

# cw 光注入による半導体レーザーの 全光制御モード同期方式におけるスペクトル整形用光フィルタ

## Optical Filters for Spectral Shaping in All Optical Mode-Locking of Semiconductor Lasers by cw Light Injection

森 正和†, 伊藤 樹†, 後藤 了祐‡, 丸橋 大介‡

Masakazu MORI, Itsuki ITOH, Ryosuke GOTO, and Daisuke MARUHASHI

**Abstract :** Optical filters, especially band rejection filters, for spectral shaping in all optical mode-locking of semiconductor lasers by cw light injection are studied experimentally. Two types of filters are studied; the ring resonator type and the Mach-Zehnder interferometer type. Active control to compensate for fluctuations of the optical lengths due to the room temperature variation is also studied. The Mach-Zehnder type filters prove to be advantageous because of large variable free spectral ranges and insensitiveness to internal losses. The filter structure and the active control technique are described in detail. These filters are useful for shaping optical spectra both in generation and multiplication/division of high repetition frequency optical pulse trains.

### 1. はじめに

実用光通信システムの高速度化に対する熱意は、波長多重化の波に押されてやや冷めていたが、2006 年度の 40Gb/s 光通信システムの導入とともに再び盛り返してきた。注目すべき点は、コヒーレント光通信に関連して開発された技術が多く取り入れられていることである。光波のコヒーレンスに関連した技術は、今後ますます重要になると予想される。

光通信システムの伝送速度や信号処理速度を高速化することは、単に通信技術のみならず、科学技術全般に関わる重要課題である。その根幹となる技術は、クロック信号としての安定、かつ制御性の良い、高繰り返し光パルス列の発生法である。また、このクロック信号に同期した、低繰り返し光パルス列を発生する技術を同時に開発していくことも必要である。

筆者らは、cw 光を多縦モード発振の Fabry-Perot 型半導体レーザー (F-P LD) に注入してモード同期させる「全光制御モード同期法」を提案し、その実験検討をしてきた<sup>1-5)</sup>。本手法によれば、単純構造の F-P LD を用いて、電気的変調を用いず、純光学的にモード同期させることが可能である。この手法を用いて、波長 1.55 $\mu\text{m}$  帯において繰り返し周波数 141GHz、パルス幅 1.5psec の光パルス列発生に成功している<sup>1)</sup>。更に、別個の F-P LD 内での相互注入同期、および注入同期と組み合わせることにより、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可能であることを示してきた<sup>2,3)</sup>。

この方式によるモード同期法を実用化する上で、いくつかの課題があった。一つは、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点である。他の一つは、モード同期しても、温度変動などの影響のためにモード同期状態を長時間は維持できないという点である。これらの問題点は、物理機構の定量的解明を困難なものとし、かつ、実用化の上でも大きな障害となっていた。種々の実験検討を重ねた結果、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ように、外部共振器を F-P LD に結合させて能動制御する手法を開発した<sup>4,5)</sup>。これにより、主縦モード間の相互注入同期、および隣接縦モードの注入同期の様子を観測できるに至っている<sup>5)</sup>。

外部共振器を制御するのに、現状では、F-P LD の出力光をそのまま遅延自己ペロタイン方式のスペクトル線幅測定器に入力するという「スペクトル線幅一括モック方式」で行っている。この方式では、F-P LD の出力光に混入した狭スペクトル線幅の注入 cw 光成分のために、F-P LD の線幅状態はモックしずらくなる。注入 cw 光を除去してスペクトル線幅測定器に入力することが望ましい<sup>6)</sup>。

また、モード同期した F-P LD の光出力に含まれる注入 cw 光成分によって、出力光パルス列の波形は一つおきに振幅が変化する。注入 cw 光を除去できれば、一定振幅の光パルス列が得られる。

同様に、モード同期パルス列の繰り返し周波数の分周

† 愛知工業大学大学院 研究工学科 (豊田市)

‡ 富士通株式会社 フォトクス事業本部 (川崎市)

や通倍においても、出力光のスペクトル成分から入力光のスペクトル成分を除去するフィルタが必要となる<sup>2,3)</sup>。

以上の点を考えて、今回は手始めに、F-PLD の光出力から注入 cw 光成分を除去するための帯域阻止フィルタの検討を行った。

## 2. 全光制御モード同期法における光フィルタの必要性

我々が提案している、cw 光注入による多縦モード発振 F-PLD の全光制御モード同期法における光スペクトルの配置を図 2.1 に示す。F-PLD 二つの主縦モード周波数の中心に狭スペクトル線幅の cw 光を注入することにより、まず主縦モードを相互注入同期させ、次に隣接縦モードを注入同期させるものである<sup>1)</sup>。このような同期現象は非線形光学効果によって起きるものであり、F-PLD を多縦モード発振で、且つ、狭スペクトル線幅の状態に維持することが不可欠である。

そこで、狭スペクトル線幅とするための外部共振器<sup>7)</sup>を図 2.2 のように F-PLD に結合させ、これを能動制御する手法を開発してきた。外部共振器の能動制御には、F-PLD の出力光を一括してスペクトル線幅測定器でモニタすることにより行っているが<sup>5)</sup>、狭スペクトル線幅の注入 cw 光成分も混入しているために、F-PLD の線幅状態をモニタしづらいという欠点がある<sup>6)</sup>。より安定に外部共振器を能動制御できるようにするためには、F-PLD の出力に含まれる注入 cw 光成分を抑圧してスペクトル線幅測定器に入力することが必要となる。

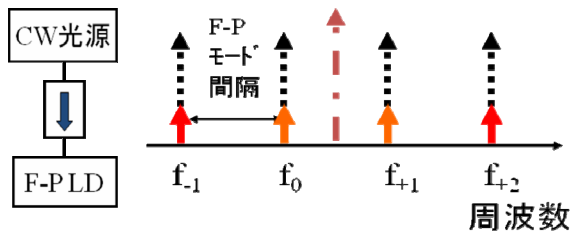


図 2.1 全光制御モード同期法における光スペクトルの配置

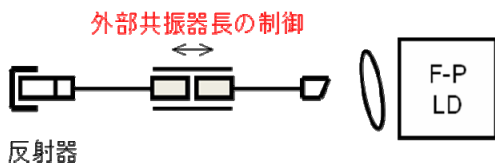


図 2.2 外部共振器によるスペクトル線幅狭帯化

F-PLD の出力に含まれる注入 cw 光成分は、モード同期時にはパルス波形に影響を及ぼす。モード同期すると F-PLD の縦モード成分と注入 cw 成分の相対位相は固定されるが、注入 cw 光成分は縦モード周波数位置の真ん中にあるために、二パルスごとに縦モード成分と位相が揃う。このため、図 2.3(a)のようにパルス振幅が一つおきに変化することになる。

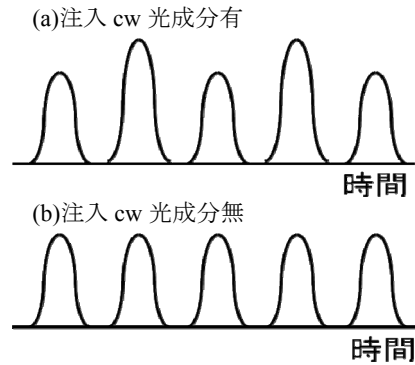


図 2.3 注入 cw 光によるパルス波形の変化

このように、外部共振器の能動制御、および出力パルス波形の整形という観点からは、注入 cw 成分を抑圧する帯域除去フィルタを実現することが望まれる。

モード同期パルス列の二分周動作における光スペクトルの配置を図 2.4 に示す。モード同期した縦モード周波数間隔  $f_0$  の F-PLD<sub>1</sub> 出力を、縦モード周波数間隔  $f_0/2$  の F-PLD<sub>2</sub> に同図の周波数配置で注入する<sup>3)</sup>。この場合にも、このままでは F-PLD<sub>2</sub> の出力に F-PLD<sub>1</sub> のスペクトル成分が含まれるため、時間領域で考えると、繰り返し周波数  $f_0/2$  の二分周パルス列の中間に振幅の小さなパルスが現れることになる。F-PLD<sub>1</sub> のスペクトル成分を抑圧するための notch フィルタを実現できれば、完全な二分周パルス列が得られる。

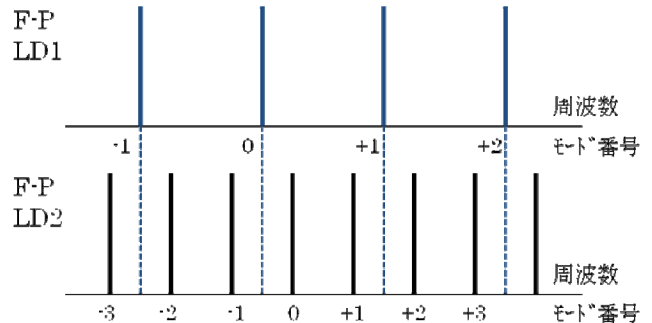


図 2.4 二分周動作における光スペクトルの配置

モード同期パルス列の繰り返し周波数を二通倍する場合も同様に、注入光スペクトル成分を抑圧する notch フィルタの実現が望まれる。

以上のように、全光制御モード同期法においては、波長可変の帯域除去フィルタや notch フィルタを実現することが重要な課題である。ここで、帯域除去フィルタは notch フィルタと帯域通過フィルタを組み合わせれば実現可能であること、および、帯域通過フィルタは市販品で入手可能であることを考えると、波長可変 notch フィルタの実現に注力すればよい。

## 3. 帯域阻止光フィルタ

ここでは検討条件を明確にすると共に、いくつかのフィルタ構成法について行った実験結果を述べる。

帯域阻止フィルタの検討条件は次の二点である。

- (1)共振器長 150 $\mu\text{m}$ ~1,200 $\mu\text{m}$  の F-P LD に適用可能。
- (2)モード同期パルス列の分周・乗倍にも適用可能。

(1)の条件は、電気的処理では困難な繰り返し周波数 35GHz~280GHz を狙うためのものである。(2)の条件は、より汎用性のあるフィルタを開発するためのものである。

前述のように、これらの条件を満たす波長可変リッジフィルタを実現すればよいことになる。

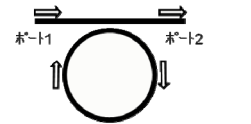

### 3.1 基本検討

フィルタ構成法には種々あるが<sup>8-10)</sup>、上記の検討条件を満たすものは、表 3.1.1 に示すリング共振器型と Mach-Zehnder 干渉計型の二種類である。

リング共振器型は、短リング長で、且つ、低リング損失を実現できれば、フィネス大で FSR 大とすることができる。このため、マイクロリング共振器としての応用が広く研究されているが、本研究の目的にはリング長を可変とすることが不可欠である。可変リング長としても、リング共振器本来の特長が生かせるかどうかを実験で確かめる必要がある。

一方、Mach-Zehnder 型では、フィネスは最大でも 2 と小さいが、アーム長差を小さくすれば FSR 大とすることができる。リング共振器型の FSR がリング長そのものに依存するのに対して、Mach-Zehnder 型の FSR はアーム長に依存するのではなく、アーム長差に依存する点が大きな違いである。また、この構成法では、アーム損失がアンバランスにならないように注意すれば、アーム損失の大きさそのものは大きな問題にならないという利点もある。

いずれの構成法も光の干渉を利用しているため、周囲温度の変化による光学長の変動を補償する手段が不可欠である。光フィルタとして集積化する場合は基板温度の精密制御で対処可能であるが、個別光部品を組み合わせる場合には温度制御のみで対処することは不可能である。そこで、参照光を光フィルタに入力して能動制御する手法を検討した。その詳細は 3.3 節で述べる。

構成	フィネス	FSR	所要条件	光学長制御
<b>リング共振器</b> 	大	小	短リング長 低リング損失	参照光入力による能動制御
<b>Mach-Zehnder干渉計</b> 	小	大	小アーム長差	

FSR:フリースペクトルレンジ

表 3.1.1 帯域阻止フィルタの基本検討

### 3.2 リング共振器型光フィルタ

実験に用いたファイバリング共振器の構成を図 3.2.1 に示す。ファイバリング共振器は、リング長で決まる周波数間隔で周期的な帯域阻止特性を持つ<sup>2,3)</sup>

外部から F-P LD に注入した cw 光を阻止し、且つ F-P LD の縦モード出力光を通過させるためには、リング一周の光学長を F-P LD の光学長の 4 倍まで可変できるようにする必要がある。共振器長が 150 $\mu\text{m}$ ~1,200 $\mu\text{m}$  の F-P LD を想定すると、必要なリング長の可変幅は 2mm~16mm になる。一方、温度変化によるリング長変動を補償することも必要である。

このように、リング長を mm 単位まで可変できると同時に、数十 nm 単位で制御できることが必要となる。これを実現するために、リングの途中にファイバコリメータを設けて、ファイバコリメータの間隔を mm 単位まで変えられる構成とした。また、ピエゾ素子でリング長に摂動を加えてリング長変動をモータし、ファイバコリメータの間隔を数十 nm 単位で制御する方式とした。この目的で、ファイバコリメータの一方を最大移動距離 20mm、分解能 25nm の微動台に載せて能動制御する構成とした。

ファイバリング共振器の周波数特性は周期的であるため、F-P LD の中心波長付近で縦モードが通過帯域に入るように設定しても、導波路分散によっては、周辺縦モードが阻止域にかかる可能性がある。通過帯域幅が F-P LD の縦モード波長間隔と同程度である波長可変の帯域通過フィルタ (BPF) をファイバコリメータの間に挿入すれば、BPF の通過帯域内の波長成分に対してのみファイバリングが作用するようにできる。現実の小型で低損失な波長可変 BPF の通過帯域幅は 1nm 以上であるから、この手法は共振器長 300

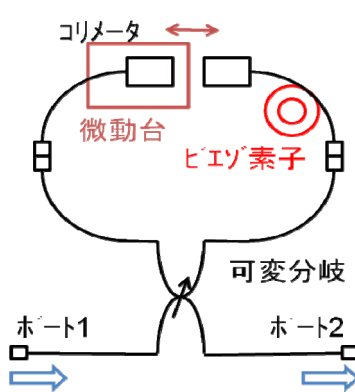


図 3.2.1 リング共振器の構成

$\mu\text{m}$  以下の F-P LD に対して有効である。

図 3.2.2 にピエゾ素子によるリング長摂動<sup>11)</sup>の例を示す。0.9mm  $\phi$  被覆の偏波保持ファイバを 15mm  $\phi$  のピエゾ素子 (ピエゾメカニクス社製 HEST 150/15-8/4) に 1/3 周だけ接着した状態で測定した。こ

のピエゾ素子は、電圧を印加すると電圧の符号によらず円周方向には収縮する性質を有するため、リング長摂動の周波数は印加電圧周波数の二倍となる。実験の結果では、リング長変動の補償制御に用いるには 10nmp-p 程度の摂動量で充分であった。

フリースペクトルレンジ (FSR) を広くし、且つフィネスを大きくすることを狙い、偏波保持ファイバで短ファイバリング長の共振器を

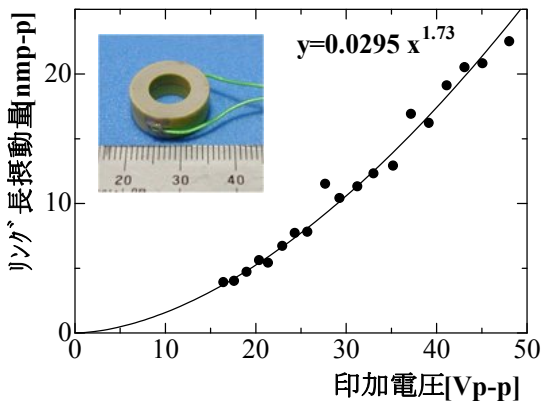


図 3.2.2 ピエゾ素子によるリング長の摂動  
(印加電圧 143Hz、光学長摂動周波数 286Hz)

構成して実験を行った。今回の実験ではコメータの間に BPF は挿入していない。ファイバリングは長さ 39.4cm のファイバ部と、ファイバコメータ間の空隙 1.7cm で構成されており、FSR は約 500MHz であった。カップラの出口からリングを一周してカップラに戻るまでの損失は 1.8dB であった(二箇所のコネクタ損失 0.2dB×2 を含む)。

狭スペクトル線幅の波長可変 LD を用いてファイバリング共振器の透過周波数特性を測定した結果を図 3.2.3 に示す。カップラでの透過パワー：結合率  $\rho = \rho : (1 - \rho)$  の比率を最適化することにより、10dB 程度の抑圧が可能である。ただし、FSR に対する通過域周波数幅の相対値はカップラの分岐比率を調整してもほとんど変化せず、フィネスは約 5 である。鋭い

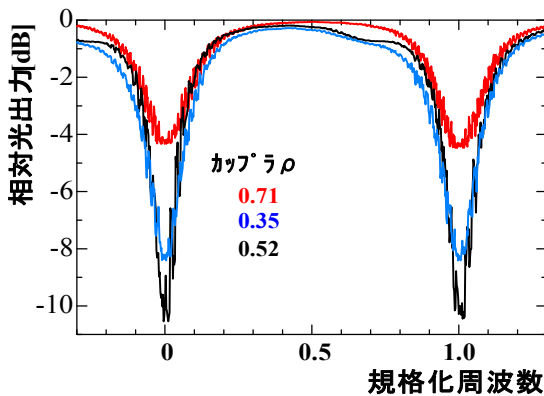


図 3.2.3 リング共振器の周波数特性

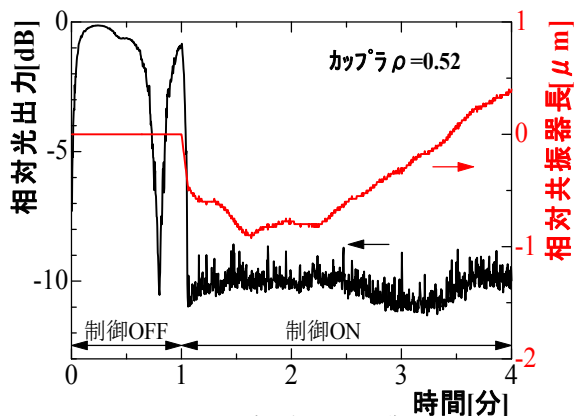


図 3.2.4 リング共振器の制御

帯域阻止特性を実現するためには、リングの一巡損失を小さく抑えることが不可欠であるが、本実験系のようにファイバコメータとコネクタ二箇所がリング中にある場合は 1dB 以下に抑えることは困難であった。

カップラの透過率比  $\rho$  を最適近辺に設定して、リング長制御を行った。圧電素子で 10nmp-p@286Hz のリング長摂動を加え、ファイバリング共振器の出力が最小となるようにファイバコメータの間隔を 25nm ステップで制御した(制御系の詳細については、3.3 節を参照)。制御結果を図 3.2.4 に示す。

温度などによるリング長変動が補償されていることが分かる。光出力には最大で 2dB 程度のスパイク状変動がみられるが、この原因は主に振動によるものである。除振対策や、一秒あたりの制御回数(現状 5 回/秒)、コメータ間隔の制御ステップの大きさ(現状 25nm)など、制御に関するパラメータを最適化することにより、小さくできる可能性がある。

リング共振器型フィルタの特長は大きなフィネスが得られることであり、マイクロリングとすれば広い FSR も可能である。しかし、共振器長を mm 単位で可変にしようとする、リング損失が大きくなり、且つ FSR も狭くなって本来の特長が損なわれてしまうことになる。

### 3.3 Mach-Zehnder 型光フィルタ

実験に用いた Mach-Zehnder 型フィルタの構成を図 3.3.1 に示す。このフィルタは、アーム 1 とアーム 2 の光学長差で決まる周波数間隔で周期的な帯域阻止特性を持つナッチフィルタとして動作する。阻止域における抑圧量を大きくするためには、光分岐の分岐比を 1:1 に合わせ、且つ、二つのアームの損失を揃えることが必要となる。

本実験では市販光部品をなるべくそのまま使用することとし、アーム 1 とアーム 2 はそれぞれ約 3m、その光学長差は微動台の移動可能距離である 2cm 以内となるように設定した。参照光のパワーモータ(ポート 3)や LD 出力光のスペクトル線幅モータ(ポート 2)に用いる二個の光アイソレータ(同図中の橙色で示した)を除いて、すべて偏波保持の光部品で構成してある。

前述のように、アーム長差の調整には二種類の機能が要求される。一つは、フィルタの FSR と F-P LD の縦モード周波数間隔とを整数比に調節するためのものであり、mm 単位までの調節機能が必要である。もう一つは、光の干渉位相差を調節して出力ポートを制御するためのものであり、数十 nm 単位での調節が必要となる。これを実現するために、リング共振器の場合と同様に、一方のアームの途中にファイバコメータを設けて、ファイバコメータの間隔を mm 単位まで変えられる構成とした。また、ピエゾ素子でアーム長に摂動を加えてアーム長変動をモータし、ファイバコメータの間隔を数十 nm 単位で制御する方式とした。この目的で、ファイバコメータの一方を最大移動距離 20mm、分解能 25nm の微動台に載せて能動制御する構成とした。

本実験では、参照光を用いてアーム長を能動制御する手法を採った。この原理は次のとおりである。まず、使用



する FSR になるようにアーム長差を調節する。次に、波長可変 LD の出力を参照光としてポート 1 に入力し、ポート 4 から出力されるようにアーム長を能動制御する。

現実的には、ポ

ート 3 からの参照光出力が最少となるようにアーム長を制御する方が高感度となる。そこで、ポート 3 に光パワーメータを接続し、光パワーが最少となるように、ロックインアンプで微動台を分解能 25nm で制御する。これにより、温度変動等によるアーム長差の変化は 25nm 程度の精度で補償される。同時に、初期に設定した FSR の値も温度変化に左右されることなく維持される。参照光には、抑圧したい光信号を用いる。例えば、全光制御モード同期法における注入 cw 光を分岐して用いばよい。

参照光を用いてアーム長を能動制御した状態で、F-P LD の出力光をポート 4 に入力する。ポート 4 からポート 1 への分岐・合波の位相条件は、ポート 1 からポート 4 へのそれと同じであるから、F-P LD の出力に含まれる注入 cw 光成分はポート 1 側のみ出力され、ポート 2 側には出力されない。

一方、F-P LD の縦モード成分がポート 2 側のみ出力され、ポート 1 側には出力されないようにするには、次の条件が必要である。

$$\Delta f_{LD} = (2k - 1)FSR_{MZ} \quad (3.3.1)$$

ここで、 $\Delta f_{LD}$  は F-P LD の縦モード周波数間隔、 $k$  は自然数、 $FSR_{MZ}$  は Mach-Zehnder 型フィルタの FSR である。この条件を光学長で表すと次のようになる。

$$\Delta L_{MZ} = 2(2k - 1)L_{LD} \quad (3.3.2)$$

ここで、 $\Delta L_{MZ}$  は光学長で表した Mach-Zehnder 型フィルタのアーム長差、 $L_{LD}$  は光学長で表した F-P LD の共振器長である。例えば、共振器長  $L=300\mu\text{m}$  の F-P LD では、屈折率を 3.5 とすると、 $L_{LD}=1.05\text{mm}$  となり、 $\Delta L_{MZ}=2.1\text{mm}$ 、 $6.3\text{mm}$ 、 $10.5\text{mm}$ 、... に設定する必要がある。

まず、アーム長の能動制御の特性を調べるために、ポート 1 から参照光のみを入力した状態で、ポート 3 の光出力パワーが最少となるように制御した。結果を図 3.3.2 に示す。最初の 3 分間は制御を OFF してある。制御 OFF の状態では、室温変化によって、ポート 3 の光出力パワーが時間とともに最大値 -12dBm から最小値 -27dBm まで大きく揺らぐ。しかし、制御 ON にすると、-25dBm 近辺の値に抑えられ

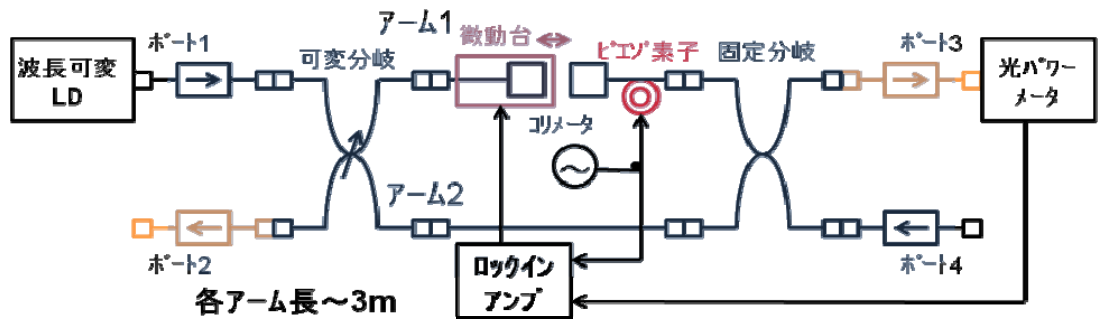


図 3.3.1 Mach-Zehnder 型フィルタの構成と制御系

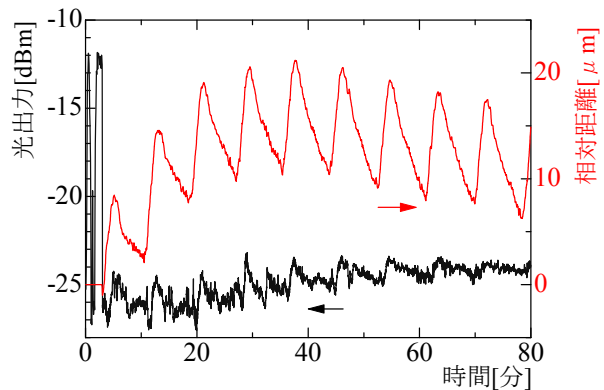


図 3.3.2 Mach-Zehnder 型フィルタの制御 (最初の 3 分間は制御 OFF)

ていることが分かる。この実験ではエアコンの動作によって、周期が約 10 分で室温が変化しており、それに伴う  $10\mu\text{m}$  程度の光学長変動が補償されている。

制御 ON の状態でも、ポート 3 の光出力パワーは数秒単位で数 dB 揺らいでいる。この原因は、アーム長制御を 25nm 単位でステップ的に行っていること、振動があること、および波長可変 LD の位相跳びがあること、などの複合的な原因によるものである。また、数十分単位でのゆっくりとした光出力パワーの変動は、光分岐の分岐比が温度によって変化するためである。

コリメータ間隔を変化させて FSR を測定した結果を図 3.3.3 に示す。波長 1558nm の参照光でアーム長を能動制御しながら、ポート 4 に一定出力パワーの波長可変 LD を接続してポート 2 の出力パワーの波長依存性を調べた。

コリメータ間隔を変えることにより、FSR は 48GHz から 660GHz まで変化している。本実験では Mach-Zehnder 干渉計のアーム長を 2cm 以内で合わせてあるため、コリメータ間隔を変えた場合の FSR 変化は大きくなっている。FSR から求めたアームの光学長差は、同図(e)のようにコリメータ間隔と直線的な関係にある。この図から所望の FSR に設定するためのコリメータ間隔を大雑把に決定することができる。FSR を特定の F-P LD の縦モード周波数間隔に精密に合わせるための手法は 4 章で述べる。

図 3.3.3(a)-(d)において、阻止波長における抑圧比は波長とともにゆっくりと変化している。また、同図(d)では

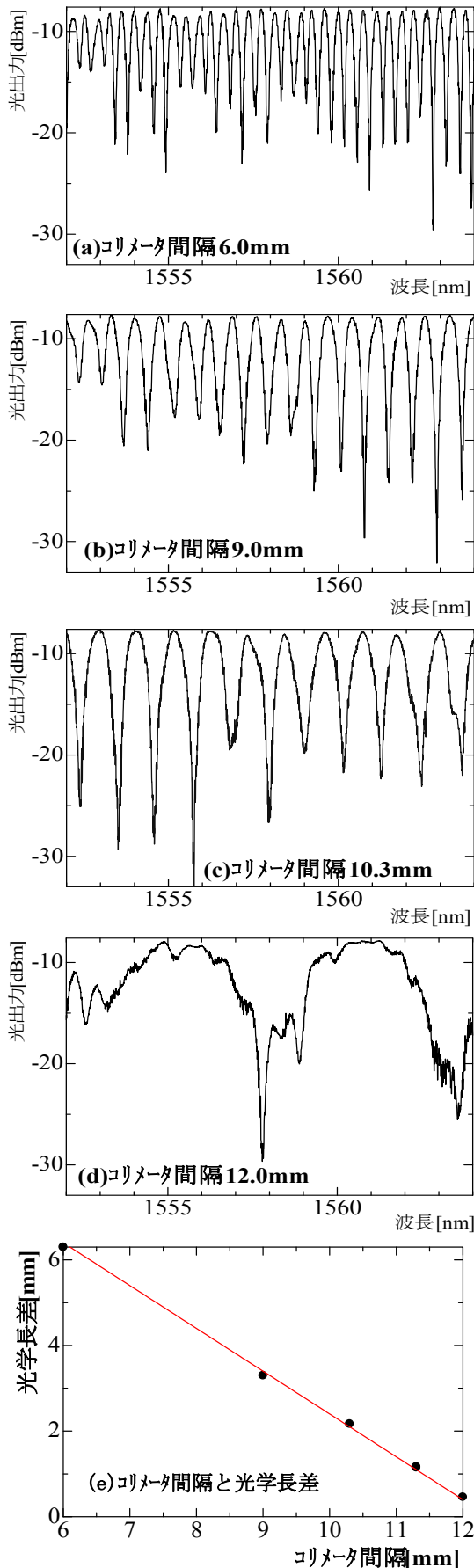


図 3.3.3 コリメータ間隔によるフリースペクトルレンジの変化 (参照光波長 1558nm で能動制御)

通過波長においても光出力が波長とともに不規則に変化しているのが見られる。これらの原因は、用いた波長可変 LD のスペクトル線幅が、設定波長によって 300kHz~数 MHz の間で大きく変化したためである。光源のスペクトル線幅の変化は抑圧比に対しては特に大きな影響を及ぼす。

波長可変 LD のスペクトル線幅の変化を考慮すると、今回の測定では、阻止波長における抑圧比は 10dB 程度であった。この値を改善するためには、Mach-Zehnder 干渉計の各アームの特性をよりバランスさせることが必要である。今回の実験系では一方のアームにのみファイバコリメータ(挿入損失~1dB)を挿入しているため、アーム損失はアンバランスになっている。損失もバランスさせる機構が必要である。

#### 4. Mach-Zehnder 型フィルタによる F-P LD のスペクトル整形

前節で述べた Mach-Zehnder 型フィルタを用いて F-P LD のスペクトルを整形する実験を行った。用いた F-P LD は 1.55  $\mu\text{m}$  帯の共振器長 300  $\mu\text{m}$ 、閾値電流( $I_{th}$ )10mA のものである。

今回は F-P LD に cw 光を注入せず、図 4.1 に示すように、F-P LD の外部で合波し、擬似的なモード同期状態の光スペクトルとして用いた。F-P LD の駆動電流を  $2I_{th}$  とし、その主縦モードの中心波長 1553.28nm に波長可変 LD を設定した。波長可変 LD の出力を分岐して、一方を Mach-Zehnder 型フィルタの参照光として用いた。もう一方は F-P LD の出力光と合波して擬似モード同期状態の光スペクトルとし、Mach-Zehnder 型フィルタの入力光とした。フィルタの入力光スペクトルを図 4.2(a)に示す。波長可変 LD のパワーは主縦モードのパワーと同程度になるように設定してある。

F-P LD の発振中心波長近辺における縦モード周波数間隔  $\Delta f_{LD}$  を測定し、(3.3.1)で  $k=1$  とおいた  $FSR_{MZ} = \Delta f_{LD} / (2k-1) = \Delta f_{LD}$  になるように図 3.3.3(e)を使って Mach-Zehnder 型フィルタのコリメータ間隔を設定した。実験では、 $FSR_{MZ} = \Delta f_{LD} = 142\text{GHz}$ 、光学長で表した Mach-Zehnder 型フィルタのアーム長差  $\Delta L_{MZ} = 2.1\text{mm}$  であった。このように FSR を設定してから参照光を入力し、能動制御を開始した。

Mach-Zehnder 型フィルタの出力光のスペクトルを図 4.2(b)に示す。図に示された 18 本の F-P LD の縦モード成分については相対強度がほぼ変化していないのに対して、注入 cw

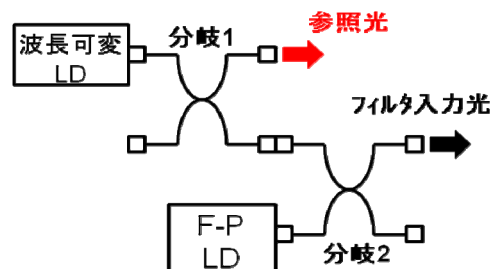


図 4.1 疑似モード同期状態のスペクトル合成系

光に相当する参照光の強度は、相対的に 10dB だけ抑圧されていることが分かる。

FSR の設定許容範囲を調べるために、アーム長差を  $\Delta L_{MZ} = 2.1\text{mm}$  を中心にして 0.1mm ステップで変化させ、フィルタの入出力における F-P LD の縦モードスペクトルを比較した。その結果、最適値  $\pm 0.05\text{mm}$  以内であれば、注入 cw 光を抑圧し、且つ、F-P LD の縦モードの相対スペクトル強度には変化がないと見なせることが分かった。FSR に換算すると、 $FSR_{MZ} = 142\text{GHz} \pm 3\text{GHz}$  になる。

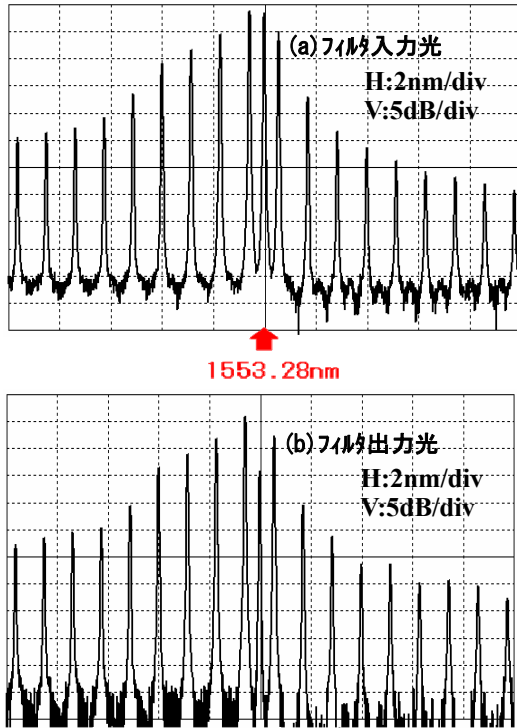


図 4.2 Mach-Zehnder フィルタによる F-P LD のスペクトル整形

次に Mach-Zehnder フィルタのフリースペクトルレンジ  $FSR_{MZ}$  を精密に調節する手法を実験検討した。与えられた F-P LD の縦モード周波数間隔  $\Delta f_{LD}$  に対して、(3.3.1) の関係を満たすよう  $FSR_{MZ}$  を調整せねばならない。上記のように、図 3.3.3(e) で求めたコリメータ間隔に設定するという手法でも大きくずれることはないが、より正確に設定する方法を開発しておくことが望ましい。

$FSR_{MZ}$  が(3.3.1)の関係から少しずれると、注入 cw 光(=参照光)の波長から離れた周辺の縦モード成分は、Mach-Zehnder フィルタの通過域から阻止域へ入り込む。したがって、これらの周辺縦モード成分のフィルタ出力パワーをモニタすれば  $FSR_{MZ}$  の精密調節ができると期待される。

参照光波長を 1553.2nm として能動制御し、この状態でコリメータ間隔を  $10.3\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$  の範囲で掃引したときのフィルタ出力パワーの変化を観測した。コリメータ間隔を掃引する際には、コリメータ間隔の変化分が能動制御によって補償されることがないように、ほぼ cw 光波長に等しいステップで短時間に変化させ、その後に能動制御系が定常状態に落ち着く

まで待つてから光パワーを測定するという手順で行った。尚、コリメータ間隔=10.3mm は、 $FSR_{MZ} = \Delta f_{LD}$  の条件を満たす位置である。結果を図 4.3 に示す。

Mach-Zehnder フィルタの出力の全パワーをモニタした(b)の場合でも、コリメータ間隔=10.3mm を中心とした鈍いピークがみられる。一方、中心波長から 4nm だけ短波長側にずらした通

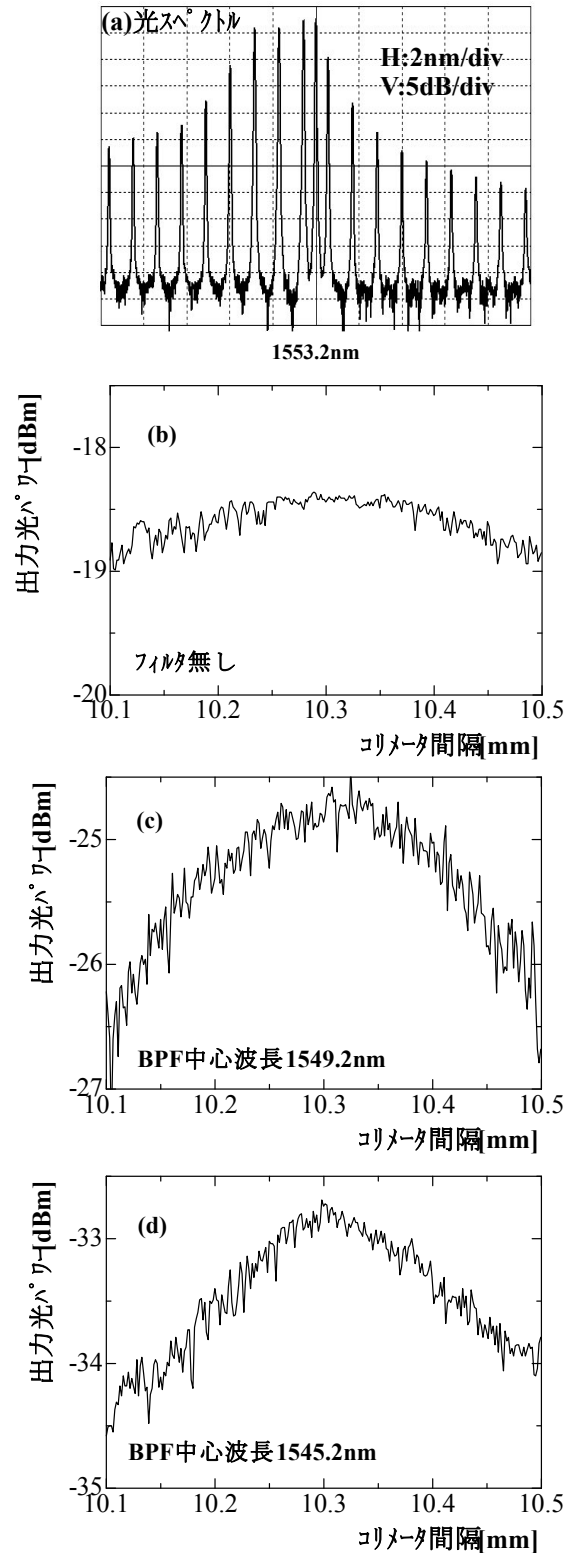


図 4.3 光パワーモニタによる Mach-Zehnder フィルタのフリースペクトルレンジ調節法

過帯域幅 3nm の帯域通過フィルタを通して光パルスをモダした場合(c)では、鋭いピークが現れる。帯域通過フィルタの中心波長を 8nm だけ短波長側にずらした場合(d)では、より鋭いピークが現れている。

以上のように、Mach-Zehnder フィルタの出力における F-P LD の周辺縦モードの光パルスをモダすることによって、Mach-Zehnder フィルタの FSR を精密調節できることが分かった。

## 5. まとめと今後の予定

cw 光注入による多縦モード発振半導体レーザの全光制御モード同期法について、出力光に含まれる注入 cw 光を抑圧するための帯域阻止フィルタを検討した。リング共振器型と Mach-Zehnder 型の二種類を実験検討した結果、後者を能動制御して用いる手法が有効であることが分かった。このフィルタは、共振器長  $150\mu\text{m}\sim 1,200\mu\text{m}$  の半導体レーザに適用できるよう、広いワイドスペクトルレンジ可変幅を有すると共に、フィルタ内部での損失に対する所要条件が緩いという特徴を有する。

現状では抑圧量が 10dB 程度であるので、干渉計のアーム損失をバランスさせる手段を付け加えてフィルタとして完成させ、全光制御モード同期法の実験系に使用していく予定である。

## 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", *Appl.Phys.Lett.*, vol.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) 鈴木基仁,水池秀仁,森正和,西澤典彦,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,第 37 号 B,pp.179-189 (2002).

4) 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,第 42 号 B,pp.43-53 (2007).

5) 森正和,伊藤樹,南紀太郎,後藤了祐,丸橋大介: Fabry-Perot 型半導体レーザへの cw 光注入による縦モード間の注入動同期過程の観測,2007 年電子情報通信学会ソサイエティ大会,C-4-10 (2007).

6) 森正和,伊藤樹,後藤了祐,丸橋大介: 多縦モード発振半導体レーザのスペクトル線幅一括モダに用いる帯域阻止フィルタの検討,2008 年電子情報通信学会総合大会,C-4-25 (2008).

7) 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).

8) 岡本勝就: 光導波路の基礎(コロナ社,1992),pp.160-163.

9) G.P.Agrawal: Lightwave technology(Wiley,2004),pp.71-85.

10) 島田禎晉監修: コヒーレント光通信(電子情報通信学会,1988),pp.52-59.

11) G.Nykolak, M.R.X.de Barros, T.N.Nielsen, and L.Eskildsen, "All-Fiber Active Add-Drop Wavelength Router", *IEEE Photon.Technol.Lett.*, vol.9, No.5, pp.605-606(1997).

(受理 平成 20 年 3 月 19 日)