処理や高速化の技術を開拓していくことが重要な課題となっている。

我々は、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た¹⁾。同手法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(F-P LD)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ものである。更に、別個の F-P LD 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、或いは逡倍することが原理的に可能である²⁾。本手法の根本は、多縦モード発振の半導体レーザーにおける主縦モード間の相互注入同期と、それに続く隣接縦モードの注入同期という、単純なものである¹⁾³⁾。

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、レーザーの個体差によらず、原理通りに動作することを最重要課題として検討を進めてきた。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が分かった。そこでまず、光ファイバを外部共振器に用いたスペクトル線幅狭窄化法を講じた結果、主縦モード間の相互注入同期過程を観測することができた⁴⁾。次に、外部共振器に位相調整機能を設けることにより、主縦モード間の相互注入同期過程、およびそれに続く隣接モードの注入同期過程までを観測することができた⁵⁾。

このように外部共振器によって確実に再現性は向上することが分かったが、外部共振器によって最適状態に設定しても、数分で設定がずれてスペクトル線幅は元に戻ってしまうという問題があった。そこで今回は、外部共振器を能動制御して、スペクトル線幅狭窄化状態を長時間持続するための要素技術と制御技術の開発を中心にして検討を進めた。

外部共振器としては、数 mm まで光学長を可変できるような、偏波保持ファイバで構成されたコリメタを用い、さらに数 10nm 単位で制御して光波の位相を制御できる構造を検討した。次にこの外部共振器を用いて、F-P LD の多縦モード発振状態を維持したままで狭スペクトル線幅状態に能動制御する手法を検討した。

2. 外部共振器構造の検討

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

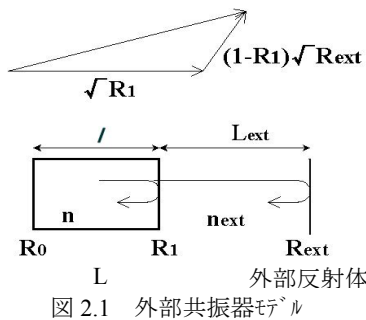
† 愛知工業大学大学院 研究工学科(豊田市)

‡ 名古屋大学大学院 工学研究科(名古屋市)

‡† 富士通株式会社 光開発推進部(川崎市)

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。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-PLD 後方における短尺偏波保持ファイバ(短尺 PM ファイバ)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きた。しかし、時間的安全性に欠けており、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行った⁶⁾。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_1 , 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、



$R_{ext} \ll R_1$ 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。外部反射によって合成ベクトルの位相がずれるために、発振波長がずれる。発振周波数を与える式は次のようになる⁶⁾。

$$\frac{4\pi n\ell}{\lambda} + \frac{(1-R_1)\sqrt{R_{ext}}}{\sqrt{R_1}} \sin\left(\frac{4\pi L_{ext}}{\lambda}\right) = 2\pi l \quad (2.1)$$

ここで、 l 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。ここで、同表中のパラメータ R_a と R_b は次式で与えられる。

$$R_a = \frac{(n\ell)^2 R_1}{L_{ext}^2 (1-R_1)^2}, \quad R_b = \left(\frac{3\pi}{2}\right)^2 R_a \quad (2.2)$$

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

表 2.1 外部反射による領域分け

三つの領域に分かれる様子は、LD の後方端面で反射する振幅 $\sqrt{R_1}$ の電界ベクトルと、外部反射体で反射して LD に結合する振幅 $(1-R_1)\sqrt{R_{ext}}$ の電界ベクトルの合成を考えれば分かりやすい。LD の光学長に比べて、外部反射体までの距離は十分長い ($n\ell \ll L_{ext}$) ので、後者のベクトルは前者のベクトル

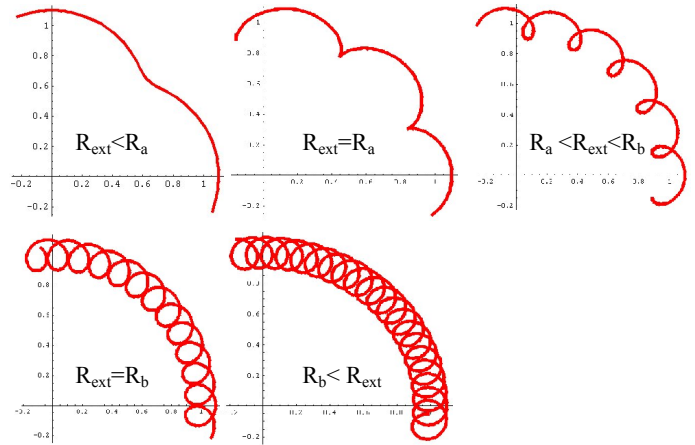


図 2.2 外部反射による領域分け(相対振幅反射率=0.1 の場合)。パラメータ相対距離 $L_{ext}/n\ell$ は左から 5、10、20、44、70

より位相が速く回転する。相対振幅 $[(1-R_1)\sqrt{R_{ext}}]/\sqrt{R_1}$ を 0.1 で一定に保ったまま、相対距離 $L_{ext}/n\ell$ をパラメータとして、周波数を変化させたときの合成ベクトルの軌跡を図 2.2 に示す。図を描く便宜上、周波数は 0 から計算しているので、位相条件(2.1)が満たされる横軸右との交点の数はどの条件でも 1 になっている。光周波数の辺りでは原点を数千回以上回転しているの、合成ベクトルの軌跡が横軸右と交わるときに振幅最大になっているとは限らない。このような状況は、図 2.2 のベクトル軌跡を原点に対して回転したものと同じになる。すなわち、位相条件を満たす状態数としては、図 2.2 の原点を通る半直線との交点の数を考えればよく、表 2.1 のようになることが分る。

一方、スペクトル線幅の狭窄化は、領域によらずにパラメータ γ で次式のように表される⁶⁾。

$$\Delta\lambda_{1/2} = \frac{\Delta\lambda_0}{(1+\gamma)^2} \quad (2.3)$$

ここで、 $\Delta\lambda_0$ は単体のスペクトル線幅、 $\Delta\lambda_{1/2}$ は狭窄化後のスペクトル線幅である。また、パラメータ γ は次式で与えられる。

$$\gamma = \frac{(1-R_1)\sqrt{R_{ext}}L_{ext}}{\sqrt{R_1}n\ell} \quad (2.4)$$

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(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 R_{ext} が決まることになる。

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、(2.1)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 $n\ell$ 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。

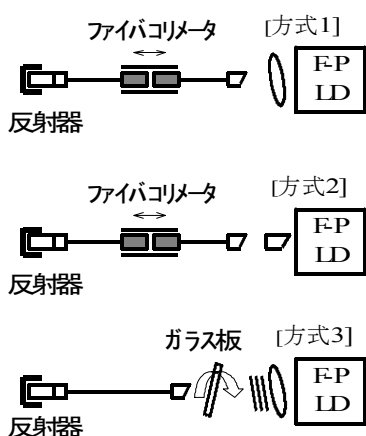
3. ファイバコリメータによる外部共振器

3-1 基本検討

前節の結果から、外部共振器には、位相調整機能と共振器長調整機能の二つが必要である。温度変動による変化分を補償できるようにするためには、位相調整は精度 10nm 程度で数 10 μ m まで、一方、共振器長調整は精度 10 μ m 程度で数 mm まで行えるようにせねばならない。

これまでは、外部共振器として用いるファイバと LD との距離を 25nm ステップで変化させて位相調整を行った。また、厚いガラス板を LD とファイバとの間に挿入し、そのビームに対する角度を変えることにより、300 μ m まで連続的に共振器長を調整した。これ以上の共振器長調整は厚さ 0.145 mm のカバーガラスを一枚、二枚と挿入して、離散的に変化させた⁵⁾。この方式の最大の欠点は、ガラス板の回転に伴ってビーム方向がずれるため、その度に軸合わせが必要な点である。

そこで、PANDA ファイバを用いた PM コリメータの空隙長を調節する方式を検討した。検討した外部共振器の構成を表 3.1 に示す。市販ファイバコリメータでは、空隙長が数 mm 変化しても、挿入損失を 1dB 以下に抑えることができる。従っ



て、コリメータ対の一方を微動ステージにて制御すれば、位相調整と共振器長調整を兼ねた制御が可能となる。ただし、PM コリメータの挿入損失分だけ LD との結合損失を下げる努力が必要である。すなわち、表 3.1 の

方式 1 で、大口径レンズによる結合損失を XdB とすると、 $X \leq 14.5\text{dB}$ が目標値となる。これを達成するために、大口径非球面レンズを用いることを検討した。

3-2 大口径非球面レンズによる後方結合損失の改善

LD の後方結合に斜め研磨セルフォックレンズを用いると、斜め研磨 PANDA ファイバとの結合損失は 14.5dB という大きな値になる。この主原因はセルフォックレンズの直径が小さいため、ビームを拾いきれないからである。そこで、口径が大きい非球面レンズに着目し、入手可能なもので最も口径が大きいもの(米国 LIGHTPATH 社製、有効径 4.00mm、有効焦点距離 2.95mm、開口数 0.53)⁸⁾を使用した。その結果、LD 後方の斜め研磨 PANDA ファイバとの結合損失は 6.4dB にまで抑えることができた。斜め研磨セルフォックレンズを用いたこれまでの結合損失 14.5dB よりも 8.1dB 低減した。また、LD のビーム方向に対して 8° 程度斜めに非球面レンズを配置した状態でも、ファイバ側を最適位置にもっていけば、上記と同じ結合損失が得られた。

前方結合にも大口径非球面レンズを用いてその効果を評価したところ、垂直研磨 SM ファイバとの結合損失は 5.3dB であった。現状の前方結合には、斜め研磨 SELFOC レンズと斜め研磨 PANDA ファイバを用いているが、その結合損失は 6.7dB である。SELFOC レンズを斜め研磨することによる結合損失の増加が 1.5dB あることを考えると、前方結合に大口径非球面レンズを用いることの利点は小さい。

以上の実験結果から、後方結合には大口径非球面レンズと斜め研磨 PANDA ファイバを用い、前方結合には、これまで通りに斜め研磨 SELFOC レンズと斜め研磨 PANDA ファイバを用いることとした。

3-3 外部共振器の構成

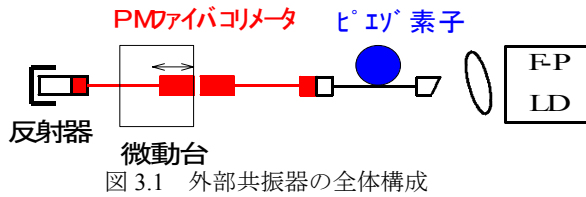
温度変動による外部共振器の位相や共振器長の変化を能動的に補償するためには、外部共振器長に微小な摂動を与えて変化の方向を検出する必要がある。また、外部共振器を組み込んだ状態でも、外部共振器単体の特性を評価できるようにしておかねばならない。これらの点を考慮して、外部共振器全体の構成を図 3.1 のようにした。

図 3.1 において、ビーム素子に PANDA ファイバを一巻して光学長に摂動を与えるようにした。共振器長を 30cm 程度以下にするために、後述するような小径(15mm ϕ)のビーム素子を用いた。また、PM コリメータ部の特性を単体で評価できるように、入出力光コネクタは垂直研磨とした。一方のコリメータ端を微動台(分解能 25nm、可動範囲 900 μ m)に載せて位相と共振器長の両方の制御に用いた。外部共振器中の光コネクタによる反射の影響を低減するために、反射器の反射

方式	挿入損失	共振器長	操作性	備考
1 大口径レンズ+PMコリメータ	XdB+2.1dB	$\leq 20\text{cm}$	優	位相調整と共振器長調整の両方できる。
2 セルフォックレンズ+PMコリメータ	14.5dB+2.1dB	$\leq 20\text{cm}$	良	位相調整と共振器長調整の両方できる。
3 大口径レンズ+ガラス板	15.5dB	$\leq 15\text{cm}$	難	共振器長調整は可能だがビーム方向がずれる。

表3.1 外部共振器の構成方式

率は極力大きくし、LD との結合損失を調整することによって、外部共振器の実効反射減衰量を設定するようにした。

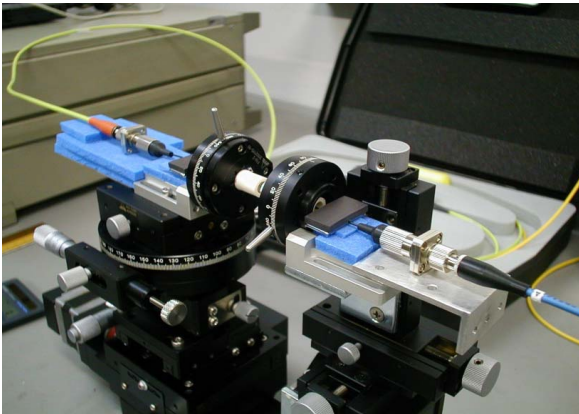


光コネクタを着脱すると、PANDA ファイバの軸方向の角度は数度変動する。これによって偏波消光比が変動し、その結果として外部共振器の実効反射減衰量も変動することになる。簡単な計算から、偏波消光比が無窮大であるとした場合の実効反射減衰量を基準として、それからの変化を 1dB 以内に抑えるためには、偏波消光比は 10dB 以上であればよいことが分る。製作した短尺 PANDA ファイバコード同士を接続して偏波消光比を評価したところ、平均で 20dB、最悪でも 13dB であった。従って、光コネクタを着脱することによる偏波方向のずれは、外部共振器の実効反射減衰量の設定誤差 1dB 程度として考慮した。

[PM コリメータ部] 市販 PM コリメータの光コネクタ側を切り落とし、フェールを再取り付けして用いた。光コネクタからレンズ先端までの長さはそれぞれ 8.1cm と 10.2cm であった。取り扱う上では、長さ 8cm 程度が限度である。

二本の PM コリメータを対向させて外部共振器の光学長可変部分を構成した。その様子を図 3.2 に示す。一方の PM コリメータは、位相調整と光学長調整が可能のように分解能 25nm で可変幅 900 μ m の微動台に載っている。

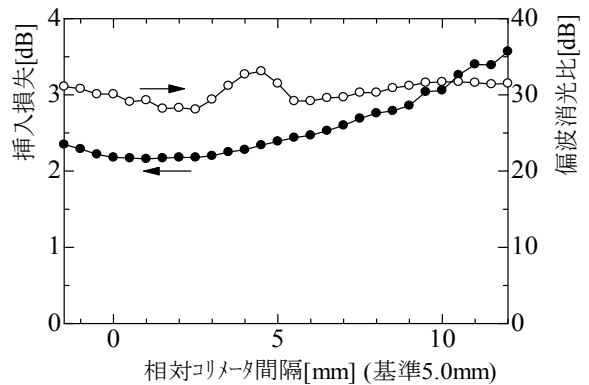
光コネクタの着脱によって光軸がずれることのないよう、ファイバ部分をマグネツトで押さえつける構造とした。レンズ間の距離を 5mm 程度とし、挿入損失、および偏波消光比が最良となるように軸合わせを行った。その結果、挿入損失 2.1dB、偏波消光比 26.2dB となった。光コネクタの着脱による損失変動は ± 0.4 dB、偏波消光比の変動は ± 1 dB 程



度であり、マグネツトの効果は大きい。また、数時間放置しても着脱時と同程度の変動幅であった。

図 3.3 に結合損失と偏波消光比のレンズ間距離依存性を示す。レンズ間距離の変化幅が 10mm 程度まで良好な特性が保たれている。共振器 $L=150\mu\text{m}\sim 1,200\mu\text{m}$ の半導体レーザの光学長は $nL=3.5\times(150\mu\text{m}\sim 1,200\mu\text{m})\leq 4.2\text{mm}$ であるから、通信用の全ての半導体レーザの共振器長調整に用いることができる。

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、LD の発振波長にも依存する。また、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。一方の PM コリメータは分解能 25nm の微動ステージに取り付けてあるので、1.55 μm 帯での位相制御の分解能は 12deg となる。



[反射器] 高反射率で且つ長さが短い反射器とするために、PANDA ファイバ素線の一端に光コネクタを取り付け、他端にはフェールを取り付けてそこにアルミ箔を塗布する構成にした。アルミ箔を密着させるため、コネクタアダプタを介して反対側から別のフェールを押し付けた。ファイバ加工の都合上、長さは 4cm 程度になった。

反射減衰量の波長依存性を偏波保持サキュレタを用いて評価した結果を図 3.4 に示す。広い波長範囲に亘って、1.5dB 程度の反射減衰量が得られている。波長周期 5nm 程度で反射減衰量が変動しているのは、偏波保持サキュレタと反射器のコネクタ接続部で偏波方向が少しずれているためである。偏波保持サキュレタから反射器側に光が入射するときには直線偏波であっても、反射されて戻ってきたときには楕円偏波(波長に依存する)になっているので、等価的な偏波保持サキュレタの挿入損失が波長によって変化することになる。反射減衰量のこのような波長依存性は、偏波非保持サキュレタを用いて評価すると全く見られなくなる。

コネクタ接続部における偏波方向のずれに起因する反射減衰量の波長依存性は、市販の 1mPANDA ファイバを用いて反射器を構成した場合にも最大で ± 0.5 dB の変化として

観測された。光コネクタが元々持っている角度方向の余裕によるものであるため、PANDAファイバを使う限りは避けられない。

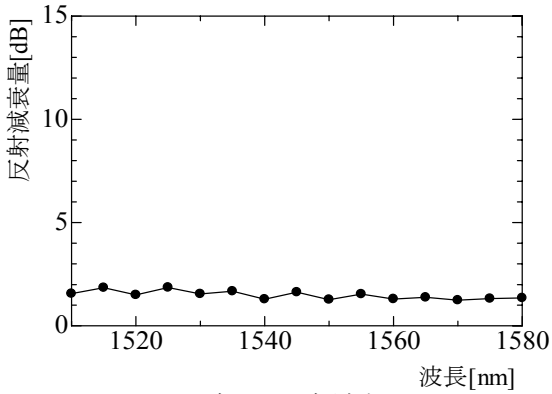


図 3.4 反射器の反射減衰量

[ピエゾ素子による光学長変調部] 外部共振器の全長を 30cm 程度以下に抑えるため、外径が 15mm と小さいピエゾ素子(独ピエゾメカニク社製 HES1 150/15-8/4)を用いることにした。円筒型ピエゾ素子の外周に両面テープを貼り付け、外径 250 μ m の PANDA 素線を一卷きしてゴムバンドで押さえた。この様子を図 3.5 に示す。

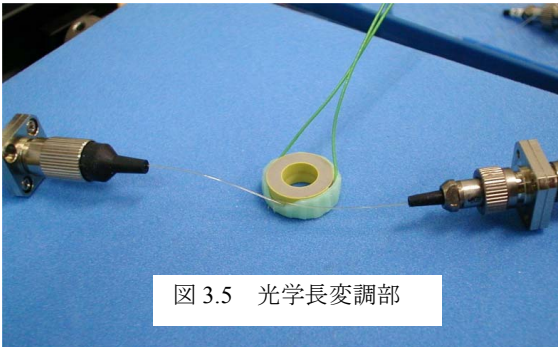


図 3.5 光学長変調部

変調周波数は、光パワーメータや選択バルブメータなどのアナログ出力が応答できる範囲内なるべく高い値をえらび、200 Hz とした。ピエゾ素子の静電容量が 8 μ F (カタログ値。実測では 11 μ F) と大きいので、専用の駆動回路を製作して用いた。ピエゾ素子への印加電圧と光学長変化との関係をマッハ・ツェンダ干渉計を用いて測定した結果を図 3.6 に示す。光学長変化は印加電圧のほぼ自乗に比例している。また、印加電圧が正でも負でも、光学長変化の方向は同じであった。したがって、光学長変化を 200Hz とするために、印加電圧は 100Hz に設定した。

制御するために必要な光学長の摂動量は小さいほどよい。これまでのスペクトル線幅の観測結果では、良好なスペクトル線幅が得られる光学長の範囲は最適値 ± 50 nm $\sim\pm 100$ nm であることが分かっているので、光学長の摂動量として 50nm-p 以下で制御することを目標とした。このときの印加電圧は 19Vp-p 以下となる。

カタログデータによると、PANDAファイバの曲げによる特性変

化は、曲げ直径 $D=40$ mm までは無視できるが、 $D\leq 30$ mm では急激に劣化する⁹⁾。そこで、製作した二本のコネクタ付短尺 PANDA ファイバ(14.8cm、14.2cm)について、15mm ϕ のピエゾ素子に巻かない場合と一卷きした場合とで挿入損失と偏波消光比がどう変わるかを測定した。最悪のデータは、挿入損失が 0.6dB \rightarrow 1.1dB で 0.5dB の増加、偏波消光比は 23dB \rightarrow 18dB で 5dB の減少であった。曲げによるこの程度の特性格化は、外部共振器に適用する上では全く問題ないレベルである。

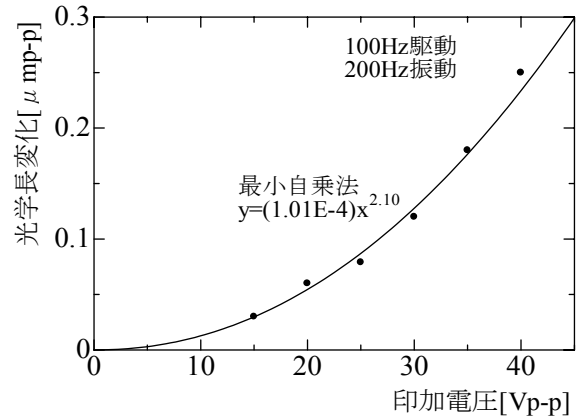


図 3.6 ピエゾ印加電圧と光学長変化量

4. 外部共振器の制御

PM コリメータを用いた外部共振器の制御方法の検討は、次の順序で行った。

- (1) 光学干渉計での実験：PM コリメータの制御プログラム開発と、制御に必要な摂動光学長量を見積もるため、光学干渉計(マイケルソン型、およびマッハ・ツェンダ型)の一方のアームに PM コリメータを組み込んで制御実験を行った。
- (2) F-P LD のスペクトル線幅制御の実験：F-P LD の後方に外部共振器を組み込んで、スペクトル線幅が狭窄化された状態を維持する制御実験を行った。

4.1 光学干渉計での PM コリメータの制御実験

図 4.1 のマイケルソン干渉計を構成し、その一つのアームに PM コリメータ対と反射器を組み込んだ。PM コリメータ対のレンズ間距離を 5mm 程度に設定し、一方の PM コリメータを 25nm ステップで移動させながら、干渉計の出力光パワーを光パワーメータで観測した。微動台の性能により、移動可能距離は 900 μ m である。尚、実験に用いた PM カップラのファイバ部分は外径

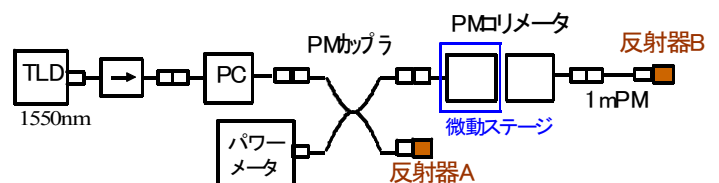


図 4.1 マイケルソン干渉計による PM コリメータの動作確認実験

250 μm の PANDA 素線であるため、周囲の温度変化に対して敏感に反応する。この実験では、エアコンの風が当たる状態で行っているため、エアコンの ON/OFF 動作による影響を大きく受けている。

PM コリメータの移動距離が 0 μm ~10 μm 、および 890 μm ~900 μm の場合の出力光強度の変化を図 4.2 に示す。PM コリメータの挿入損失は対向距離が数 mm 変化しても殆ど変化しないため、出力光パワーのピーク値は移動距離 0 μm ~900 μm の間で一定になっている。また、移動距離 0 μm ~900 μm にわたって半波長周期の変化が観測されるが、細かく見るとその周期はゆっくりと変化している。これは、移動に要する時間が 8 分弱であり、その間の室温変化によって干渉計のアーム長が伸び縮みするためである。

次に PM カップラの反射器 A 側のファイバをピエゾ素子に巻きつけ、その光学長を 200Hz で 30nmp-p、或いは 60nmp-p だけ変調した。出力光パワーが最大となるよう、干渉計アームの位相差状態をロックインアンプで検出し、パソコン経由で PM コリメータを微動ステージにより制御した。尚、干渉計のアーム長は各々約 1m である。制御結果を図 4.3 に示す。

微動ステージの制御は約 20 回/秒で、制御サイクル毎に ± 25 nm 移動させるという方式を採った。微動ステージを制御しないと出力光パワーは不規則に変動するが、制御開始と同時にピーク値に保たれる。図中の相対光学長は、制御サイクル

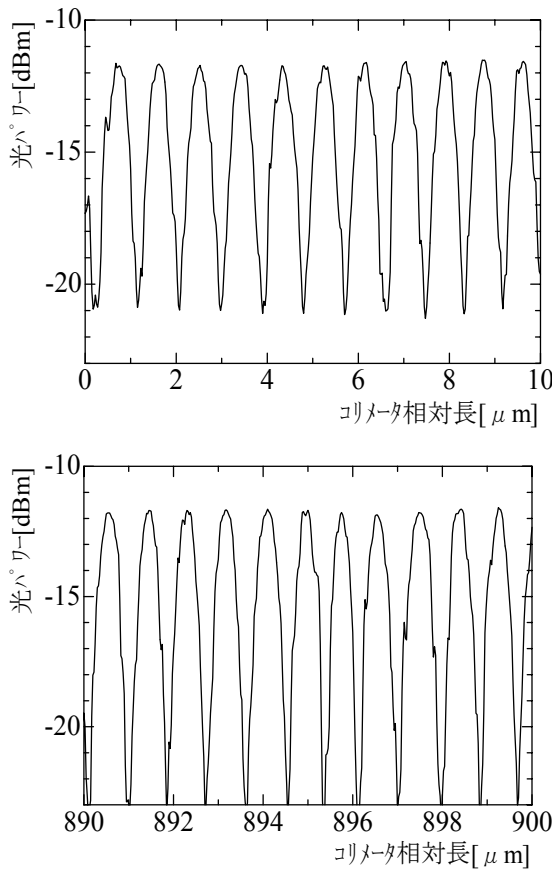


図 4.2 マイケルソン干渉計光出力のコリメータ間隔依存性

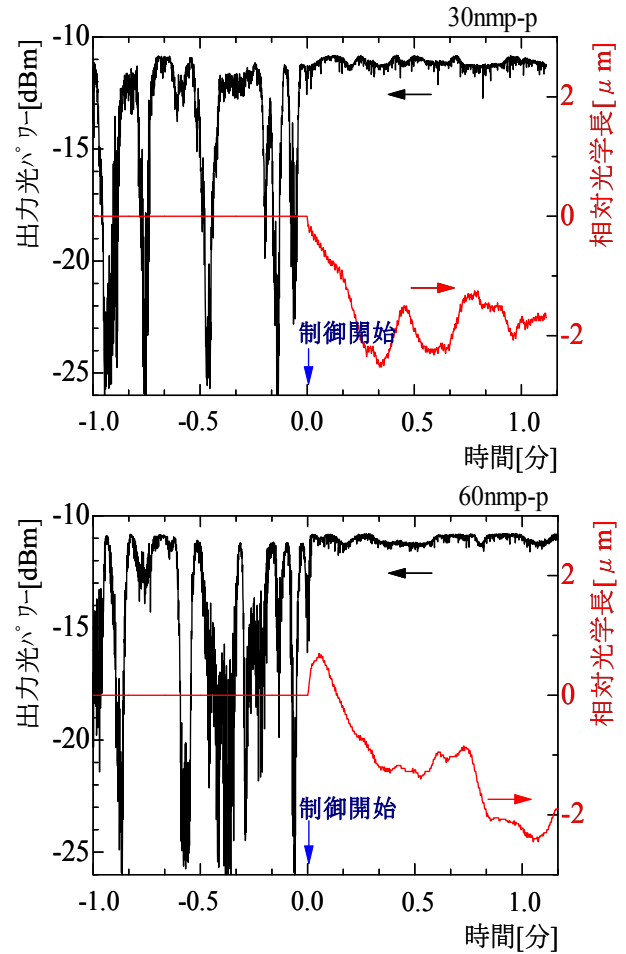


図 4.3 マイケルソン干渉計での PM コリメータの制御

毎の制御量(± 25 nm)を積算したものである。ギアのバックラッシュがあるため、相対光学長の厳密な値ではなく、平均的な値を表している。また、出力光パワーに見られるスパイク状の変動分は、(1)エアコンの ON/OFF 動作や風によって大きな温度変化が生じた場合や、(2)机の振動があった場合、によるものである。(1)については、エアマットなどの覆いを被せればかなり抑えられる。(2)については、除振措置を施した実験台であれば取り除ける。

マイケルソン干渉計における制御実験の結果を基にして、図 4.4 のマッハ・ツェンダ型干渉計での制御実験を行った。干渉計のアーム長は各々約 2m である。エアコンの ON/OFF 動作や風の影響を抑えるため、PM カップラ#1 による光分波から、PM カップラ#2 による光合波までのファイバ部分をエアマットで覆った。

なるべく小さな光学長摂動量で安定な制御が得られるように、ロックインアンプのパラメータを調整した。図 4.5 に光学長摂動量をパラメータとした短時間での制御の様子を示す。

同図から、光学長摂動量 10nmp-p で十分な制御特性が得られていることが分る。出力光パワーが最大となる状態では、電界振幅が同じである二つの光が同一位相で合波されると考えると、光学長摂動量 Δl p-p を加えたときの出力光パワーの相対変化 ε は $\varepsilon = (2\pi\Delta l p-p/\lambda)^2/4 = 4 \times 10^{-4} = 0.04\%$ となる。

光学長摂動量を 15nm-p として長時間の制御を行った様子を図 4.6 に示す。当実験室の環境では、エアコンの ON/OFF 動作による室温変化は約 0.5 度であり、その周期は 13 分～14 分であった(図 4.7)。このエアコン ON/OFF 動作に伴って、相対光学長が 15 μm 程度変動していることが分かる。この光学長変動が制御系で補償されて、ほぼ一定の光出力パワーとなっている。

出力光パワーにはエアコンの ON/OFF に同期した 0.2dB 程度の変動が見られる。この原因は、波長可変レーザのコヒーレンス特性や PM コリメータの分岐特性が温度変化で影響を受けたためであり、制御系の問題ではないと考えている。また、出力光パワーには小さなスパイク状の変動が見られるが、これ

は通常の事務机の上で実験したことによる振動の影響である。除振台上で実験すれば抑えられる。

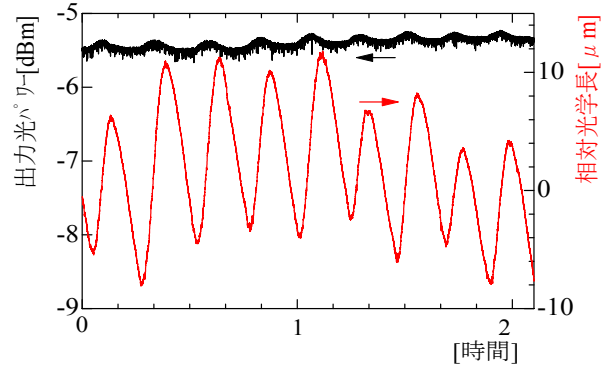


図 4.6 マッハ・ツェンダ型干渉計における PM コリメータの長時間制御

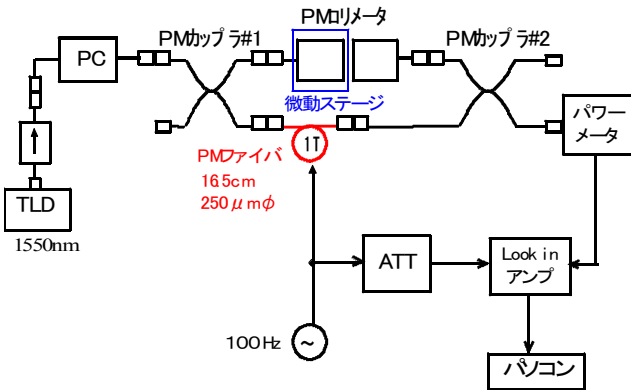


図 4.4 マッハ・ツェンダ型干渉計での制御実験

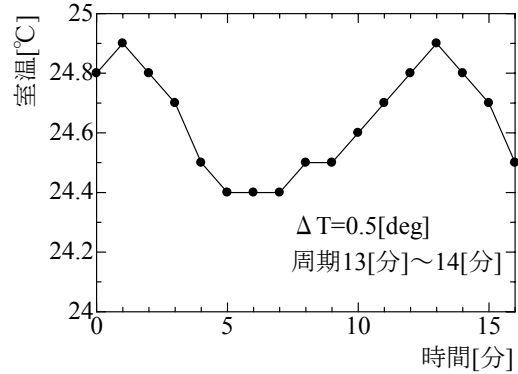


図 4.7 室温変化の様子

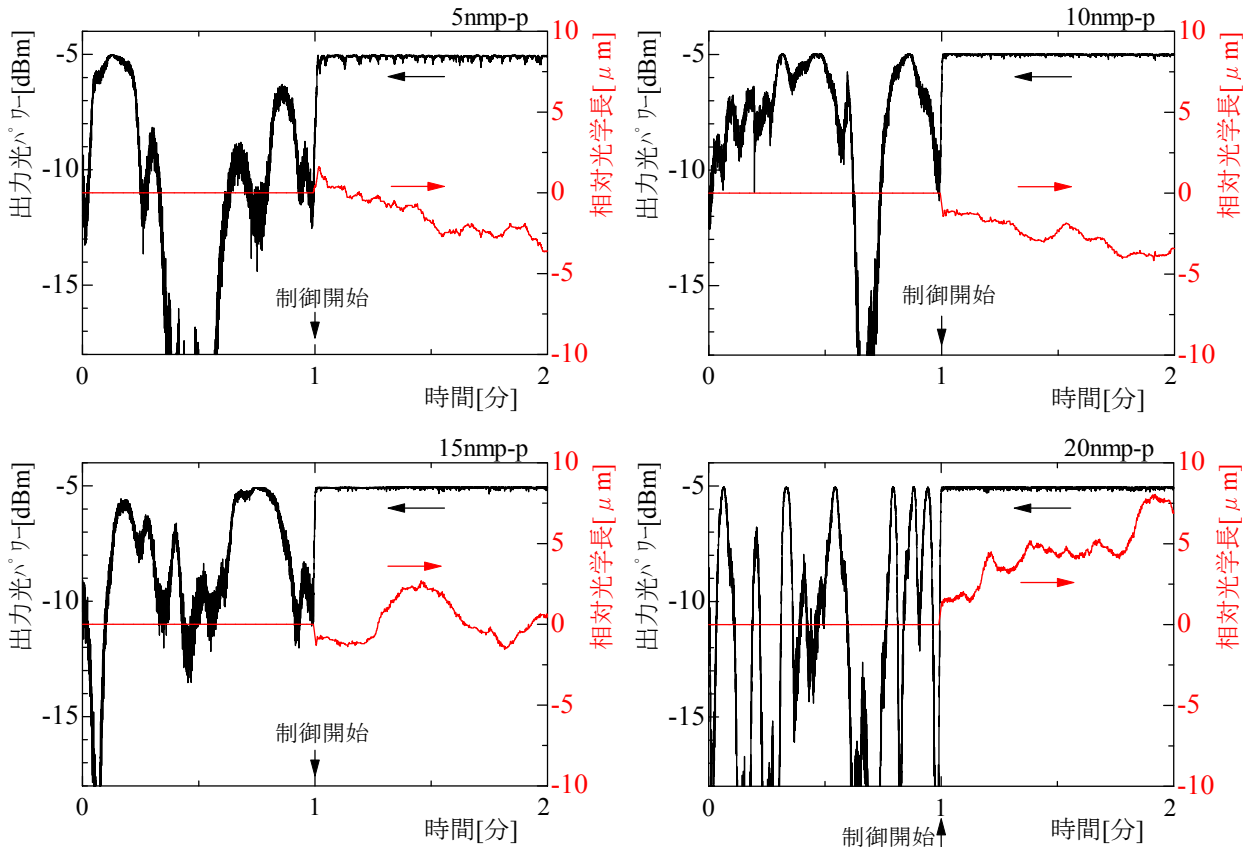


図 4.5 マッハ・ツェンダ型干渉計における PM コリメータの短時間制御

4・2 F-P LD のスペクトル線幅制御

前節で検討した外部共振器を、発振波長 $1.55\ \mu\text{m}$ で共振器長 $300\ \mu\text{m}$ の F-P LD(端面処理 AR-CL)の後方に組み込み、スペクトル線幅が狭窄化された状態を維持する制御実験を行った。

[F-P LD と外部共振器との結合系]

F-P LD の後方出力を口径が大きい非球面レンズ(有効径 4.00mm 、焦点距離 2.95mm)を用いて外部共振器と結合させた。この様子を図 4.8 に示す。

外部共振器各部の長さは次の通りである。(1)LD~斜め研磨 PANDA までの空中部= 1.5cm 、(2) 斜め研磨 PANDA= 14.2cm 、(3)PM コリメタ(右)の PANDA 部= 10.2cm 、(4) PM コリメタ間の空中部= 4mm 、(5) PM コリメタ(左)の PANDA 部= 8.1cm 、(6)反射器(PANDA)= 3.7cm 。

ファイバの屈折率を 1.45 とすると、外部共振器全体の光学長は 54.4cm 、ファイバ長に換算すると 37.5cm である。この共振器長で、位相調整により外部共振器モード数が 1 で、かつスペクトル線幅を最も狭くできる反射減衰量の限界値 R_b は 42.7dB となる。

種々の設定パラメータを評価できるように、外部共振器には二箇所の光コネクタ接続部を設けた。LD との結合損失は図中の①で、また、外部共振器の単体特性は①と②で切り離せば評価することができる。ただし、これらの光コネクタにおける反射の影響を避けるため、反射器の反射率はできる限り大きくし、LD との結合損失を調節して反射減衰量を設定した。ファイバの位置をずらして結合損失を調整すると、一般には偏波消光比が劣化するため、この調整法での反射減衰量の設定値は実効的な値ではない。

①-②の PM コリメタ部の挿入損失や偏波消光比は、最適に調整すればほぼ一定である。したがって、反射減衰量を設定するには、②で切り離して光パワーをモニタし、設定し

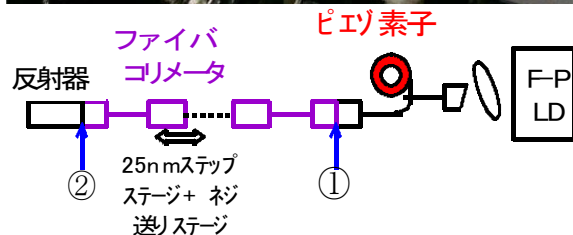
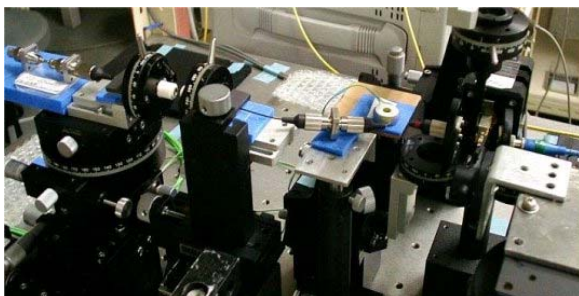


図 4.8 LD と外部共振器の結合系

たい反射減衰量に対応する光パワーに合わせればよい。

[外部共振器の制御方式]

外部共振器を能動制御するには、外部共振器の光学長を変調し、その結果として変化する何かを検出してフィードバックをかける。最終目的はスペクトル線幅の狭窄化であるが、それに関連した物理量で、なるべく簡単な機器で検出できるものが望ましい。検討したいいくつかの候補を表 4.1 に示す。表中の優先順位では、必要な測定機器類の規模が小さいものを上位とした。

前方光パワーと LD 端子電圧について、後方反射の有無による変化を測定した結果を表 4.2 に示す。後方に結合させた 14.2cm の PANDA ファイバの一端を開放して反射を返した。この状態で反射減衰量 31.5dB となり、各縦モード内の外部共振器モードを一つにできる限界値 $R_b=34.9\text{dB}$ を超えている。LD 端子電圧の変化は 0.2mV であり、テジボルでの測定限界に近い。また、光パワーについては、この程度の反射の有無では 0.05dB 変化しているが、微動ステージにより反射位相を変化させたときには温度揺らぎの中に埋もれてしまい、検出不可能であった。

分類		候補	優先順位	備考	
光信号	前方出力	信号	光パワー	1	
			スペクトル線幅	3	
	雑音		低周波雑音	4	
			緩和振動成分	5	EDFが必要。
	後方出力		上記と同じもの		外部共振器と別に取り出し必要。
電気信号	信号	LDチップ端子電圧	2		
	雑音	駆動電流	6		

表 4.1 制御量の候補

後方反射の状態	前方光パワー	LD端子電圧	備考
反射減衰量 31.5dB	-5.47dBm	0.9368V	$R_b=34.9\text{dB}$
反射無し	-5.52dBm	0.9370V	

表 4.2 光出力と端子電圧の変化の大きさ

次に、遅延自己ペロダインによるスペクトル線幅測定器(アドバンテス製 Q73351)を用いることを検討した。同測定器では、入力光を 150MHz だけ周波数シフトしたものと、もとの入力光を遅延させたものとをビート成分を出力する。スペクトル線幅が狭いほど 150MHz 成分のパワーが大きくなる。多縦モードスペクトルの場合には、各縦モードのスペクトル線幅が狭いほど、或いは、より多くの縦モードのスペクトル線幅が狭窄化するほど 150MHz 成分のパワーが大きくなる。そこで、前方光出力をスペクトル線幅測定器に入力し、その出力の 150MHz 成分のパワーを選択バルメタ(帯域幅 30kHz)で測定する構成とした。図 4.8 の外部共振器を用いて、反射減衰量を限界値近辺($\sim R_b$)に設定し、共振器長を幅 $900\ \mu\text{m}$ だけ掃引した結果を図 4.9(a)に示す。LD 駆動電流は $20\text{mA}(=2.2I_{th})$ である。LD の光学長は $nL=3.5 \times 300\ \mu\text{m}=1050\ \mu\text{m}$ である

から、この区間内で、外部共振器に要求される共振器長と位相についての二つの条件が満たされる状態が現れると期待できる。同図(a)における相対距離-330 μm 近辺がこれに当たる。この部分を拡大したものを同図(b)に示す。半波長周期でスペクトル線幅が変化していることが分る。一方、光パワーはほぼ一定であり、スペクトル線幅狭窄化の目安にはならない。

図 4.9(a)のように、外部共振器の長さをを 1,000 μm 規模で変化させて、最も線幅が狭窄化するところへもって

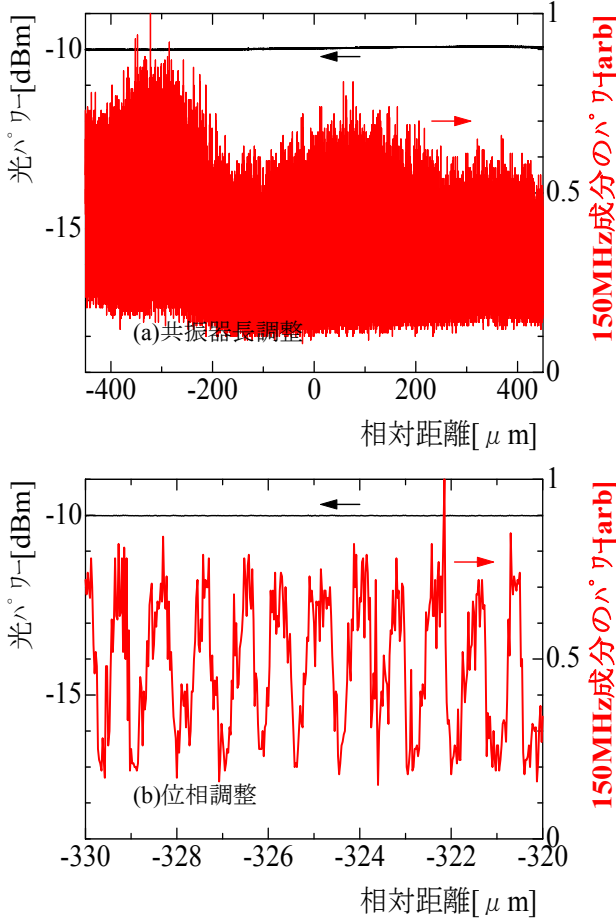


図 4.9 外部共振器によるスペクトル線幅の変化(20mA=2.2Ith)

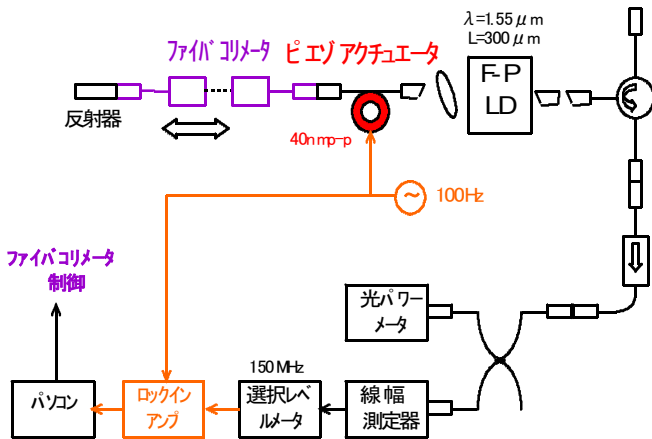


図 4.10 スペクトル線幅制御系

いくことが共振器長調整である。この後で、図 4.9(b)のように、外部共振器の長さをを数 10nm 規模で変化させて、最も線幅が狭窄化するところへもっていくことが位相調整である。位相調整はフィードバック系による自動制御で行う。

[スペクトル線幅の制御実験]

実験系を図 4.10 に示す。まず、フィードバックループを開放し、ピエゾ素子を変調しない状態で、パソコンにより PM ファイバコリメータのレンズ間隔を幅 900 μm だけ掃引しながら、スペクトル線幅測定器の 150MHz 成分のパワー P_{150M} を測定する。次に、 P_{150M} が最大となるレンズ間隔の近辺へもっていき、ピエゾ素子を変調した状態でフィードバックループを閉じる。ピエゾ素子の光学長変化は 200Hz で 40nm p-p とした。ロックインアンプで雑音を抑圧しながら、200Hz の電気信号($f=100\text{Hz}$ の参照信号を入力すると、 $2f=200\text{Hz}$ の信号を内部で発生させる機能を用いた)に対する P_{150M} の変化の位相を検出し、符号に応じて $\pm 25\text{nm}$ ステップで PM コリメータを制御した。

駆動電流 60mA(=6.5 Ith)、反射減衰量 43.1dB とし、フィードバックループを開放した状態で共振器長を変化させたときの 150MHz 成分のパワーの変化を図 4.11 (a) に示す。なお、この外部共振器長においては、各縦モード内の外部共振器モードを一つにできる反射減衰量の限界値 R_b は 42.7dB で

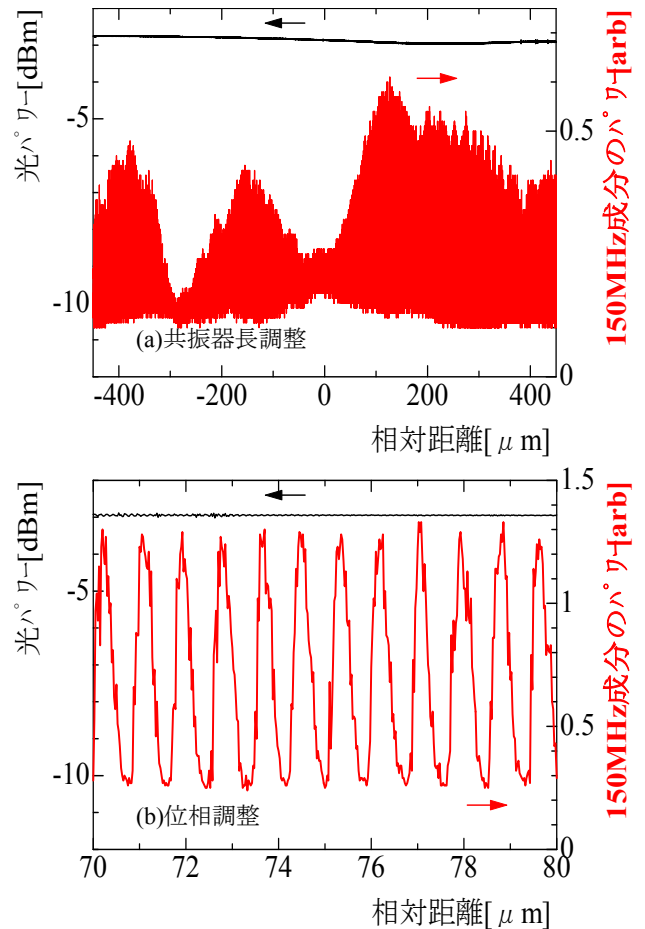


図 4.11 外部共振器によるスペクトル線幅の変化(60mA=6.5Ith)

ある。

図 4.11(a)において、相対距離 125 μm でパワーが最も大きくなっている。この近辺を拡大したものが、同図(b)である。手動で 150MHz 成分のパワーがピークとなるところにもっていき、フィードバックを閉じて、制御を開始する。ロックアップの感度、時定数、フィルタ条件などを種々に変えて、制御の最適化を図った。

フィードバック制御を ON(3 分間)→OFF(4 分間)→ON(3 分間)とした時の、各測定値の変化を図 4.12 に示す。

図 4.12(a)において、フィードバック制御によって、外部共振器における 0.1 $\mu\text{m}/\text{min}$ ~0.3 $\mu\text{m}/\text{min}$ 程度の光学長変動が補償されていることが分る。

フィードバック制御を ON→OFF に切り替えても 30 秒~40 秒は、スペクトル線幅が狭窄化した状態が維持されている。フィードバック制御をしてなかった以前の実験では、主縦モードの相互注入同期や、隣接縦モードの注入同期を観測できるのは 30 秒~2 分以内であり、実験結果と符合している。

また、フィードバック制御を OFF→ON に切り替えると、直ちにスペクトル線幅が狭窄化した状態に復帰する。

LD と外部共振器は風除けフードで覆われていること、及び外部共振器の長さが 37.5cm(ファイバ長に換算)と短いために、0.1 $\mu\text{m}/\text{min}$ ~0.3 $\mu\text{m}/\text{min}$ という小さな光学長変動に抑えられている。これまでの実験から、縦モードのスペクトル線幅が狭窄化するのには、共振器長が最適値から $\pm 50\text{nm}$ ~ $\pm 100\text{nm}$ にあるときであることが分っている。これらの値から見積もると、スペクトル線幅が狭窄化する条件にもっていったとしても、共振器長のフィードバック制御をしない場合には、20 秒~1 分 30 秒で狭窄化していない状態に移ることになり、これまでの実験結果を裏付ける結果である。

図 4.12(b)において、光パワーはフィードバック制御の ON/OFF と無関係であることが分る。

以上の結果から、スペクトル線幅の狭窄化制御には、線幅測定器によるスペクトル線幅中心成分の一括モードが有効であ

ることが分った。

5. まとめと今後の予定

Fabry-Perot LD の多縦モード発振状態を保ったままで、各縦モードのスペクトル線幅を狭窄化する手法を検討した。PANDA ファイバ型ファイバコネクタを用いた外部共振器を検討し、その要素技術と制御手法を実験検討した。その結果、次の結果が得られた。

- (1)外部共振器長を 25nm ステップで制御することにより、往復で 12 度ステップの位相調整が可能。
- (2)外部共振器長を mm オーダーまで可変でき、共振器長 300 μm までの LD に対して共振器長調整が可能。別の微動ステージと組み合わせれば、共振器長 1,200 μm でも対応可能。
- (3)室温変化などによる 0.1 $\mu\text{m}/\text{s}$ 程度までの共振器長変化を追尾可能。
- (4)スペクトル線幅狭窄化状態を維持できる見通しがあった。

今後は、制御パラメータの最適化、および縦モード毎のスペクトル線幅の測定を行い、本題の cw 光注入実験へと進めて行く予定である。

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, "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, 第 36 号 B, pp.209-216(2001).
- 3) H.Kasuya, M.Mori, R.Goto, M.Suzuki, T.Goto, and K.Yamane, "All Optical Mode Locking of Fabry-Perot Laser Diode by Injecting cw Light at the Center of Two Longitudi-

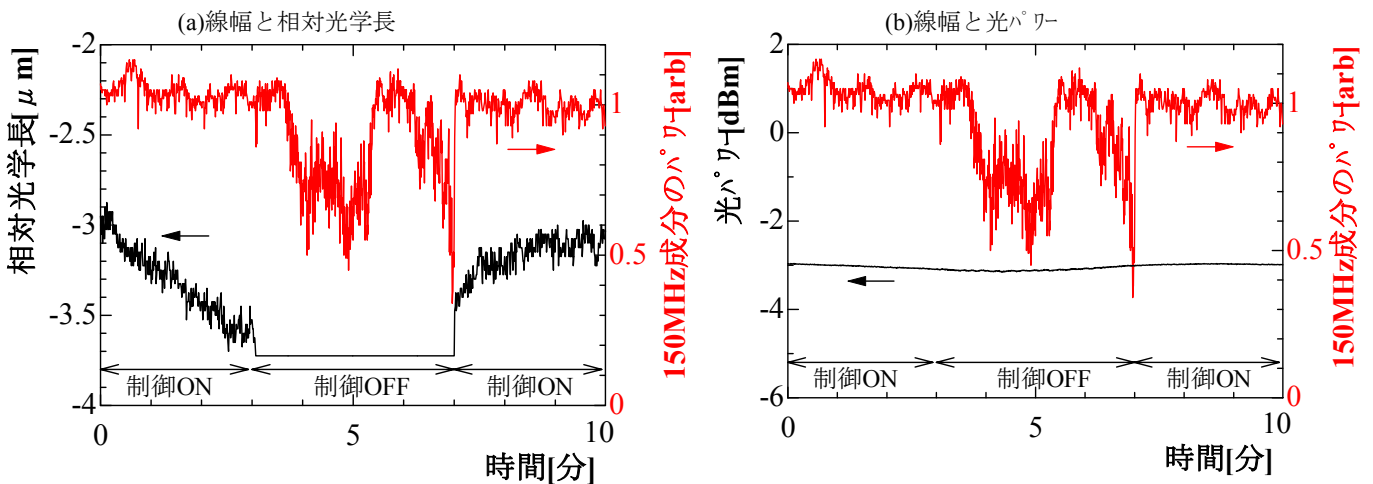


図 4.12 スペクトル線幅制御の様子

nal Modes", *Forth Optoelectronics and Communications Conference OECC'99*, pp.1329-1331(1999).

4) 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,"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の相互注入同期の観測",愛知工業大学研究報告,第40号B,pp.81-89(2005).

5) 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,"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",愛知工業大学研究報告,第41号B,pp.51-59(2006).

6) L.Goldberg, H.F.Taylor, A.Dandridge, J.F.Weller, and R.O.Miles,"Spectral Characteristics of Semiconductor Lasers with

Optical Feedback", *IEEE J.Quantum Electron.*, vol.**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 Lser Diode Coupled to an External Cavity", *IEEE J.Quantum Electron.*, vol.**QE -20**, No.5, pp.492-499(1984).

8) エドモンド・オプティクス・ジャパン,"2005年度版光学部品・製品総合カタログ",p.32(2005).

9) 株式会社フジクラ光機器技術部,"フジクラPANDAファイバご紹介と偏波保持ファイバの基礎",www.fujikura.co.jp/optde/jp/2004/pdf/16pnb04j.pdf.

(受理 平成19年3月19日)