

変調サイドバンド光注入による Fabry-Perot LD の縦モード間注入同期

Injection Locking among Longitudinal Modes in Fabry-Perot LDs by Modulation Sidebands Injection

森 正和†, 棚森 鶴‡
Masakazu MORI, Tazuru TANAMORI

Abstract: A method to mode-lock Fabry-Perot laser diodes (F-P LDs) by modulated light injection is proposed. The principle is based on the cascaded injection locking among longitudinal modes in F-P LDs. The structure and the operation characteristics of the modulation-sideband generator are described. Some preliminary experiments done with 1.55 μm F-P LDs show the occurrence of the cascaded injection locking among several longitudinal modes.

1. はじめに

光通信システムの伝送容量は、波長多重技術によって飛躍的に増大した。その結果、光ファイバで伝送可能な帯域は使い尽くされつつあり、無線技術に見られるような新たな変復調技術の開拓による周波数利用効率の向上に大きな期待が寄せられている¹⁾。しかし、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、依然として重要な課題である。基礎となる技術は、基準クロック信号としての安定で且つ制御性の良い、高繰り返し光パルス列の発生である。また、この基準クロック信号に同期した光信号や電気信号を発生する技術を同時に開発せねばならない。繰り返し周波数の当面の目標は、実用光通信システムにおける最高クロック周波数の4倍が目安となるため、繰り返し周波数 100GHz 以上の光パルス列発生、およびそれに同期した低繰り返し光パルス列発生を実現することが重要である。

筆者らは、cw 光を多縦モード発振のファブリ・ペロー型半導体レーザ (F-P LD) に注入することによる「全光制御モード同期法」を提案し、その動作機構の解明と改良を進めてきた^{2)~5)}。この手法によれば、単純構造の F-P LD を用いて、純光学的にモード同期させることが可能である。この手法で波長 1.55 μm 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。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が原理的に可能であることを示した⁴⁾。

しかし、この手法で発生するモード同期パルス列の繰り返し周波数は F-P LD の単体特性によって決定されるため、安定度は低く、通信や信号処理に適用できる品質ではない。また、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問題があった。これらの理由により、モード同期パルス列の分周や通倍など、この方式の特長を活かせる応用展開へと進められない状況にあった。

上記の問題を解決するために、cw 光に変調を加え、主縦モードの周波数位置にサイドバンド成分を発生させて注入する「変調サイドバンド光注入法」の検討を進めた⁶⁾⁷⁾。本手法によれば、cw 光注入による全光制御モード同期法の特長を引き継ぎながら、マイクロ波信号に同期した繰り返し周波数のモード同期光パルス列の発生が原理的に可能である。

本稿では、変調サイドバンド光注入法について、その原理、サイドバンド生成系の構成、およびそれをを用いた実験結果について述べる。

2. 変調サイドバンド光注入法の動作原理

cw 光の周波数を 2 本の主縦モードの中心に合わせて注入する全光制御モード同期法では、まず主縦モードが相互注入同期し、次に隣接縦モードが注入同期する²⁾ という二段階を経る。一般には、外部光を F-P LD に注入すると、キャリア密度が変化するため、F-P LD の発振特性も変化する。主縦モード間の相互注入同期を引き起こさせるために注入 cw 光パワーを上げると、F-P LD の発振特性が変化してしまい、F-P LD の単体特性によってはモード同期しないという問題が起きる。この問題を解決するために、新たに変調サイドバンド光注入法を検討した。

F-P LD 内の非線形光学効果を大きくするには、外部共

† 愛知工業大学 工学部 電気学科(豊田市)

‡ 愛知工業大学大学院 工学研究科(豊田市)

振器を用いて縦モードのスペクトル線幅狭窄化を図ることも有効である⁵⁾。外部共振器は、補助的な手段として変調サイドバンド光注入法にも用いることができる。本稿では、外部共振器なしでの検討結果を述べる。

図 2.1 に変調サイドバンド光注入法における各光成分の周波数配置を示す。周波数 f_c の cw 光に Mach-Zehnder 変調器(M-Z 変調器)で周波数 f_m の正弦波振幅変調を加えて変調サイドバンド成分 $f_c \pm kf_m$ (k は自然数)を発生し、サキュレタを介して F-P LD に注入する。何れかの変調サイドバンド成分の周波数を F-P LD の 2 本の主縦モード周波数に一致させれば(図では $f_c \pm 2f_m$)、主縦モードを位相が揃った状態で注入同期させることが可能である。

全光制御モード同期法では、周波数 f_c の cw 光を介して 2 本の主縦モードを相互注入同期させていた。これに対して本手法は、変調サイドバンド成分により直接に主縦モードを注入同期するものである。主縦モードの注入同期が起きてスペクトル線幅が狭窄化すれば、隣接縦モードの注入同期が継続的に起きて、モード同期に至る。この隣接縦モードの注入同期過程は全光制御モード同期法と同じ動作である。

変調サイドバンド光注入法においては、注入光の変調サイドバンド成分が重要であり、元々の cw 光成分(搬送波成分) f_c は無くてもよい。主縦モードを注入同期させるために必要な変調サイドバンド光パワーは、その縦モードパワーの -20dB 程度である。したがって、搬送波成分を抑圧して注入すれば、被注入 F-P LD の発振特性をほぼ乱すことなく、主縦モードを注入同期させることができる。

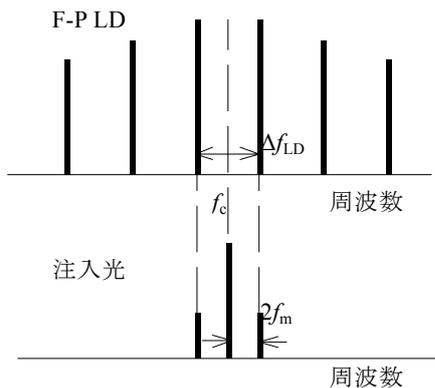


図 2.1 変調サイドバンド光注入の周波数配置

3. 変調サイドバンド光生成系^{6),7)}

変調サイドバンド間の周波数差を大きくして、大きな縦モード周波数間隔にも対応できるようにするため、変調周波数 f_m の高調波成分の大きさと直流バイアス条件との関係を調べた。 $f_c \pm 2f_m$ 成分が最大となるのは、直流動作時の M-Z 変調器出力が最大となる直流バイアスのとき

である。一方、 $f_c \pm 3f_m$ 成分が最大となるのは、直流動作時の M-Z 変調器出力が最小となるときである。代表例を図 2.2 に示す。実験では、スペクトル線幅 200kHz の波長可変光源を用い、変調条件 $f_m=17.85\text{GHz}$ 、+20dBm とし、出力光スペクトルを分解能 0.07nm の光スペアナで観測した。

$f_c \pm 3f_m$ 成分が最大となるように直流バイアスを設定してもそれらは小さく、かつ不要な $f_c \pm f_m$ 成分が大きくなる。一方、 $f_c \pm 2f_m$ 成分が最大になるように直流バイアスを設定すると、それらは比較的大きく、かつ不要な $f_c \pm f_m$ 成分はそれよりも 10dB 以下に抑えることができる。ただし、大きな搬送波成分 f_c が出るので、他の手段を用いて抑える必要がある。

サイドバンド間の周波数差を大きくして、大きな縦モード周波数間隔にも対応できるようにするため、M-Z 変調器の出力が最大となる直流電圧にバイアスを設定して駆動する系とした。このとき、出力光には搬送波成分 f_c 、および偶数サイドバンド成分 $f_c \pm 2nf_m$ (n は自然数)が含まれる。一方、F-P LD の縦モード周波数間隔 Δf_{LD} は、スペクトルホールディングの影響が及ばないようになるべく大きくする必要があり。これらの条件を考慮して、F-P LD には共振器長 600 μm 、および 900 μm の 1.55 μm 帯 F-P LD を用い、 $\Delta f_{LD}=4f_m$ となるよう、M-Z 変調器に加える変調周波数を設定した。

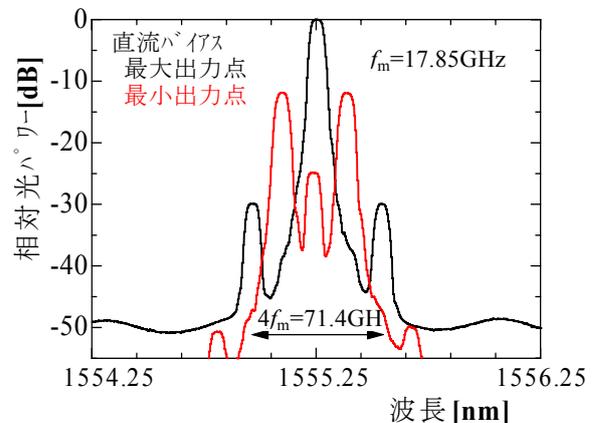


図 2.2 直流バイアスによる変調サイドバンド成分の変化

3・1 搬送波抑圧なし

スペクトル線幅 200kHz の波長可変光源を用い、変調周波数 $f_m=17.85\text{GHz}$ で信号源の最大出力(+20dBm)を M-Z 変調器に加えて変調した。出力光スペクトルを光スペアナ(分解能 0.07nm)で観測した例を図 2.2 に示す(同図の直流バイアスを最大出力点に設定した場合)。搬送波成分 f_c に対するサイドバンド成分 $f_c \pm 2f_m$ の相対パワーは -30dB であった。また、サイドバンド成分 $f_c \pm f_m$ はこれよりも約 10dB 小さかった。これらのデータから M-Z 変調器の半波長電圧 V_π を見積ると、 $V_\pi=10.0\text{V}@17.85\text{GHz}$ となった。

変調サイドバンド光注入による Fabry-Perot LD の縦モード間注入同期

信号源出力を+25dBm まで上げることができれば、搬送波成分 f_c に対するサイドバンド成分 $f_c \pm 2f_m$ の相対パワーを -20dB にできる。現状の信号源出力(+20dBm)では搬送波成分が相対的に大きいため、被注入 F-P LD の発振特性を乱さずに主縦モードを注入同期させることは困難である。

3・2 搬送波抑圧あり

定偏波ファイバで構成したファイバループミラー⁸⁾の性質を用いて搬送波成分を抑圧する手法を検討した。図 2.3 に構成を示す。定偏波ファイバループの非対称な位置に M-Z 変調器を配置し、入力 cw 光(周波数 f_c)に周波数 f_m の正弦波振幅変調を加える。ファイバループを左に回る光の伝搬方向は電気信号のそれと同じなので、M-Z 変調器で効率よく変調されるが、右に回る光はほとんど変調されずに M-Z 変調器を抜ける。したがって、ファイバカップラの分岐比を調整することにより、搬送波 f_c 成分を抑圧しながら、サイドバンド成分を取り出すことができる。また、直流バイアス V_{dc} の調整により、奇数サイドバンド成分を抑圧できる。

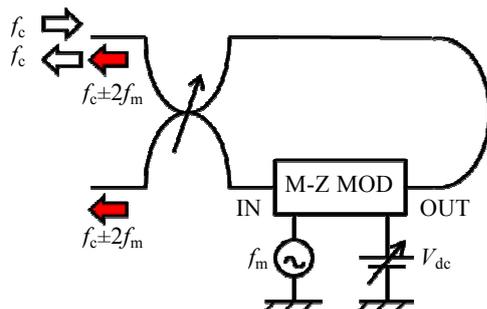


図 2.3 搬送波を抑圧した変調サイドバンド生成系

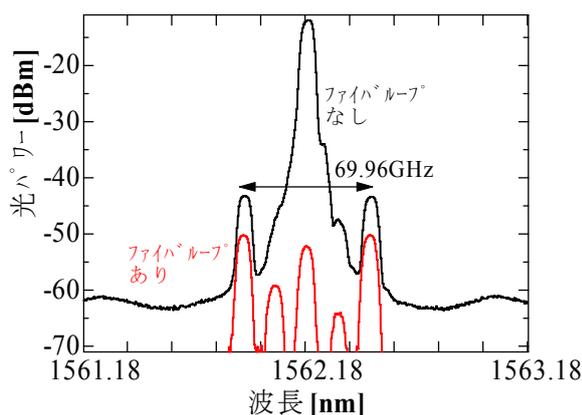


図 2.4 ファイバループによる搬送波成分の抑圧

動作確認のために、スペクトル線幅 250kHz の波長可変光源を用い、変調周波数 $f_m = 11.556$ GHz で信号源の最大出力(+20dBm)を M-Z 変調器に加えて変調した。出力光スペクトルを光スペアナ(分解能 0.07nm)で観測した結果を図 2.4 に示す。ファイバループにより、搬送波成分 f_c は変調サイドバンド成分 $f_c \pm 2f_m$ と同程度まで抑圧できることが分かる。

この M-Z 変調器を単体で変調周波数 $f_m > 10$ GHz にて駆動すると、出力における変調サイドバンド成分 $f_c \pm 2f_m$ の大きさは搬送波成分 f_c に比べて -20dB 以下であった。したがって、ファイバループで搬送波成分 f_c が最も抑圧されるのはファイバカップラの分岐比が 1:1 に近いときになる。またこのときには、変調サイドバンド成分 $f_c \pm 2f_m$ は、ファイバループが無いときに比べて 6dB 小さくなる。

図 2.4 のように搬送波成分 f_c をサイドバンド成分 $f_c \pm 2f_m$ と同程度まで抑圧できるため、被注入 F-P LD の発振特性を乱さずに主縦モードを注入同期させることが容易になる。

4. 変調サイドバンド光注入実験

F-P LD の選択に際しては、①縦モード間のパワー分布が安定していること、②外部共振器を付加しやすいこと、および M-Z 変調器の性能限界を考慮して、③スペクトル線幅の影響が出ない範囲で縦モード周波数間隔 Δf_{LD} を小さくすること、を重視した。今回は共振器長 600 μ m(端面処理 AR-HR)、および共振器長 900 μ m(端面処理 CL-CL)の二種類の LD を外部共振器なしで用いた。

実験系を図 4.1 に示す。光スペクトラムアナライザ(分解能 = 0.07nm)と confocal F-P 干渉計(Free Spectral Range=300MHz, finesse=250)で F-P LD の発振スペクトル全体を観察しながら注入光の波長と変調周波数の調整を行った。また、波長可変 cw 光源 II とのビームスプリッタから各縦モードのスペクトル線幅を測定した。

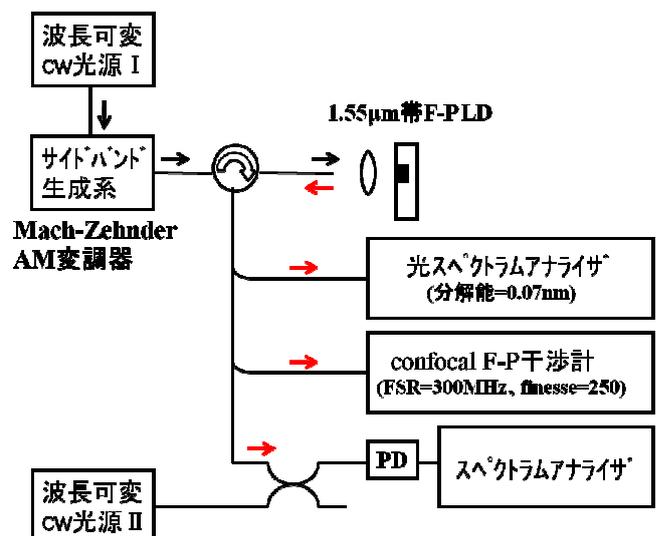


図 4.1 変調サイドバンド光注入の実験系

4・1 共振器長 600 μ m の F-P LD

・搬送波抑圧なし

用いた F-P LD は共振器長 600 μ m、端面処理 AR-HR、閾値電流 21.6mA である。F-P LD 単体でのスペクトル線幅

が狭くなる直流電流を調べ、直流電流 $37.5\text{mA}(=1.74I_{th})$ に設定した。これに変調サイドバンド成分 $f_c \pm 2f_m$ を持つ搬送波周波数 f_c の光を注入した。 f_c は F-P LD の主縦モードの中心に合わせた。

光注入時の F-P LD の出力スペクトルを光スペアナで観測した結果を図 4.2(a) に示す。このときに F-P LD チップに結合する光パワー(殆どが搬送波成分 f_c) は -12.7dBm であった。注入した変調サイドバンド成分 $f_c \pm 2f_m$ のパワーは、搬送波成分 f_c のパワーよりも 30dB 程度低いが、F-P LD の出力では同レベルになっていることが分かる。

図 4.2(b) は confocal F-P 干渉計で F-P LD の出力スペクトルを観測したものである。主縦モード 1 と 2 ($f_c + 2f_m$ と $f_c - 2f_m$)、および注入搬送波成分 0 (f_c) 以外に矢印で示した成分が現れている。これは 2 を励起光、1 を信号光とする四光波混合過程で生ずる成分である。尚、F-P LD 単体でのスペクトル線幅は広く、数 10MHz 以上であった。

以上のように、搬送波成分を抑圧しないでも変調サイドバンド光によって、主縦モードの線幅狭窄化とそれらの四光波混合成分を観測することができる。しかし、注入光の搬送波成分のパワーが大きいため、F-P LD の発振特性が光注入によって影響を受け、主縦モード以外が発振が抑えられる。その結果、隣接縦モードを縦続的に注入同期することは困難となっている。

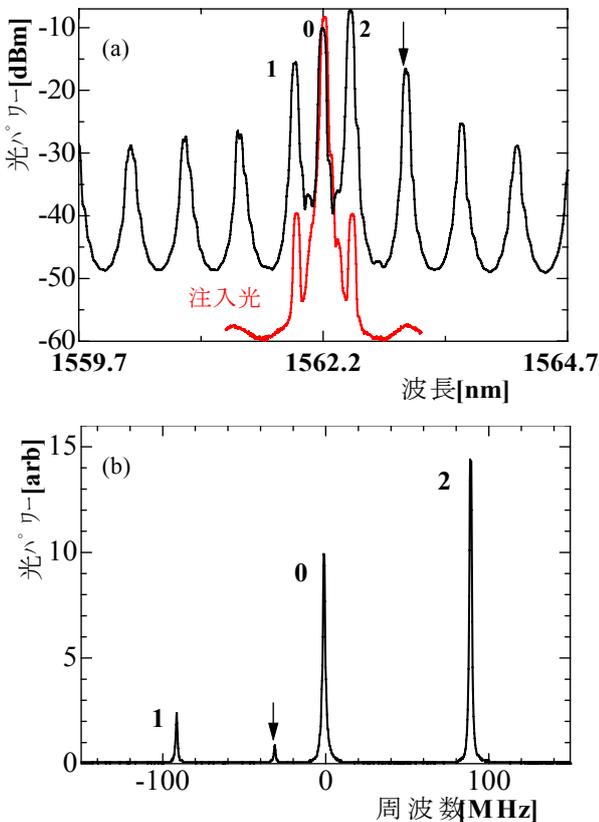


図 4.2 共振器長 $600\mu\text{m}$ の F-P LD (搬送波抑圧なし)

・搬送波抑圧あり

搬送波を抑圧した変調サイドバンド光を注入した結果を図 4.3 に示す。その他の実験条件は図 4.2 の場合と同じである。

図 4.3(a) と図 4.2(a) を比べると、注入光における搬送波成分は 30dB 程度抑圧されていることが分かる。図 4.3(b) は confocal F-P 干渉計で F-P LD の出力スペクトルを観測したものであり、搬送波成分は全く見られない。一方、同図には主縦モード 1 と 2 ($f_c + 2f_m$ と $f_c - 2f_m$) 以外に矢印で示した二つの成分が現れている。これは 2 を励起光、1 を信号光とする四光波混合過程(黒色の矢印)、および 1 を励起光、2 を信号光とする四光波混合過程(赤色の矢印)で生ずる成分である。

搬送波を抑圧することにより、被注入 F-P LD の発振特性に対する影響を抑えながら主縦モードの注入同期を観測することができたが、隣接縦モードの注入同期を観測するまでには至らなかった。この主原因は F-P LD 単体での各縦モードのスペクトル線幅が広いためである。

4・2 共振器長 $900\mu\text{m}$ の F-P LD

共振器長が長くなると、スペクトルホールベニングの影響によって縦モード間のパワー分布が不安定となり、また多縦モード発振が困難になる可能性がある。しかし、縦モードのスペク

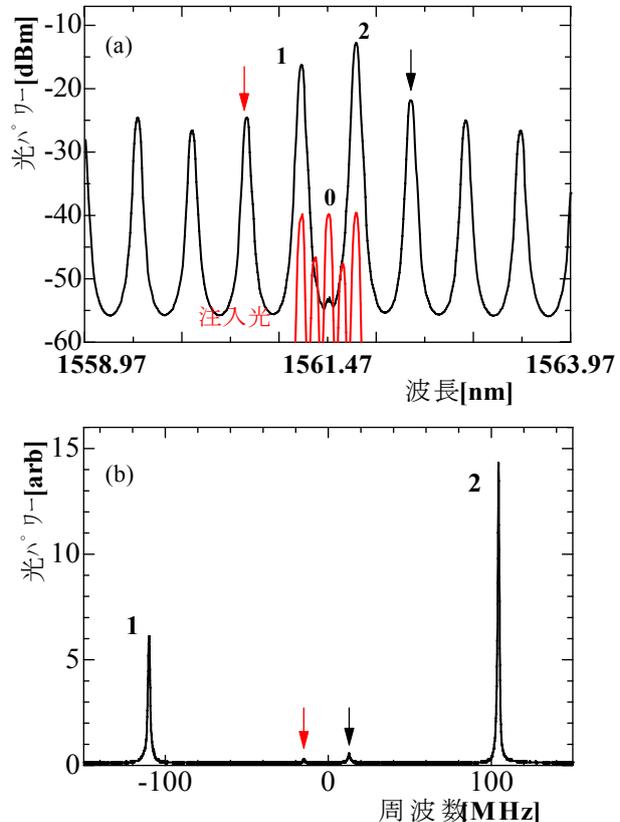


図 4.3 共振器長 $600\mu\text{m}$ の F-P LD (搬送波抑圧あり)

変調サイドバンド光注入による Fabry-Perot LD の縦モード間注入同期

線幅を狭くできるという利点がある。そこで、共振器長 $900\mu\text{m}$ 、端面処理 CL-CL の F-P LD を用いて実験した。用いた F-P LD は閾値電流 $I_{th}=17.1\text{mA}$ の $1.55\mu\text{m}$ 帯 F-P LD である。前節の結果から、搬送波を抑圧したサイドバンド光注入が有効であることが分かったので、その場合に限って実験した。

図 4.4 に F-P LD の主縦モード (-1 と 0) の周波数にサイドバンド周波数 $f_c \pm 2f_m$ を合わせて注入した時のスペクトルを示す。F-P LD 単体での線幅が最も狭くなる直流電流 ($56.3\text{mA}=3.3I_{th}$) に設定し、縦モード周波数間隔 $\Delta f_{LD}=4f_m$ となるよう、M-Z 変調器に加える変調周波数 $f_m (=11.580\text{GHz})$ を設定した。主縦モード (-1 と 0) に結合する光パワーは、結合損失 4.6dB から -48.8dBm と見積もられる。本手法では不要な搬送波成分が抑圧されているため、光注入の有無による縦モード間のパワー分布変化は光スペアナで観測できないほど小さかった。

光注入による各縦モードのスペクトル線幅変化を、confocal F-P 干渉計 ($\text{FSR}=300\text{MHz}$, $\text{finesse}=250$)、および狭線幅の波長可変光源とのビート観測により調べた。その結果、図 4.4(a) のモード -3 ~ +1 で著しいスペクトル線幅の狭窄化が起きていることが分かった。図 4.5 にモード 0 とモード +1 のスペクトル変化の様子を示す。モード 0 とモード -1 の線幅狭窄化は注入した変調サイドバンド光成分で起きるものであり、その他は線幅が狭窄化した縦モード間の四光波混合

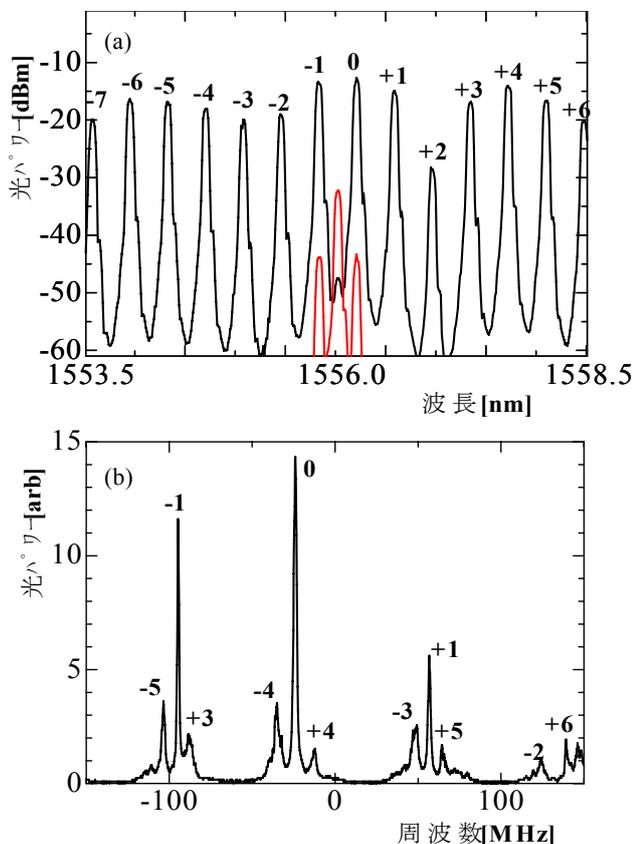


図 4.4 共振器長 $900\mu\text{m}$ の F-P LD
その 1 (搬送波抑圧あり)

過程で生じる成分を介して起きるものである。

スペクトル線幅の狭窄化が長波長側のモード +1 までで留まっているのは、モード +2 のスペクトル強度が極端に低いためである。モード +2 のスペクトル強度が低い理由は不明である。

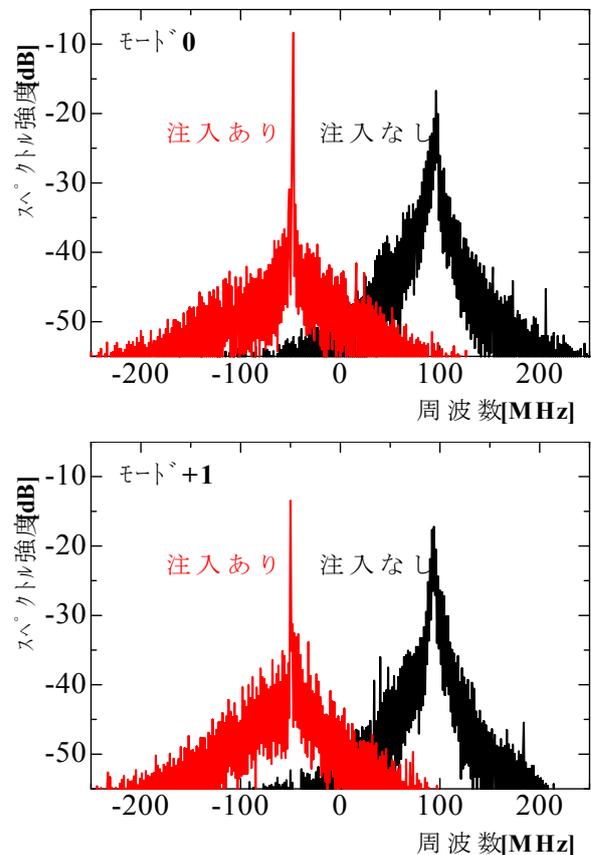


図 4.5 縦モード発振スペクトルの変化

モード +2 の影響を避けるために、注入光の周波数を三縦モード分だけ短波長側にずらして実験を行った。その結果を図 4.6 に示す。このときには、同図のモード -6 ~ -1 で著しいスペクトル線幅の狭窄化が起きていることが分かった。より多くの縦モードでスペクトル線幅の狭窄化を起こさせるためには、変調周波数 f_m を細かく設定することが必要である。また、外部共振器を用いて、変調サイドバンド光を注入しない状態での各縦モードのスペクトル線幅を狭窄化することも有効であろう。

縦モードのスペクトル線幅の狭窄化が起きる様子を図 4.7 に示す。変調周波数 f_m は、図 4.6 のモード -6 ~ -1 で著しいスペクトル線幅の狭窄化が起きたときの値に固定した。搬送波周波数をモード -4 と -3 の中心周波数からずらした値に設定し、徐々にモード -4 と -3 の中心周波数に近づけていった。

モード -3 では、変調サイドバンド光を縦モード周波数の 100MHz 程度以内に近づけると、スペクトルの裾が一旦は広がり、更に近づけると注入同期して狭窄化する。

モード -2 のスペクトル線幅の狭窄化は、モード -3 と -4 の四光波

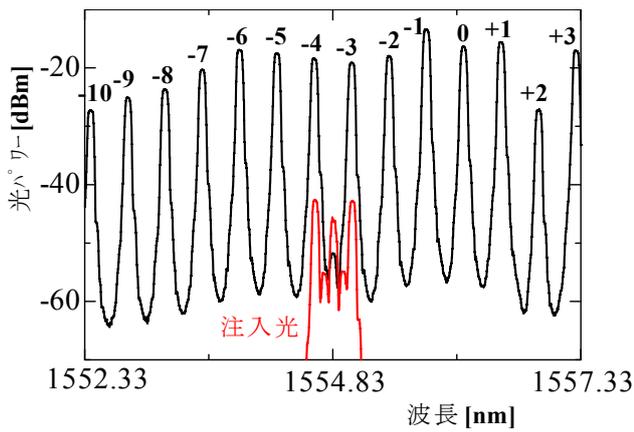


図 4.6 共振器長 900 μ m の F-P LD
その 2(搬送波抑圧あり)

混合過程で生じる成分を介して起きるものであるが、モード-3と同様な変化をすることが分かる。モード-2では、注入同期する直前の状態で線幅がかなり広がる。

5. 結論

F-P LDにcw光を注入してモード同期させる全光制御モード同期法の改良手法として、「変調サイドバンド光注入法」の検討を進めた。cw光に変調を加え、主縦モードの周波数位置にサイドバンド成分を発生させて注入するものである。搬送波成分を抑圧して注入することにより、被注入F-P LDの発振特性を乱さずに、複数縦モードで注入同期を引き起こせることが分かった。外部共振器によ

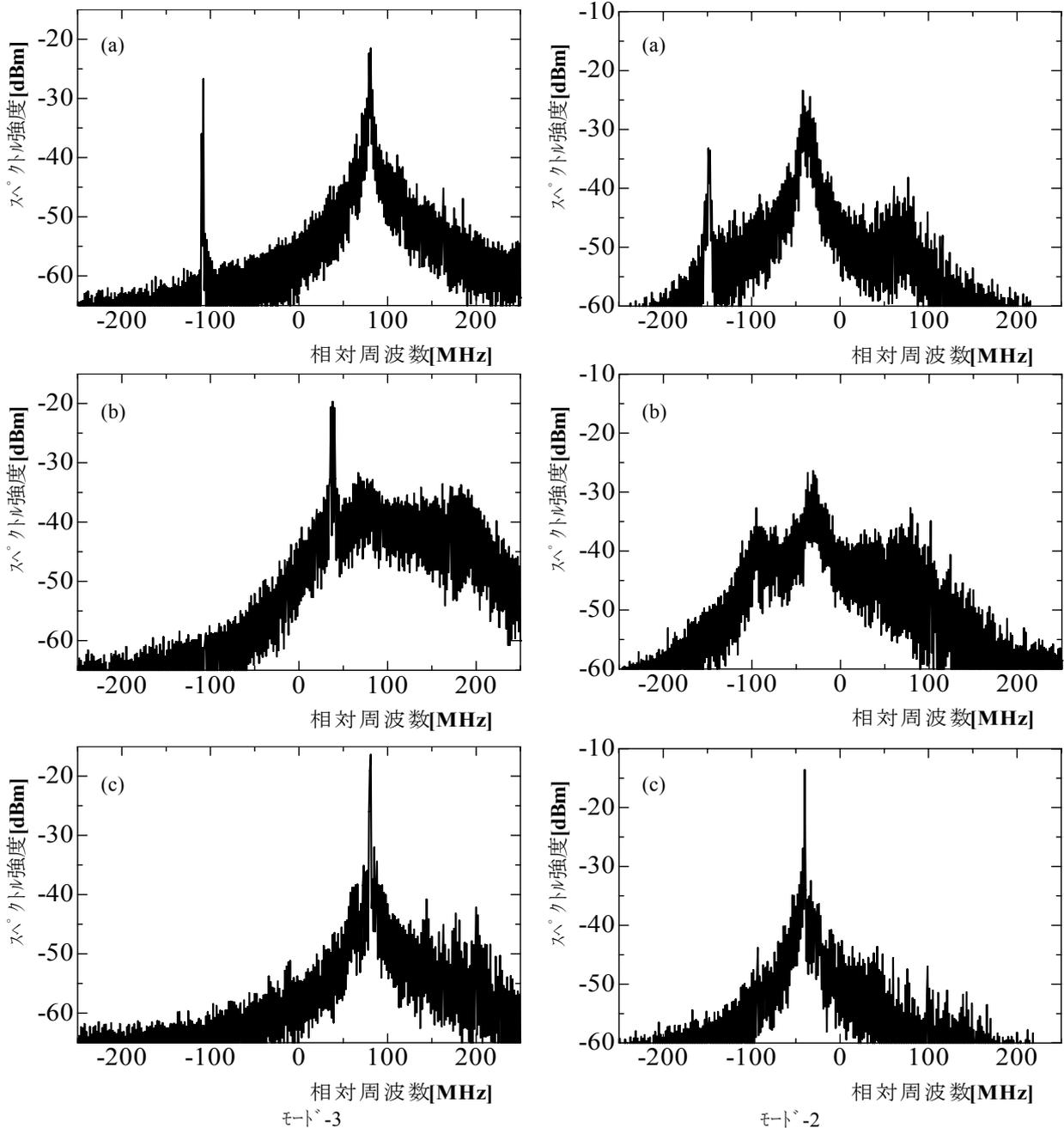


図 4.7 注入同期に至る縦モード発振スペクトルの変化

るF-P LD単体でのスペクトル線幅狭窄化と組み合わせることにより、多数の縦モードで注入同期が起きると期待できる。

参考文献

- 1) 川西哲也, 「光変調技術の最新動向と新展開」, *OPTRONICS*, vol.30, No.651, pp.100-102(2011).
- 2) 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, pp.13-15(1999).
- 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 frequency of two longitudinal modes", *APCC/OECC'99*, vol.2, pp.1329-1331 (1999).
- 4) 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, No.36, pp.209-216(2001).
- 5) 濱田正敏, 水野敏紀, 森正和, 西沢典彦, 後藤俊夫, 後藤了祐, 丸橋大介, 「Fabry-Perot 型半導体レーザ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, No.41B, pp.51-59(2005).
- 6) 森正和, 棚森鶴, 近藤蔵人, 「変調サイドバンドを持つ光注入による Fabry-Perot LD の縦モード間注入同期の実験検討」, 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, C-4-29 (2011).
- 7) 森正和, 棚森鶴, 竹内雅典, 「光注入による Fabry-Perot LD の縦モード間注入同期のための変調サイドバンド生成法」, 電気関係学会東海支部連合大会, E4-2(2011).
- 8) G.P.Agrawal, *Lightwave Technology*, pp.76-81, Wiley, New York(2004).

(受理 平成 24 年 3 月 19 日)