

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

Lasing Characteristics and Applications of All Optical Mode Locking of Fabry-Perot Laser Diodes

鈴木 基仁†, 水池 秀仁†, 森 正和†, 後藤 俊夫‡, 後藤 了祐‡†, 山根 一雄‡†
Motohiro SUZUKI, Hidehito MIZUCHI, Masakazu MORI, Toshio GOTO, Ryosuke GOTO, and Kazuo YAMANE

Abstract: We have proposed the all optical mode locking of Fabry-Perot laser diodes, which 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 lasing characteristics and applications of the method are investigated. It is found that the mode locking characteristics are greatly enhanced by using a SELFOC lens as the external cavity. Applications to division and multiplication of the pulse repetition frequency are also discussed.

1. はじめに

光通信技術においては、高速化は重要な課題である。高速の光伝送や光信号処理においては、簡易なデバイス構成で超短パルスを安定に発振できる光源が不可欠である。この目的で、過飽和吸収体を組み込んだ集積型の受動モード同期半導体レーザー¹⁾やハイブリッドモード同期半導体レーザー²⁾が盛んに研究されている。また、モード同期した半導体レーザーの縦モードをフィルタで抜き出して、繰り返し周波数 1.34THz のピコ信号を発生した報告がある³⁾。

我々は、特別構造のデバイスを用いないという方針で高速パルスを発生させる手法を検討してきた。1999年に、ファブリ・ペロ型半導体レーザー(F-P LD)を用いて、モード同期させる手法を提案し、共振器長 300 μ m の F-P LD を用いて、繰り返し周波数 141GHz、半値全幅 1.5psec の光パルスの発生に成功している⁴⁾。また、レンズの外部反射を利用した F-P LD の自己モード同期現象を用いることにより、繰り返し周波数 286GHz、半値全幅 1.1psec の光パルスの発生を観測している⁵⁾。

我々は、高速パルスの発生法として主に cw 光注入方式の検討を進めてきた。図 1 に示すように、cw 光注入方式と自己モード同期方式は共に、二つの主縦モード間の相互注入同期、及びそれに続いて隣接縦モードが次々と注入同期していくことを利用している。両者で異なる点は、発端となる主縦モード間の相互注入同期が、外部から注入された cw 光を励起光として生じるのか、或いは、LD 内のある縦モードを

励起光として生じるのかである。従って、cw 光注入方式では、自己モード同期が起きない範囲で、主縦モードのスペクトル線幅を狭く保っておかなければならないという条件が要求される。この点が解決できれば、注入光の周波数を変化させると、幅 30~50MHz 程度にわたって発振スペクトルの引き込みが起きる⁴⁾ことが分かっているため、制御性の観点から自己モード同期方式よりも有利である。

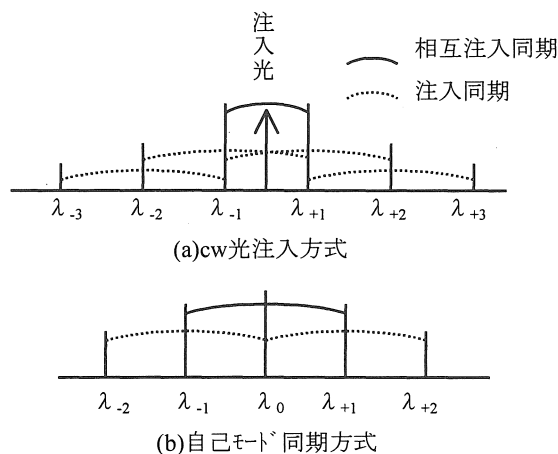


図 1 二つの方式の比較

我々が開発した手法を実用化するためには、以下の点を検討していかなければならない。

- ① 再現性向上
- ② 解析モデルの確立
- ③ 繰り返し周波数の分周法と通倍法
- ④ 電気信号への同期法
- ⑤ 同期引き込み範囲の拡大
- ⑥ 出力パルスの変調、圧縮
- ⑦ 応用法

† 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)

特に、再現性の向上は最重要課題であり、ぜひとも解決しなければならない点である。また、制御性の面からは、電気信号への同期法を確立することが不可欠である。本報告では、再現性向上、及び繰り返し周波数の分周法と通倍法の検討結果について述べる。

まず、F-P LD として共振器長 $900\mu\text{m}$ の LD を用いて実験を行った。長共振器とすることにより、①繰り返し周波数が 45GHz 程度になって、 40Gb/s システムとの接点ができる、②長共振器のため自走時のスペクトル線幅が狭まり、モード同期がかかり易くなる可能性がある、ことが期待できるからである。また、端面反射率の違いにより、動作特性にどのような違いが現れるのかも調べた。

これまでの実験により、再現性を悪くする最大の原因は外部反射であることが経験的に分かっている。特に、結合用セルフォックレンズでの反射の影響が大きい。この反射を抑える方法、及び逆に積極的に利用する方法の実験検討を行った。

繰り返し周波数の分周法と通倍法については、相互注入同期を利用した手法について検討を行った。

2. 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 2 に示す。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_{-1} と f_1 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。

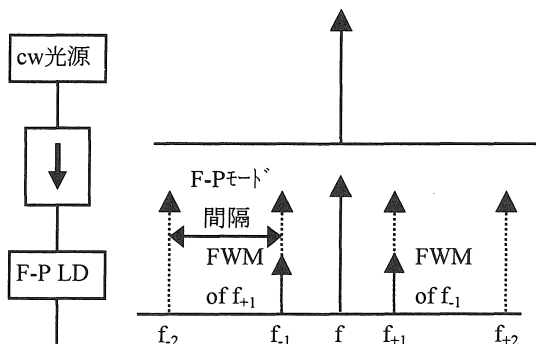


図 2 原理図

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。

3. 共振器長 $900\mu\text{m}$ の F-P LD の特性

実験系を図 3 に示す。cw 注入光源には、狭線幅 ($\leq 100\text{kHz}$) の単一縦モード波長可変 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。cw 注入光パワーは、偏波制御器 (Polarization Controller: PC) と光サキュレータの接続点において、 $5\text{mW}\sim 6\text{mW}$ 、光サキュレータと F-P LD との結合損失は $5\text{dB}\sim 6\text{dB}$ である。従って、F-P LD の活性層に結合する cw 注入光パワーは、 $1.3\text{mW}\sim 1.9\text{mW}$ である。

F-P LD の出力は光サキュレータを介して、光スペクトラムアナライザ (アソリツ MS9710B、分解能 0.07nm) で発振スペクトルを観測した。また、オートコレクタ (inrad 製、分解能 0.1psec) でモード同期状態でのパルス波形を観測した。

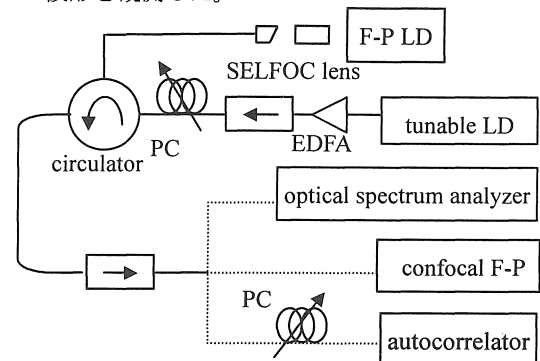


図 3 実験系

この実験系を用いて、F-P LD の共振器長、及び端面反射率の違いによる動作特性の差を調べた。cw 注入光によるモード同期では、前述のように外部反射が大きな影響を及ぼす。特に、結合用セルフォックレンズの選択は重要である。セルフォックレンズの影響については後で述べることにして、ここでは、標準的な 0.18° のセルフォックレンズ (日本板硝子製 RMT18-Z0283-155-ABC ($R=2.0$)) を用いた場合の結果について述べる。この場合には、セルフォックレンズによるスペクトル狭窄化は起きていない。むしろ、光サキュレータ本体での微弱な反射によって 100MHz 程度の間隔で外部共振器モードが生じ、かえってスペクトル線幅は広がっている。

実験には市販の共振器長 $900\mu\text{m}$ の F-P LD (NEL 製) を用いた。端面処理は、AR コート劈開 (AR-CL)、及び劈開-劈開 (CL-CL) の二種類とした。発振中心波長は、AR-CL が 1540nm 近辺、CL-CL が 1555nm 近辺である。

confocal F-P 干渉計でスペクトル線幅の狭窄化が起きるかど

うかを観測することにより、モード同期時状態と非同期状態とを判別した。この章で述べる、標準的な 0.18 μ m のセルパッケジを F-P LD との結合に用いた場合は、なかなかモード同期状態に至らず、再現性が悪かった。その原因は、①実験系、特に光サキュラ本体での反射によってスペクトル線幅が単体のときよりも広がっている、②縦モード間隔が狭いため、縦モード間で競合がある(スペクトルホールバニング)、ためと考えられる。

実験系の各部を微調整して、モード同期状態としたときのパルス波形を図 4 に示す。F-P LD の直流バイアス電流は閾値電流の 6.5~7.5 倍である。(a)は CL-CL、(b)は AR-CL のサンプルである。図 4(a)では、パルス波形が不規則に変化しているが、繰り返し周波数は共振器長から予想される値の 43GHz である。パルス波形がガウス型であると仮定する半値全幅は 7.0psec である。一方、図 4(b)ではパルス波形は規則的であるが、繰り返し周波数は共振器長から予想される値の約 1/2 の 29GHz である。パルス波形がガウス型であると仮定すると半値全幅は 11.2psec である。

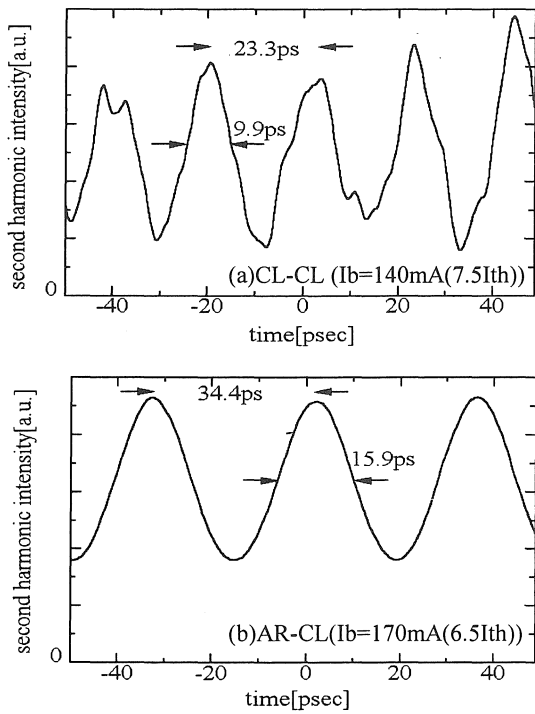


図 4 モード同期時状態でのパルス波形

パルス列の繰り返し周波数が共振器長から予想される値の約 1/2 となった原因を調べるため、モード同期状態での発振スペクトルを光スペクトラムアナライザにより測定した。その結果を図 5 に示す。同図より、主縦モード λ_{-1} と λ_{+1} 、及びそれと隣り合う四光波混合成分が強く現れ、それ以外の縦モードが抑圧されていることが分かる。このため、F-P モード間隔の半分の周波数でモード同期した状態と等価になり、図 4(b)のように繰り返し周波数が F-P モード間隔の約 1/2 であるパルス列が観測されたと考えられる。これに対して、共振器長

300 μ m、端面処理が AR-CL の F-P LD でモード同期が観測されたときには、モード同期状態と非同期状態とで、発振スペクトルはほとんど変化していない⁴⁾。

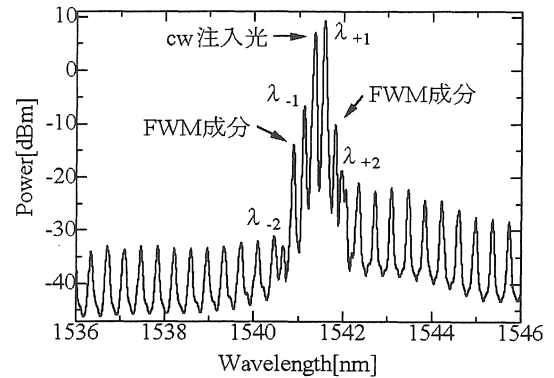


図 5 AR-CL モード同期状態での発振スペクトル

この違いが生じる原因は、前述のように、①実験系の反射、②スペクトルホールバニング、の影響と考えている。反射については、共振器長 370 μ m の F-P LD を用いた場合でも、外部反射があるときには、二モード以外が抑圧されるという現象が観測されている。従って、外部反射の影響が第一の原因であると考えられる。一方、スペクトルホールバニングについては、その周波数幅がどの程度かは不明であるが、縦モード間隔 60GHz(推定共振器長 714 μ m)の F-P LD を用いて、注入同期により二モードを同時発振させたとの報告⁹⁾があるから、本実験に関しては二次的な原因と考えている。

図 5 の発振スペクトル観測に用いた F-P LD では、cw 注入光の波長を変化させると、それにつれて出力パルスの繰り返し周波数が変化するという現象が見られた。主縦モード λ_{-1} (1540.95nm)と λ_{+1} (1541.22nm)の間で cw 光の波長を 0.02nm ずつ変化させたときの繰り返し周波数変化を図 6 に示す。同図より、注入光の波長を長波長側にシフトしていくと、パルスの繰り返し周波数はほぼ直線的に低くなるのが分かる。cw 注入光の波長が 1540.96nm より短い場合は λ_{-1} へ、また 1541.21nm より長い場合は λ_{+1} へと注入同期が起こり、パルスは発生しない。

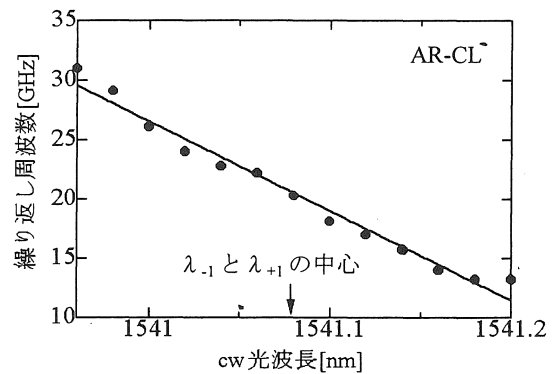


図 6 主縦モード λ_{-1} (1540.95nm)と λ_{+1} (1541.22nm)の間で cw 光の波長を変化させたときの繰り返し周波数変化

このように、端面処理が AR-CL の場合は外部反射の影響を受けやすく、発生パルスの特性が変化しやすい傾向がある。

4. セルフォックレンズによる外部共振器の効果

AR コートを施した 1.55 μm 用の標準的な 0.18 びッチのセルフォックレンズを結合に用いた場合には、前述したように、モード同期がかかりにくい。この最大の原因は、微弱な外部反射による F-P LD の発振スペクトルの変化であると考えた。ここでは、結合用セルフォックレンズで意図的に強い反射を返すことによって、モード同期の再現性を改善するための検討を行った結果について述べる。

標準的な 0.18 びッチのセルフォックレンズを結合に用いた場合について、confocal F-P 干渉計でスペクトルの観察を行ったところ、100MHz 程度の細かい線スペクトルが観測された。従って、F-P LD から距離 1m 近辺の位置、すなわち、図 3 の実験系における光サキュレタ本体での微弱な反射の影響と断定した。そこで、この反射よりも強い反射を結合用セルフォックレンズから返してやることによって、F-P LD のスペクトル線幅を制御すればよいと考えた。すなわち、セルフォックレンズを、F-P LD の外部共振器として利用することになる。セルフォックレンズのリースペクトルは F-P LD の縦モード間隔と整数比になるようにするのが理想であるが、手持ち部品の都合で、1.3 μm 用 0.22 びッチのセルフォックレンズ(日本板硝子製 H18022B 130N(R=2.0))を用いて実験を行った。1.3 μm 用セルフォックレンズを用いることにより、1.55 μm 用 AR コート無しの状態と等価になり、外部共振器としての効果を持たせることができる。カタログデータ値から、セルフォックレンズのリースペクトルと F-P LD の縦モード間隔の比は 1.80、セルフォックレンズ片端面の電力反射率は 0.058 と見積もられた。

セルフォックレンズの位置を微調整して、スペクトル線幅が狭くなる場所に設定した。図 7(a)に示すように、この条件下で縦モード三本おきにスペクトル強度が強くなる場合が多く見られた。これは、セルフォックレンズのリースペクトルと F-P LD の縦モード間隔の比が整数からずれているためである。セルフォックレンズの位置を調整し、発振スペクトルの包絡線が滑らかになった状態が図 7(a)である。同図中の矢印の周波数位置に cw 光を注入したときの様子を図 7(b)(c)に示す。図 5 と同様に、主縦モードの二本以外は発振が抑圧されてしまっている。従って、パルスの繰り返し周波数は、 $46\text{GHz} \times 3(\text{縦モード三本おき}) \div 2(\text{cw 注入光と主縦モード二本の干渉}) = 69\text{GHz}$ となっている。この状態から、cw 注入光の周波数を数 GHz ずらすと、スペクトルとパルス波形は図 7(d)(e)のようになり、図 4(b)や図 5 と類似した状態となった。すなわち、三本おきにスペクトル強度が強くなるということがなくなり、パルスの繰り返し周波数は 20GHz へと急変した。このことは、セルフォックレンズ

の反射のみで発振スペクトルが制御できているわけではないことを示している。

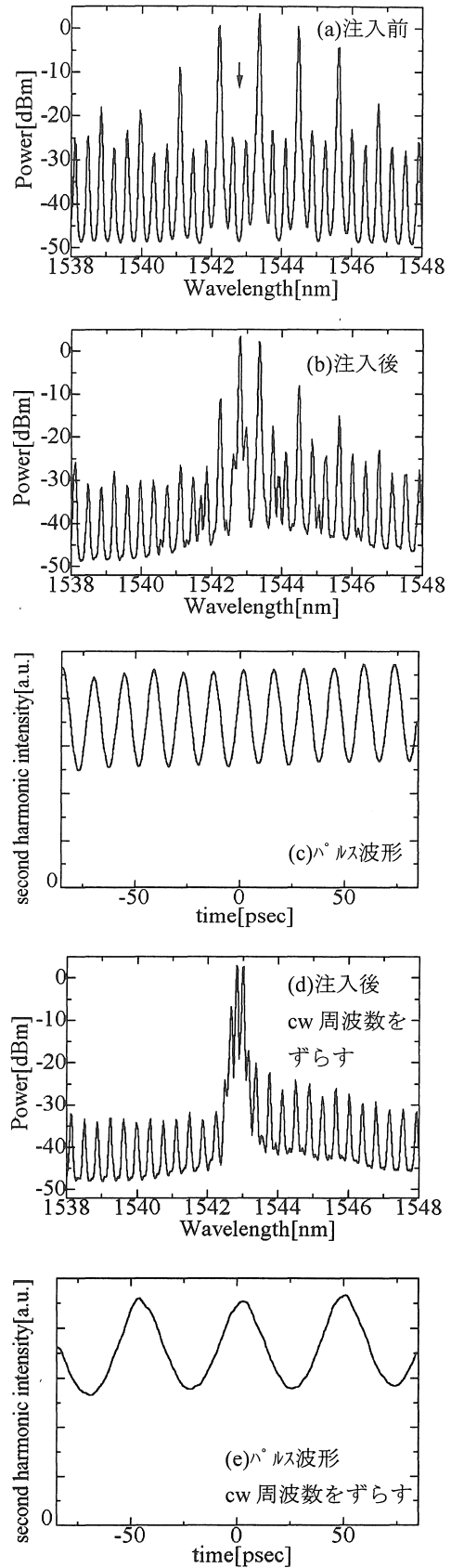


図 7 1.3 μm 用 0.22 びッチのセルフォックレンズを用いた場合 (AR-CL, Ib=110mA(4.2Ith))

上記の手法を、端面処理が AR-CL の別の F-P LD サンプルに適応してみた。このサンプルは、AR コート付で 1.55 μm 用 0.18 μm pitch のセルフフォーカスレンズを結合に用いた場合には、cw 光注入によるモード同期が観測されなかったものである。このサンプルについても容易にモード同期状態とすることができた。その結果を図 8 に示す。この場合には、cw 光注入前後でのスペクトル変化は殆どなく、パルスの繰り返し周波数は 143GHz となっている。発振スペクトルが三モードごとに強くなっていることにより、縦モード間隔の三倍に等しい繰り返し周波数になっていることが分かる。

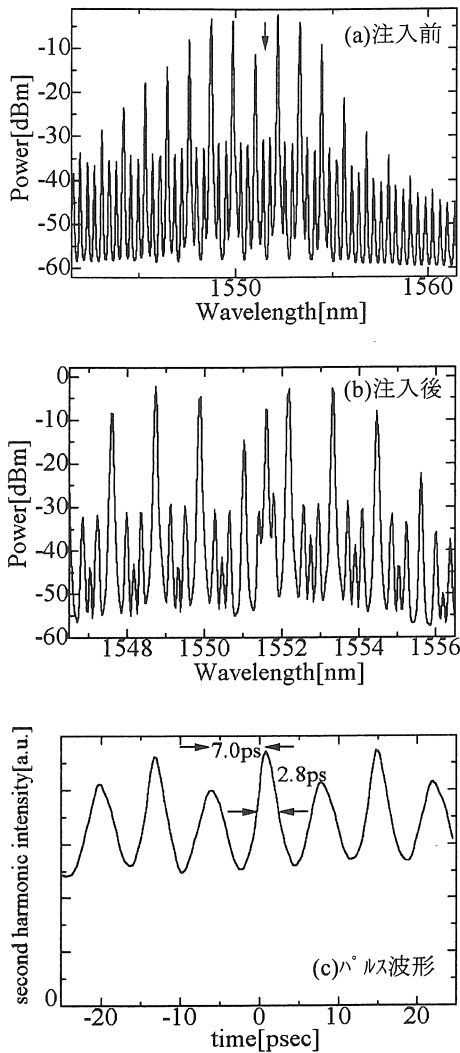


図 8 1.3 μm 用 0.22 μm pitch のセルフフォーカスレンズを用いた場合 (但し、図 7 の LD サンプルとは別の LD サンプルを使用, AR-CL, $I_b=120\text{mA}(4.3I_{th})$)

次に、結合用セルフフォーカスレンズとして、1.55 μm 用で両端平面の 0.25 μm pitch のもの(日本板硝子製 H18-S0250-155-ABC)を使用し、そのフリースペクトルレンジが共振器長 300 μm 、端面処理 CL-CL の F-P LD (Opto Speed 製)の縦モード間隔と整数比になるように長さ調整をして用いた。セルフフォーカスレンズのフリースペクトルレンジを測定するために、狭線幅の波長可変 cw 光源を用いて

セルフフォーカスレンズの反射パワーを測定した。その結果を図 9 に示す。これから、セルフフォーカスレンズのフリースペクトルレンジは 23.2GHz であることが分かる。

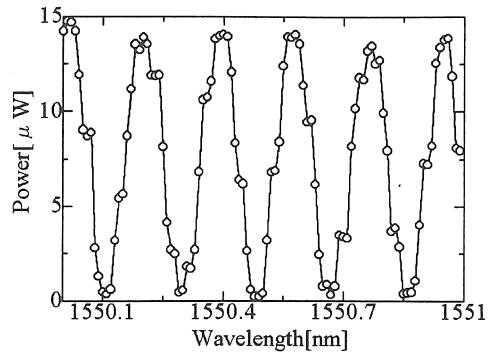


図 9 セルフフォーカスレンズのフリースペクトルレンジ

共振器長 300 μm 、端面処理が CL-CL の F-P LD のついて外部共振器の効果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とパルス波形を図 10 に示す。この F-P LD では、外部共振器がない状態では cw 光注入によるモード同期は観測されていない。セルフフォーカスレンズは外部共振器としての機能を高めるため AR コートを除去して用いた。図 10(a)より、F-P LD の縦モード間隔は 139.3GHz であることが分かる。セルフフォーカスレンズのフリースペクトルレンジと F-P LD の縦モード間隔の比は 6.00 であり、整数比となっている。パルス列の繰り返し周波数は 1/F-P モード間隔に等しい 139GHz 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。但し、セルフフォーカスレンズの位置調整や cw 注入光の周波数によっては、自己モード同期が起きることも観測された。

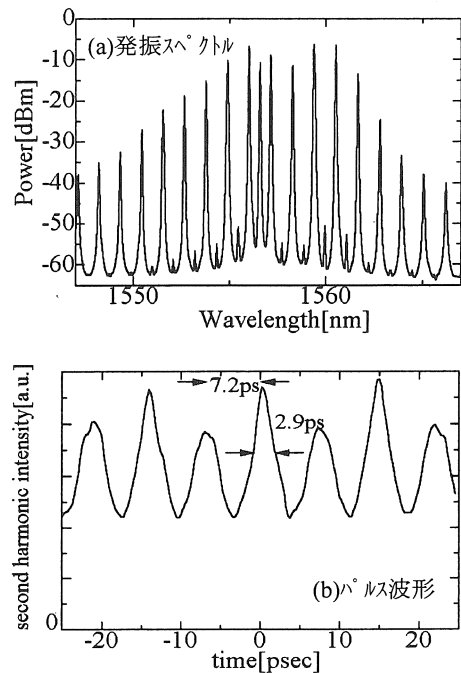


図 10 モード同期状態での発振スペクトル、パルス波形 (L=300 μm , CL-CL, $I_b=50\text{mA}(9.1I_{th})$)

このように、セロフォックスの反射を利用する方法は、再現性向上という点で非常に効果があることが分かった。今後、セロフォックス以外での反射抑圧法を確立することと併せて、定量的に調べていく予定である。

セロフォックスの反射を用いる方法以外に、スペクトル狭帯化法としては、図 11 に示すような F-P LD の相互注入同期を用いる方法が考えられる。同一構造の二つの F-P LD が相互注入同期すれば、線幅が自走時の 1/2 倍になる。但し、①二つの F-P LD の縦モード周波数を一致させる、②LD 間の距離を波長オーダーで制御する、③光パワー測定点を設ける、などの工夫が必要である。

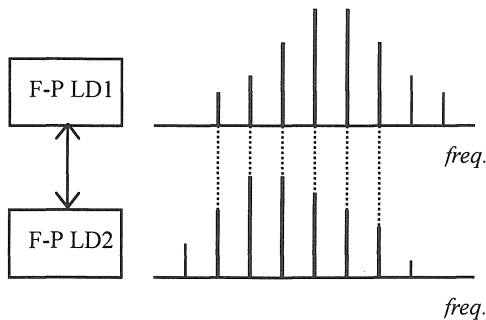


図 11 F-P LD の相互注入同期を用いたスペクトル線幅狭帯化

5. 各種の全光制御モード同期法の検討

信号処理への応用には、1 章で述べた項目の中で、③繰り返し周波数の分周法と通倍法、及び、④電気信号への同期法、の検討が重要である。電気的信号処理が可能な値まで繰り返し周波数を分周できれば、④は達成できるため、③を光技術で実現することが先決問題となる。

まず、cw 光注入によるモード同期の原理を位相から検討してみる。図 12 において、モード +1 とモード -1 は cw 光注入を励起光として相互注入同期するから、次の位相関係が成り立つ。

$$\phi_{+1} = 2\phi_0 - \phi_{-1} \quad (1)$$

但し、 ϕ_0 は cw 光の位相である。これから、任意定数 ϕ を用いて各モードの位相は次のように書ける。

$$\phi_{+1} = \phi_0 + \phi \quad (2)$$

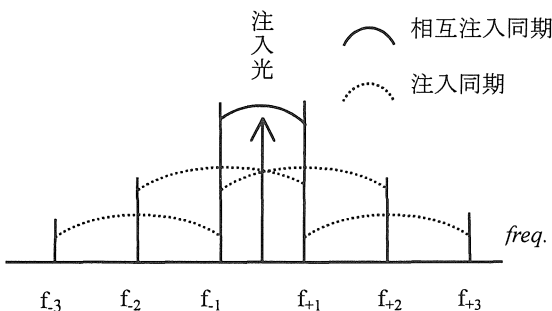


図 12 位相の検討

次に、モード +1、-1 を励起光として、モード -1、+1 の四光波混合成分がモード +2、-2 の周波数位置に生じて注入同期が起きる。従って、モード +2、-2 の位相 ϕ_{+2} 、 ϕ_{-2} は次のようになる。

$$\phi_{+2} = 2\phi_{+1} - \phi_{-1} = \phi_0 + 3\phi \quad (3)$$

以下同様にして、四光波混合による注入同期で位相が決まっていく。この結果、LD 出力全体の光電界 $E(t)$ は、縦モードの各周波数間隔を ω_0 として、

$$\begin{aligned} E(t) = & \dots + E_{-3} \exp\{j(\omega_{cw} - 5\Delta\omega_0/2)t + j(\phi_0 - 5\phi)\} \\ & + E_{-2} \exp\{j(\omega_{cw} - 3\Delta\omega_0/2)t + j(\phi_0 - 3\phi)\} \\ & + E_{-1} \exp\{j(\omega_{cw} - \Delta\omega_0/2)t + j(\phi_0 - \phi)\} \\ & + E_{+1} \exp\{j(\omega_{cw} + \Delta\omega_0/2)t + j(\phi_0 + \phi)\} \\ & + E_{+2} \exp\{j(\omega_{cw} + 3\Delta\omega_0/2)t + j(\phi_0 + 3\phi)\} \\ & + E_{+3} \exp\{j(\omega_{cw} + 5\Delta\omega_0/2)t + j(\phi_0 + 5\phi)\} + \dots + c.c. \\ = & \exp\{j(\omega_{cw}t + \phi_0)\} [\dots + E_{-3} \exp\{-j5\Delta\omega_0/2(t+2\phi/\Delta\omega_0)\} \\ & + E_{-2} \exp\{-j3\Delta\omega_0/2(t+2\phi/\Delta\omega_0)\} \\ & + E_{-1} \exp\{-j\Delta\omega_0/2(t+2\phi/\Delta\omega_0)\} \\ & + E_{+1} \exp\{j\Delta\omega_0/2(t+2\phi/\Delta\omega_0)\} \\ & + E_{+2} \exp\{j3\Delta\omega_0/2(t+2\phi/\Delta\omega_0)\} \\ & + E_{+3} \exp\{j5\Delta\omega_0/2(t+2\phi/\Delta\omega_0)\} + \dots] + c.c. \end{aligned} \quad (4)$$

$E_{env}(t)$ は包絡線の形を与える部分である。 $t+2\phi/\Delta\omega_0$ の関数として考えれば(すなわち、時間軸の原点をずらせば)、全ての縦モードの位相は揃っており、繰り返し角周波数 ω_0 のモード同期状態である。また、励起光を付け加えて考えると、繰り返し角周波数 $\omega_0/2$ のモード同期状態となる。このように、相互注入同期のみではなく、それに続く隣接モードの注入同期の両方が起きて初めて各縦モードの位相が揃う。光系のみで分周、通倍を行う場合にはこの点に注意する必要がある。

任意定数 ϕ だけ位相に自由度があるのは、cw 光注入で、且つ直流駆動であるため、どの時刻もパルス発生に関して同等だからである。従って、信号処理の目的には、何らかの外部的光信号、或いは電気信号で発生時刻を制御する手段が必要となる。

繰り返し周波数の二分周は、図 13(a)の系で実現できる。モード同期した、縦モード間隔 f_0 の F-P LD1 出力を、縦モード間隔 $f_0/2$ 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、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。但し、上述のように、この過程でのみで全縦モードの位相が揃うわけではない。以下に述べるように、相互注入同期した組の間で四光波混合による注入同期が起こって初めて、全縦モードの位相が揃い、モード同期状態となる。

同図(a)において入力光の位相を 0 ととると、式(2)と同様に、F-P LD2 の相互注入同期するモードの組ごとの位相は次のようになる。但し、 ϕ_i は任意の位相である。

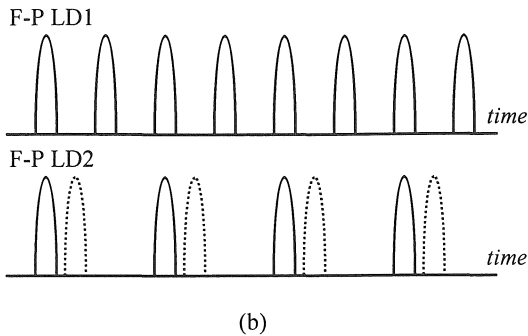
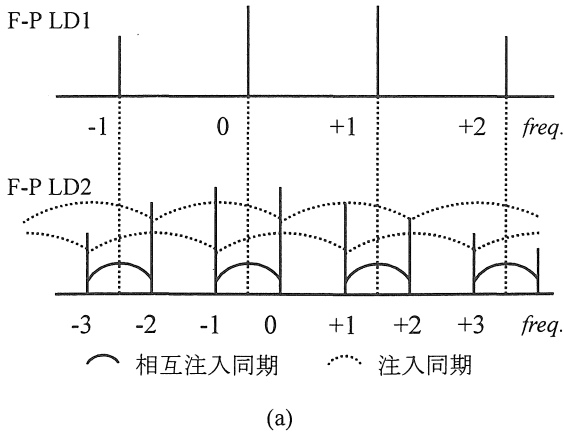


図 13 繰り返し周波数の二分周

- ... モード⁻³とモード⁻²の組 : $-\phi_{-1}, \phi_{-1}$
- モード⁻¹とモード⁰の組 : $-\phi_0, \phi_0$
- モード⁺¹とモード⁺²の組 : $-\phi_{+1}, \phi_{+1}$...

これらの組の間で四光波混合による注入同期が起きると、式(1)と同様な位相関係が生まれ、次のようになる。

- 励起光モード⁻²でモード⁻³とモード⁻¹が注入同期
: $-\phi_{-1} - \phi_0 = 2\phi_{-1}$ (a)
- 励起光モード⁻¹でモード⁻²とモード⁰が注入同期
: $\phi_{-1} + \phi_0 = -2\phi_0$ (b)
- 励起光モード⁰でモード⁻¹とモード⁺¹が注入同期
: $-\phi_0 - \phi_{+1} = 2\phi_0$ (c) (5)
- 励起光モード⁺¹でモード⁰とモード⁺²が注入同期
: $\phi_0 + \phi_{+1} = -2\phi_{+1}$ (d)

(a)(b)から $\phi_0 = 3\phi_{-1}, \phi_{-1} = 3\phi_0$ が得られる。これから、 $8\phi_0 = 0 \pmod{2\pi}$ となる。すなわち、 $\phi_0 = 0, \pm\pi/4, \pm\pi/2, \pm 3\pi/4, \pi$ である。一方、(c)(d)から $\phi_{+1} = 3\phi_0, \phi_0 = 3\phi_{+1}$ が得られる。これらを整理すると、次のようになる。

- $\phi_0 = 0, \pm\pi/4, \pm\pi/2, \pm 3\pi/4, \pi, \dots$
- $\phi_{-1} = 3\phi_0, \phi_{+1} = 3\phi_0, \dots$ (6)

この8つの可能な位相状態について、電界の包絡線を式(4)と同様にして求めると、入出力パルスの位相関係としては、図 13(b)の二つの状態が可能であることが分かる。すなわち、分周パルスが出る時刻は、入力パルスと同じ時刻か、或い

は半周期ずれた時刻かのいずれかになる。このいずれも実現可能かどうかは、二つの状態の安定性解析を行わなければならないが、現状では未検討である。

同様な手法で繰り返し周波数の三分周が可能である。図 14(a)の周波数配置で、モード同期した、縦モード間隔 f_0 の F-P LD1 出力を、縦モード間隔 $f_0/3$ の F-P LD2 に注入する。*印の縦モードを除いて、F-P LD2 の縦モードが二つずつ組となって相互注入同期が起きる。*印の縦モードは相互注入同期に関与しないが、相互注入同期した縦モード間の四光波混合成分により注入同期する。この*印の縦モードを励起光とする四光波混合を経て、全ての縦モードの位相が揃う。二分周の場合と同様にして位相を調べると、12の可能な位相状態があることが分かる。しかし、入出力パルスの位相関係としては、二分周の場合と同様に二つの状態のみであることが分かる。

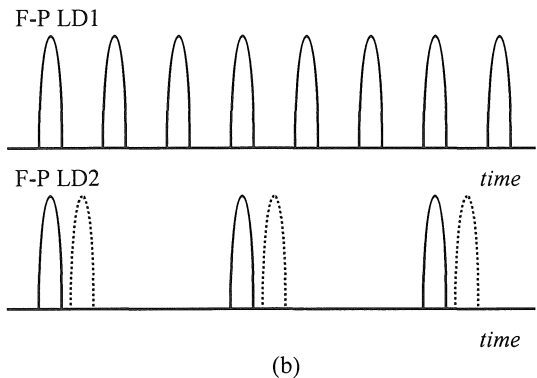
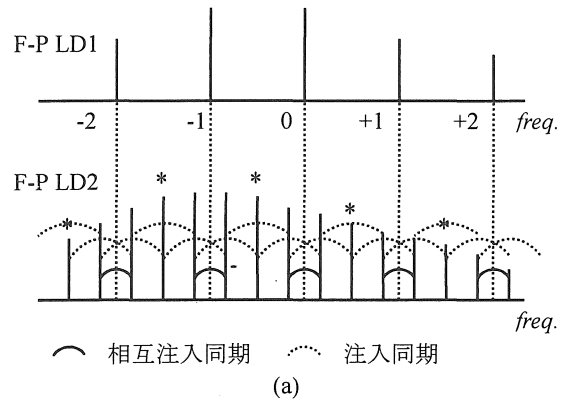


図 14 繰り返し周波数の三分周

繰り返し周波数の分周に比べると、その通倍は比較的容易に実現できる。

光時分割多重方式(OTDM)でよく用いられているように、モード同期パルス列を二分岐し、遅延合成すれば繰り返し周波数を通倍できる。また、繰り返し周波数 f_0 のモード同期パルス列を、フリスベクトルレンズが $n f_0$ (n は 2 以上の自然数)の Fabry-Perot 干渉計に通せば、出力光の繰り返し周波数は $n f_0$ となる。

分周と同様な手法を用いることも可能である。二通倍の場合の原理を図 15 に示す。モード同期した、縦モード間隔 f_0

の F-P LD1 出力を、縦モード間隔 $2f_0$ の F-P LD2 に図の周波数配置で注入する。F-P LD2 が注入同期して、繰り返し周波数 $2f_0$ のパルス列が得られる。

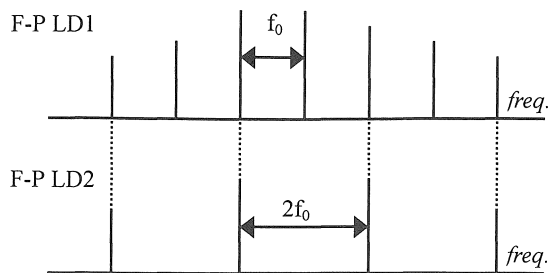


図 15 繰り返し周波数の二通倍

分周、通倍のいずれも縦モード間隔が精密に制御された F-P LD が不可欠である。エッチングによる鏡面作成や、面発光型のような堆積方向に鏡面がある構造、など各種の共振器長制御技術が必要となる。

6. まとめと今後の課題

cw 光注入による F-P LD の全光制御モード同期について、再現性の向上を中心とした検討を行った。

外部反射、特にセルフフォーカスでの反射によってモード同期特性は大きく変化することが分かった。1m 程度離れた点での微弱反射でスペクトル線幅が広がっている場合には、二本の主縦モードのみが発振し、cw 注入光の周波数を変化させるとパルスの繰り返し周波数が変化するという現象が見られた。一方、セルフフォーカスでの反射を利用してスペクトル線幅を狭窄化した場合には、比較的再現性よくパルスを発生することが分かった。また、F-P LD の端面処理については、AR-CL とする方が外部から制御しやすいことが分かった。

実用化に向けて、光技術によるパルス繰り返し周波数の分周法と通倍法を検討した。相互注入同期と注入同期のみを用いる手法では共振器長の加工精度に対する依存度が大きい。従って、パルス光注入や電気信号による制御などを併用した手法の検討が必要である。

今後は、外部反射の抑圧法と共に、セルフフォーカスでの反射を積極利用する方法を確立することにより、再現性の向上を図る予定である。また、繰り返し周波数の分周と通倍の実験を行い、最終的に電気信号への同期を実現したいと考えている。

参考文献

- 1) Y.Katagiri and A.Takada,"A harmonic colliding-pulse mode-locked semiconductor laser for stable subterahertz pulse generation", *IEEE Photon.Technol.Lett.*,Vol.9,No.11,pp.1442-1444(1997)
- 2) T.Hoshida, H.F.Liu, M.R.H.Daza, M.Tsuchiya, T.Kamiya and Y.Ogawa,"Generation of 33GHz stable pulse trains by subharmonic electrical modulation of a monolithic passively mode-locked semiconductor laser",*Electron.Lett.*,Vol.32,No.6, pp.572-573(1996)
- 3) M.D.Pelusi, H.F.Liu, D.Novak and Y.Ogawa,"THz optical beat frequency generation from a single mode locked semiconductor laser", *Appl.Phys.Lett.*,Vol.71,No.4, pp.449-450 (1997)
- 4) 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)
- 5) 水池秀仁, 鈴木基仁, 森正和, 後藤俊夫, 後藤了祐, 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サイエティ大会, C-4-5
- 6) M.Ogusu, K.Inagaki and Y.Mizuguchi,"Tunability for 60 GHz-band millimeter-wave generation using two-mode injection locking of a Fabry-Perot slave laser",*ECOC'99*, pp.I380-I381 (1999)

(受理 平成13年 3月19日)