

MEASUREMENT OF THE ARRIVAL TIMING DIRECTLY FROM EUV-FEL PULSES AT XFEL/SPring-8

S. Matsubara¹, H. Maesaka, T. Ohshima, S. Inoue, N. Hosoda, K. Tamasaku, T. Togashi, M. Nagasono, A. Higashiya,
M. Yabashi, and Y. Otake
RIKEN/SPring-8
170-00131-1-1, Kouto, Sayo, Hyogo, Japan, 679-5148

Abstract

The SCSS test accelerator was constructed and user experiments using SASE-FEL light in an extreme-ultraviolet (EUV) region have been performed at SPring-8. It is necessary to distribute an accurate timing signal both to accelerator components and experimental instruments. We developed a trigger system aiming at a timing jitter of less than 100 fs. The jitter of the time difference between the reference timing signal and a beam-induced signal from an RF BPM cavity was measured. The jitter value was nearly 50 fs in rms. However, this value was an arrival timing of the electron beams at the BPM position before an undulator section and not an arrival timing of the SASE light pulses at the experimental end station. Therefore, we tried to measure the arrival timing of the SASE (EUV) light pulse. We employed an in-vacuum fast photo diode in order to directly observe EUV light at a 60 nm and to detect the arrival timing at the end station. The measured time jitter was 2.5 ps in rms, which was limited by the rise time of the photo diode. Even though the resolution of the time jitter did not reach to 50 fs, the system is still useful to verify trigger delay values for user experiments.

EUV-FELパルスの到達時間の直接測定の試み

1. はじめに

現在、兵庫県佐用町のSPring-8キャンパスで、理化学研究所によりX線自由電子レーザー (XFEL) 計画が推し進められている。この加速器は、低エミッタンス熱電子銃、Cバンド電子線形加速器、真空封止アンジュレータからなる全長約700mにも及ぶ施設である。安定なXFELを発生させるためには加速器のタイミング・高周波を50 fsの高い精度で同期させる必要がある^[1]、そのためのタイミングシステムの開発が行われている^[2, 3, 4]。

このXFELに先駆け、原理実証器であるSCSS試験加速器が建設され、EUV-FEL光が安定に発生している。この試験加速器を用いて、XFELを目指したさまざまな評価実験が行われ、現在すでに利用実験が行われるまでに至っている。この利用実験として、ポンプ・プローブのようなFEL光パルスとの同期を必要とする実験が予定されており、加速器のみならず、利用実験においても高精度なタイミシステムが必要である。そして、この試験加速器において、タイミングシステムの基準信号と加速器の電子ビームの同期精度が、rmsで50 fs程度あることが確認されている^[5]。したがって、FEL光の到達時間ジッタも50fs程度であることが期待される。しかしながら、実際に利用者が使用するEUV-FEL光と時間基準信号との同期性を評価する手法がなく、この手法の確立が急務であった。

今回、EUV光のタイミングを直接観測する方法を試験した。最初に、60 nmのEUV光をCe:YAG結晶の可視光の蛍光により高速PD(Photo Diode)で観測した。その後、測定精度を向上させるために、真空用高速PDを用いてEUV光のタイミングを直接観測した。詳細については、本稿で述べる。

2. SCSS試験加速器のタイミングシステムとこれまでの成果

SCSS試験加速器のタイミングシステムを図1に示す。電子銃近傍に設置されたマスターオシレータより70 m先の実験ホールまで、5712MHzの基準RF信号が加速器に沿って機器に分配されている。この基準RF信号により、加速器においては電子ビームが加速される。また、実験ホールでは、FEL光パルスの到達するタイミングを知る信号として、ポンプ・プローブなどの利用実験に使用されている。

熱電子銃からの電子ビームは、速度変調用の238 MHz、速度変調・加速用の476 MHz、エネルギー変調 (バンチ圧縮) ・加速用の2856 MHz、加速用の5712 MHzの順に通過し加速される。基準RFとなる低位相ノイズの5712 MHz信号^[2, 3, 4] を発生させるこのマスターオシレータは、低ノイズの水晶発振器出力、RFコム発生器およびPLL回路を組み合わせて作られて

¹ E-mail: matsubara@spring8.or.jp

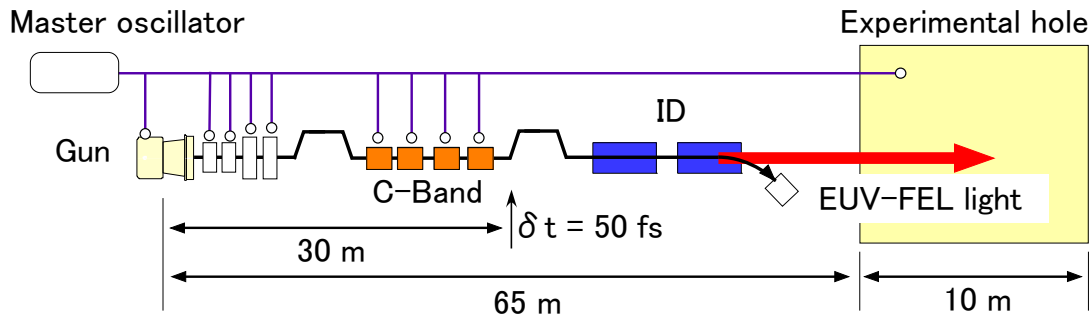


図1. SCSS試験加速器のタイミングシステムのアウトライン

いる。この信号を分周することにより、他の2856 MHz、476 MHz、238 MHzの基準信号が作られる。基準信号は、位相安定ケーブル（～8 ppm/K）を用いて伝送されている。

この基準RF信号と電子バンチとの到達時間の評価は、高精度のビーム位置モナ（BPM）を用いてされている。このBPMは4760 MHzの共振空洞により電子バンチの到達を感知し、到達時間のジッタは基準RF信号から作られた4760 MHzでIQ検出することにより測定が行われた。Cバンドの加速管直後の位置で測定されたジッタの値はrmsで46 fsであった^[5]。この値は、XFELに必要とされるタイミングシステムの特性が達成されていることを証明するものである。そして、SCSS試験加速器の利用実験に使用される基準RF信号とFEL光のタイミングジッタも、電子バンチとのジッタ値と同等の値が期待される。

しかしながら、この測定は、マスターオシレータからおよそ30 mの距離離れている位置で電子に対して行われたものであり、実際に利用者が使用する光ではなく、実験ホールまでの距離70 mの半分の位置である。そこで、実際に利用する位置でのFEL光と基準RF信号とのタイミングジッタを評価する測定を試みた。FEL光パルスのパルス幅が1 ps弱であり、ポンプ・プローブ実験などに対応するためにはサブピコ秒でのタイミングジッタの精度が必要である。

3. Ce:YAGの蛍光によるタイミング測定

最初の試みとして、EUV-FEL光をCe:YAG結晶に照射して、その蛍光を一般的に用いられている可視光用高速Si-PD(Electro-Optics Technology, ET-2030)によって測定した。測定系の構成を図2に示す。Ce:YAGの蛍光は波長500nm付近にピークがあり^[6]、SCSS試験加速器のEUV-FEL光のアライメントに用いている。Ce:YAG結晶は、真空フランジ内でななめ45度に取り付けられており、蛍光はFEL光の光軸に対して90度の角度でビューポートを通して取り出した。この蛍光を光学レンズを用いて集光し、PDに入射して測定を行った結果を図3に示す。この測定信号の立ち上がり時間は400 psであった。しかしながら、1ショット毎の強度変動が大きく正確なタイ

ミングジッタの測定までは至らなかった。現在、SCSS試験加速器の出力安定度は、rmsで10%程度には抑えられている。図2の強度のばらつきはそれに比べてはるかに大きい。この計測で用いた光学系は、Ce:YAG結晶の発光を像転送してPD集光ができていない。チャンバ内を反射しながら出力された蛍光を集光しているだけである。このため、FEL光の位置揺らぎがあると、蛍光の集光条件が変化してしまう。FEL光の強度変動に加えて、この蛍光の伝送揺らぎも加味され、測定信号の変動が大きくなったのだと考えられる。

この信号からは、所望のサブピコ秒の精度でのタイミングジッタの測定は望めない。測定したジッタ値はrmsで30 ps相当であった。

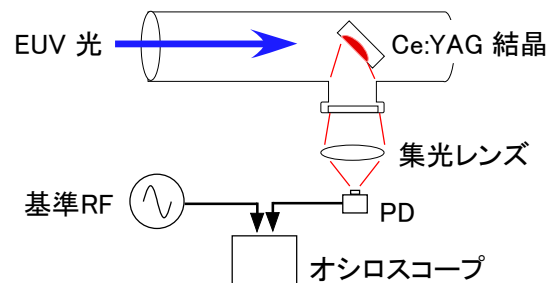


図2. Ce:YAGの蛍光を用いた測定系

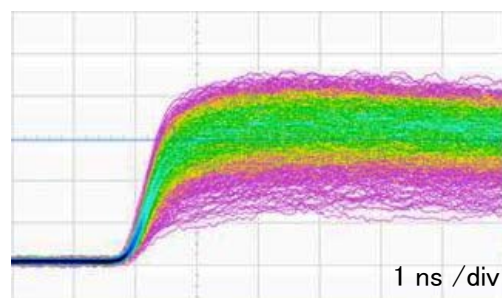


図3. Si-PDによるCe:YAGの蛍光測定

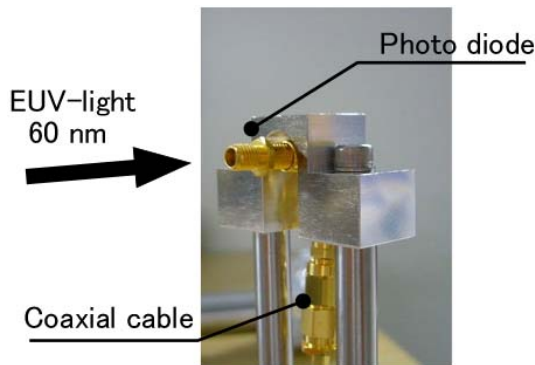


図4. 真空用高速PDの外観写真

4. 真空用高速PDによる到達時間の直接測定

測定精度の向上を目指して、次にEUV-FEL光を直接高速PDにより測定した。波長60 nmのEUV光パルスを直接測定するために、International Radiation Detectors, Inc. の真空用高速PD (AXUVHS10) を用いた(図4)。PDは真空チャンバの中にセットされ、PDからの信号は同軸ケーブルを用いて取りだした。このPDからの信号と、マスターオシレータからの基準RF信号を広帯域オシロスコープ(アジレントDSO81204B、帯域最大12GHz)を用いてタイミングジッタの測定を行った。大ピーク強度の光を直接観測することで、高いS/Nが期待できる。その測定結果を図5に示す。

EUV-FEL光パルスを直接このPDを用いて測定すると、立ち上がり時間が90 ps、パルス幅が450 psの信号を確認することができた。Ce:YAGの蛍光過程を介して測定するよりも、1桁早い信号であった。ま

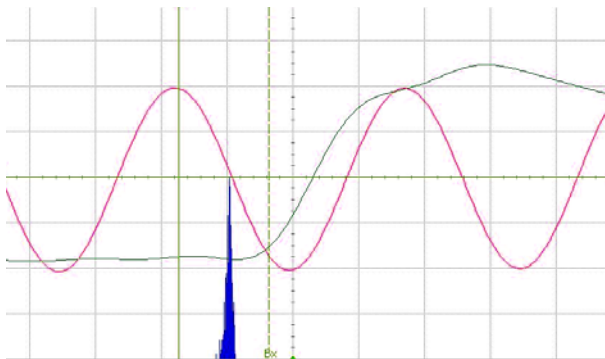


図5. 真空用PDによるEUV-FEL光パルスの到達時間の測定結果。緑線がPD、赤線が5712MHz基準RF信号である。青のヒストグラムは基準RF信号のゼロクロスタイミングのもので、EUV光の到達時間ゆらぎを表す。横軸は50ps/divである。

た、図2で現れた信号強度の不安定性は現れなかった。これは、 $\phi=10$ mm程度のEUV-FEL光に対してこのPDの受光サイズが $\phi=30$ μm と十分に小さく、光の中心部分だけを測定できており、ビーム位置の揺らぎの影響を受けにくいからだと考えられる。

光パルスの到達時間ジッタは、真空用PDからの信号をトリガーにして、5712 MHzの基準RF信号のゼロクロス点の揺らぎを測定した。測定されたタイミングジッタ値は、rmsで2.3 psであった。

今回の測定では、目標とするサブピコ秒のタイミングジッタ値を測定するまでには至らなかった。この測定結果は、今回の立ち上がり時間90 psの信号を用いた測定系でのフォトダイオードの電気ノイズなどに起因する測定限界値であると考えている。

しかしながら、EUV-FEL光パルスのタイミングを直接、数ピコ秒の精度で簡便に測定することができることが確認できた。そして、パルス幅が1 ps程度のSCSS試験加速器FEL光をポンプ・プローブなどの実験に用いる際のタイミング調整に有用な装置として使用できる。

5. まとめと今後の予定

EUV-FEL光パルスと基準RF信号とのタイミングジッタの測定を試みた。今回、真空用高速PDを用いて、2.3 psのジッタ値を測定することができた。この結果は、すでに評価されている電子バンチと基準RF信号とのジッタ値50 fsに及ぶ精度での測定までは至っていない。しかしながら、このPDによりEUV光パルスを数ピコ秒の精度で簡易に測定することができることが判った。EUV-FEL光パルスのタイミング調整などには十分に使用することができる。

そして今後、サブピコ秒での測定精度を得るために、さらに早い立ち上がり時間の信号を観測する予定である。12 GHzのオシロスコープを用いた測定では、数ps程度の精度が限界である。次の展開として、Ce:YAGよりも早い応答性のある蛍光体を用いて、その蛍光応答を200 fsの時間分解能のあるストリークカメラFESCA200²により測定することを検討している。高速応答の蛍光体の候補の1つであるZnO結晶は、50 ps以下の時間応答が見込まれる^[7]。目標とするサブピコ秒の測定精度を達成できると考えている。

参考文献

- [1] H. Tanaka, et al., “XFEL/SPring-8 のバンチ圧縮性能に及ぼすRF機器変動の影響評価”, 第4回加速器学会, 和光, 2007, p. 613.
- [2] Y. Otake, et al., “Sub-pico-second trigger system for the SCSS prototype accelerator”, FEL2006, Berlin, Germany, 2006.

²http://jp.hamamatsu.com/products/opto-meas/pd357/pd360/fesca/index_ja.html

- [3] T. Ohshima, et al., “XFELに向けた低電力低周波システムの改良”, 第4回加速器学会, 和光, 2007, p. 559.
- [4] H. Maesaka, et al., “SCSS試験加速器のRFシステムの高精度化”, 第5回加速器学会, 東広島, 2008, p. 530.
- [5] Y. Otake, et al., “TIMING AND LLRF SYSTEM OF JAPANESE XFEL TO REALIZE FEMTO-SECOND STABILITY”, Proceedings of ICALEPCS07, Knoxville, Tennessee, USA, 2008, p. 706.
- [6] E. Zych, et al., “Kinetics of cerium emission in a YAG:Ce single crystal: the role of traps”, J. Phys., 2000, p. 1947.
- [7] Y. Furukawa, et al., “Temperature dependence of scintillation properties for a hydrothermal-method-grown zinc oxide crystal evaluated by nickel-like silver laser pulses”, J. Opt. Soc. Am. B 25, 2008, B118.