

## 電気光学効果を用いたレーザー加速電子の パルス長・タイミングの計測

### PULSE LENGTH AND TIMING MEASUREMENT OF LASER ACCELERATED ELECTRON BEAMS BASED ON ELECTRO-OPTICAL EFFECTS

神門正城<sup>#, A)</sup>, 黄開<sup>A)</sup>, Timur Zh. Esirkepov<sup>A)</sup>, James K. Koga<sup>A)</sup>, 小瀧秀行<sup>A)</sup>

森道昭<sup>A)</sup>, 林由紀雄<sup>A)</sup>, 中新信彦<sup>A)</sup>, Sergei V. Bulanov<sup>A), B)</sup>

Masaki Kando<sup>#, A)</sup>, Kai Huang<sup>A)</sup>, Timur Zh. Esirkepov<sup>A)</sup>, James K. Koga<sup>A)</sup>, Hideyuki Kotaki<sup>A)</sup>

Michiaki Mori<sup>A)</sup>, Yukio Hayashi<sup>A)</sup>, Nobuhiko Nakanii<sup>A)</sup>, Sergei V. Bulanov<sup>A), B)</sup>

<sup>A)</sup>Kansai Photon Science Institute (KPSI), National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

<sup>B)</sup>Institute of Physics ASCR, v. v. i. (FZU), ELI Beamlines, Czech Republic

#### Abstract

We present a modified spatial decoding measurement system based on an electro-optical effect for measurements of electron bunch length and timing from laser wakefield accelerators. The EO crystal was placed very close to the exit of the plasma, where the front of the electric field of an electron bunch cannot be treated as plane. We derived a modified formula for converting the spatial displacement to time. The formula was confirmed with an experiment. The pulse length of laser accelerated electron beams was measured with this technique and was 42  $\mu\text{m}$  (140 fs). This value is limited by the electron energy and can be improved with a higher energy than 100 MeV. The timing between a pump laser and electron beams can be measured with this technique to better than 22 fs, which is the resolution limit of the evaluation method.

#### 1. はじめに

高強度・超短パルスレーザーをプラズマ中に集光することで励起されるプラズマ波を用いるレーザー航跡場加速[1] (以下では単にレーザー加速と呼ぶ) では、加速周波数は THz 領域であり、高い加速勾配 (10~100 GV/m) を持つことから小型加速器を実現できるとして期待されている。レーザー加速電子は、中心エネルギー 4.2 GeV、エネルギー拡がり 1~10%、パルス幅 2 fs、規格化横方向エミッタンス 0.1~1 mm-mrad、電荷量 1~100 pC が個々に実現・計測されている。我々は、レーザー加速を多段に重ね、エネルギーのスケラビリティの実証と電子ビームの位相空間での制御を目指しているが、電子ビームのパルス幅とレーザーと電子ビームのタイミング計測をリアルタイムで計測できる装置の開発に取り組んでいる。電子ビームのパルス幅を計測する装置としては、電子ビームを光に変換し、ストリークカメラや干渉計、コヒーレントなスペクトルを計測する方法、電子ビームの電場を電気光学結晶により検知する方法、電子ビームの磁場によるファラデー回転、電子ビームを高周波空洞で横方向に偏向する方法など様々な方法が加速器やレーザー加速の分野で使われている。

我々は、電子ビームのパルス幅とタイミングを計測でき、ビーム調整に使えるリアルタイム性、非破壊性を持つ方式として、電気光学結晶 (EO 結晶) を用い[2]、さらに斜めからプローブ光を導入する空間デコード法をレーザー加速電子に対して初めて適

用した[3]。本プロシーディングスでは、その際に工夫した計測法、空間-時間の関係式、および結果について報告する。

#### 2. EO 計測

電気光学効果を用いた電子ビームのパルス長計測は、電子ビームが持つクーロン電場によって結晶中に誘起されるポッケルス効果によって結晶に入射したプローブ光の偏光方向が変わる効果を利用する。実際の計測配置には、スペクトル領域でのデコード法[4]、時間領域でのデコード法[5]、空間デコード法[6]が知られているが、本研究ではプローブ光を結晶に対して傾けて入射する空間デコード法を用いた。本方式では、プローブレーザー光を電子ビームに対して適切なタイミングに予め設定しておけば、シングルショット・非破壊で電子ビームのパルス長とレーザーとのタイミングずれを計測することができる。さて、空間デコード法では、時間軸が空間軸に変換されるため、空間座標と時間の相関関係を求める必要がある、

$$c\Delta t = \Delta\xi \tan\theta_p \quad (1)$$

が用いられている。ここで、 $c$ は真空中の光速、 $\Delta t$ は、 $\Delta\xi$ は検出器での空間変位、 $\theta_p$ はプローブ光の結晶への入射角度である。この式は電子ビームが作る電場の等電位面が平面波であるとして、結晶表面に到着する時刻を考えると導くことができる。

我々は、Fig. 1 に示すように、レーザー加速電子の発生点付近、ノズル出口から下流に 2 mm、ビーム軸から横に 1 mm に GaP 結晶 (厚さ 50  $\mu\text{m}$ ) の端面がくるように設置し、計測を行った。これにより、レーザー加速電子に本方式を用いた場合の欠点であ

<sup>#</sup>kando.masaki@qst.go

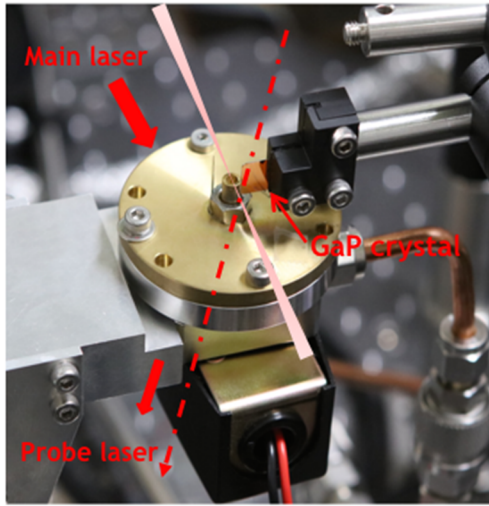


Figure 1: EO measurement setup.

る電子ビームのポインティング揺らぎによる位置の誤差や、比較的大きなエネルギー分散によるパルス長の伸長効果を抑えることができる。この工夫により、後述するようにレーザー加速電子においてEO計測を成功させることができた。

さて、このように電子ビームの発生点に近い位置で電子ビームのクーロン場を計測する場合、Eq. (1)の関係式が用いることができるだろうか？

### 3. 計測点が電子発生点に近い場合

電子ビームのクーロン場は Liénard-Wiechert ポテンシャルを用いて計算できる。Figure 2 に各時刻での電場分布を示す。ここでは、時刻  $t=0$  において電子ビームが発生したものとしている。Figure 3 において静電場が球面状に、光速で伝わっていく様子がわかる。すなわち、電子ビームが作る電場の先端部は球面となっており、Eq. (1)の導出で仮定した平面波ではないことがわかる。従って電場先端部が球面になっている場合の空間と時間の関係式を求める必要がある。新しい関係式は Fig. 3 のように考えることで幾何学的に求めることができる。その結果は、

$$c\Delta t = \Delta\xi \tan\theta_p + \frac{L}{\cos\theta_{s0}} - \frac{L}{\cos\theta_{s0}} \sqrt{1 - \frac{2\sin\theta_{s0}\cos\theta_{s0}\Delta\xi}{\cos\theta_p L} + \frac{\cos^2\theta_{s0}\Delta\xi^2}{\cos^2\theta_p L^2}} \quad (2)$$

となる（記号については Fig. 3 を参照のこと）。レーザー加速電子のように短い時間スケールを議論する場合には、 $\Delta\xi \ll L$ と考えることができ Eq. (2)は次のように近似できる。

$$c\Delta t = \left(1 + \frac{\sin\theta_{s0}}{\cos\theta_{s0}}\right) \Delta\xi \tan\theta_p \quad (3)$$

平面波の場合は、 $\theta_{s0} \rightarrow 0$ となるので、Eq. (3)は Eq. (2)に一致し、以前の関係式を再現できる。

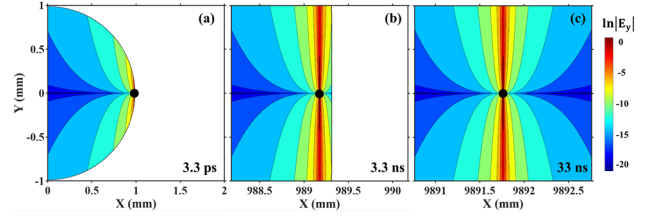


Figure 2: Calculated electric field ( $E_y$ ) distributions of an electron with the energy of 30 MeV born at  $x=0$  mm at  $t=0$  at (a)  $t=3.3$  ps (1 mm), (b)  $t=3.3$  ns (1 m) and (c)  $t=33$  ns (10 m).

### 4. 関係式の実験結果

レーザー加速電子ビームの生成は、量研関西研の JLITE-X レーザー（チャープパルス増幅チタンサファイアレーザー）を用いた。レーザーピークパワーは、最大 10 TW、パルス幅は 40 fs、F/20 の軸外し放物面鏡により He ガスジェット（3 mm コニカルノズル）上に集光した。集光サイズは、 $1/e^2$  半径  $w_0=21 \mu\text{m}$  であり、ピーク集光強度は  $I=1.6 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$  であった。

プラズマ密度は、 $n_e=(2.2-3.7) \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  の範囲で変え、おおよそ最大エネルギー 30-40 MeV の電子ビームが発生する条件で計測を行った。

Figure 4 にプローブ光のタイミングを変えて計測した EO 信号結果を示す。Figure 4(a)-(d)は生の信号を表しており、ディレイを変えることで CCD カメラ上での横方向の位置が変わっていく様子がわかる。このプローブ光のディレイ値と変位をプロットしたものが Fig. 4 (e)である。この実験値はクーロン場が平面的であると仮定して求められた Eq. (1)のフィッティング直線からは大きくずれている。一方、球面波を仮定して求めた Eq. (3)では $\theta_{s0}=33.1^\circ$ であり、実験の配置 $\theta_{s0}=34.3^\circ$ とよく合った。

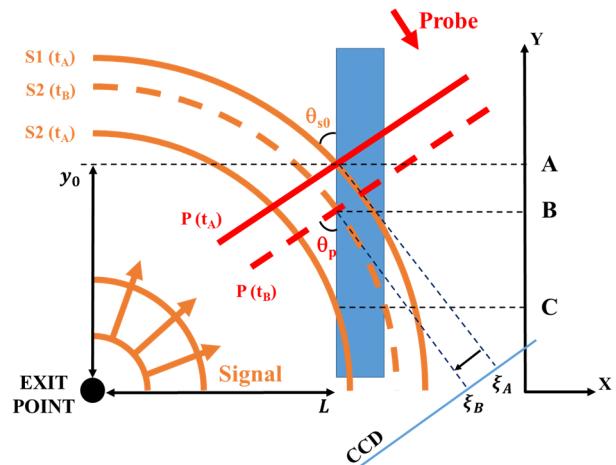


Figure 3: Geometry of the spherical front of the electric field by an electron at the exit point, the plane wave front of a probe laser pulse, and the EO crystal.

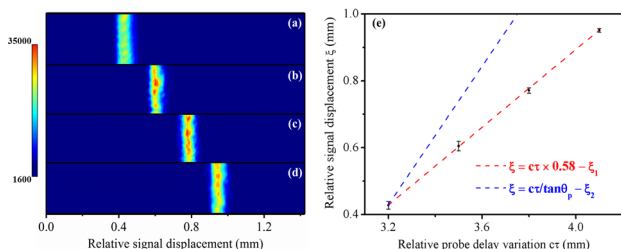


Figure 4: Measured EO signals at various time delays (a)-(d). The relationship between the displacement on the detector and the probe delay (e).

## 5. 電子ビームのパルス長計測結果

電子ビームのパルス長とタイミングについては、本装置で計測できる。タイミングについては、電子ビームを加速するメイン光からビームスプリッターにて計測に用いるプローブ光を作っているために、原理的なジッタはない。実際にレーザーがプラズマ中を伝播する様子をプローブ光を用いて計測し、伝播のチャンネル位置を計測することによりジッタを評価すると、計測限界の 22 fs 以下であった。

電子ビームのパルス長に関しては、Fig. 5 に示すように、30-40 MeV 程度の電子ビームに対しておよそ 42  $\mu\text{m}$  (140 fs)程度であった。これは実際の電子ビームのバンチ長ではなく、計測の分解能によると考えられる。本方式での計測限界は、(1)電子ビームのエネルギー（クーロン場の広がり）、(2)用いるプローブ光のパルス長、(3)プローブ光とクーロン場の結晶中での速度分散、(4)用いる結晶の帯域、などによって決まる。究極的には(3)、(4)の要因でリミットされ、おおよそ 30 fs 程度であるが、現在の計測では低い電子エネルギーにより限界が決まっていると思われる。実際に、プローブ光と THz 領域 (<8 THz) の相互作用を文献[7]に従い計算すると、100 MeV 以上の電子では 9  $\mu\text{m}$  (30 fs)程度のパルス長は計測できる見込みを得た。

レーザー加速電子ビームのバンチ長は、発生点では冒頭に示したように 1  $\mu\text{m}$  以下 (数 fs) が期待され、coherent transition radiation のスペクトルもそれを支持する結果となっている[8]。本研究で用いた EO 計測法では、検出限界は足りないが、リアルタイム・非破壊のモニターとしてはある程度は使えるものではないかと考えている。本モニターの限界を超えて計測する場合には、coherent transition radiation などのコヒーレント発光成分の光計測を行う必要があると思われる。

また、本計測では、数 pC の電荷量であるが、十分な信号量が取れており、バランス検出や、EO 結晶を複数用いることで位置検出やピークカレント、TOF なども計測できる可能性がある。

## 6. まとめ

レーザー加速電子ビームのパルス長とタイミング計測をリアルタイム・非破壊で計測できるモニターとして電気光学結晶を用いた手法を、電子発生点に

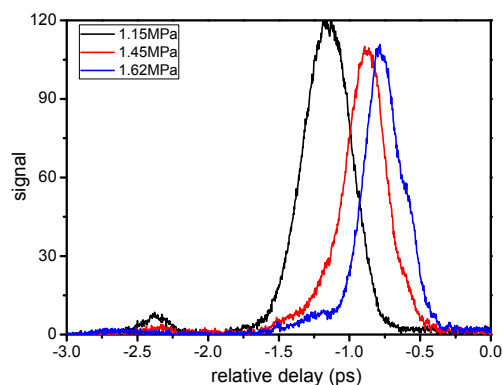


Figure 5: Measured EO signals by the electron bunch at various gas pressures.

近い部分で用いる方法に拡張した。従来知られている空間-時間の変換公式の修正版を導出し、実際に実験で妥当であることを確かめた。タイミング計測については、レーザー加速では電子はレーザーによって加速されるため、原理的にジッタ 0 の計測ができる。電子ビームのパルス長については、EO 計測法では限界があり 30 fs 程度であるが、本実験においては電子エネルギーが最大 40 MeV と低いために 42  $\mu\text{m}$  (140 fs)程度であった。100 MeV 以上の高エネルギー電子に対しては限界値程度の値が得られるという計算結果を得た。

## 謝辞

本成果は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の「ユビキタス・パワーレーザーによる安全・安心・長寿社会の実現 (佐野雄二プログラム・マネージャー)」の一環として得られました。

## 参考文献

- [1] T. Tajima and J. M. Dawson, "Laser Electron Accelerator", *Phys. Rev. Lett.* 43,1979, pp.267-70.
- [2] X. Yan *et al.*, "Subpicosecond electro-optic measurement of relativistic electron pulses", *Phys. Rev. Lett.*, 85, 3404, 2000, pp. 1-7.
- [3] K. Huang *et al.*, "Electro-optic spatial decoding on the spherical-wavefront Coulomb fields of plasma electron sources", *Scientific Reports*, 8, 2938, 2018, pp. 1-10.
- [4] I. Wilk *et al.*, "Single-Shot Electron-Beam Bunch Length Measurements", *Phys. Rev. Lett.*, 88, 124801, 2002, pp. 1-4.
- [5] G. S. Berden *et al.*, "Electro-Optic Technique with Improved Time Resolution for Real-Time, Nondestructive, Single-Shot Measurements of Femtosecond Electron Bunch Profiles", *Phys. Rev. Lett.*, 93, 2004, pp.1-4.
- [6] A. L. Cavalieri *et al.*, "Clocking Femtosecond X Rays", *Phys. Rev. Lett.*, 94, 114801, 2005, pp1-4.
- [7] S. Casalbuoni *et al.*, "Numerical Studies on the Electro-Optic Sampling of Relativistic Electron Bunches," *TESLA Report 2005-01*, 2005, pp. 1-33.
- [8] O. Lundh *et al.*, "Few Femtosecond, Few Kiloampere Electron Bunch Produced by a Laser-Plasma Accelerator", *Nature Phys.*, 7, 2011, pp. 219-22.