ファイバ型光コムの EOM を用いた高速制御

武者研究室 照井李佳

1.研究背景

1999年に、超短パルスモード同期レーザによる光コムを用いて周波数計測ができることをドイツマック スプランク量子光学研究所のTheodor W. Hänsch が実証した。翌年に米国コロラド州のJILAの研究グル ープがモード同期レーザ単体による自己参照法を用いたレーザ周波数の絶対計測を実現した。これらの研 究は、光コムの基本的な原理やその実証を示すものである。ホールとヘンシュは、「光コム技術を含む、 レーザを使った精密分光の発展への貢献」が認められ、2005年度のノーベル物理学賞を受賞している。 光周波数コム(光コム)は、周波数軸上に等間隔に並んだモードからなる櫛(コム)形のスペクトルを持つ光 信号である。これを周波数軸上で見ても等周波数間隔に並んだスペクトルとなることを利用して、周波数 の目盛りとして使う。ファブリ・ペロー共振器に代表される縦モードは、光コムによく似たスペクトルを 有しているが、その縦モードの周波数間隔はc/2nL(cは光速、nは位相屈折率、Lは共振器長)の影響により 変化してしまう。これに対し、光コムのモード間隔は時間軸上の光パルス列の時間間隔の逆数で決まるた め波長によらず一定である。そのため図1で示すように、ゼロから数えてn番目の周波数は、

$f_n = f_{ceo} + n f_{rep}$ として表すことができる。



図1光周波数コムの概念

 f_{rep} は繰り返し周波数 (repetition frequency: f_{rep})であり、時間軸上で観察したときの光パルスの間隔時間 の逆数に等しい。また縦モードの周波数を仮想的に0まで拡張すると、0と重ならない余りの周波数、キ ャリアエンベロープオフセット周波数 (carrier envelope offset: f_{ceo}) 持つ。 f_n と測定したい周波数のビート をとることにより、周波数のものさしとして用いることができる。

2.研究概要

本研究では通常のファイバ型光コムに EOM を挿入し、より広帯域・高利得でのゆらぎの抑制を行うこ とを目的とした。全ファイバ型の超短パルスレーザを作成し、偏光調節モジュールを調節することにより モードロック発振させた。このとき繰り返し周波数は約 39MHz となった。*frep*のゆらぎを抑制するために PZT のみ電圧を加え、光路長を変化させたところ 2 時間で 110Hz の変動を 2mHz まで抑えることができ た。しかし PZT の機械共振のため 400Hz 以下でしか制御することが出来なかった。そのため新たに EOM にも電圧を加え、EOM と PZT の両方を用いてゆらぎの抑制を行った。 3.実験結果と考察

3.1 超短パルスレーザの作成



図2ファイバ型光コムの概念図

EDF で増幅された光はリング型共振器内を回る。リング内には偏波依存型アイソレータが入っており、 その前後は偏光板によって、特定の偏光の光のみ通過するようになっている。アイソレータの前後には偏 波回転コントローラが入っており、偏光を特定の状態に合わすことができるようになる。2つの偏光板で は強い光のみを通し、弱い光は通さない。そのためモードロック発振が起こり超短パルスが発生する。



図3モードロック発振時のパルス波形 図4モードロック発振時のスペクトル

モード同期発振を起こした場合、繰り返し周波数 39.2MHz のパルスが得られた。

3.2frenの制御と安定度

*frep*を検出したら、それを安定化する必要がある。実際の実験図を図5に示す。発振している超短パルスレーザの信号を PD で受け、それとほぼ同じ周波数を RF 発振器より発生させる。二つの信号は位相比較器によりその位相差が誤差信号として出力される。その後安定化回路により制御信号が発生させられ、PZTの電圧がコントロールされる。実際の周波数変化は周波数カウンタによって計測される。また、周波数カウンタと RF 発振器には基準として 39MHz の信号を入力している。



図 5frep安定化の実験系

図6に示すように2時間で39MHz中心の110Hzの変動を測定した。これは実験室内の温度変化や振動 が原因である。光ファイバは細く、室内の温度変化に影響を受けて伸び縮みをする。ファイバの長さが温 度変化によって変わるということは、共振器の実効長もそれと共に変化する。よって室内の温度変化と同 時に繰り返し周波数も変動する。

図7において45秒のときに制御を加えた。その後100秒までは*frep*が安定化され、周波数変動がない直線になっていることがわかる。 次に、精度を上げて制御を加えた後の周波数変動を確認した。結果は図8に示す。制御をかけることにより2時間で2mHzまで変動を抑えることができた。



次に測定したゆらぎをアラン分散を用いて評価する。



図 9 アラン分散を用いた周波数変動の評価

無制御時には1秒で10⁻⁸の安定度であるが、時間が経つほど安定度は悪化していく。一方制御時には1秒で10⁻¹¹以下、2000秒で7×10⁻¹²に到達している。

3.3PZTの制御帯域と EOM の伝達特性

制御を加える際には制御帯域についても考えなければならない。図 10 に位相雑音スペクトルを示す。無 制御時には 1/f 雑音の影響を受けていたが、制御を加える事により低周波域での雑音を抑制することが可能 となった。



700Hz 付近で PZT が発振しかかってためそれ以下の帯域でしか制御を行うことは出来ない。次に制御の 特性を示すオープンループ伝達関数を図 11 に示す。10kHz 付近での鋭いピークは PZT の機械共振の影響 である。機械共振に伴い位相が回転してしまい、5kHz 付近では制御の条件である位相回転角が 180 度以 下という条件を満たしていない。また gain が多いほど制御がかかりやすいため、実際には 1kHz 以下でし か制御できない。





図 12 伝達特性測定のための実験系

図 13 EOM の伝達特性

まずモードロックがかかった状態で外部から EOM に変調を加え、屈折率を変化させた。屈折率が変わる ことにより光路長も変わり、 $f_{rep} = c/l$ より繰り返し周波数も変化する。mixier では位相誤差を測定してい るため $V_{out} \propto \Delta \phi_{rep}$ となっている。従って伝達関数は $T = \Delta V_{out}/\Delta V_{in}$ として表すことができる。実験結果を 図 13 に示す。ただし f_{rep} 制御のループ内なのでサーボフィルタの gain で補正した。

周波数と位相は $2\pi f = d\varphi/dt$ として表現されるため、応答関数は1次の積分の形として測定できる。gain が 10kHz で落ちてしまったのは PZT の機械共振が原因である。この結果から EOM は周波数制御器とし て広帯域に線形応答することがわかった。

4.まとめと今後の展望

超短パルスレーザを作成し、モードロック発振させたところ 39.2MHz の繰り返し周波数を観測した。PZT を用いて周波数雑音の制御を行った。無制御時には 2 時間で 110Hz だったが、制御を加えると 2 時間で 2mHz まで抑えることが出来た。EOM の伝達関数を測定したところ EOM が周波数制御器として広帯域に 線形応答していることを確認した。今後は EOM を用いて PZT のみを用いたときより広帯域、高利得での 制御を行なっていく。

参考文献

レーザー学会、レーザー研究 2011 年 11 月 「光周波数コムが拓く新時代」 解説小特集号