

光コムのパルスタイミングジッタ検出器の開発

電子工学科 植田研究室 HADI KUSUMA

1. 序論

自然現象や生命活動は原子や分子の並び方や動き、そしてこれらの集まりの中での電子の動きにその源がある。原子や分子の配列と動きや、電子の動きを観ることができれば、難病の原因解明と新薬の創出など、私たちの生活の向上に大きく役立つと期待を寄せている。このナノメートルの世界を観るためにはナノメートル以下の波長の光、すなわち X 線が必要となる。そこで考えられたのは X 線レーザーである。レーザーは位相の揃ったコヒーレントな光を発生するため、X 線レーザーが実現すれば原子や分子の瞬間的な動きを観察することができると考えられる。現在、兵庫県佐用郡にある大型放射光施設・SACLA サイト内において、この技術を用いた X 線自由電子レーザー (XFEL) の施設が 2006 年に建設が始まり、2011 年 2 月に完成された。

XFEL の発生装置は電子銃、線形加速器、アンジュレータ (永久磁石列) の 3 つの部分に分けられる。安定に XFEL を発生させるには加速器のタイミング・高周波を 100 fs 以下の時間精度で同期させる必要がある。また、利用者においてポンプ・プローブ実験のように時間精度が必要な実験を行う場合にも電子銃と観測装置とを 100 fs 以下の精度で同期させる必要がある。この時求められるパルスの timing jitter は 50 fs 以下となっている。そこで本研究では、RF 信号とパルスタイミングを同時に伝送できる光コムを用いて光ファイバーの伝送システムを開発し、ファイバー長の揺らぎに起因する RF 位相揺らぎと timing jitter を評価した。しかし、timing jitter の測定器である相互相関計には測定限界があることがわかったため、相関計自体を改善する必要がある。具体的には光周波数コムの光源により短期安定度の高い光源を使用することで SN 比を上げることができると考えられる。また、測定系全体の安定性を上げることによって、機械的安定性と長期安定度の高い相関計が得られる。相互相関計の測定限界を向上させることが目的とした。

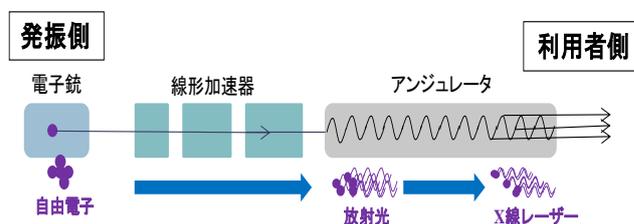


図 1. XFEL 発生装置の概略図

2. 原理

2.1 光周波数コム

本研究では信号伝送には周波数コムというものを利用した。光周波数コムとは、時間軸上では超短パルスが一定時間間隔で並んだものであり、周波数軸上では発振モードが一定間隔で並んだものである。光周波数コムの特徴は高周波信号 (RF 信号) と光パルスを同時に伝送できる点である。図 2 は横軸を周波数で見た光周波数コムを表している。図 3 は横軸を時間で見た光周波数コムを表している。これよりわかるように周波数領域では縦モード間のビートとして高周波を伝送できる。また、時間領域ではパルスタイミングをクロックとして伝送することができる。

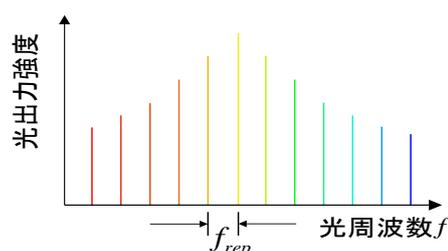


図 2. 周波数領域で見た光コム

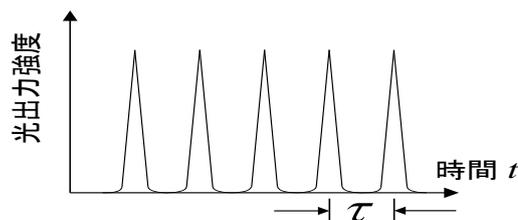


図 3. 時間領域で見た光コム

2.2 非線形光学結晶

非線形光学結晶とはレーザーのような強い光に対する物質の非線形な応答を利用し、光の周波数変換（高調波発生）や光パラメトリック発振を行うために使用される光学結晶である。このため、波長変換結晶と呼ばれる場合もある。光の周波数変換には和周波発生（ $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$ ）に代表される高調波発生、その他に差周波発生（ $\omega_1 - \omega_2 = \omega_3$ ）や光パラメトリック発振（ $\omega_1 = \omega_2 + \omega_3$ ）などがある。

本研究では、HC Photonics 社製の PPLN（Periodically Poled LiNbO₃=周期分極反転二オブ酸リチウム）結晶を用いた。PPLN には 2 種類があり、バルク型と導波路型である。バルク型 PPLN は高出力と大きな開口部という利点があるのに対して導波路型 PPLN は緊密に長距離にわたってレーザー光を閉じ込めることにより、非線形効率を高めることができるという利点がある。今回は本実験ではバルク型の PPLN を用いて第二高調波発生の実験を行った。結晶長は 10 mm、断面は 1 mm × 3 mm の長方形を成している。第二高調波の出力は基本波のパワーの 2 乗に比例するため、結晶中に効率よく単一偏光レーザーを入射させる必要がある。また、バルク型ではレーザー光が回折されて第二高調波のパワーは焦点条件と結晶の光学特性に依存する。そのため、ビーム径の絞り込みが重要な要素となる。図 4 は PPLN の構造を示す。

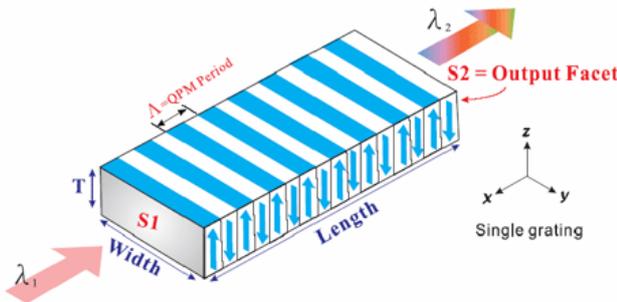


図 4. PPLN の構想図

3. 実験と結果

3.1 光源

本研究では、光源には我々の研究室で製作された波長 1560 nm のエルビウムドープファイバーを用いたモード同期レーザー光コムを使用した。このレーザーはスペクトルの半値全幅 17.5 nm、フーリエ限界パルス幅が 464 fs の超短パルスが発生し、繰り返し周波数 54.7 MHz である。図 5 はそのエルビウム添加ファイバーを用いたモード同期レーザー光コムの概略図を示す。

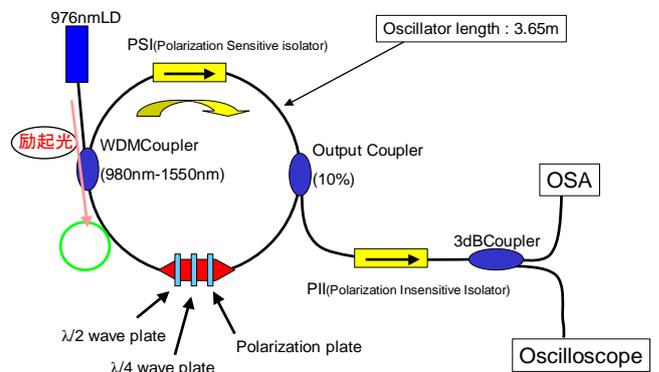


図 5. モード同期レーザー光コムの概略図

3.2 第二高調波発生

実験手順はまず、モード同期レーザーのビームをコリメートレンズで平行光に直した後、円偏光の光を $\lambda/2$ 板と $\lambda/4$ 板を用いて単一 S 偏光にした。その後、 $f = 100$ のレンズで集光させて、PPLN 結晶に入射させることで SHG を発生させ波長 780 nm の光が出るようにした。この時に基本波の 1560 nm の光が残るため、ダイクロイック・ミラーを用いて反射することにより取り除いた。このときに発生した SHG の光はスペクトルアナライザを用いて観測した。

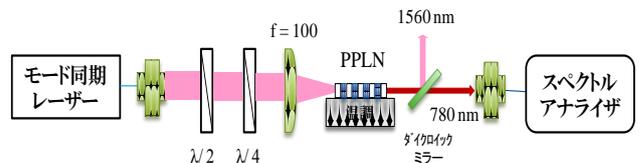


図 6. 第二高調波発生実験系

スペクトルアナライザを用いて発生した第二高調波のスペクトルを測定した結果は 図 7 に示す。

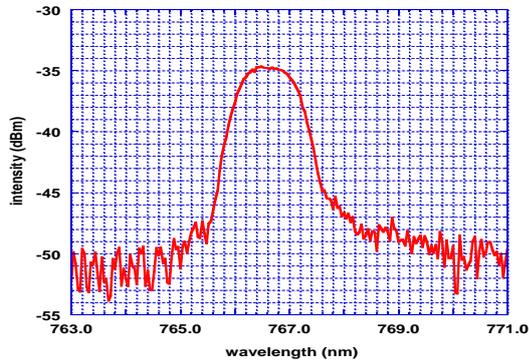


図 7. SHG のスペクトル

図 7 より発生した第二高調波が中心波長 767 nm で基本波の波長 1560 nm よりも短波長の方にあることがわかった。

3.3 相互相関計の製作

これまでに植田研究室で製作されたタイミングジッタの測定器である相互相関計は system noise floor の測定限界で制限されていることがわかった。本研究では、相互相関計を改善するため、具体的には光周波数コム光源により短期安定度の高い光源を使用することにより、SN比を上げることができると考えられる。また、測定系全体の安定性を上げることによって、より機械的安定性と長期安定度の高い相関計が得られると考えられる。図 8 と図 9 は実際に相互相関計を設計して製作したものとその概略図を示す。

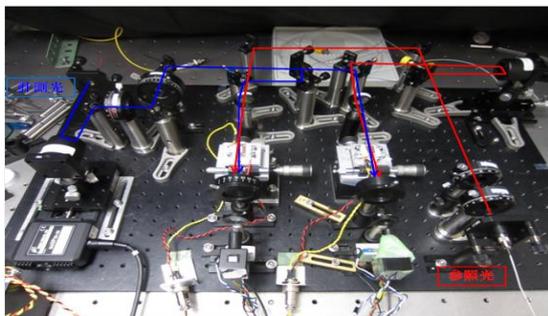


図 8. 製作した相互相関計

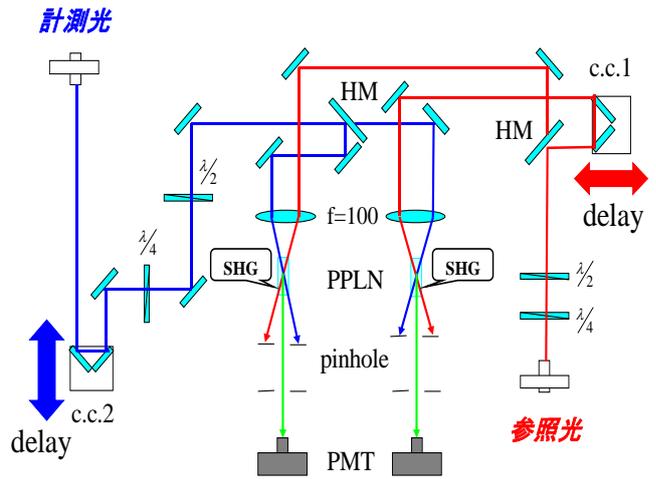


図 9. 相互相関計の概略図

3.4 相互相関計の評価

次は図 9 を用いて相互相関計自体の timing jitter の測定原理を説明する。光源には 1560 nm のモード同期レーザー光コムを用いた。まずは光源を 3 dB カプラーを用いて参照光と計測光に分けた。その後は図 9 に示すようにそれぞれの光を実験系に通して非同軸で PPLN 結晶に入射させることで第二高調波 (SHG) を起こし、それを光電子増倍管で観測した。この時、corner cube 2 を掃引することにより、delay time を変化させ delay time に対して相互相関波形を得ることができる。さらに corner cube 1 を動かすことによって参照光の delay を調整し、最初のパルスに対して得られるパルス波形が半パルスずれて現れるようにする。この状態で、得られる 2 つの相関波形 を電氣的に差し引きすることにより timing jitter の弁別曲線が得られる。この弁別曲線の 0 点付近での揺らぎを観測することによりリアルタイムで timing jitter を測定することが可能となり、相関計自体の揺らぎに起因する timing jitter を電氣的に得ることができる。

今回の実験で得られた弁別曲線よりその 0 点付近を 1 時間ほどにわたって観察した電圧変化を表す時系列信号は図 10 に示す。

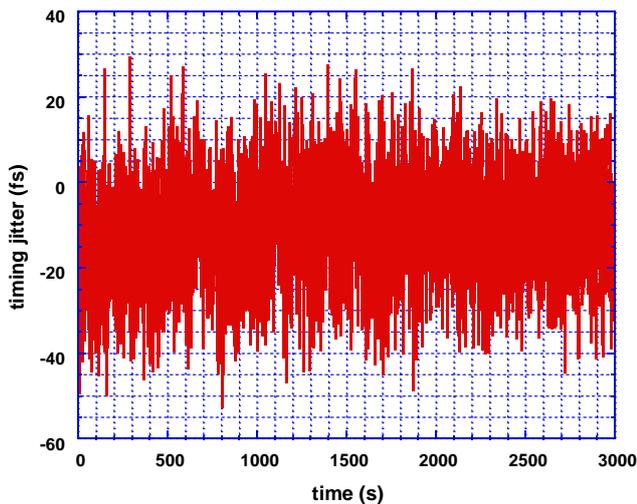


図 10. 時系列信号

図 11 は timing jitter のアラン分散の比較を示す。青点はこれまでに製作された相互相関計の system noise floor を示す。緑点はこれまでにを行った RF 位相揺らぎの測定結果より得られた測定限界の予測値を表しているものである。赤点は今回再設計して製作した相互相関計の system noise floor を示す。この図より今回の製作した相互相関計はこれまでに製作された相関計より測定限界が向上されたことがわかる。また、予測したものよりも一桁以上 system noise floor が低下し、きちんとしたパルスタイミングジッタの評価が可能と期待される。

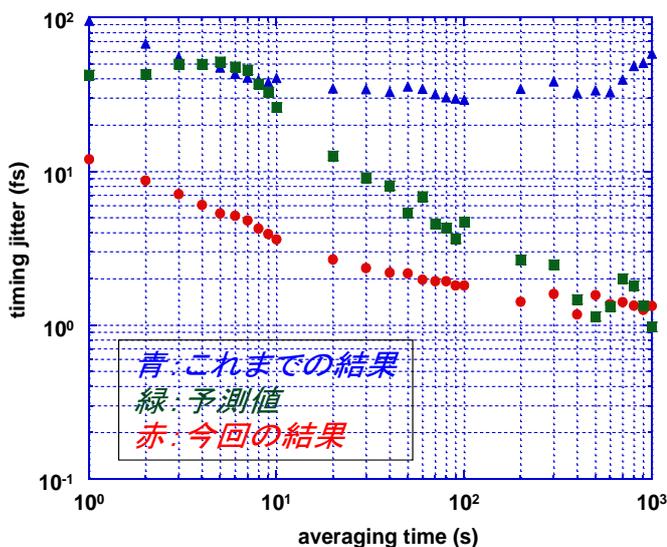


図 11. timing jitter のアラン分散

4. まとめと今後の課題

本研究では、これまでに製作された相互相関計の測定限界を向上させるために相互相関計を設計して再構築した。実験結果より今回の相互相関計自体の timing jitter は平均時間 10 s 以上では 10 fs 以下になったことがわかった。これまでの結果と比較したところ、今回の system noise floor がより抑制されていて相互相関計の測定限界が向上されたと考えられる。その要因としては、一つ目は今回用いた光源であるモード同期レーザー光コムのパルス幅が以前用いた EOM 型光コムに比べ、1/3 ほど狭いため得られた弁別曲線の傾きが鋭くなり、SN 比が上がったと考えられる。また、今回は測定系全体を改善することにより機械的安定性が向上され、さらに長期的安定性にもつながったと考えられる。したがって、相関計の測定限界を向上させることができ、timing jitter 測定用としてより正確な評価が可能になったと考えられる。

本研究では、XFEL の運用を目的とするため実際に EOM 型光コムを使用しなければならない。EOM 型光コム of 繰り返し周波数は 5.712 GHz であり、この高周波の目的は実際に加速器を同期するためである。一方、モード同期レーザー光コムを持っている繰り返し周波数は 54 MHz であるため、timing jitter 測定用のみには使用できないことがわかった。今後の課題としては我々の研究室で開発された安定化ファイバーと光源に EOM 型光コムを用いて、今回製作した相互相関計で timing jitter 測定実験を行う必要がある。

5. 参考文献

J.Kim, L.Chen, Z.Zhang, F.N.C.Wong, and F.X.Kärtner, “Long-term femtosecond timing link stabilization using a single-crystal balanced cross correlator,” OPTICS LETTERS, Vol.32,No. 9, 1044-1046 (2007)