

# マイクロ ECLD を用いた自動位相同期システムの開発

基盤理工学専攻 武者 満 研究室 伊藤航平

## 1. 序論

現在、レーザーは加工や通信、測定、医療など様々な分野で利用されている。その中でも、光通信においてレーザーは大きな役割を担っていると言える。そもそもレーザーは、「誘導放射による光の増幅」を意味する "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" の各頭文字をとって LASER といい、共振器を用いて光を増幅して得られる人工的な光である。レーザー光は指向性や収束性、単色性に優れているという特徴を持つ。レーザーを用いた光通信では、レーザーの周波数の高さによって広周波数帯域、大容量の通信が可能である。また、レーザーの指向性の良さにより通信の秘密保持が容易である。これらの理由で、現在では光ファイバーを用いた光通信が盛んに行われている。大容量の光通信には、狭い光周波数間隔の基準が必要である。ITU-T (国際通信連合の電気通信標準化部門) ではこの基準として「周波数グリッド」を勧告している。周波数グリッドは当初は波長 1.5  $\mu\text{m}$  近辺で 100GHz 間隔のものと考えられていた。しかし、最近では 12.5GHz 間隔のものも考えられおり、様々な周波数間隔のものがある。つまり、より一層高い光周波数の制御技術が求められているのである。この技術を可能にするのが、位相同期レーザーである。本研究では、位相同期レーザー作成のために 2 点の方法を用いた。

一点目が、光周波数コムにレーザーの周波数を同期させる方法である。25GHz 間隔の光周波数コムを発生させ、その -10、-5、0、+5 次の縦モード (125GHz 間隔) に超小型 ECLD (ITLA) を追従させた。この際の光コムは、共振器型の EOM を用いて発生させた。インライン型の EOM 光コムではサイドモードの SNR が低くなり、+10 次などの高次モードにレーザーの周波数を同期させるのが困難であったためである。

二点目が、マイクロ ECLD (TTX11537) を用いて、位相同期レーザーを発生させる方法である。この場合、光周波数コムに同期させるのではなく、同じマイクロ ECLD を 2 台用意してそれらを位相同期する。まず、このマイクロ ECLD を出力周波数を自動で制御するためのアプリケーションを LabView を用いて作成した。周波数に対応する、アクチュエーターの印加電圧を出力アプリケーションである。次に、2 台のマイクロ ECLD のビート周波数を、注入電流によって動かせる事を確認した。最後に、制御回路を通して、マイクロ ECLD に不帰還し、位相同期を試みた。

## 2. 原理

### 2.1 マイクロ ECLD の原理

本実験で用いたレーザーは、PURE PHOTONICSのPPCL300とNeo Photonics社のTTX11537である。これは、フィルター型のECLDである。小型ながら狭線幅のレーザーを出力する。周波数操作のアクチュエーターは大きく2つに分類される。粗く周波数操作をするアクチュエーターと、細かく周波数操作をするアクチュエーターである。粗く周波数を操作するのは、内部に内装された二枚のエタロンフィルターへの印加電圧である。この二枚のエタロンフィルターは異なる透過率のものである。細かく周波数を操作するアクチュエーターはゲインチップへの注入電流と、レーザーの基盤の制御端子への印加電圧である。PPCL300は、RS-232というアプリケーションを用いて、これらのアクチュエーターへ制御を全て自動化してある。TTX11537は自動化されていない。で

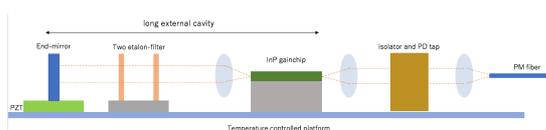


図1 マイクロ ECLD の原理図

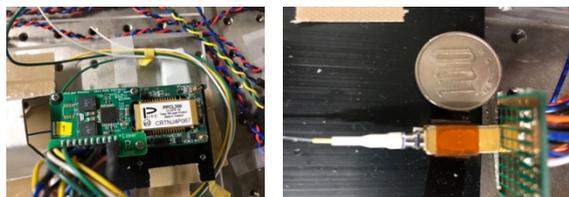


図2 PPCL300 (左) と TTX11537 (右)

### 2.2 光周波数コムについて

周波数コムは、John L. Hall 博士と Theodor W. Hansch 博士によって開発された光領域において周波数軸上に等間隔の縦モードが並んだ光である。現在では、光の物差しとして精密測距や光領域での周波数計測、広帯域の周波数基準として応用されている。具体的には光周波数コムは時間領域では超短パルスが一定時間間隔で並んだものであり、周波数領域では発振モード(縦モード)が一定間隔で並んだものである。周波数領域においての光周波数コムの姿が櫛(comb)に似ていることから、光周波数コムと呼ばれている。光周波数コムの  $n$  番目の縦モード周波数  $f_n$  は、繰り返し周波数  $f_{rep}$  とオフセット周波数  $f_{ceo}$  を用いて式(2.1)表される。光コムの概念図は図3に示す。

$$f_n = f_{ceo} + n \cdot f_{rep} \quad (2.1)$$

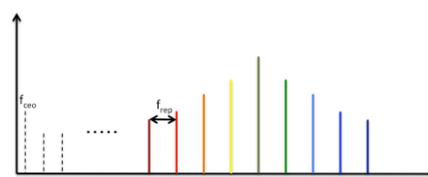


図3 光周波数コムの概念図

### 2.3 共振器型 EOM 光コムについて

光周波数コム[7]は様々な方法で実現できる。本研究で用いた光周波数コム発生器ODCG(Optical frequency comb generator)はEOM(Electro Optic Modulator)を用いて入射された光に位相変調を加える方式のものである。ここから、共振器型EOMを用いた光コムの発生原理について述べる。

まず、EOMについてだが最も単純なのは、屈折率が局所的な電界の強さの関数であるニオブ酸リチウム(LiNbO<sub>3</sub>)などの電気光学結晶で構成されているものである。これに電圧をかけた場合、電気光学効果によって結晶の屈折率が変わるので結晶の入射光に対して位相変調をかけることができる。ここで、印加電圧を周期的に変化させた場合の電場について考える。z方向に伝搬する電場 $E(z,t)$ は、比例定数 $A_z$ 、各周波数 $\omega$ を用いて式2.2で表すことができる。

$$E(z,t) = A_z e^{i\omega t} \quad (2.2)$$

このsinに恒等展開を適用すると、式2.2は式2.3で書くことができる。

$$\begin{aligned} E(z,t) &= A_z e^{i\omega t} \left( 1 + \frac{\Delta\theta}{2} (e^{i\omega_m t} - e^{-i\omega_m t}) \right) \\ &= A \left( e^{i\omega t} + \frac{\Delta\theta}{2} e^{i(\omega_m + \omega)t} - \frac{\Delta\theta}{2} e^{i(\omega - \omega_m)t} \right) \end{aligned} \quad (2.3)$$

この式から、元の信号に加えて $\omega - \omega_m$ と $\omega + \omega_m$ に二つの小さなサイドモードを持っていると解釈することができる。現実には無限にサイドモードが存在する。ヤコビ・アンガー拡張と呼ばれるベッセル関数を含む有用な恒等式存在す

る。これによってサイドモードを求めるための以下の式2.4が導き出される。

$$\begin{aligned} E(z,t) &= A_z e^{i\omega t + i\Delta\theta \sin\omega_m t} \quad (2.12) \\ &= A e^{i\omega t} \left( J_0(\Delta\theta) + \sum_{k=1}^{\infty} J_k(\Delta\theta) e^{ik\Delta\theta t} + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_k(\Delta\theta) e^{-ik\Delta\theta t} \right) \end{aligned}$$

以上より、入射光の周波数を中心にEOMの変調周波数 $\omega_m$ の間隔でサイドモードが発生して光コムが実現できることがわかった。

サイドモードのスペンを広げるためには補償をする必要がある。そこで、EOMをファブリーペロー共振器中に置く。共振器の干渉効果によって分散補償をする。高フィネスの共振器を利用することで数百台のEOMを直列に並べた場合と同じ効果が得られる。これによってスペンの大きな光周波数コムを実現している。EOM型光周波数コム発生器の概略図を図4に示す。

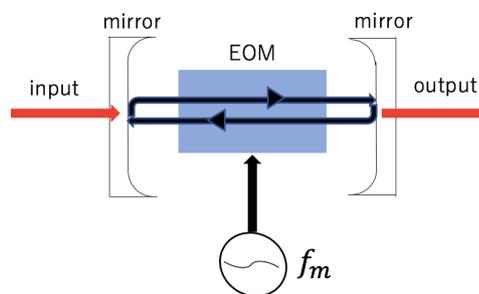


図4 共振器型EOMを用いた光周波数コム発生器

### 3. 実験

#### 3.1 共振器型光周波数コムの発生

本研究で発生させた共振器型 EOM 光コムの実験のセットアップの概略図を、図 5 に示す。実際に発生した光コムのスペクトルとインライン型の光コムのスペクトルの比較を図 6 に示した。

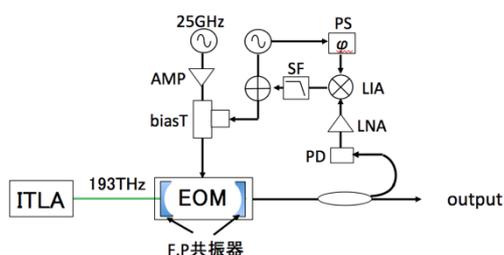


図 5 実験セットアップ

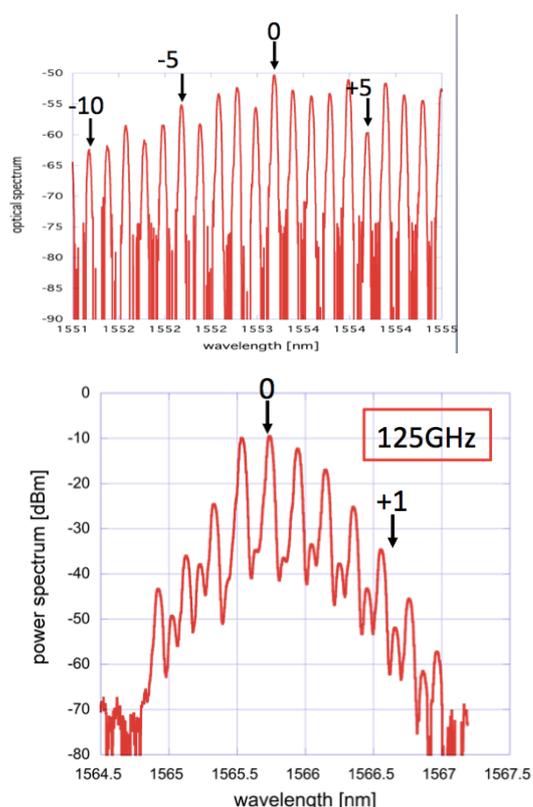
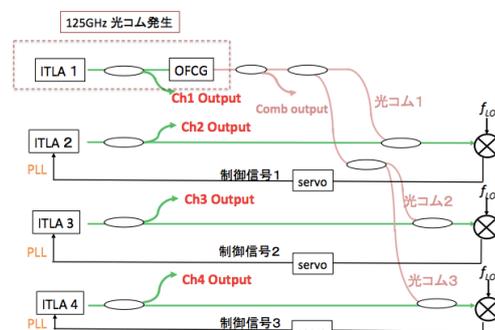


図 6 共振器型 EOM 光コム (上) とインライン型 EOM 光コム (下) の比較

#### 3.2 光コムを用いた ITLA の位相同期

図 7 に、実験セットアップの概略図を示した。



ITLA を 4 台用いて 4 チャンネル位相同期レーザー信号を実現する。一台の ITLA を EOM の OFCG に入射させての光コムを発生させる。この光コムのスペクトルを、25:75 と 50:50 のファイバーカップラを用いて三つに分配する。分配された光コムと ITLA2~4 のビート信号を PFD に入射させ、60MHz のローカル周波数とミックスし、誤差信号を取得する。この誤差信号をサーボ回路を通して ITLA の電流変調端子に不帰還することで、位相同期を試みた。結果を図 3.5,3.6 に示した。また、ITLA1~4 の周波数と光コムのスペクトルは常にモニターできるように、1:99 のファイバーカップラで Output 信号を設けた。

結果を、図 8,9 に示す。図 8 より、波長  $1.5\mu\text{m}$  帯において、複数の帯域で 4 チャンネルのレーザーが 125GHz 間隔に周波数同期されている事が確認できる。図 9 では、ビート周波数のスペクトルを確認したが、中心周波数 60MHz のサイドモードのキャリアのパワーが抑制されていない。これは、注入電流変調における制御帯域が不足している事が原因であると考えられる。

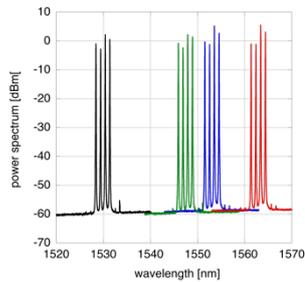


図8 位相同期した際のレーザーのスペクトル

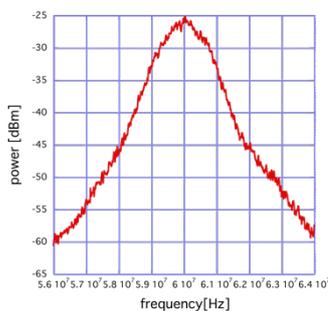


図9

ローカル周波数 60MHz と ITLA のビート周波数のスペクトル

### 3.3 マイクロ ECLD の周波数制御

マイクロ ECLD では、ゲインチップとシリコン基盤によって 50GHz 周波数を変化させられることがわかっている。つまり、エタロンフィルターによって周波数を 50 GHz 感覚で制御することができれば、全ての周波数を出力できる。しかし、実際にエタロンフィルターで周波数を制御したところ、いくら印加電圧を細かく変化させても、連続的でなく離散的に変化してしまった。これは、出力周波数が2枚のエタロンフィルターの透過率の共通部分によるものであることが原因であると言える。つまり、二枚のエタロンフィルターへの印加電圧を最適化すれば、連続

的に周波数を変化させることが可能であると言える。印加電圧を最適化し、ゲインチップとシリコン基盤で制御することで、全ての周波数領域におけるアクチュエーターの値を特定することができた。周波数に対応するアクチュエーターの値を表にしたものを、「周波数マップ」と呼ぶことにした。

### 3.4 出力周波数の自動制御

3.2 で、周波数に対応するフィルター 1、2、Si 基盤の印加電圧の値が全て把握できた。これらの電圧は、デジタルアナログコンバータ (DA コン) で印可する事にした。ここでは、周波数に対応する電圧を自動で出力するアプリケーションを LabView を用いて作成した。アルゴリズムを図 10 に示した。

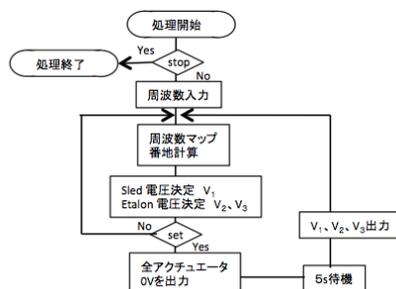


図10 周波数マップ出力アルゴリズム

この際注意した事は、電圧変化の際の動きである。マイクロ ECLD は、印加電圧の上げ下げによるヒステリシスが確認できた。よって、電圧を変化させる際には、一旦 0V を出力してから目的の値を出力するようにプログラムを設定した。

### 3.5 マイクロ ECLD のビート周波数測定

まず、3.3 のシステムを用いて周波数セ

ットを行い、193.8175THz 付近でのビート周波数を測定した。この際、PFD で位相同期に必要な誤差信号を取得するため、このビート周波数の SNR は 30dB 以上でなければならない。結果を図 11 に示した。

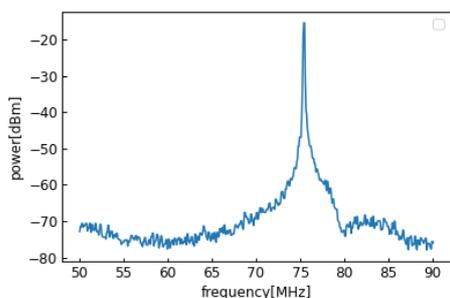


図 1 1 2 台のマイクロ ECLD 間のビート周波数のスペクトル

位相同期する際は、マイクロ ECLD への注入電流によってレーザーの周波数に制御をかける。そのため、ここではマイクロ ECLD の駆動に用いているカレントドライバに電圧をかけてビート周波数が実際に動くかどうかを確認した。結果を図 12 に示した。

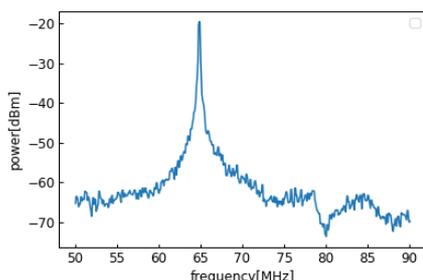


図 1 2 注入電圧端子へ+0.01V 印加した時のビートスペクトル

図 11,12 より、ビート周波数をゲインチップの注入電流によって操作できること、30dB 以上の SNR のビートスペクトルが取れていることを確認でき

た。

### 3.6 位相同期

3.3~3.5 を使って、位相同期の実験をした。この際に用いたサーボ回路は実験室で作成した。二台のマイクロ ECLD のビート周波数を PFD を用いてローカル周波数とミックスし、その位相差がゼロになるような制御をサーボ回路を用いて作り、マイクロ ECLD に負帰還した。結果を図 1 2 に示す。

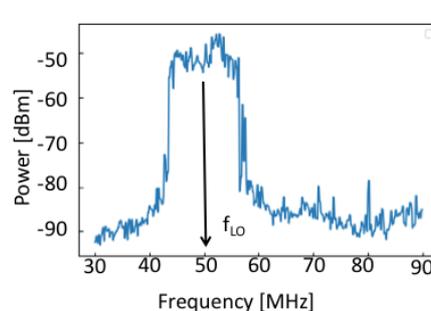


図 1 2 ローカル周波数とのビートスペクトル

図 1 2 より、中心周波数はロックされているものの、位相同期ができていないことがわかる。サーボ回路が最適化されていないことが原因として考えられる。

### 4. 展望

サーボ回路を最適化することで、中心周波数付近にパワーが集中し、サイドモードのパワーが抑制された、正確な位相同期が実現できるだろう。

### 5. 参考文献

[1] S. A. Diddams, et al. "Direct link between microwave and optical frequencies with a 300 THz femtosecond laser comb" Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 5102-5105