

DEVELOPMENT OF A 800 nm COMB LASER DRIVEN BY A 1500nm COMB LASER AS TIEM REFERENCE FOR A PUMP-PROBE EXPERIMENTS OF XFEL/SPring-8

Yuji Otake^{1,A)}, Naoyasu Hosoda^{A)}, Hirokazu Maesaka^{A)}, Shinich Mastubara^{A)}, Takashi Ohshima^{A)}

A) RIKEN, XFEL Joint Project /SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148, Japan

Abstract

A pump-probe experiment using XFEL/SPring-8 as a probe laser is one of the most prominent parts to extract the future of a coherent short-pulse. A commercial Ti:Sapphire mode-locked laser system is used as a pump laser. However, the time jitter of the mode locked laser, as which is caused by the noise of an electrical mode-locking circuit, is around several hundred femto-seconds. This jitter value is not enough for a requirement of our pump-probe experiment with a laser pulse width of several ten femto-seconds. To improve this time jitter, the method, using a 770 nm Ti:Sapphire laser amplifiers directly driven by a 1540 nm master optical source as a time reference signal source for an XFEL accelerator, was devised. This method can eliminate the noise caused by the electrical mode-locking circuit. The basic principle of the method was proved by a preliminary experiment with laser pulse manipulation employing an E/O crystal.

XFEL/SPring-8のポンプ・プローブ実験のための1500nm帯時間基準コムレーザー駆動ポンプ用800nm帯域レーザーの開発

1. はじめに

X線自由電子レーザー^[1]を使った代表的な実験は、その数十フェムト秒の短パルス光という特性を利用したポンプ・プローブ実験である^[2]。このポンプ・プローブ実験では、X線レーザーがプローブ光でチタンサファイアレーザーがポンプ光である。ポンプ光で励起された実験試料の時間を追った変化を、プローブ光によりX線回折法などで観測する。この実験に必要な時間精度は、たとえば、光励起相転位に起因した分子・原子の電子分布状態変化を観測する場合、フェムト秒領域の時間精度が必要である。

ポンプ・プローブ実験では、フェムト秒幅のX線自由電子レーザー光とチタンサファイア・モードロックレーザー光の両短パルスを同期させる。その実験用の装置の構成を図1に示す。同期のための時間基準信号は、X線自由電子レーザー用加速器の加速高周波のサブハーモニクス信号を使用する。それは、市販のモードロックレーザーの使用を前提としているからで、そのサブハーモニクス信号によりモードロックをかける。この同期手法は、レーザーからのコムパルスをフォトダイオードで電気に変換し、フィルターでサイン波にした信号とサブハーモニクス信号の位相比較をして、レーザーの空洞長に帰還制御をかけるものである。電気信号によるモードロックでは、電気信号に含む多くの熱やショット・外来ノイズで、モードロックの時間ジッタを数百フェムト秒より低くすることが難しい状況である（市販品のカタログ参照）。故に、現状の数百フェムト秒の同期精度（時間ジッタ）では、前記したフェムト秒領域のパルスのタイミングを決定するに

は十分でない。我々は、要求の数十フェムト秒幅のポンプとプローブ光両パルスの時間ジッタを数十フェムト秒以下に抑えるために、電気の同期化回路を使用しない方法を考案した。

現状、SCSS試験加速器の時間基準信号源は、46fs (rms) の5712MHz加速高周波と電子ビームの時間ジッタを達成できるノイズレベルである^[3]。更に、この信号源のノイズレベルを7fs相当しか増加しない光高周波伝送装置の開発に成功している^[4]。このことから、考案した光伝送・制御のみのチタンサファイアの同期システムを作れば、50fs以下のポンプとプローブ光両パルスの同期も夢ではない。

当面の本システムの開発の目標は、原理実証に重きを置いている。この報告では、アイデアと原理検証のための予備実験の結果を述べる。

2. 1500nm帯時間基準コムレーザー駆動ポンプ用800nm帯域レーザー

2-1 システム概要

既に述べたように現状技術では、市販のモードロックレーザーを電氣的に同期させると、同期精度がノイズにより数百フェムト秒が限界である。これを改善するためには、なるべく電気の能動素子を使用しない方法でポンプレーザー光を生成する必要がある。そこで考案したのが以下の方法で、図1の点線内を改良した装置である。それを図2に示す。この方法では、まず、自由電子レーザー用加速器の加速周波数（5712MHz）に高精度に同期した同じ繰り返し周波数の光コムパルス列を作りだす。このパルス列は、光コム発生器^[5]またはモードロックレー

¹ otake@spring8.or.jp

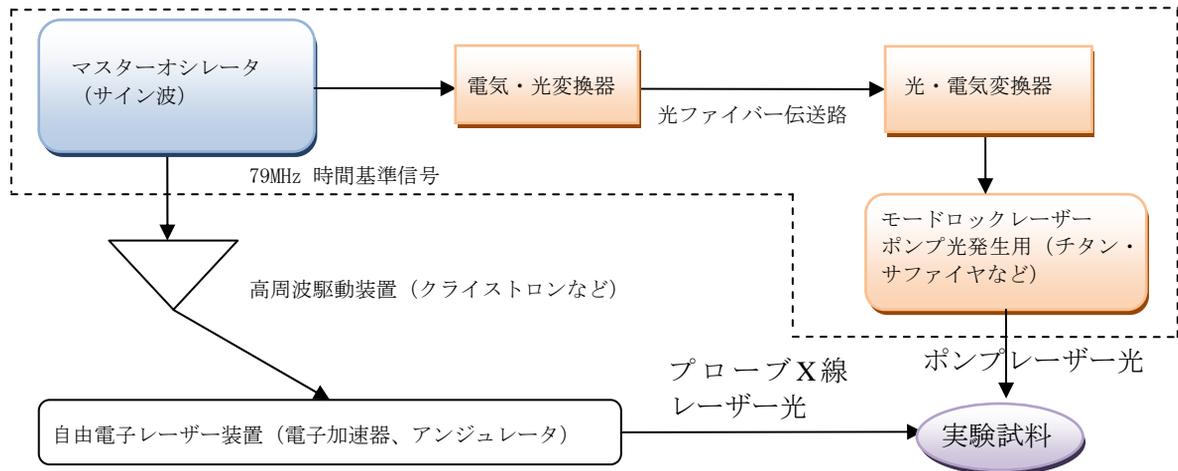


図1. 市販のチタンサファイアレーザーをポンプ光に、自由電子レーザーをプローブ光に使い、両者を同期させる手法。点線の範囲内が今回改良する部分。

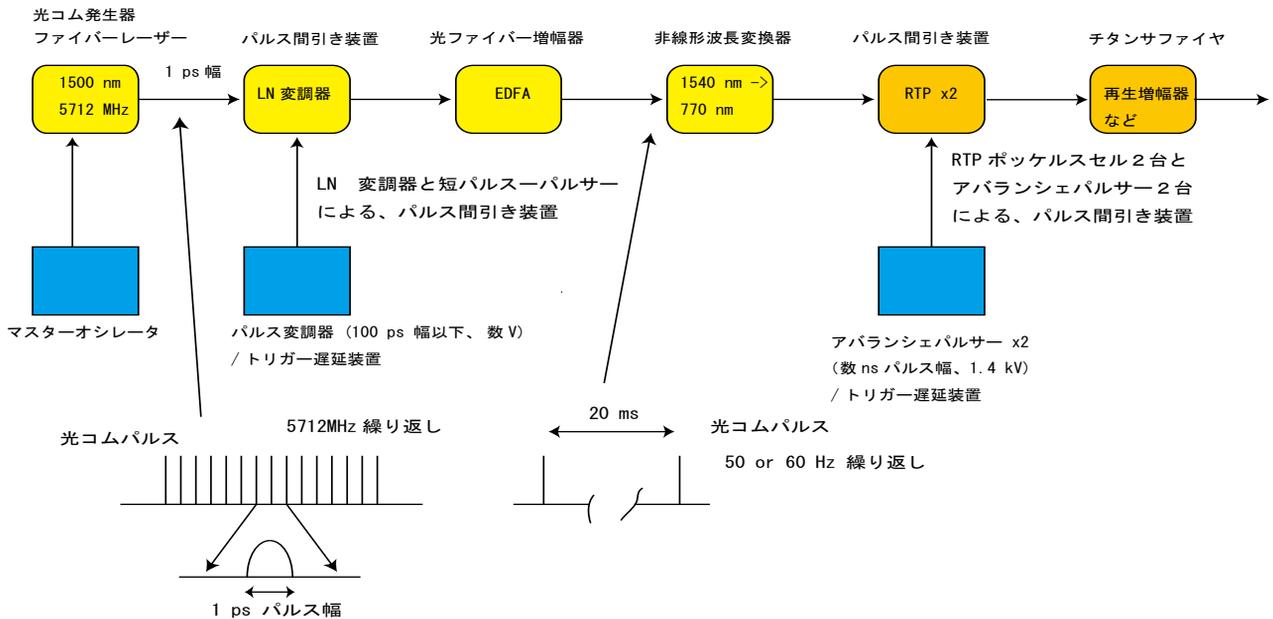


図2. 1500nm時間基準コムレーザー光による800nmチタンサファイアレーザーの直接駆動系統図

ザー（主にファイバーレーザー^[6]）にて生成される。生成したコムパルス列は、情報通信で良く使用される1500nm帯のレーザー光であり、5712MHz繰り返し（175ps）で1ps以下のパルス幅を持ち、時間基準信号となる。情報通信で多用されている1500nm帯の光を使用することで、光学部品の量産効果から装置の製作コストが低減される。この信号は、位相安定化光ファイバー^[7]でレーザー源から使用場所（加速器または実験室など）に送られる。送った信号は、電気光学結晶を使ったLN変調器^[8]と高速パルス発生器によるシャッター機能により、加速器の繰り返し周波数や実験に必要な60Hz以下などの非常に低い繰り返しコムパルス列に間引かれる。さらに、この繰り返しの低いコムパルスは光ファイバーアンプ（EDFA）^[8]で増幅される。続いてPPLN

（Periodically Poled Lithium Niobate）の非線形光学結晶に入射され、たとえば1540nmのレーザー光はチタンサファイアレーザーの発振波長に近い770nmに変換される。この770nmの短パルスレーザー光は、アバランシェパルスにて駆動される直線に並んだ各2個のポッケルスセル^[9]と偏光板（シャッター）に通され、パルスの前後の余分なDCバイアス成分のレーザー光が除かれる。2段目の770nm光に対するシャッター操作は、間引かれたレーザーパルス光に対するパルスの存在する部分としない部分の消光比の向上を目指している。今まで述べたパルスの間引き法の詳細は、次節に詳細を示す。この光は、チタンサファイアのモードロックレーザーに使用されている再生増幅器に入射され、再生増幅器後の数段の増幅器で大強度の数百フェムト秒以下の短パルスのレーザー光へ増幅される。この発生した光が、

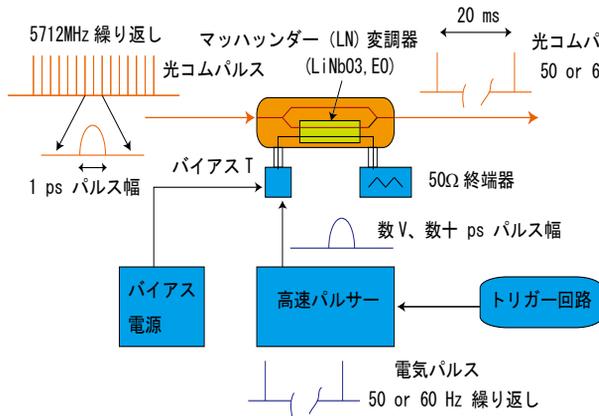


図3 LN変調器を使用したレーザーパルス間引き法。

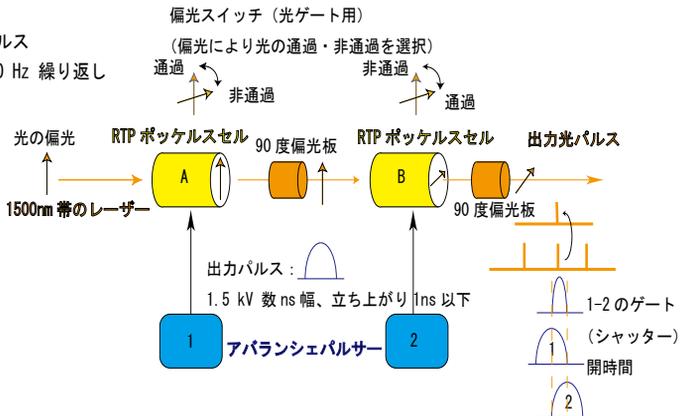


図4 RTPを使用したレーザーパルス間引き法。シャッター操作により間引かれる。本手法の装置構成を図3に示す。

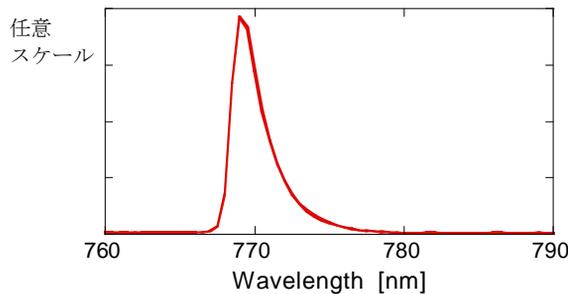


図5 770nmに変換された光のスペクトル

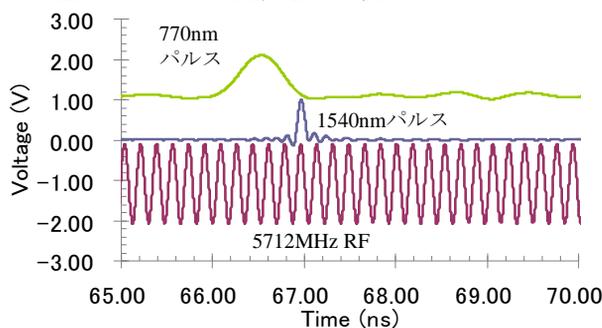


図6 5712MHzの高周波信号（下）に同期した10Hzに間引いた1540nm光（中）と770nm光（上）

物質を励起するためのポンプレーザーになり、場合によっては物質の変化を検出するプローブ光となる。以上の方法では、電気・光の能動素子の数をモードロックレーザー一部で減らせ、システムとしての総ノイズ量を減らすことにより低ジッタを実現できる。

2-2 短パルスレーザー間引き法1 (5712MHz->60Hz)

1540nmの5712MHz光コムパルスを60Hzに間引くには、LN変調器が使用される。この変調器は、電気光学結晶のLiNbO₃を使用してマハツエンダー干渉計^[10]を構成したもので、100ps程度の幅のパルスを発生する高速パルス発生器により駆動される。この方法では、変調器に入力された1ps以下のパルス幅の約10GHz以下の繰り返しのレーザーパルス列（コムパルス列）が、60Hzなどの非常に低い繰り返しに

2-3 短パルスレーザー間引き法2 (消光比向上)

図4は、1ps以下のパルス幅の数百MHz以下の繰り返しの770nmレーザーパルス列（コムパルス）を60Hzなどの非常に繰り返しの低いパルス列に間引く方法である。この方法は、各2個のRTPなどの電気光学結晶を使用したポッケルスセル^[9]と、偏光板、高電圧・高速アバランシェパルサーを使用する。アバランシェパルサーは、ピーク電圧が1.3KVで幅が数ns、立ち上がりが1ns以下の出力パルスを発生する。レーザーパルスが入射される最初のポッケルスセルと続くポッケルスセルは、高電圧パルサーの駆動タイミングとセルの設置方向で、交互に偏光方向が変化する。一方の偏光板およびポッケルスセルがレーザー光を通すと、他方が閉じるなどのシャッター制御がおこなわれる。この方法により、ポッケルスセルに加える高電圧パルサーの出力パルスのタイミングを調整することで、数nsなどの短い時間だけレーザー光が2つのポッケルスセルを通過できるようにする。すなわち、前記のタイミングを調整することで、ポッケルスセルによる短パルスレーザー光に対するシャッターの開放時間が変更できる。これにより、たとえ高電圧パルサーのパルス幅が数十nsなどとある程度長くとも、シャッター速度をそれより短くでき、アバランシェパルサーのパルス立ち上がり速度である1nsに近いものが実現できる。以上の方法により、数百MHz以上の繰り返しの光コムパルスを60Hzなどの低い繰り返しに、容易に間引くことが可能となる。

3. レーザーパルス波長変換・間引き実験

我々は、今まで述べたパルスの間引きや波長変換の原理検証のために図2に示すシステムの一部を組み上げ、本格開発ための予備的な実験を行なった。この実験では、加速器のマスターオシレータに同期した5712MHz繰り返しの1540nmコムレーザーパル

スを光コム発生器で出力して、図5に示すようにPPLNで770nmに波長変換し、図6に示すように10Hzに間引くことに成功した。図6には、各波長の光をフォトダイオードで観測した波形を載せる。残念ながら、フォトダイオードのパルス応答は遅く、各光のパルス幅は測定できていない。であるが、各光パルスが、光コムを駆動している5712MHzに同期して繰り返しが低いことは、図から理解できる。

4. まとめ

先に述べた予備実験の成功により本方法の原理検証が終わり、本格的な装置開発が始められる。今後は、ストリークカメラにより770nmの変換光のパルス幅を測定する予定である。加えて、変換光を再生増幅器などに入力して、大尖塔強の短パルスレーザー光を発生する実験を行う予定である。

著者らは、この研究を支援していただいた、理化学研究所のXFEL/SPring-8計画推進本部のメンバーに感謝するものである。

参考文献

- [1] T. Tanaka and T. Shintake, (Eds.) SCSS X-FEL Conceptual Design Report (RIKEN Harima Institute, Japan, 2005).
- [2] A. M. Lindenberg et al., Atomic-Scale Visualization of Inertial Dynamics, *Science*, Vol 038, pp. 392-395 (2005).
- [3] Y. Otake et al., Timing and LLRF System of Japanese XFEL to Realize Femto-second Stability, proc. of ICALEPCS07, pp. 706-710 (2007).
- [4] H. Maesaka et al., Development of the Optical Timing and RF Distribution System for XFEL/SPring-8, proc. of FEL08, TUPPH046 (2008).
- [5] M.Kouroggi, et al., Generation of Expanded Optical Frequency Combs, Edited by A.N Luiten, Frequency Measurements and Control, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, PP. 315-335 (2001).
- [6] M. H. Ober et al., 42-fs pulse generation from a mode-locked fiber laser started with a moving mirror, *OPTICS LETTERS*, pp. 367-369 (1992).
- [7] S. Tanaka, Phase Stabilized Optical Fiber, Tec. Rep. of Sumitomo Electric Ind. Ltd., (1989).
- [8] K. Thyagarajan et al., Fiber Optic Essentials, *IEEE PRESS*, PP. 197-204 (2007).
- [9] 小沼 稔, オプトエレクトロニクスとその材料, 光学図書 (株), PP. 201-249 (1995).
- [10] P. Hariharan, Optical Interferometry, *ELSEVIER*, PP. 26-27 (2003).