

電気光学サンプリングによる電子ビーム周りの電場のシングルショット計測

SINGLE-SHOT MEASUREMENT OF ELECTRIC FIELD AROUND ELECTRON BEAM BY ELECTRO-OPTIC SAMPLING

菅晃一^{#,A)}, 太田雅人^{B)}, 王有為^{C)}, Agulto Verdad C.^{C)}, Mag-usara Valynn Katrine^{C)},
有川安信^{C)}, 松井龍之介^{D)}, 坂和洋一^{C)}, 中嶋誠^{C)}
Koichi Kan^{#,A)}, Masato Ota^{B)}, Youwei Wang^{C)}, Verdad C. Agulto^{C)}, Valynn Katrine Mag-usara^{C)},
Yasunobu Arikawa^{C)}, Tatsunosuke Matsui^{D)}, Youichi Sakawa^{C)}, Makoto Nakajima^{C)}

^{A)} National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)

^{B)} National Institute for Fusion Science (NIFS)

^{C)} Institute of Laser Engineering (ILE), Osaka University

^{D)} Department of Electrical and Electronic Engineering, Mie 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. Visualization of spatio-temporal electric field around an electron beam was demonstrated.

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) [1,2]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。このような電子ビームの診断手法は、時間分解計測や光源加速器の発展へも応用が期待される。また、電子ビームは相対論的速度で運動する理由から、相対論的な現象の実験的観測にも利用可能である [3]。

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 [4,5]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 [6]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 [7]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 [8]。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 [9]。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 [10]。

そこで、本研究では、電気光学サンプリングによる 35 MeV の電子ビーム周りの電場のシングルショット計測を行っている。エシロンミラーもしくは回折格子によりフェムト秒レーザーの時空間分布を調整し、電子ビームが電気光学結晶へ作用したポッケルス効果(レーザーの偏光の変化)を CCD カメラで測定することによりシングルショット計測が可能となった。このようなビーム診断で二次元に時間と空間軸を展開して計測した相対論的な現象(ローレンツ収縮)、および、計測・光学系について報告する。

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 [11,12]を用いてフェムト秒電子ビームの発生を行った。プローブ光として用いる一部のフェムト秒レーザーの光の三倍高調波

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

発生による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可変 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 $< 100 \text{ pC/pulse}$) 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。

2.2 電子ビームが生成する電場

Figure 1 に示すように、本研究の対象とする (光速に近い速度で移動する) 相対論的電子の周りの電磁場は、リエナール・ヴィーヘルト・ポテンシャル (Liénard-Wiechert potentials, LWP) によって記述される。LWP 理論ではポテンシャルが電子ビームの周りに生成される。電子の移動速度が光速であると近似した時、電子ビームが金属境界を通過後に形成される LWP の形状は、金属境界を中心とした、自由空間伝搬距離が半径となるような球面となる。したがって、金属境界から十分遠方においては、LWP は電子ビームの中心軸近傍においては平面とみなすことができ、ローレンツ変換 (Lorentz transformation, LT) を考慮した電場分布に漸近する [13]。本研究では、クーロン場の時空間分布の実験的観測を目指した。加えて、金属境界条件を導入することにより、電子ビームは貫通できるが、電子ビーム周りの電磁場は通過できない条件 (金属境界条件) を設定した。

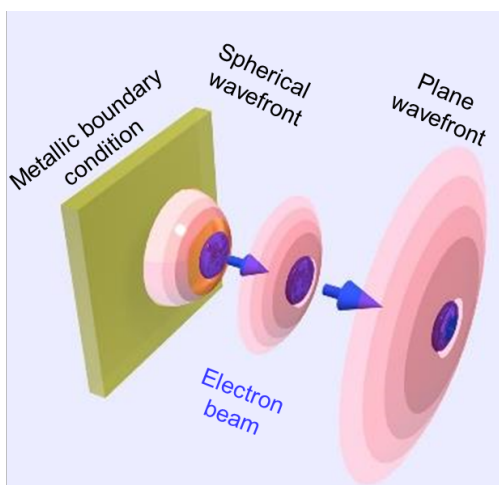


Figure 1: Diagram of electric fields around an electron beam derived by Liénard-Wiechert potentials (LWP) and Lorentz transformation (LT). Electric fields are generated again soon after the electron beam in the measurement system because of a metallic boundary condition.

2.3 EO サンプリング

Figure 2 に示すように、EO サンプリング [8] は、EO 結晶に電場が印加されると、ポッケルス効果による複屈折 (屈折率の異方性) が誘起され、入射した直線偏光のプロブ光が、透過では楕円偏光に変化する性質を利用して、電場を検出する手法である。本研究で用いる EO 結晶の一つである、ZnTe (110) では、例えば、計測するテラヘルツ電場の偏光およびプロブ光の偏光を $[-1 \ 1 \ 0]$ 方向 (実験室の x 方向) に一致させ、測定における感度を最大化する (外部電場による屈折率楕円の 2 つの主軸の屈折率の差を最大化、かつ、長軸もしくは短軸とプロブ光の偏光方向のなす角を 45° に設定) ことが可能である [14] (Fig. 2 (a))。つまり、本研究では、 x 軸を検出する電場およびプロブ光の偏光方向であり、 x 軸となす角と 45 度の方向がポッケルス効果による長軸もしくは

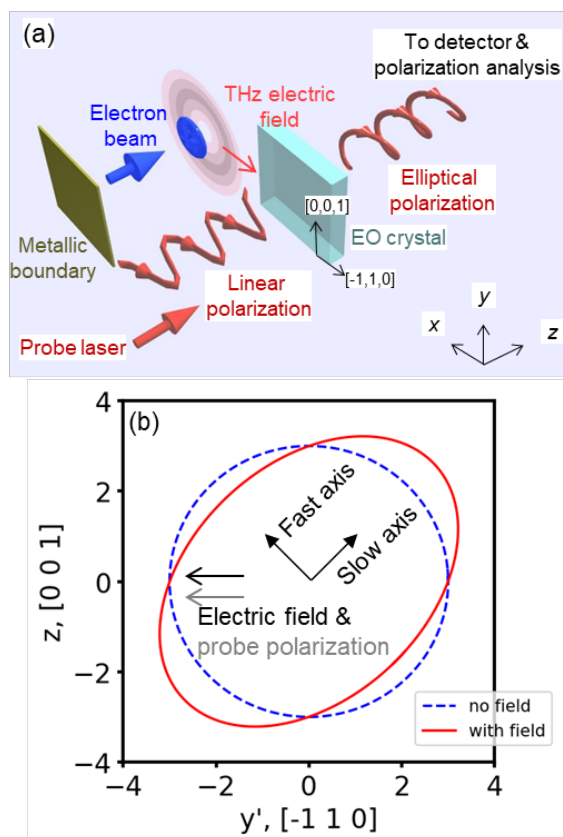


Figure 2: (a) Diagram of an electro-optic (EO) sampling for electron beam. Electric field component in $[-1 \ 1 \ 0]$ axis around the beam was measured using a polarization change of a probe laser due to a birefringence of an EO crystal. Tips' trajectories of electric field vectors are shown for a probe laser induced by a retardation in the EO crystal [15]. (b) Diagram of configuration among index ellipsoid, THz electric field, and probe laser polarization. The index difference between the fast and slow axes (Δn) is 1.2 with assumptions of electro-optic coefficient (r_{41}) of 4 pm/V , electric field strength of 10 GV/m , and linear response without destruction due to the field (solid line). Axes of y' and z denote crystal orientation.

短軸である [15]。本研究では、時空間分布の制御されたプローブ光パルスを用いて、さらにその偏光変化の分布の解析により、時空間分解が可能なシングルショット計測に応用した。Figure 2(b)は、上記のように感度を最大化する際の、屈折率楕円に対する、計測対象の電場ベクトルおよびプローブ光の偏光方向の概念図を示している。軸は結晶の方位を示す。破線の楕円は電場が印加されていない状態の屈折率 $n_0=3$ に対して、実線の楕円は電気光学定数 $r_{41} = 4 \text{ pm/V}$ および印加する電場強度 10 GV/m として、ZnTe が電場に破壊されずに線形応答する仮定の下での楕円(遅軸と速軸の屈折率差 $\Delta n = 1.2$)の概念図を、それぞれ、示している。

2.4 光学系

電子ビーム計測では、Fig. 3 に示すように、パルス圧縮されたサブピコ秒電子ビーム (35 MeV, 70 pC) の周りのテラヘルツ電場計測を行った。EO 結晶として ZnTe (110) (厚み 1 mm, JX 金属)を用いた。また、シングルショット計測を行うために、エシェロンミラーを用いて、折り返しの光路によりフェムト秒レーザーの時空間分布を調整した(Fig. 3 右下)。電子ビームの軸に EO 結晶を設置し、y 方向で集束され、x 方向には集束されないような条件のシリンドリカルレンズ(CL1)を用いた。撮像範囲を広げるために、CCD カメラ(BG130, 東芝テリー)の素子サイズに収まるように y 方向に縮小しながらプローブ光を輸送した(CL3)。最終的に、CCDカメラにより電子ビーム由来のポッケルス効果による偏光の変化を計測した。適宜、1/4 波長板(QWP)を調整し、電場分布を解析できるようにした。

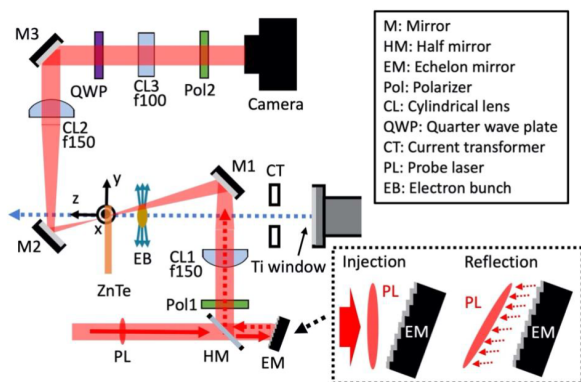


Figure 3: Optics of the single-shot measurement of the electron beam. Copyright 2022 NPG. Reprinted with changes from an open access reference [3].

3. 実験結果

Figure 4 (a)は、金属境界条件と測定点 (ZnTe) の距離が 204 mm の条件で、エシェロンミラーを用いたシングルショット計測により得られた、電場の時空間分布の計測結果を示す [3]。LT を考慮した電場分布から予想されるように、進行方向(時間に相当する Z, T)で電場分布は収縮した形状、動径方向(空間の x)へ電場分布の広がる様子が確認でき、相対論的効果により等方的ではない電場分布の直接観測を行うことに成功した。取得画像からの電場分布解析においては、QWP の位相を $\pm 1.5^\circ$ の

条件の、ビーム有り(プローブ光に対する EO 結晶の位相差有り)2枚、ビーム無し2枚、計4枚の画像の演算により、位相オフセット法 [16]に基づく算出を行った結果である。Figure 4 (b)は、particle-in-cell 計算により得た分布を示す。これらの比較により、電場の時空間分布の妥当な計測結果であることが示された。

多数回計測においては、Fig. 2 に示すような、比較的短距離(金属境界条件~測定点の距離として 10 mm オーダー)の条件においては、球面波形状に近い分布(LWP を考慮した分布)も得られており、同様に、計算からも予測されるような分布であった。このような計測を通して、電子ビームに関する相対論的な現象を実験的に直接観測することが可能となった [3]。

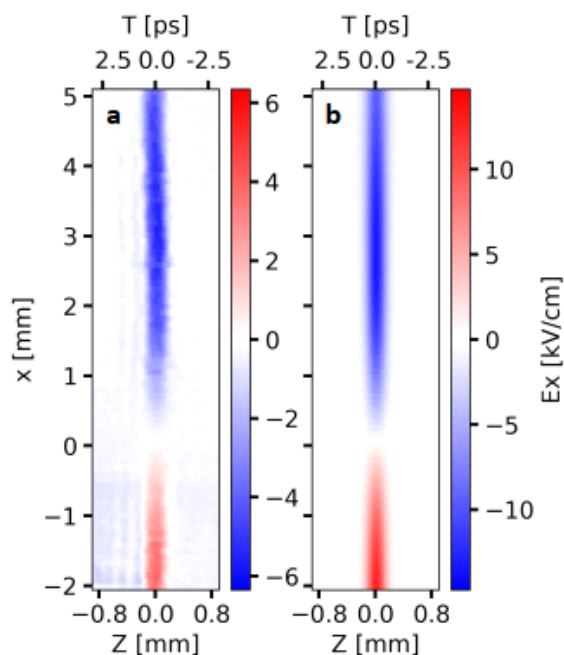


Figure 4: Comparison of the spatio-temporal profiles of (a) the experimental result and (b) numerical simulation at a condition of the distance of 204 mm between the Ti window and ZnTe. Axes of Z and T are longitudinal direction for the electron beam. The origins correspond to the beam center. Copyright 2022 NPG. Reprinted with changes from an open access reference [3].

4. まとめ

本研究では、電気光学サンプリングによる電子ビーム周りの電場のシングルショット計測を開発した。サブピコ秒電子ビーム(35 MeV, 70 pC)の計測を通じて、特殊相対性理論の効果により等方的では電場の時空間分布を明らかにした。今後、本計測手法は、電子由来の電磁場の放射現象(チェレンコフ放射、シンクロトロン放射、ミス・パーセル放射等)の計測への応用を行う。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 (JP23K11702, JP20H02206, JP19K05331, JP20H00364, JP19J20765)、オートレース (2022M-225)、核融合科学研究所 共同研究 (2021NIFS18KUGK125, 2022NIFS18KUGK125)、日本科学協会の笹川科学研究助成 (2022-2021) の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)、大阪大学レーザー科学研究所共同研 (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] M. J. Bronskill, R. K. Wolff, and J. W. Hunt, Subnanosecond Observations of the Solvated Electron, *J. Phys. Chem.* **73**, 1175 (1969).
- [2] M. Gohdo, S. Tagawa, K. Kan, J. Yang, and Y. Yoshida, Direct Ionization-Driven Observational Approaches for Radical Cation Formation in Solution for Pulse Radiolysis, *Radiation Physics and Chemistry* **196**, 110105 (2022).
- [3] M. Ota *et al.*, Ultrafast Visualization of an Electric Field under the Lorentz Transformation, *Nat. Phys.* **18**, 12 (2022).
- [4] H. Azechi *et al.*, Thermonuclear Burn Time and Duration in Laser-driven High-aspect-ratio Targets, *Applied Physics Letters* **55**, 945 (1989).
- [5] R. A. Lerche, D. W. Phillion, and G. L. Tietbohl, 25 Ps Neutron Detector for Measuring ICF-target Burn History, *Review of Scientific Instruments* **66**, 933 (1995).
- [6] Y. Arikawa *et al.*, The Conceptual Design of 1-Ps Time Resolution Neutron Detector for Fusion Reaction History Measurement at OMEGA and the National Ignition Facility, *Review of Scientific Instruments* **91**, 063304 (2020).
- [7] T. Takahashi *et al.*, Čerenkov Radiation from a Finite Trajectory of Electrons, *Phys. Rev. E* **50**, 4041 (1994).
- [8] Q. Wu and X.-C. Zhang, Free-space Electro-optic Sampling of Terahertz Beams, *Applied Physics Letters* **67**, 3523 (1995).
- [9] G. Berden *et al.*, Benchmarking of Electro-Optic Monitors for Femtosecond Electron Bunches, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 164801 (2007).
- [10] M. Ota, K. Kan, S. Komada, Y. Arikawa, T. Shimizu, V. K. Mag-usara, Y. Sakawa, T. Matsui, and M. Nakajima, Longitudinal and Transverse Spatial Beam Profile Measurement of Relativistic Electron Bunch by Electro-Optic Sampling, *Appl. Phys. Express* **14**, 026503 (2021).
- [11] I. Nozawa *et al.*, Measurement of < 20 Fs Bunch Length Using Coherent Transition Radiation, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **17**, 072803 (2014).
- [12] K. Kan, M. Gohdo, J. Yang, I. Nozawa, Y. Yoshida, H. Kitahara, K. Takano, R. Kuroda, and H. Toyokawa, Time-Domain Measurement of Coherent Transition Radiation Using a Photoconductive Antenna with Micro-Structured Electrodes, *AIP Advances* **11**, 125319 (2021).
- [13] 太田雅人ら, 電磁気における特殊相対性理論の直接検証, レーザー研究(レーザー学会), 掲載予定 (2023).
- [14] Q. Chen, M. Tani, Z. Jiang, and X.-C. Zhang, Electro-Optic Transceivers for Terahertz-Wave Applications, *J. Opt. Soc. Am. B* **18**, 823 (2001).
- [15] 菅晃一ら, 相対論的な電場収縮過程の超高速観測, 日本赤外線学会誌, 掲載予定 (2024).
- [16] G. Asai, D. Hata, S. Harada, T. Kasai, Y. Arashida, and

I. Katayama, High-Throughput Terahertz Spectral Line Imaging Using an Echelon Mirror, *Opt. Express* **29**, 3515 (2021).