EOM 光コムによる複数レーザー間の位相同期

武者研究室　伊藤航平

[背景・目的]

光通信は、情報を波長が光信号として光ファイバーを用いて伝送する。このとき用いられる光信号は1.5μm帯の光である。伝送方法として、波長多重分割方式(DWDM)がある。これは1本の光ファイバーに多波長の光を入れて伝送する。このとき、伝送する光信号の周波数基準となっているのが周波数グリッドである。周波数グリッドとは、波長1.5μm帯域で等間隔に周波数基準光が配置されたものである。周波数グリッドの周波数間隔は、光通信で用いる際は100GHzや25GHである。間隔が25GHzと狭い場合、それぞれの基準光が高精度でなければならない。そこで本研究では1.5μm帯における25GHz間隔の周波数基準を作成するために、まず使用するレーザーのスペック評価を行った。続いて、繰り返し周波数25GHzの光コムをEOMを用いて発生させた。最後に、発生させたEOM光コムにレーザーを位相同期した。

[LDのスペック評価]

本実験で使用したレーザーは小型外部共振器型半導体レーザー(ITLA)である。原理図を図1、ITLAの実物を図2に示す。図2はITLAの大きさを分かりやすくするために100円玉と並べて撮影したものだが、非常に小さい事が分かる。このITLAは二枚のエタロンフィルターの温度、ピエゾにかける印可電圧、ゲインチップへの注入電流の三つによって出力周波数を変化させる。そこで、それぞれの性能を評価し、以降の実験で使用するアクチュエーターを決める。

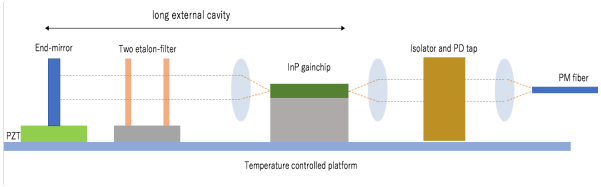

図1 ITLAの原理図

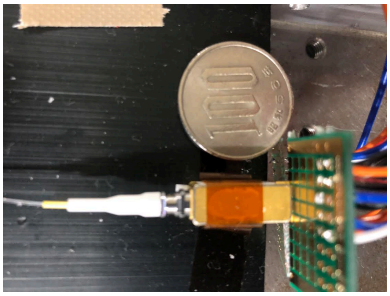

図2 ITLAの実物

(エタロンフィルターによる波長操作)

二枚のエタロンフィルターにはそれぞれ独立に電圧をかけて温度を変化させる事ができる。こそで、それぞれのエタロンフィルターをHTR1,HTR2として片方の印可電圧を固定し、もう片方を変化させる事で波長特性を調べた。結果を図3に示す。

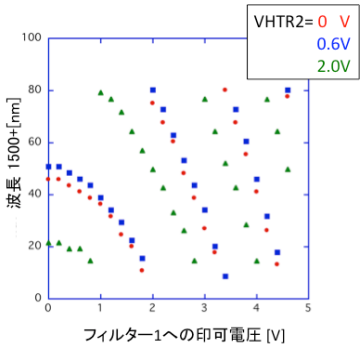

図3　エタロンフィルターの操作による波長特性

図3より、エタロンフィルターによって最大80nm程度波長を変化させる事ができる事が分かる。つまり、周波数はTHz オーダーで操作できる事が分かる。また、モードホップが起こっている事も分かった。しかし各フィルターの温度を最適化する事でモードホップ領域を避けることができる。

（ピエゾによる周波数操作）

ピエゾによる周波数操作の性能を評価するために、同じITLAを二つ用意し、片方の周波数を固定し、もう片方の周波数をピエゾで変化させてそれらのビート周波数の変化を測定する事で評価した。結果を図4に示す。

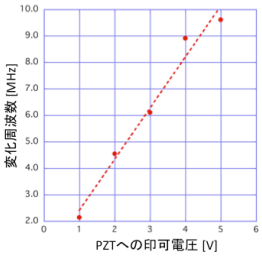

図4　ピエゾの操作による周波数変化

図4より、1Vあたり1.93MHz周波数を変化させる事が分かる。また、このITLAのピエゾには最大40Vまでしか電圧をかけられない。よって、ピエゾでは最大約80MHz しか周波数を変化させられないことが分かった。

（注入電力による周波数操作）

ITLAには注入電柱制御端子として、AM端子が取り付けられている。このAM端子にかける印可電圧を変化させる事でゲインチップへの注入電流を変化させ、出力される周波数を測定した。結果を図5に示す。

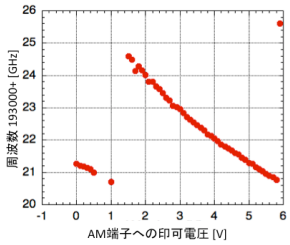

図5　注入電流操作による周波数特性

図5より、注入電流によって最大4GHz周波数を変化させられる事が分かった。また注入電流による操作でもモードホップする事があると分かる。最大4GHz周波数を動かす事ができる。

以上の三つの実験を比較すると、ピエゾによる周波数操作ではその可動範囲が小さすぎるので本実験では使えない事が分かった。そこで、本実験ではアクチュエーターとしてエタロンフィルターへの印可電圧とゲインチップへの注入電流を選択した。以降の実験では、これらの操作は全て専用のソフトを用いてPCから行った。

[EOM光コムの発生]

本実験では、電気光学変調子(EOM)を用いて光周波数コムを発生させた。EOMは、電圧をかける事で電気光学効果によって入射光に対して位相変調をかけることができる素子である。EOMに入射した光E(t)は以下の式1のように変調される。f_{comb}はEOMにかける印可電圧の変調周波数、ϕ_mはEOMの単位長さ辺りの変調指数である。

$$E(t) = E_0 \, exp(j\phi_m \, sin(2\pi f_{comb} t))$$

$$= E_0 \sum_{-\infty}^{\infty} J_n(\phi_m) exp(jn(2\pi f_{comb})t) \qquad (式1)$$

式1より、サイドモードになるにつれてパワーが下がっていく事が数式から確認できる。

EOMに印可電圧によって位相変調をかけるにあ

たり、本研究室のシグナルジェネレーター(SG)は最大で 20GHz しか周波数を出せなかったため、周波数逓倍器を用いて25GHz にした。これによって、繰り返し周波数が 25GHz の EOM 光コムを発生させた。実際に発生した EOM 光コムのスペクトルを図6に示す。また、この EOM 光コムの一次のサイドモードとレーザーのビート信号を取り、その SNR を評価した。これは、位相同期をする際に用いる周波数位相弁別器（PFD）によって周波数の引き込みが可能かを確かめるためである。PFD とは位相差に比例した電圧を出力する回路である。PFD で周波数の引き込みをするためには、ビート信号の SNR が 30dB 以上でなければならない。実際に取得できたビート信号のスペクトルを図7に示す。

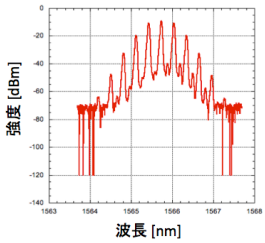

図6 EOM 光コムのスペクトル

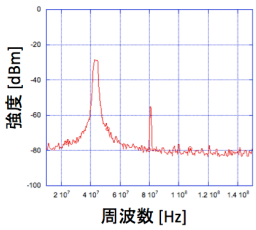

図7 ビート信号のスペクトル

図7より、SNR が 30dB 以上である事が読み取れるので、一次のサイドモードにレーザーを引き込めることが確認できた。

[位相同期]

以上の実験をふまえて、実際に EOM 光コムにレーザーを位相同期した。まずは、位相同期のための回路(PLL)を作成した。回路図を図8に示す。

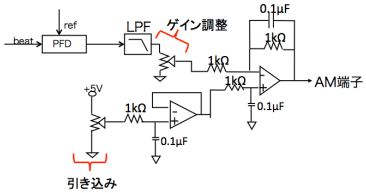

図 8 PLL 回路図

ここで用いた PFD は研究室にある面実装回路に素子を配置することで自作した。実際の PFD は図 9 である。

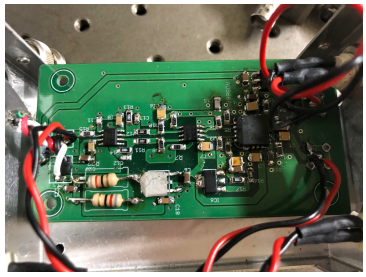

図9　自作したPFD

図8の PLL によってリファレンス周波数にロックされた EOM コムの 1 次のサイドモードとレーザーのビートのスペクトルと位相雑音を測定した。結果を図10、11に示す。

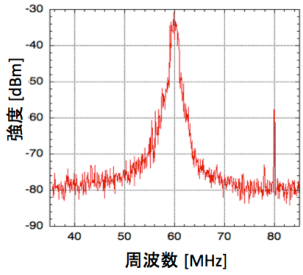

図 10 リファレンス周波数にロックされた EOM コムとレーザーのビート周波数スペクトル

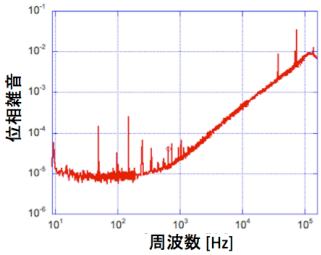

図10　図9の位相雑音

まず図9についてだが、スペクトルの中心周波数は60MHz となっている。今回用いたリファレンス周波数は60MHz であるので中心周波数はロックできている事が分かる。しかし中心周波数の両サイドの周波数でのパワーも強く、位相同期はなされていない。そこで、図10を見ると制御帯域が150kHzである事が分かる。これより、今後この制御帯域を広げていく事で位相同期を達成できると考えられる。

[まとめ]

(ITLA について)

・フィルターでの操作では THz オーダーで周波数を動かす事ができる

・注入電流での操作では GHz オーダーで周波数を動かす事ができる。

・ITLA をPC を用いて操作できるようにセットアップできた。

(EOM 光コムについて)

・EOM と SG、周波数逓倍器などを用いて実際に繰り返し周波数が 25GHz の EOM 光コムを発生させることができた。

(位相同期について)

・PLL を作成し、レーザーの中心周波数をEOM 光コムにロックする事ができた。

[展望]

・フィルタの最適化を行い、制御帯域を広げて位相同期を実現する。

・光コムの１次以外のサイドモードにも位相同期をする。