

電気光学サンプリングによる電子ビームの軸方向電場の計測

MEASUREMENT OF LONGITUDINAL ELECTRIC FIELD AROUND ELECTRON BEAM USING ELECTRO-OPTIC SAMPLING

菅晃一^{#, A), B)}, 太田雅人^{C), D), E)}, 王有為^{E)}, 加藤康作^{E)}, 神戸正雄^{B), F)}, 楊金峰^{B)}, Verdad C. Agulto^{E)},
有川安信^{E)}, 松井龍之介^{G)}, 吉田陽一^{B)}, 中嶋誠^{E)}

Koichi Kan^{#, A), B)}, Masato Ota^{C), D), E)}, You Wei Wang^{E)}, Kosaku Kato^{E)}, Masao Gohdo^{B), F)}, Jinfeng Yang^{B)},
Verdad C. Agulto^{E)}, Yasunobu Arikawa^{E)}, Tatsunosuke Matsui^{G)}, Yoichi Yoshida^{B)}, Makoto Nakajima^{E)}

A) QST

B) SANKEN, Osaka University

C) NIFS

D) SOKENDAI

E) ILE, Osaka University

F) Graduate School of Science and Engineering, Saitama University

G) Department of Electrical and Electronic Engineering, Mie University

Abstract

Ultrashort pulsed electron beams can contribute to improving the time resolution of reaction analysis in applications. At the same time, techniques for measuring the temporal profile of electrons on the picosecond and femtosecond scales are essential for not only time-resolved measurements using electron beams but also understanding ultrafast plasma dynamics in terms of temperature and density information. In this presentation, we report on the establishment of a single-shot spatio-temporal measurement using electro-optic sampling for a 35 MeV electron beam, as well as the visualization of the longitudinal electric field formed around the electron beam. The longitudinal electric field was measured by selecting an electro-optic crystal.

1. はじめに

これまで、電磁気学における特殊相対性理論 (SR, special relativity) [1]の妥当性は受け入れられてきた。しかし、「収縮された電場」に関しては、強固な実験的根拠に基づいたものではなかった。近年、「収縮された電場」に関しての決定的な実証は、高エネルギー電子ビームによって生成される相対論的クーロン電場の画像により達成された [2]。これは、電気光学 (EO, electro-optic) サンプリングを用いたサブピコ秒・超高速電場診断に基づくものである。

相対論的電子ビームに EO サンプリング [3]を適用する試みは、電子ビームのパルス幅をクーロン電場から推定する目的で 2000 年に始まった [4]。しかし、相対論的クーロン電場の時空間分布に関する研究報告はほとんど存在しない。また、以前の研究 [2]では扱われていない、軸方向のクーロン電場や高エネルギー電子ビームの周囲の磁場といった、電磁気学における SR の特性が依然として残されている。

本研究では、サブピコ秒相対論的電子ビーム (35 MeV) 周辺の準三次元電場分布を、ZnTe 結晶 ((110)および(100)面)を用いた単一ショット・時空間 EO サンプリングにより測定した。

2. 実験構成

電子ビームは、大阪大学産業科学研究所量子ビーム

[#] kan.koichi@qst.go.jp

科学研究施設 [5]にあるフォトカソードベースの線形加速器で生成された。加速器は、銅カソードを備えた 1.6 セル S バンド RF 電子銃、2 m の進行波型線形加速管、およびアーク型磁気バンチ圧縮器で構成されている。RF 電子銃のフォトカソードは、ピコ秒レーザー (PULRISE VI, Time-Bandwidth) の第 4 高調波 (262 nm, UV) により励起され、パルスエネルギー 130 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ 、パルス幅 5 ps FWHM、10 Hz で照射された。バンチ電荷は、減光フィルターで調整された。電子バンチは、35 MW のクライストロンを用いて 10 Hz で加速され、最終的に 35 MeV まで加速された。これらの電子バンチは、ベンディングマグネット、四極、六極磁石で構成された磁気パルス圧縮器により、サブピコ秒に圧縮された。圧縮器出口では、電子ビームはチタン製薄膜窓を通過し、空気中で測定された。プローブ光パルスには、電子ビームと同期されたフェムト秒レーザー (Tsunami, Spitfire, Spectra-Physics) が使用された。加速器と 2 台のレーザーは、79.33 MHz (S バンド 2.856 GHz の 36 分の 1) の共通 RF で同期された。

Figure 1 は、フォトカソードベースの加速器により生成された 35-MeV サブピコ秒電子ビーム周囲の THz 電場を測定するための単一ショット・時空間測定システムを示している。電子バンチは z 軸方向に進行する。電子バンチ経路内に、アルミニウム蒸着されたペリクルミラー (P1, 厚さ 2 μm)、つまり、金属境界条件を設けた。金属境界条件と EO 結晶との距離 d は、自由空間中でクーロン電場が伝搬する時間に相当する。ZnTe 結晶 ((110): 1 mm 厚, (100): 2 mm 厚) は、それぞれ横方向および縦方向の電場測定に用いられた。ポツケルス効果により誘起され

た複屈折によって、電子ビームのクーロン電場がプローブパルスの偏光を変化させた。プローブ光パルス(800 nm, <130 fs FWHM)はビームエキスパンダーで広げられ、回折格子(600 本/mm)で波面に傾きを与えた後、EO 結晶上に空間-時間変換された状態で集光された。結像光学系で偏光解析の検出を行い、電子ビーム由来の電場を可視化した。

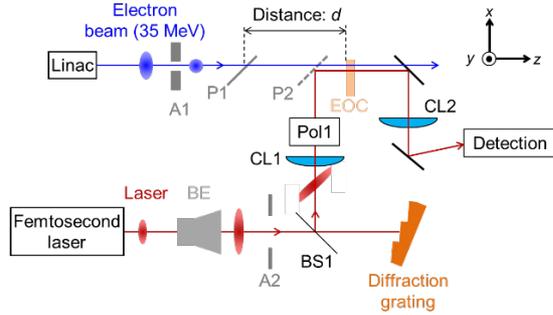


Figure 1: Single-shot and spatio-temporal measurement system for THz electric fields around sub-picosecond electron beams.

3. 電場の解析

時空間プロファイル評価には、補償子としての 1/4 波長板を用いた位相オフセット法が採用された。この方法では、補償子の位相および電子ビーム由来の電場による光強度 $I(\theta, \Delta)$ を以下のように関係づける [2,6]。 θ は補償子の位相、 Δ は電子ビームの電場つまり複屈折による遅延量である。得られた 4 つの画像(電子ビームの有無と θ の正負の組み合わせ)から、式(1)により電子ビームに由来する遅延量 Δ が算出される。さらに、遅延量、プローブ光波長における屈折率、電気光学係数、EO 結晶の界面におけるフレネル係数(テラヘルツにおける屈折率)、結晶の厚みを考慮し、電場の算出を行った。

$$\frac{I(+\theta, \Delta)}{I(+\theta, 0)} - \frac{I(-\theta, \Delta)}{I(-\theta, 0)} = \frac{2 \sin \Delta}{\sin 2\theta} \quad (1)$$

4. 測定結果

Figure 2 は、検出部を 2 光路で構築し、カメラで取得した単一ショット測定例を示す。正負の θ 条件における画像が示され、解析領域が矩形で示されている。(b)および(c)は、それぞれ径方向および軸方向の THz 電場分布を示す。電荷量は <30 pC/pulse、ビームサイズは <1 mm (rms)であった。 $d = 45$ mm の距離により、両方のプロファイルに湾曲が現れている。径方向の電場はビーム中心 ($\Delta y = 0$ mm) で弱く、軸方向は強く、最大電場強度はいずれも 1 kV/cm オーダーであった。これらのプロファイルから、径方向および軸方向で符号が変化しやすい方向が明確に確認された。

5. 結論

エネルギー 35 MeV、電荷 <30 pC/pulse の相対論的電子ビームにおける準三次元(径方向・軸方向)の電場

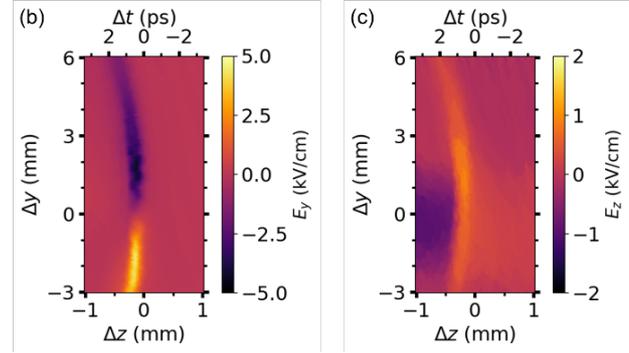
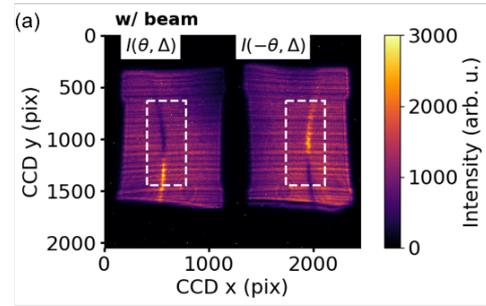


Figure 2: (a) Measurement of E_y (transverse electric field) using the camera and ZnTe (110). Left and right dashed rectangles are conditions of opposite sign for θ . The axis of time is reversed due to a beam splitter and imaging in the left and right patterns. Analysis results of (b) E_y and (c) E_z (longitudinal electric field) using Eq. (1) and conversions. Δz and Δy denote longitudinal and transverse positions for the beam center, respectively. These examples were performed at $d = 45$ mm.

分布が可視化された。単一ショット・時空間 EO サンプリングと位相オフセット法を用いた 2 光路光学系により測定を行った。径・軸方向電場プロファイルの違いとして、各方向における符号反転(変化)が明確に観測され、電場強度は 1 kV/cm オーダーであった。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費(JP23K11702、JP23H00281、JP20H02206、JP23K13080、JP24H00317、JP24H02232)の補助を受けて実施したものです。オートレース(JKA、2022M-225)から補助を受けて実施したものです。また、大阪大学産業科学研究所附属量子ビーム科学研究施設共同利用(R3-D-4、R4-D-2、R-5-D-1)、核融合科学研究所共同研究(2021NIFS18KUGK125、2022NIFS18KUGK125)、大阪大学レーザー科学研究施設共同研(2022B2-006、2023B2-003)からも援助を受けて実施したものです。

参考文献

- [1] A. Einstein, "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", Ann. Phys. 322, pp. 891, 1905.
- [2] M. Ota *et al.*, "Ultrafast visualization of an electric field under the Lorentz transformation", Nat. Phys. 18, pp. 1436, 2022.

- [3] Q. Chen *et al.*, “Electro-optic transceivers for terahertz-wave applications”, J. Opt. Soc. Am. B 18, pp. 823, 2001.
- [4] X. Yan *et al.*, “Subpicosecond Electro-optic Measurement of Relativistic Electron Pulses”, Phys. Rev. Lett. 85, pp. 3404, 2000.
- [5] K. Kan *et al.*, “Time-domain measurement of coherent transition radiation using a photoconductive antenna with micro-structured electrodes”, AIP Advances 11, pp. 125319, 2021.
- [6] G. Asai *et al.*, “High-throughput terahertz spectral line imaging using an echelon mirror”, Opt. Express 29, pp. 3515, 2021.