

電気光学サンプリングを用いたシングルショット電子ビーム計測

SINGLE-SHOT MEASUREMENT OF ELECTRON BEAM BY ELECTRO-OPTIC SAMPLING

菅晃一^{#, A)}, 太田雅人^{B)}, 駒田蒼一郎^{C)}, 王有為^{B, D)}, C. Agulto Verdad^{B)}, K. Mag-usara Valynn^{B)}, 有川安信^{B)},
松井龍之介^{C)}, 坂和洋一^{B)}, 中嶋誠^{B)}

Koichi Kan^{#, A)}, Masato Ota^{B)}, Soichiro Komada^{C)}, Youwei Wang^{B, D)}, Verdad C. Agulto^{B)}, Valynn K. Mag-usara^{B)},
Yasunobu Arikawa^{B)}, Tatsunosuke Matsui^{C)}, Youichi Sakawa^{B)}, Makoto Nakajima^{B)}

^{A)} SANKEN (ISIR), Osaka University

^{B)} ILE, Osaka University

^{C)} Department of Electrical and Electronic Engineering, Mie University

^{D)} Faculty of Engineering Science, Kansai University

Abstract

Generation of femtosecond and picosecond electron bunches has been investigated for a light source based on electron bunches and improvement of time resolution in time-resolved measurements. Measurement of time profiles of such electron beams and radiations are applied to not only accelerator experiments but also detection of fusion reaction history. In this study, single-shot measurement of terahertz (THz) electric field around electron beam of 35 MeV was studied.

1. はじめに

フェムト秒・ピコ秒パルス幅を有する電子ビームは、自由電子レーザー、パルスラジオリシス等の加速器物理、物理化学の研究に応用されている。そのため、短パルス電子ビーム発生は、高品質な光源開発や時間分解計測における時間分解能向上のために不可欠となっている。これまでに阪大産研では、フェムト秒電子ビームとフェムト秒レーザーを用いて、フェムト秒時間分解能を有するパルスラジオリシス(過渡吸収分光法)を開発・利用してきた。今後、パルスラジオリシスの時間分解能を向上するためには、さらに短い電子ビームが必要となる。これまでに電子ビーム発生では、フォトカソード高周波(RF, radio frequency)電子銃にピコ秒またはフェムト秒紫外光を入射し、光電子を電子ビームとして利用してきた。さらに、発生した電子ビームを加速管によりエネルギー変調し、アクロマティックアークの磁気パルス圧縮器により約 30 MeV のフェムト秒電子ビームを発生してきた。光電子発生にフェムト秒レーザーを用いて、さらに空間電荷効果を低減した場合は、フェムト秒電子銃と磁気パルス圧縮の最適化により、マイケルソン干渉計を用いて 20 フェムト秒の電子ビーム計測を行うことが可能になっている。

慣性核融合分野においてもプラズマの温度・密度ダイナミクスを理解するために、いくつかの放射線(中性子、ガンマ線等)の超高速計測が必要となっている。例えば、20 ps 台の応答時間の中性子検出[1, 2]により燃焼履歴(burn history)の診断を行う事が可能である。また、10 ps の時間分解能でガンマ線検出[3]による診断も行われている。また、テラヘルツ検出で用いられる、電気光学(EO, electro-optic)サンプリングによる中性子線検出の提案[4]がされており、さらに高時間分解能のプラズマの燃焼履歴診断が期待されている。

フェムト秒・ピコ秒電子ビームパルスは、1 ps の逆数が 1 THz に相当するため、テラヘルツ領域の電磁波研究にも利用されてきた。同時に、より短いパルス幅を持つ電子ビームは、電子ビームの分布をフーリエ変換することにより得られるバンチ形状因子[5]から、より広帯域の電磁波を高強度で生成することがコヒーレント放射として知られている。レーザーと EO 結晶を用いたテラヘルツ発生・検出手法は、電場が印可された結晶の複屈折性(ポッケルス効果)を利用する[6]。これまでに、電子ビームに関する EO サンプリングでは、電子ビームのテラヘルツ電場により誘起される複屈折性を利用して、60 フェムト秒の電子ビーム電場が観測されている[7]。EO サンプリングでは、レーザーにより発生されたテラヘルツ波や電子ビーム由来の外部電場が EO 結晶にポッケルス効果を誘起し、同時に入射したレーザー光の偏光成分の変化を解析することが多く行われている。

そこで、本研究では、EO サンプリングを用いたシングルショット電子ビーム計測システムの構築を行っている。シングルショット計測における要素技術開発について、報告する。

2. 実験装置

2.1 フェムト秒電子ビーム発生

フェムト秒電子ビーム周りのテラヘルツ電場計測を行うために、フォトカソード RF 電子銃ライナック[8]を用いてフェムト秒電子ビームの発生を行った。Figure 1 に加速器の構成を示す。ピコ秒レーザーからの紫外光パルスを用いて光電子・電子ビーム発生を行った。カソード表面における光電場の効果により電子ビームの電荷量の増強を目的に、光パルスをビーム軌道となす角:68° の条件でカソードに入射した。電子ビーム測定では、紫外光パルスに対する反射型の変換 ND(neutral density)フィルターを設置し、カソードに照射するレーザーのパルス

[#] koichi81@sanken.osaka-u.ac.jp

あたりのエネルギー、つまり発生電荷量を調整した。加速器は、フォトカソード RF 電子銃、加速管、磁気パルス圧縮器により構成される。これらを用いて、パルス圧縮されたフェムト秒電子ビーム(エネルギー35 MeV、電荷量<200 pC/pulse)を発生した。電子銃へのレーザー入射位相と加速管における加速位相は、それぞれ、 40° 、 100° を用いた。発生したフェムト秒電子ビームを、高真空系のビームラインを隔てるチタン箔のビーム窓から、大気中の測定系に取り出し、テラヘルツ電場測定を行った。一方、フェムト秒レーザー光は測定系へ輸送し、時間分解計測できるようにした。

2019年11月にカソード駆動用のNd:YLFピコ秒レーザーから紫外光パルスを発生できない状態に陥った。しかし、フラクシ社[9]と共同で、ピコ秒レーザー(Pulrise VI, Time-Bandwidth)の発振器と増幅部の調整や修復を行い、2021年9月に復旧の目途が立った。2022年10月の現在は、Nd:YLF結晶からの波長1047 nmの光の倍波変換を行い、130 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ (波長:262 nm、繰り返し:10 Hz)の紫外光パルスを発生可能な状態にある。

復旧の箇所について、詳細を述べる。発振器においては、SESAM(半導体過飽和吸収ミラー)が損傷していたため、入手が容易なBATOP社のSAM(過飽和吸収ミラー)に置き換えを行った。表1に試験したSAMと結果を示す。発振器の励起レーザーダイオード(LD)パワーとして1 Wの光入力(電流1.2 A)とした。市販の規格では反射率が高い場合は、変調量が小さくなる傾向であった。下流の増幅や外部RFの同期に適したCW-modelocking [10]の発振状態を得られたのは、試験した5製品の内3製品であった。結果、SAM-1064-0.6-

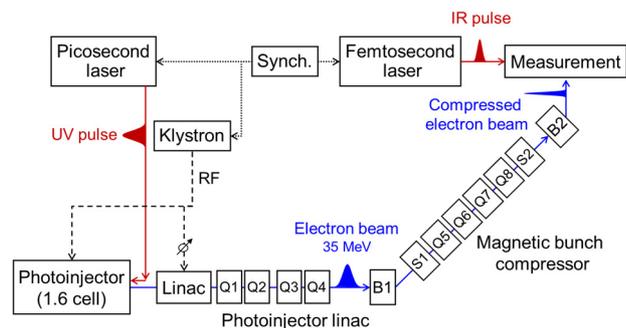


Figure 1: Photocathode-based linac. A picosecond laser was used for the generation of electron bunches. Femtosecond laser was used for electron bunch measurement.

Table 1: Replacement of SAM

Model	Modelocking type / power
SAM-1064-0.6-10ps	CW / 112 mW x 2
SAM-1064-0.7-1ps	CW / 109 mW x 2
SAM-1064-1-5ps	CW / 98 mW x 2
SAM-1064-3-5ps	Q-switched / 36 mW x 2
SAM-1064-3-10ps	Q-switched / 48 mW x 2

10psを用いて発振器を復旧した。一方、増幅器では、結晶と増幅用LDの置き換えを行った。試験的に、ショートキャビティ(1枚の出力結合鏡R95%と曲率半径300 mmの凹面鏡で結晶を挟んで、自励発振させる)からの光出力調査を行った。レーザーの納入時のショートキャビティは未試験であるが、新たに製作した増幅モジュールではLDおよび結晶を新調し、定格LD電流(ピーク電流:100 A、光ピークパワー:100 W、パルス幅:200 μs 、200 mW at 10 Hz相当)において、36 mW(10 Hz)のパワーメータ出力が得られ、新モジュールを使用可能であると判断した[11]。その結果、増幅器も修復し、ピコ秒レーザーの復旧は完了した。

2.2 電子ビーム測定系

電子ビーム計測では、パルス圧縮されたサブピコ秒電子ビームの周りのテラヘルツ電場計測を行った。EO結晶としてZnTe(厚1 mm)[12, 13]を用いた。また、シングルショット計測を行うために、エシエロンミラー[13, 14]もしくは回折格子[15, 16]を用いて、フェムト秒レーザーの時間空間分布を調整した。適宜、4-f結像および縮小結像を通して、CCDカメラにより撮像を行った。電子ビームの電場によりEO結晶で引き起こされるフェムト秒レーザーの偏光変化については、クロスニコル(直交偏光子条件)や位相オフセット法[13]により測定を行った。次節で、光学系と測定結果を示す。

3. 実験結果

3.1 時間窓の校正

Figure 2に、時間窓の校正の例を示す。フェムト秒レーザーからのパルス光をビームスプリッターにより分岐する(Fig. 3(a))。分岐された片方の光は光学遅延を調整可能な平面鏡の移動鏡(Moving mirror)、もう片方の光はエシエロンミラーもしくは回折格子によって反射される。再度、ビームスプリッターで2つの光を合流させて、電子ビーム測定のための4-f結像光学系、CCDカメラにおける視野を調整するための縮小光学系を通して、撮像を行った。エシエロンミラーにおける時間窓は段の高さ(光学遅延量)と幅によって見積もることができる。この場合は、ある光のサイズでの光学遅延の総量(高さによる光学遅延とまたぐ幅の数の積に比例)から時間窓を予想することができた。一方、回折格子を用いる場合は、回折光を下流へ輸送できる入射角とした。例えば、入射光と戻り光が一致する条件は、回折格子の方程式により入射角・反射角を見積もることができる。そのため、0度入射ではない理由から、位置による光学遅延を見積もることができる。Figure 2(b)およびFig. 2(c)に、エシエロンミラーを用いた場合で、移動鏡の相対的な光学遅延が、それぞれ、0 psおよび6.7 psのCCDカメラの測定結果を示す。今後の予定ではCCDカメラ前で2光路の位相オフセット法を予定していたので、2つの光のパターンが観測できる。また、光学遅延の調整により、垂直方向にできた干渉縞は水平方向へ移動することが分かった。干渉縞の移動は、進行方向に対して傾いた光と傾いていない光の一部が干渉していることに起因していると考えられる。また、光学遅延により移動量(CCDカメラ上のピクセル数、長さ)の係数が得られるため、後の実験の校

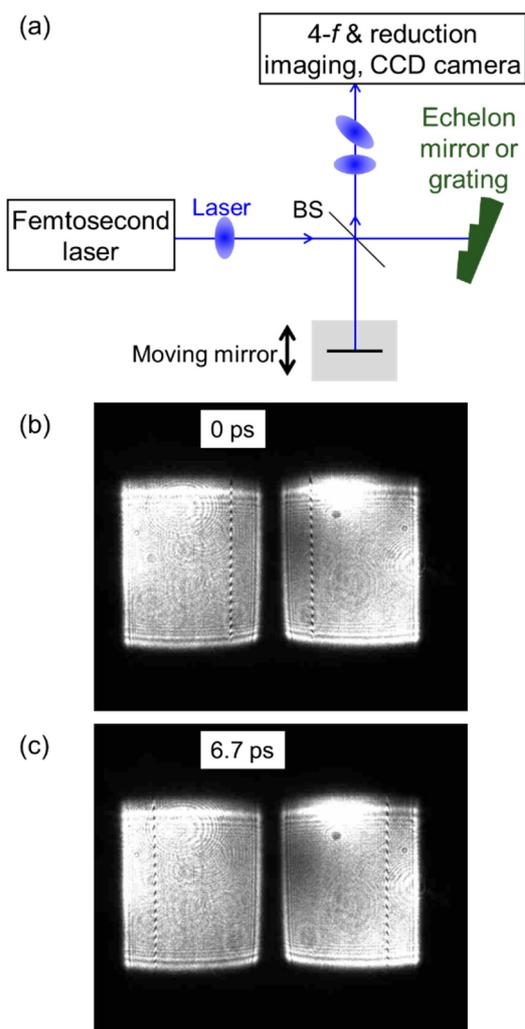


Figure 2: (a) Optical system for calibration of time axis is shown. Femtosecond laser was separated by a beam splitter (BS). Interference patterns due to spatio-temporal distribution of the light pulses were observed as vertical lines due to superposition. The interference patterns was moved in the horizontal direction by a moving mirror at time delays of (b) 0 ps and (c) 6.7 ps, respectively.

正值として使用した。

3.2 電子ビームの計測

Figure 3 に、加速器からの電子ビーム計測の例を示す。フェムト秒レーザーからの光は、ビームスプリッターを用いて、エシェロンもしくは回折格子によって時空間分布が調整されたレーザーを下流へ輸送した (Fig. 3(a))。加速器からのサブピコ秒電子ビームは、4-*f* 結像光学系の中間に設置された EO 結晶近辺を通過した。電子ビーム周りのテラヘルツ電場によるポッケルス効果で変化するフェムト秒レーザーの偏光変化を、下流の CCD カメラや偏光光学素子を用いて観測した。Figure 3(b) および Fig. 3(c) に、測定結果の例を示す。光のパターンの均一性に問題があったため、左側のパターン (点線内) で異なる電子ビームショットに対して、位相オフセット法を行っ

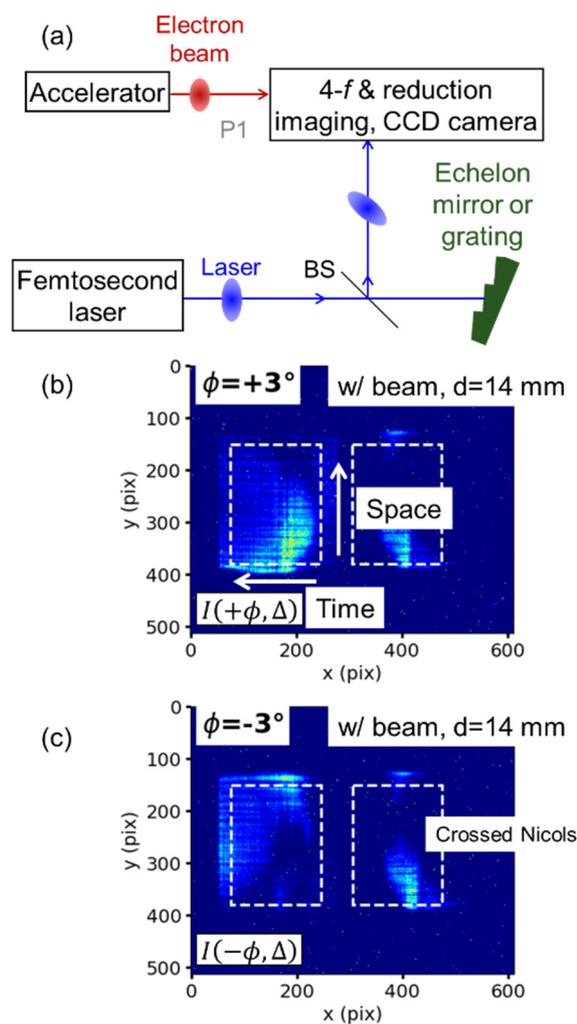


Figure 3: (a) Electron bunch measurement system is shown. Left images on the CCD camera were used for phase-offset method. Polarization changes due to electron beams were caused according to the quarter-wave-plate phase at (b) $+3^\circ$ and (c) -3° . Increase and decrease in the intensity correspond to electric field directions and their intensities. Right images were captured at crossed Nicols configuration for checking electron beam.

た。CCD カメラ上では、水平方向を時間軸、垂直方向を空間軸として読み替えることが可能である。Figure 3(b) および Fig. 3(c) において、(偏光光学素子としての) 1/4 波長板の位相は左側のパターンにおいて、それぞれ、 $+3^\circ$ および -3° とした。右側のパターンは電子ビーム確認のための直交ニコルの条件とした。位相を変化させることにより、左側では明暗が反転し、電子ビームの反対側の空間では電場の向きが逆転することが分かる。今後は、系を改良することにより、電子ビームとフェムト秒レーザー間の同期時間ジッターからも解放された、シングルショット計測 (電場の向き・強度、時空間分布) を構築する。

4. まとめ

電気光学サンプリング (EO) を用いたシングルショット電子ビーム計測を構築中である。エシエロンミラーや回折格子によるレーザーの時空間分布の制御が可能であることが分かった。電子ビーム周りの電場の計測、結像光学系、位相オフセット法を改良中である。今後、同期時間ジッターの問題を解決した、シングルショット計測を構築する。

謝辞

本研究は、科研費 (JP25870404, JP15H05565, JP26249146, JP19K05331, JP20H00364) による支援を受けました。本研究は、オートレースの補助を受けて実施しました (2022M-225)。

参考文献

- [1] H. Azechi *et al.*, Appl. Phys. Lett. 55, 945 (1989).
- [2] R. A. Lerche *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 66, 933 (1995).
- [3] H. Geppert-Kleinrath *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 89, 10I146 (2018).
- [4] Y. Arikawa *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 91, 063304 (2020).
- [5] T. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. E 50, 4041 (1994).
- [6] M. Nagai *et al.*, Opt. Express 20, 6509 (2012).
- [7] G. Berden *et al.*, Phys. Rev. Lett. 99, 164801 (2007).
- [8] I. Nozawa *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 072803 (2014).
- [9] PHLUXi;
<https://phlux.com/en/>
- [10] U. Keller *et al.*, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2, 435-453 (1996).
- [11] In the product manual, “gain switched energy” is noted as “1.54 mJ” for the delivery condition using the normal regenerative amplifier. The output power for 10 Hz operation corresponds to 15.4 mW.
- [12] M. Ota *et al.*, Appl. Phys. Express 14, 026503 (2021).
- [13] M. Ota *et al.*, “Ultrafast visualization of an electric field under the Lorentz transformation”, Nature Physics, in press (2022).
- [13] G. Asai *et al.*, Opt. Express 29, 3515 (2021).
- [14] 中嶋誠ら、特願 2021-106147、(2021).
- [15] H. Hirori *et al.*, Appl. Phys. Lett. 98, 091106 (2011).
- [16] Y. Lei *et al.*, Chinese Physics B 29(5), 057803 (2020).