

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

Lasing Characteristics and Application to Division of Repetition Frequency of All Optical Mode Locking of Fabry-Perot Laser Diodes by cw Light Injection

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‡†
Motohiro SUZUKI, Hidehito MIZUCHI, Masakazu MORI, Norihiko NISHIZAWA, Toshio GOTO,
Ryosuke GOTO, Kazuo YAMANE

Abstract: The all optical mode locking of Fabry-Perot laser diodes enable us to generate optical pulse trains at high repetition frequencies. The method is based on the mutual injection locking of two longitudinal modes and successive injection locking of adjacent longitudinal mode. In this paper, the characteristics and applications of the method are investigated. It is found that the reproducibility is improved by using a SELFOC lens as the external cavity. Feasibility of division of the pulse repetition frequency is also quantitatively discussed with phase lock loop model.

1. はじめに

光通信システムにおける伝送速度の向上に伴って、100Gbit/s クラスの光時分割多重方式(OTDM)を想定したパルス光源用の集積型モード同期レーザが盛んに研究されている¹⁾。可飽和吸収体、EA 変調器、DBR 領域を集積した構成であり、高周波を併用したハイブリッドモード同期による高安定性の実現や、DBR 領域を電気的に制御することによる繰り返し周波数の可変幅増大が可能になってきている。また、これら集積型モード同期レーザの縦モードを取り出して、干渉させることにより、THz オーダーの繰り返しビート信号を発生させることも行われている²⁾。

これに対し、我々は、特別構造のデバイスを用いないという方針で、制御性の良い高速パルスを発生させる手法を検討してきた。これまでに、次の二つの手法を実験検討してきた。

(1) Fabry-Perot LD (F-P LD) に cw 光を注入することによる全光制御モード同期法³⁾

(2) 外部反射による F-P LD の自己モード同期現象を用いた手法⁴⁾

(1) では、まず cw 光を励起光として F-P LD 中の二縦モードが相互注入同期し、次に、隣接した縦モードにそれらの四光波混合が注入されて従続的な注入同期が起きると

いう現象が利用される。一方、(2) では、F-P LD の特定縦モードが(1)における cw 注入光の役割を果たすことになる。いずれの手法も、100GHz 以上の高繰り返し光パルス列を発生することが可能である。本研究では、制御性の良さという観点から、(1)の cw 光注入方式を重点的に検討してきた。この方式では、cw 注入光の周波数を変化させることにより、幅 30MHz~50MHz 程度の同期周波数範囲であることが観測されている。この性質は、光 PLL などにおいて、繰り返し周波数を調整する上で有利である。

cw 光注入による全光制御モード同期法に関しては、再現性の向上が最重要課題である。これまでに、結合用セルフオックレンズを外部共振器として用いることにより、再現性の向上、及び同期周波数範囲の拡大が期待できるとの結果が得られている⁵⁾。

本論文では、共振器長 300 μ m の F-P LD を用いて、実験系での外部反射の抑圧法と共に、セルフオックレンズでの反射を積極的に利用する方法を検討した。また、一層の再現性向上を図ることを目的として、外部共振器としての結合用セルフオックレンズの効果をより詳細に調べた。

cw 光注入による全光制御モード同期法の原理を応用した、モード同期パルス列の繰り返し周波数の分周法と通倍法の検討をこれまでに行っている⁶⁾。そこでは、定常位相と動作との関係を調べ、原理的な可能性を調べたのみであった。本論文では、二分周動作に絞って、位相同期ループ(PLL)モデルを用いた定量的な検討を進めた。定常位相を詳細に調べると共に、安定性解析を行った。

† 愛知工業大学 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)

2. 再現性向上の検討

cw 光注入による全光制御モード同期法では再現性向上が最も重要な課題である。これまで、被注入 F-P LD の共振器長や端面処理の状態によっては、パルス光が生成されなかったり、縦モード周波数間隔の整数倍ではない繰り返し周波数でパルス列が発生したり、或いは、注入光の波長を変化させるとパルスの繰り返し周波数が GHz オーダーで変化してしまうという現象が見られた⁷⁾。これらの点を実験で調べ、端面処理は AR-CL(無反射コート-劈開)の方が CL-CL(劈開-劈開)よりもモード同期がかかり易いこと、及び共振器長が $900\mu\text{m}$ 程度にまで長くなると、スペクトルホールバーニングの影響によってモード同期がかかりにくい傾向にあることが分かっている⁵⁾。実際、共振器長 $900\mu\text{m}$ 、端面処理 CL-CL の F-P LD を用いた時は、パルス波形が全く観測されなかった。

cw 光注入による全光制御モード同期法においては、被注入 F-P LD のスペクトル線幅は重要な動作パラメータである。そのため、光学系における光サーキュレータ等での弱い外部反射があると、F-P LD のスペクトル線幅に影響して、パルス列の特性が大きく変化してしまう。そこで、外部反射の影響を抑圧、或いは積極的に利用する方法を検討した。これまでに、LD と出力光学系との結合用セルフオックレンズを外部共振器として用いる手法を考案し、共振器長 $900\mu\text{m}$ 、端面処理 AR-CL の F-P LD を用いて実験検討している⁵⁾。

本論文では、共振器長 $300\mu\text{m}$ の F-P LD で、その端面処理が CL-CL のものと、AR-CL のものについて、フリースペクトルレンジが被注入 F-P LD の縦モード間隔と整数比なるように調整されたセルフオックレンズを外部共振器として用いた場合の効果を調べた。共振器長 $300\mu\text{m}$ としたのは、スペクトルホールバーニング等、他の不確定要素を少しでも減らすためである。

3. 全光制御モード同期の原理

我々の提案している全光制御モード同期の原理を図 1 に示す³⁾。狭線幅 cw 光の周波数を F-P LD の主縦モードの中心周波数に調整し、光アイソレータを介して直流駆動の F-P LD に注入する。このことにより、注入された cw 光は縦モード f_1 と f_{+1} の非縮退四光波混合のポンプ光となり、縦モード f_1 と f_{+1} の四光波混合成分がそれぞれ f_2 と f_{+2} の周波数位置に生成される。この四光波混合成分によって、二つの縦モード f_1 と f_{+1} は相互注入同期する。よって、相対位相は固定され、当該縦モードの線幅は狭窄化される。

一度この相互注入同期が起こると、 f_1 と f_{+1} の二つの縦モード間の四光波混合成分が非縮退四光波混合によって

f_2 と f_{+2} の周波数位置に生成される。その結果、 f_2 と f_{+2} の縦モードはこれらの四光波混合成分によって注入同期される。このように、注入同期された縦モードと隣り合った縦モードの注入同期が次々と起こり、F-P LD は 1F-P モード間隔に等しい周波数でモード同期される。

注入同期を次々と起こすためには、縦モードの線幅を狭くしておく必要がある。そこで、結合用セルフオックレンズを外部共振器として用いる方式を提案した⁵⁾。

本方式は、cw 光注入のみでモード同期させるものであり、電気的な変調周波数の制限を受けない。従って、繰り返し 100GHz 以上の光パルス列の発生が可能である。

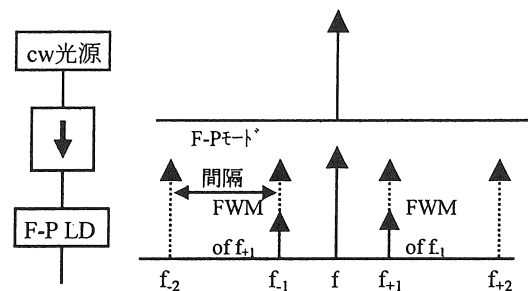


図 1 原理図

4. セルフオックレンズによるスペクトル線幅狭窄化の効果

実験系を図 2 に示す。F-P LD には共振器長 $300\mu\text{m}$ の $1.55\mu\text{m}$ 帯のものを用いた。端面処理は AR-CL、CL-CL の二種類とした。cw 注入光源には、狭線幅 ($\leq 100\text{kHz}$) の単縦モード波長可変 LD を用いた。cw 注入光パワーは、エルビウム添加光ファイバ増幅器 (Er 濃度 500ppm 、 25m) で増幅し、定偏波光サーキュレータ (Kaifa 製、挿入損失 0.6dB 、反射減衰量 $\geq 45\text{dB}$) を用いて F-P LD の出力側端面から注入した。

F-P LD の出力は光サーキュレータを介して、光スペクトラムアナライザ (アンリツ MS9710B、分解能 0.07nm) で発振スペクトルを、confocal F-P 干渉計 (フリースペクトルレンジ $= 2\text{GHz}$) でスペクトル線幅を観測した。また、オートコリレータ (inrad 製、分解能 0.1ps) でモード同期状態でのパルス波形を観測した。

結合用セルフオックレンズは、 $1.55\mu\text{m}$ 用で両端面の 0.25 ピッチのもの (日本板硝子製 H18-S0250-155-ABC、 $\text{NA}=0.60$) を使用し、そのフリースペクトルレンジが F-P LD の縦モード間隔と整数比になるように両端面を研磨して用いた。これにより、セルフオックレンズは F-P LD の外部共振器として作用する。但し、セルフオックレンズと LD 端面との距離は、スペクトル線幅が狭くなるように調整する必要がある。また、公称共振器長が同じ LD であっても、実際の共振器長にはバラツキがあるため、個々の LD に合

わせて研磨しなおした。

セルフオックレンズのフリースペクトルレンジ(FSR)は、狭線幅の波長可変 cw 光源を用いて、F-P 干渉計としてのセルフオックレンズの反射率の波長依存性を測定して求めた。また、セルフオックレンズを研磨し過ぎないように研磨と FSR 測定をこまめに繰り返した。

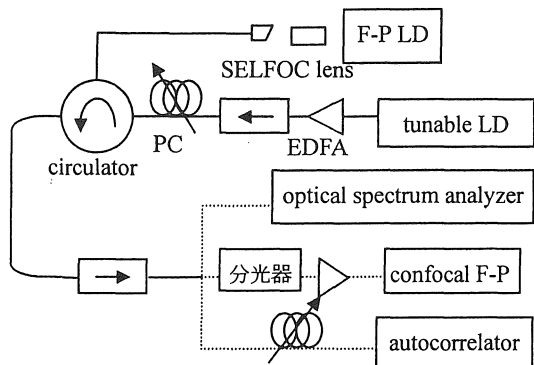


図 2 実験系

4・1 共振器長 300 μm、端面処理 劈開-劈開

共振器長 300 μm、端面処理が CL-CL の F-P LD を用いて外部共振器の効果を調べる実験を行った。

モード同期状態での発振スペクトルを図 3、オートコリレータ出力波形を図 4 に示す。F-P LD の直流電流は閾値電流の 9.1 倍である。また、セルフオックレンズの反射率の波長依存性を図 5 に示す。これから、セルフオックレンズの FSR は 23.2GHz と求められた。一方、F-P LD の縦モード間隔は 139.3GHz であり、セルフオックレンズの FSR との比は整数(=6.00)となっている。

パルス列の繰り返し周波数は F-P LD の縦モード周波数間隔に等しい 139GHz であり、オートコリレータ出力の半値全幅は 2.9ps である。パルス振幅は 1 パルスおきに大きくなっており、このことから、cw 注入光と F-P LD の縦モードの相対位相が固定されていることが分かる³⁾。パルス列の消光比は、あまり良くないが、これは、端面処理が CL-CL であるために注入光の影響を受けにくいからと考えている。

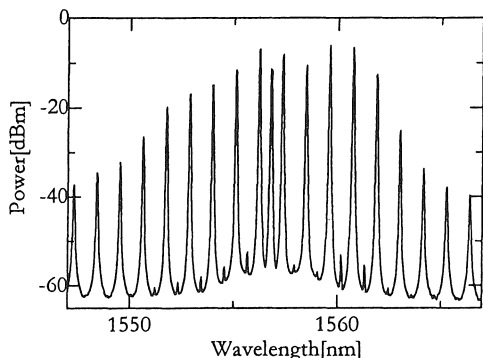


図 3 モード同期時の発振スペクトル(300 μm, CL-CL)

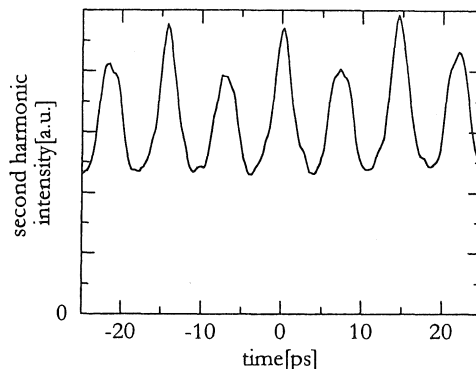


図 4 モード同期時のパルス波形(300 μm, CL-CL)

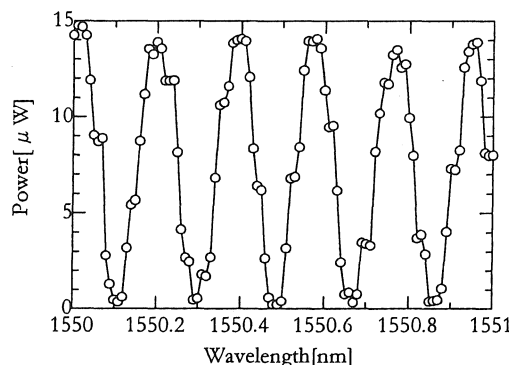


図 5 研磨したセルフオックレンズの反射率の波長依存性

この F-P LD では、外部共振器がない状態では cw 光注入による全光制御モード同期は観測されていない。外部共振器を設けることにより、初めてモード同期が起きる。

4・2 共振器長 300 μm、端面処理 AR コート-劈開

外部共振器がある状態で、共振器長 300 μm、端面処理が AR-CL の F-P LD のモード同期状態での発振スペクトルを図 6、オートコリレータ出力波形を図 7 に示す。F-P LD の直流電流は閾値電流の 4.7 倍である。この F-P LD においても、外部共振器がない状態では、cw 光注入による全光制御モード同期は全く観測されなかった。

セルフオックレンズの反射率の波長依存性を図 8 に示す。これから、セルフオックレンズの FSR は 23.4GHz と求められた。F-P LD の縦モード間隔は 141.0GHz であり、セルフオックレンズの FSR との比はほぼ整数(=6.03)となっている。

図 7 において、パルス振幅は 1 パルスおきに上下に出ているが、その理由は以下に述べるように、モード同期していないからではなく、モード同期していて、且つ、cw 注入光の強度が F-P LD の全縦モード強度の和よりも大きいからである。パルス列の繰り返し周波数は F-P LD の 1F-P モード間隔に等しい 141GHz であり、オートコリレータ出

力の半値全幅は 1.4ps である。cw 注入光の周波数を MHz 単位で変化させると、モード同期が起きている間は、confocal F-P 干渉計で観測した F-P LD の発振スペクトルが追従していく様子を観測することができる。この現象を利用して、同期周波数範囲を測定したところ、±87MHz であった。外部共振器が無くてもモード同期した F-P LD では、同期周波数範囲は±50MHz であった³⁾。したがって、外部共振器を用いた時のほうが同期周波数範囲は広がると考えられる。

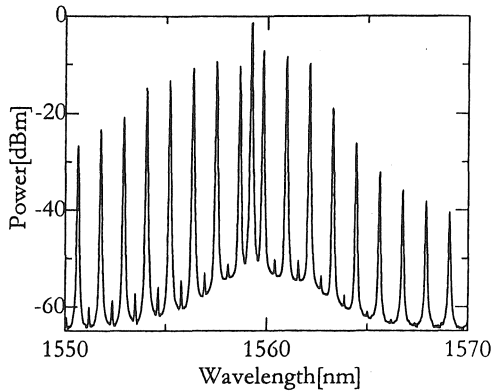


図 6 モード同期時の発振スペクトル(300 μm, AR-CL)

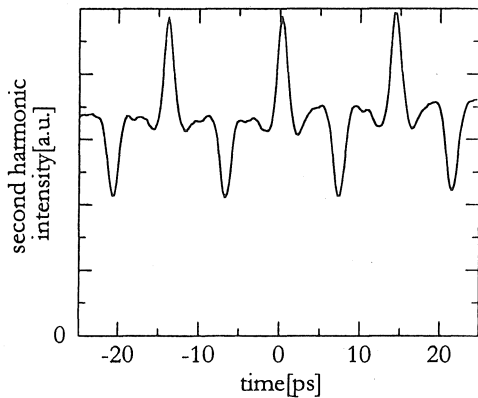


図 7 モード同期時のパルス波形(300 μm, AR-CL)

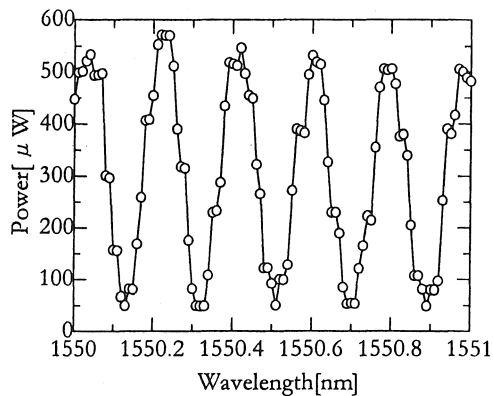


図 8 研磨したセルフフォーカスレンズの反射率の波長依存性

図 7 において、パルス振幅が 1 パルスおきに上下に出ている理由について述べる。この状況を、cw 注入光の電界を基準ベクトルとしたベクトル図で示すと、図 9 のようになる。

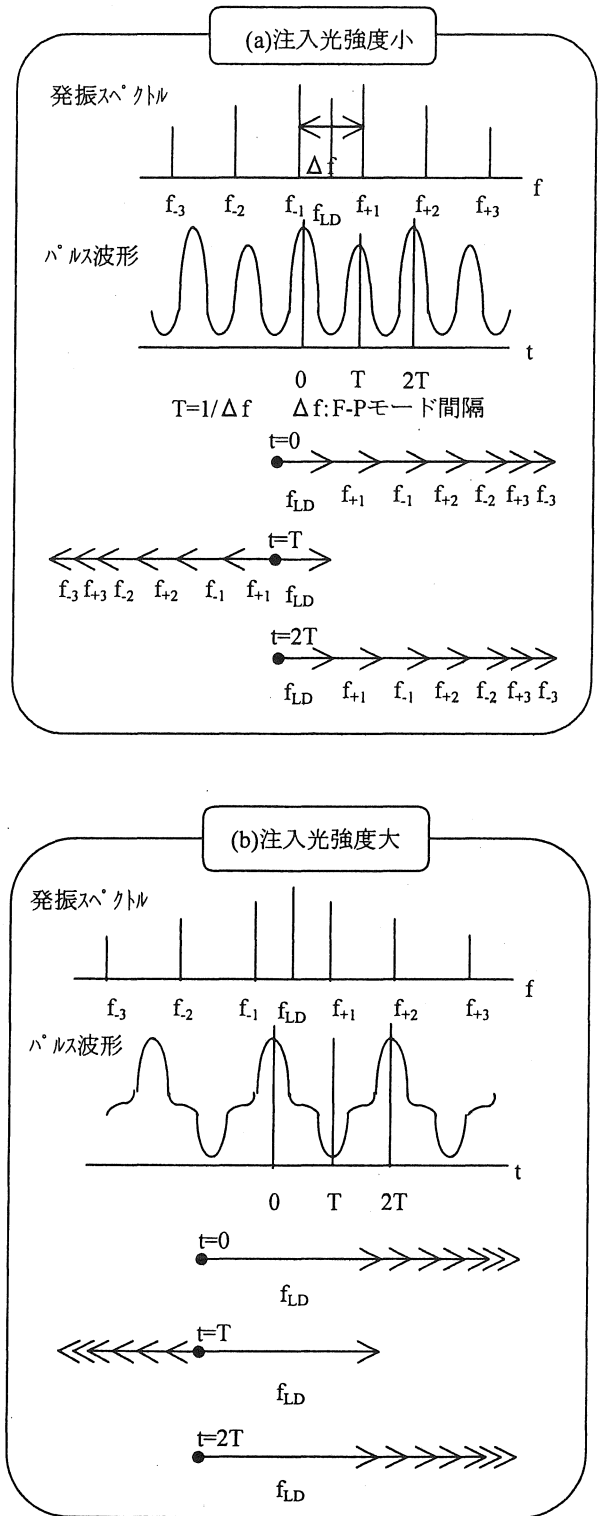


図 9 cw 注入光強度の大きさによるモード同期時の合成電界の振幅変化における違い

時刻 $t=0$ で cw 注入光の電界と F-P LD の全縦モードの電界の位相が揃っているとすると、この時から縦モード間隔の逆数 T だけ時間が経過すると、cw 注入光のベクトル方向に対して、F-P LD のベクトル方向が反対に揃う。cw 注入光の強度が小さい場合は、cw 注入光を含めた全体の合成電界の方向は F-P LD の全縦モードの合成電界の方向に支配される。したがって、全体の合成電界の振幅は、(a) に示したように、1 パルスおきに大きくなる。一方、cw 注入光の強度が大きい場合は、全体の合成電界の方向が cw 注入光の電界方向に支配される。そのため、全体の合成電界の振幅は 1 パルスおきに上下に出ることになる。つまり、図 7 において、パルス振幅が 1 パルスおきに上下に出るのは、cw 注入光の強度が大きい状態でモード同期しているからである。

LD の温度や電流を変化させると、微小ではあるが縦モード周波数間隔が変わって、外部共振器としてのセルフオックレンズの効果に差が現れる。

温度をほぼ最適にした条件下で、cw 注入光パワーを一定とし(偏波制御器出力で 8.0mW \sim 8.9mW)直流バイアス電流を変化させた時のオートコリレータ出力波形を図 10 に示す。直流バイアス電流が大きいほどモード同期がかかり易いという訳ではなく、40mA 近辺が最も安定してモード同期がかかるという傾向であった。

この LD は、反射を利用した自己モード同期の実験においても 40mA 近辺がモード同期し易いという傾向にあった⁴⁾。

直流電流 40mA ($4.7I_{th}$ 、 I_{th} は閾値電流)の条件下で、cw 注入光のパワーを変化させたときの発振スペクトルとオートコリレータ出力波形を図 11 に示す。cw 注入光パワーが 3.8mW (光サーキュレータ入力時)であれば、パワーの増加と共にパルス幅が狭くなっていく様子が分かる。この LD については、cw 注入光を止めても、自己モード同期によって繰り返し周波数 280GHz のパルスが発生した。但し、cw 注入光がある場合には、自己モード同期は抑圧されることを確認している。

同期状態と非同期状態での各縦モードのスペクトル線幅を図 12 に示す。各縦モードを回折格子分光器(分解能 0.35nm、挿入損失 9.5dB)で取り出し、エルビウム添加光ファイバ増幅器で増幅した後に confocal F-P 干渉計で観測した。同図には、cw 注入光より短波長側の四本の縦モード ($\lambda_{-1}\sim\lambda_{-4}$) の発振スペクトル線幅の変化を示してある。縦モード $\lambda_{-1}\sim\lambda_{-3}$ は、同期状態のスペクトル線幅が非同期状態の時よりも狭くなっていることが分かる。縦モード λ_{-4} のスペクトル線幅の変化は、使用した confocal F-P 干渉計の感度では、はっきりと確認できなかった。また、cw 注入光より長波長側の縦モードについても、少なくとも 3 モード分は同期状態でスペクトル線幅が狭くなることを

確認している。すなわち、少なくとも中心縦モードから ± 3 モード分はモード同期していることを直接的に確認できた。

オートコリレータ出力波形の半値全幅は 1.4ps であるから、ガウス波形と仮定すると光パルスの半値全幅は 1.0ps となる。これから、モード同期に関与している縦モード数は、おおよそ $(1/1.0ps)/141GHz=7$ となり、上記の測定結果と定性的に合っている。

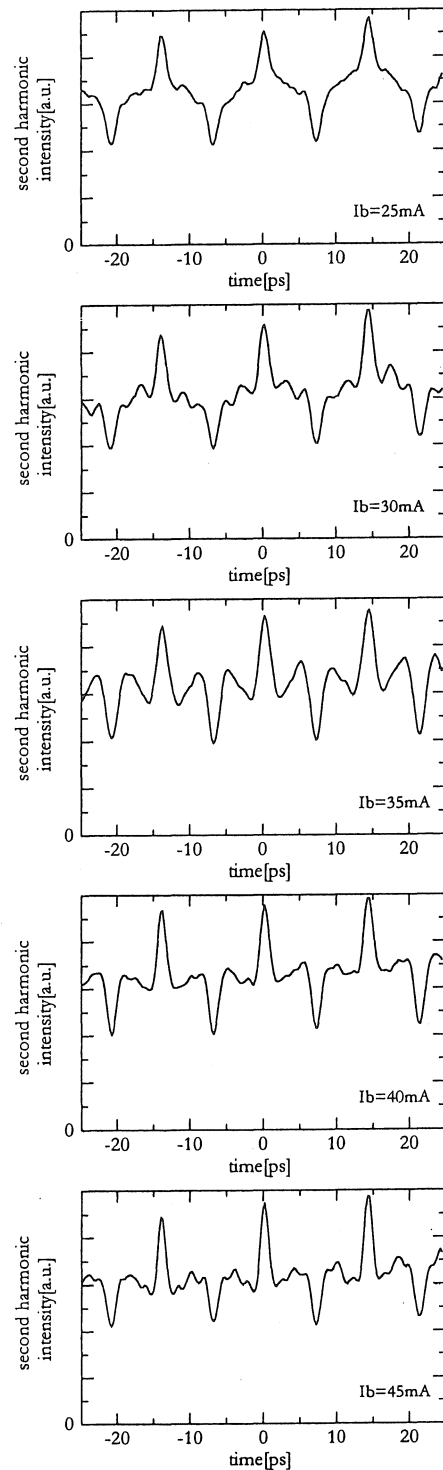


図 10 直流バイアス電流を変化させた時のオートコリレータ出力波形

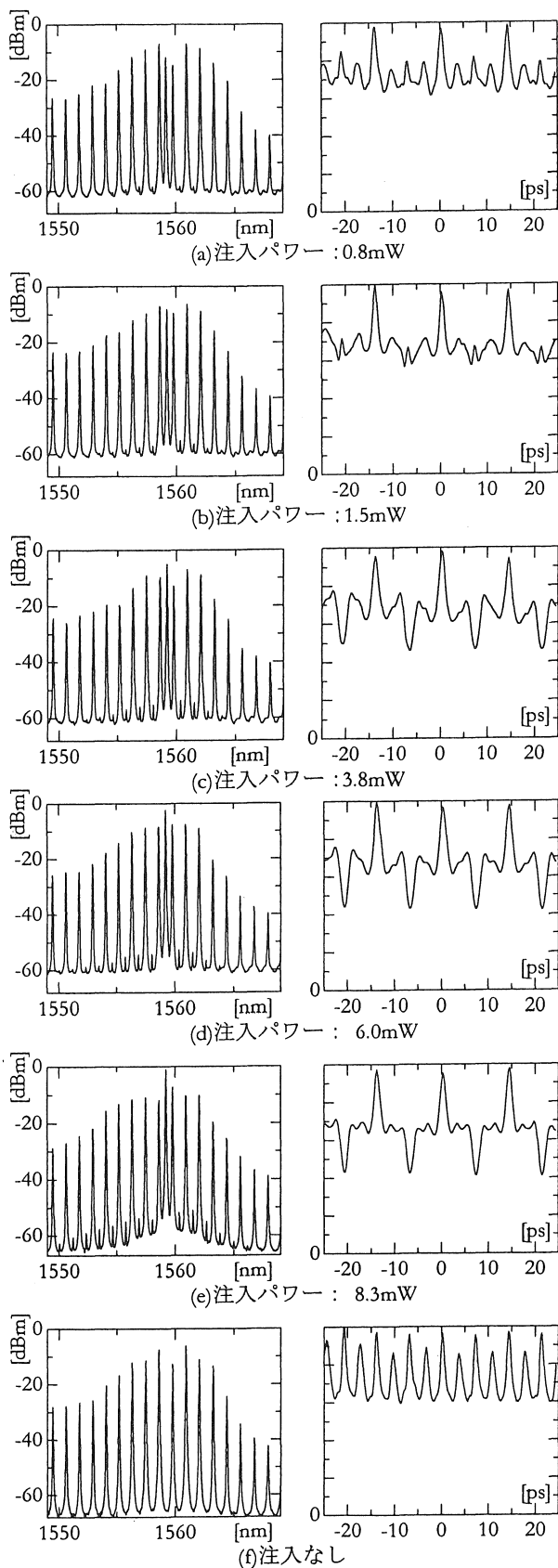


図 11 cw 注入光パワーを変化させた時の
発振スペクトルとオートコリレータ出力波形
(直流バイアス電流=40mA)

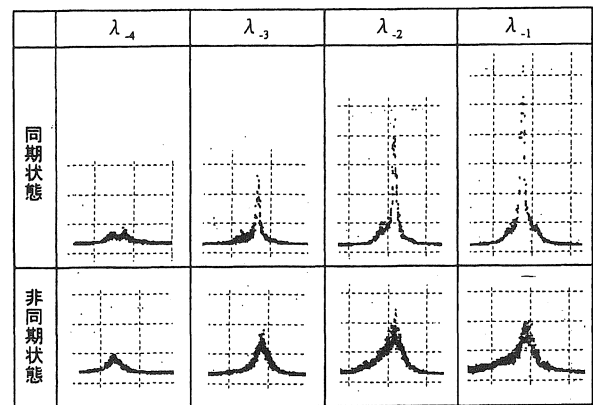


図 12 同期/非同期における各縦モードの
スペクトル線幅(H:400MHz/div)

5. パルス波形の整形法

本モード同期法では cw 注入光を用いているため、この cw 注入光成分を調整することによって出力光パルスの波形整形が可能である。図 13 にパルス波形の整形法を示す。図 9 のベクトル図より、出力光から cw 注入光の成分を除去すれば、繰り返し周波数が F-P LD の縦モード周波数間隔に等しく、且つ、パルス振幅が一定の光パルス列になることが分かる。また、注入光成分の強度を制御して、cw 注入光の電界成分と F-P LD の全縦モード電界成分の和の大きさを等しくすれば、時刻 T の時はトータルの電界はキャンセルされて打ち消しあうので電界はゼロとなる。したがって、縦モード周波数間隔の半分に等しい繰り返し周波数でパルスが発生していることになる。すなわち、光パルス列の二分周に用いることができる。

現在は、cw 注入光成分の除去方法、或いは強度調整方法として、ファイバ・ブラッグ・グレーティングや Fabry-Perot 干渉計などの光フィルタを用いる方法、cw 注入光と F-P LD の偏光方向を互いに垂直とする方法を検討している。

cw 注入光と LD 出力光の偏光方向が直交した状態でもモード同期すれば、光フィルタの代わりに、単に偏光子を用いればよいことになる。また、我々が提案してきた、光学的原理によるモード同期パルス列の繰り返し周波数の分周法や通倍法⁶⁾に適用する上でも有利になる。

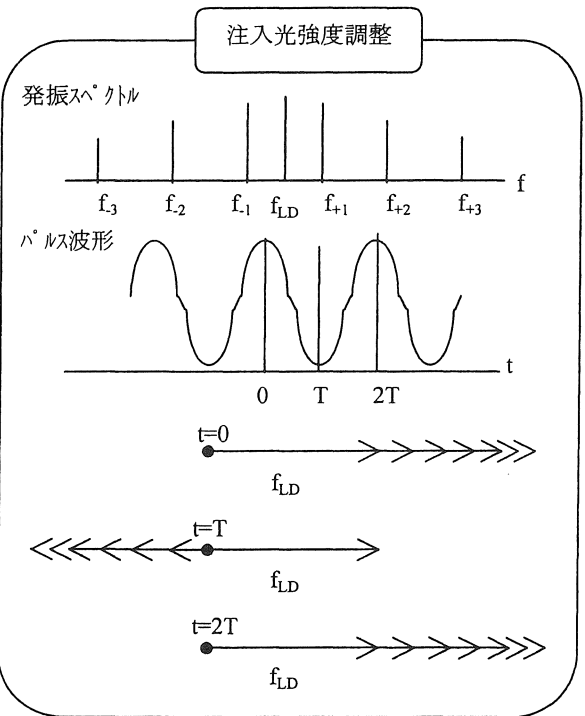
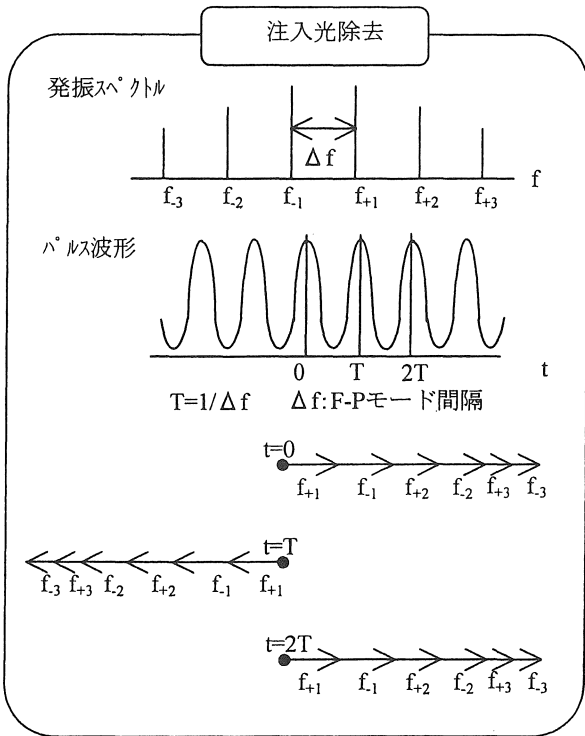


図 13 パルス波形の整形法

6. 二分周動作の解析

高繰り返し光パルス列の繰り返し周波数の分周法や通倍法は、光伝送や光信号処理に応用する上で不可欠な技術である。この中で、繰り返し周波数の通倍法については、分波・遅延・合波という OTDM 的手法や、Fabry-Perot 干渉計による高調波スペクトルの抜き出しという簡易な手

法によっても可能である。したがって、繰り返し周波数の分周法に重点をおいて検討を進める方が意義が大きい。

我々は、Fabry-Perot 型 LD における縦モード間の相互注入同期を用いた、全光学的な手法による、高繰り返しモード同期光パルス列の繰り返し周波数の分周法と通倍法を提案した⁹⁾。これまでは定常位相と動作との関係を調べたのみであった。本論文では、二分周動作に絞って、位相同期ループ(PLL)モデルを用いて定量的な検討を進めた。定常位相を詳細に調べると共に、安定性解析を行った。

6・1 二分周動作での定常位相

二分周での周波数配置を図 14 に示す。モード同期した、縦モード周波数間隔 f_0 の F-P LD₁ 出力を、縦モード周波数間隔 $f_0/2$ の F-P LD₂ に図の周波数配置で注入する。これにより、F-P LD₁ の各縦モード出力を励起光として、実線で結んだ F-P LD₂ の縦モードが二つずつ組となって相互注入同期する(…、 M_{-1} 、 M_0 、 M_1 、 M_2 、…)。F-P LD₁ の各縦モード出力の位相を 0 にとると、この過程により、安定な定常状態では二つの縦モードが互いに逆数となる(…、 $\pm \phi_{-1}$ 、 $\pm \phi_0$ 、 $\pm \phi_1$ 、 $\pm \phi_2$ 、…)。しかし一般には、その大きさは組毎に異なる。したがって、このままでは F-P LD₂ はモード同期しない。モード同期のためには、相互注入同期した縦モード組間で、F-P LD₂ 内の四光波混合(FWM)による相互注入同期(破線)が起きることが必要である。これによって、注入同期した組毎に位相が確定していく。

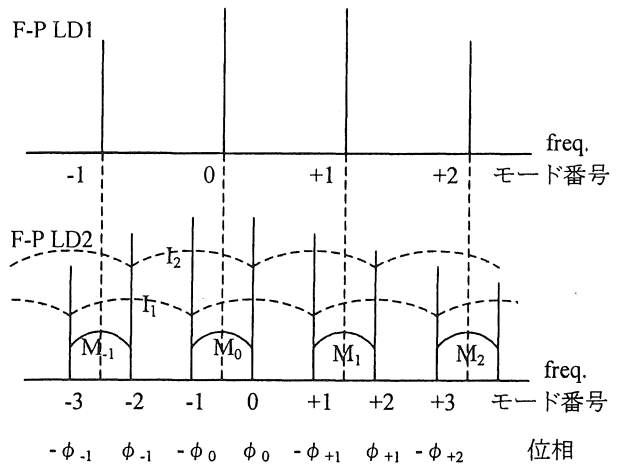


図 14 二分周動作の周波数配置

次に、各過程を順に追ってみる。

(1) cw 注入光による二縦モードの相互注入同期過程

二つの縦モードの組毎(…、 M_{-1} 、 M_0 、 M_1 、 M_2 、…)に相互注入同期が起きる。組 M_0 について考えると、cw 光の位相を θ_{cw} 、モード番号 0 の位相を θ_0 、モード番号 -1 の位相を θ_{-1} として、安定な定常状態では次式が成り立つ(図 15 の PLL モデル参照)。

$$\left\{ \begin{array}{l} 2\theta_{cw} - \theta_{-1} = \theta_0 \pmod{2\pi} : \text{励起光=注入 cw 光で、} \\ \text{モード-1 の FWM 成分がモード 0 へ注入} \\ 2\theta_{cw} - \theta_0 = \theta_{-1} \pmod{2\pi} : \text{励起光=注入 cw 光で、} \\ \text{モード 0 の FWM 成分がモード-1 へ注入} \end{array} \right. \quad (1)$$

これから、 $\theta_{-1} + \theta_0 = 2\theta_{cw} = 0$ となる。但し、cw 光位相 $\theta_{cw} = 0$ とした。つまり、 $\theta_0 = -\theta_{-1} \equiv \phi_0$ であり、二つの縦モードの位相は互いに逆符号となる。

同様なことが他の縦モードの組($\dots, M_{-1}, M_1, M_2, \dots$)についても言える。但し、図 14 に示したように、各組の位相($\dots, \pm\phi_{-1}, \pm\phi_0, \pm\phi_1, \dots$)は任意であるため、このままではモード同期は生じない。

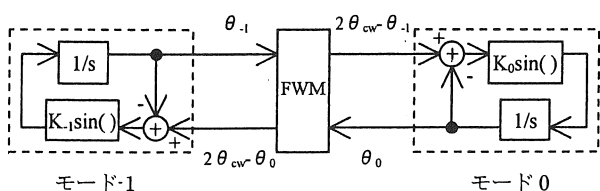


図 15 相互注入同期の PLL モデル

(2) 相互注入同期した縦モード組の間の相互注入同期過程

モード同期のためには、相互注入同期した縦モードの組同士が、FWM により相互注入同期することが不可欠である。例えば、縦モードの組 M_{-1} と M_0 の相互注入同期を考えると、安定な定常状態では次式が成り立つ。

$$\left\{ \begin{array}{l} 2\phi_{-1} + \phi_{-1} = -\phi_0 \pmod{2\pi} : \text{励起光=モード-2 で、} \\ \text{モード-3 の FWM 成分がモード-1 へ注入} \\ -2\phi_0 - \phi_{-1} = \phi_0 \pmod{2\pi} : \text{励起光=モード-1 で、} \\ \text{モード-2 の FWM 成分がモード 0 へ注入} \end{array} \right. \quad (2)$$

これから、 $\phi_0 = n\pi/4$ ($n = -3 \sim +4$)、 $\phi_{-1} = 3\phi_0$ となる。すなわち、隣接する二つの組が相互注入同期しさえすれば、それらの組の位相が確定することになる。安定なモード同期のためには、このような相互注入同期が連鎖状に起きて、多くの組が関与することが必要である。

他の組についても同様な解析を行うと、表 1 に示した可能な定常位相の組み合わせが得られる。この表では、現れた全ての組(二重線で囲まれたモード)が、隣接した組と相互注入同期すると仮定している。

縦モード 0 については、図 16 に示した 8 つの位相状態が可能である。各位相について出力光パルスの包絡線の時間変化を調べると、黒丸の状態($n=0, \pm 2, 4$)では出力パルスが入力パルスと同じ時刻に発生し、白丸の状態($n=\pm 1, \pm 3$)では半周期($1/2f_0$)ずれた時刻に発生することが分かる(図 17)。他の縦モードについても調べると、可能な位相状

表 1 各モードの可能な定常位相の組み合わせ

モード	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
位相	$-\phi_{-2}$	ϕ_{-2}	$-\phi_{-1}$	ϕ_{-1}	$-\phi_0$	ϕ_0	$-\phi_{+1}$	ϕ_{+1}	$-\phi_{+2}$	ϕ_{+2}
	$-\pi/4$	$\pi/4$	$3\pi/4$	$-3\pi/4$	$-\pi/4$	$\pi/4$	$3\pi/4$	$-3\pi/4$	$-\pi/4$	$\pi/4$
$n=-3$	$3\pi/4$	$-3\pi/4$	$-\pi/4$	$\pi/4$	$3\pi/4$	$-3\pi/4$	$-\pi/4$	$\pi/4$	$3\pi/4$	$-3\pi/4$
$n=-2$	$\pi/2$	$-\pi/2$	$-3\pi/2$	$3\pi/2$	$\pi/2$	$-\pi/2$	$-3\pi/2$	$3\pi/2$	$\pi/2$	$-\pi/2$
$n=-1$	$\pi/4$	$-\pi/4$	$-3\pi/4$	$3\pi/4$	$\pi/4$	$-\pi/4$	$-3\pi/4$	$3\pi/4$	$\pi/4$	$-\pi/4$
$n=0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$n=+1$	$-\pi/4$	$\pi/4$	$3\pi/4$	$-3\pi/4$	$-\pi/4$	$\pi/4$	$3\pi/4$	$-3\pi/4$	$-\pi/4$	$\pi/4$
$n=+2$	$-\pi/2$	$\pi/2$	$3\pi/2$	$-3\pi/2$	$-\pi/2$	$\pi/2$	$3\pi/2$	$-3\pi/2$	$-\pi/2$	$\pi/2$
$n=+3$	$-3\pi/4$	$3\pi/4$	$\pi/4$	$-\pi/4$	$-3\pi/4$	$3\pi/4$	$\pi/4$	$-3\pi/4$	$3\pi/4$	$-\pi/4$
$n=+4$	$-\pi$	π	3π	-3π	$-\pi$	π	3π	-3π	$-\pi$	π

態は図 16 と同じになり、且つ、黒丸の状態($n=0, \pm 2, 4$)では出力パルスが入力パルスと同じ時刻に発生し、白丸の状態($n=\pm 1, \pm 3$)では半周期($1/2f_0$)ずれた時刻に発生することが分かる。

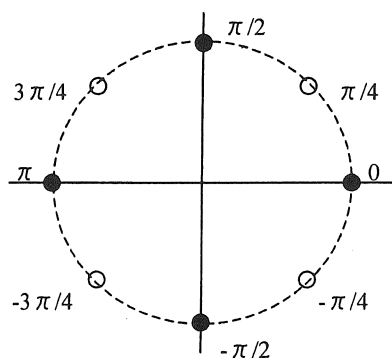


図 16 縦モード 0 の可能な位相

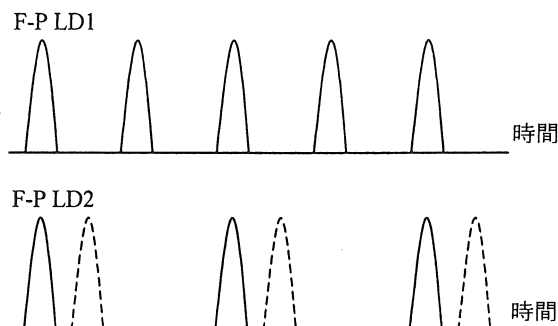


図 17 パルス包絡線の相対位相

$n=0$ の場合は、二分周パルスの出力の包絡線が時刻 $\pm 2\pi n/(\omega_0/2) = \pm 2n/f_0$ でピークとなるのは明らかであり、入力パルスと同じ時刻に発生する。

例として、 $n=+1$ の場合について出力光パルスの包絡線の時間変化を調べると次のようになる。ここで、 ω_c は F-P LD₂ のモード 0 の角周波数、 $\omega_0/2$ は F-P LD₂ の縦モード角周波数間隔(=周波数間隔 $f_0/2$)である。また、各モードの電界振幅 E_i は正の実数である。

$$\begin{aligned} E(t) = & \dots + E_4 \exp\{j(\omega_c - 4\omega_0/2)t + j\pi/4\} \\ & + E_3 \exp\{j(\omega_c - 3\omega_0/2)t + j3\pi/4\} \\ & + E_2 \exp\{j(\omega_c - 2\omega_0/2)t - j3\pi/4\} \\ & + E_1 \exp\{j(\omega_c - \omega_0/2)t - j\pi/4\} + E_0 \exp(j\omega_c t + j\pi/4) \\ & + E_{+1} \exp\{j(\omega_c + \omega_0/2)t + j3\pi/4\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+E_{+2}\exp\{j(\omega_c+2\omega_0/2)t-j3\pi/4\} \\
 &+E_{+3}\exp\{j(\omega_c+3\omega_0/2)t-j\pi/4\} \\
 &+E_{+4}\exp\{j(\omega_c+4\omega_0/2)t+j\pi/4\}+\dots+c.c. \\
 = &\exp(j\omega_c t+j\pi/4)[\dots+E_{-4}\exp\{-j4\omega_0/2(t+\pi/\omega_0)\} \\
 &+E_{-3}\exp\{-j3\omega_0/2(t+\pi/\omega_0)\} \\
 &+E_{-2}\exp\{-j2\omega_0/2(t+\pi/\omega_0)\} \\
 &+E_{-1}\exp\{-j\omega_0/2(t+\pi/\omega_0)\}+E_0 \\
 &+E_{+1}\exp\{j\omega_0/2(t+\pi/\omega_0)\} \\
 &+E_{+2}\exp\{j2\omega_0/2(t+\pi/\omega_0)\} \\
 &+E_{+3}\exp\{j3\omega_0/2(t+\pi/\omega_0)\} \\
 &+E_{+4}\exp\{j4\omega_0/2(t+\pi/\omega_0)\}+\dots]+c.c. \\
 \equiv &\exp(j\omega_c t+j\pi/4)E_{env}(t+\pi/\omega_0)+c.c. \quad (3)
 \end{aligned}$$

$E_{env}(t)$ は包絡線の形を与える部分である。 $t+\pi/\omega_0$ の関数として考えれば、全ての縦モードの位相は揃っており、繰り返し角周波数 $\omega_0/2$ (=繰り返し周波数 $f_0/2$)のモード同期状態である。 $E_{env}(t)$ は、時刻 $-\pi/\omega_0 \pm 4\pi n/\omega_0 = -1/(2f_0) \pm 2n/f_0$ で最大となる。但し、 n は整数である。一方、注入光の位相は全て0としているから、注入光電界の包絡線は $\pm 2\pi n/\omega_0 = \pm n/f_0$ で最大となる。すなわち、繰り返し周波数 f_0 の入力パルス列に対して、その半周期分($1/2 f_0$)ずれたタイミングで二分周パルス列が発生する。

他の n についても同様に計算すればよい。

6・2 二分周動作の安定性解析

実際には、縦モードの組内における相互注入同期と、組間の相互注入同期の両方が同時に作用する。この状況下での安定性を調べるため、各縦モードの位相に摂動を加えてPLLモデルにより解析した。

組内と組間の相互注入同期が同時に作用する場合は、複数個の入力があるPLLモデルで各縦モードを表現すればよい(図18)。各入力に対するループ利得の大きさ(K_1, K_2, \dots)は、①三次非線形係数の大きさ、②入力光電界強度、③励起光電界強度、④その縦モードの電界強度、に依存する。したがって、一般には互いに異なった値になる。

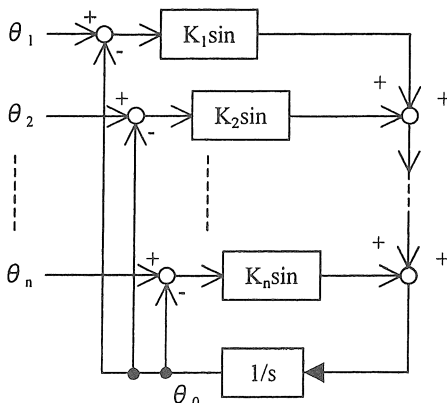


図18 入力が複数のPLLモデル

前節で述べたように、位相が確定するための基本過程は、隣接する、相互注入同期した組が互いに相互注入同期することである。したがって、この基本過程に限定して安定性解析を行えばよい。

図18で、モード-3~0の関係する基本過程には次のものが含まれる。

(1)組内の相互注入同期： M_{-1} (モード-3と-2)、 M_0 (モード-1と0)

(2)組間の相互注入同期： I_1 (励起光=モード-2、信号光=モード-3、被注入光=モード-1)

I_2 (励起光=モード-1、信号光=モード-2、被注入光=モード0)

簡単化のため、モード-3~0の光電界強度は全て等しいとすると、PLLモデルにおけるループ利得の大きさは組内の相互注入同期に関する K_m と、組間の相互注入同期に関する K_i の二つを考えればよいことになる。

各縦モードの位相に摂動を加え、その時間変化を追えば、安定性を解析できる。各縦モードの位相について、表1の任意の n ($=-3 \sim +4$)に対応する定常位相からのずれを改めて θ_i ($i=-3 \sim 0$)とおくと、上記(1)と(2)の過程を取り入れた次の連立微分方程式が得られる。

$$\begin{cases} \dot{\theta}_0 = K_m(-\theta_{-1}-\theta_0) + K_i(2\theta_{-1}-\theta_{-2}-\theta_0) \\ \dot{\theta}_{-1} = K_m(-\theta_0-\theta_{-1}) + K_i(2\theta_{-2}-\theta_{-3}-\theta_{-1}) \\ \dot{\theta}_{-2} = K_m(-\theta_{-3}-\theta_{-2}) + K_i(2\theta_{-1}-\theta_0-\theta_{-2}) \\ \dot{\theta}_{-3} = K_m(-\theta_{-2}-\theta_{-3}) + K_i(2\theta_{-2}-\theta_{-1}-\theta_{-3}) \end{cases} \quad (4)$$

但し、 $|\theta_i| \ll 1$ であり、 $\sin(\theta_i-\theta_j) \approx \theta_i-\theta_j$ 、 $\sin(2\theta_i-\theta_j-\theta_k) \approx 2\theta_i-\theta_j-\theta_k$ 、が成り立つとしている。

(4)式は初期値を与えれば解ける。次のように、ラプラス変換による方法が見通しがよい。(4)式をラプラス変換して、行列形式で表すと次式が得られる。但し、 $\Theta_i(s)$ は $\theta_i(t)$ のラプラス変換であり、各摂動の初期値 $\theta_i(t)=0$ 、且つ、各PLLのVOC入力にインパルス雑音 $A_0 \delta(t)$ 、 $A_1 \delta(t)$ 、 $A_2 \delta(t)$ 、 $A_3 \delta(t)$ が加わったとしている。

$$\begin{pmatrix} s+K_m+K_i & K_m-2K_i & K_i & 0 \\ K_m & s+K_m+K_i & -2K_i & K_i \\ K_i & -2K_i & s+K_m+K_i & K_m \\ 0 & K_i & K_m-2K_i & s+K_m+K_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Theta_0(s) \\ \Theta_{-1}(s) \\ \Theta_{-2}(s) \\ \Theta_{-3}(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix} \quad (5)$$

左辺第一項の行列の行列式を因数分解することにより、解の時間変化の形が分かる。因数分解形は $s(s+2K_m)^2(s+4K_i)$ であるから、解は定数項、及び時間と共に $\exp(-2K_m t)$ 、 $t \exp(-2K_m t)$ 、 $\exp(-4K_i t)$ で変化する項の重ね合わせになる。

時間と共に変化する項は、 $t \rightarrow \infty$ で全てが 0 に収束する。しかし、定数項は一般には 0 ではない。次に、この定数項を調べてみる。

(5)式を解いて、最終値定理 $\lim_{s \rightarrow 0} sF(s) = \lim_{t \rightarrow \infty} f(t)$ を用いると次の結果が得られる。

$$\begin{pmatrix} \theta_{0}(\infty) \\ \theta_{-1}(\infty) \\ \theta_{-2}(\infty) \\ \theta_{-3}(\infty) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\phi_m + \phi_i \\ \phi_m + \phi_i \\ \phi_m + \phi_i \\ -\phi_m + \phi_i \end{pmatrix} \quad (6)$$

但し、 $\phi_m = \frac{-A_0 + A_1 + A_2 - A_3}{4}$, $\phi_i = \frac{K_i}{4K_m}(-A_0 + A_1 + A_2 - A_3)$

ϕ_i は組間の相互注入同期に対する PLL ループ利得に比例する。一方、 ϕ_m は、見かけ上は PLL ループ利得に依存しないが、 $K_i \rightarrow 0$ でも 0 にはならない。したがって、 ϕ_m は組内の相互注入同期の寄与によるものであり、一方、 ϕ_i は組間の相互注入同期の寄与によるものであると考えられる。(6)式で、 $\theta_{0}(\infty)$ 、 $\theta_{-1}(\infty)$ 、 $\theta_{-2}(\infty)$ 、 $\theta_{-3}(\infty)$ が ϕ_m と ϕ_i にどう関係するかを見ると、各機構の作用は次のようであることが分かる。

(1)組内の相互注入同期は、二つの縦モードの定常位相が逆符号となるように作用する。

(2)組間の相互注入同期は、全ての縦モードの定常位相を同じ量だけシフトさせる。

各縦モードの定常位相は上記(1)、(2)の重ね合わせである。(2)の同一量の位相シフトはパルス包絡線の形を変えないので、図 16 の入出力の相対関係には影響を及ぼさない。

(6)式は、初期値 $0 = \theta_{0}(0) = \theta_{-1}(0) = \theta_{-2}(0) = \theta_{-3}(0)$ で、各 PLL の VCO 入力にインパルス雑音 $A_0 \delta(t)$ 、 $A_1 \delta(t)$ 、 $A_2 \delta(t)$ 、 $A_3 \delta(t)$ が加わったときの定常位相である。 ϕ_m と ϕ_i は一般には 0 でないから、インパルス雑音に加わる毎に元の定常位相から少しくずれることになる。種々のインパルス雑音に加わった結果を考えるには、(6)式の集合平均を取ればよい。 $\langle A_0 \rangle_{av} = \langle A_1 \rangle_{av} = \langle A_2 \rangle_{av} = \langle A_3 \rangle_{av} = 0$ であるから、 $\langle \phi_m \rangle_{av} = \langle \phi_i \rangle_{av} = 0$ となる。すなわち、定常位相の周りに揺らぐことを表す。その揺らぎの大きさは、インパルス雑音の大きさ(A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_3)とループ利得(K_m 、 K_i)によって決まる。

F-P LD における縦モード間の相互注入同期を利用したモード同期光パルス列の繰り返し周波数の二分周動作では、図 16 と図 17 に示したように複数の状態が可能である。PLL モデルによる解析からは、全てが安定であることが分かった。

一方、PLL モデルに取り入れられていない効果によって、一部の状態が実際には現れないという可能性はある。本解析では、時間的なパルスの重なり具合にかかわらずループ利得 K_m と K_i は一定としている。しかし、二つの光は LD 内のキャリアを介して相互作用すると考えられるから、直

感的には、パルスが時間的に重なる状態の方がより大きなループ利得になって、この状態のみが現れると考えられる。今後は、まず実験で確かめ、次にその結果を解析するという方針を進める。

7. まとめ

cw 光注入による半導体レーザの全光制御モード同期法に関し、再現性を向上するための手法を提案すると共に、実験確認を行った。実験系での微弱な外部反射により、パルスの特性が変化することを抑えるために、外部共振器として結合用セルフオックレンズを用いる手法を提案した。実験では、セルフオックレンズのフリースペクトルレンジが F-P LD の縦モード間隔と整数比になるように調整し、F-P LD の外部共振器として作用させる手法の有効性を調べた。その結果、再現性が向上し、同期周波数範囲が拡大することが分かった。また、注入光強度の大きさによって、出力パルスの形状が定性的に変化することも分かった。出力光から cw 注入光の成分を除去する手法、或いは強度調整する手法を検討すると共に、F-P LD の縦モード周波数間隔に等しい繰り返し周波数の光パルスと、その 1/2 の繰り返し周波数の光パルス列を生成できる可能性があることを示した。

今後は、出力光から cw 注入光の成分を除去、或いは強度調整する手法の実験検討を進め、一層の再現性向上を図る予定である。

また、cw 光注入による全光制御モード同期法の原理を応用した、モード同期パルス列の繰り返し周波数の二分周法について、PLL モデルを用いた定量的な検討を進めた。定常位相を詳細に調べると共に、安定性解析を行った。その結果、入力パルス列と、二分周された出力パルス列との時間関係には、パルスが重なる状態と、重ならない状態の二種類の安定状態があることが分かった。

参考文献

- 1) 横山：高安定モード同期半導体レーザー，レーザー研究，Vol.27，No.11，pp.750-755(1999)
- 2) M.D.Pelusi et al., "THz optical beat frequency generation from a single mode locked semiconductor laser", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.71, NO.4, pp449-450(1997)
- 3) H.Kasuya et al., "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)
- 4) 水池他：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ソサイエティ大会，C-4-5

- 5) 鈴木他：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)
- 6) 森他：Fabry-Perot LD の縦モード間相互注入同期と注入同期を用いたモード同期パルス列の分周と通倍, 2001 年電子情報通信学会総合大会, C-4-14
- 7) 鈴木他：連続光注入による共振器長 900 μ m Fabry-Perot LD の全光制御モード同期における繰り返し周波数の制御, 2000 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-4-4

(受理 平成14年 3 月19日)