

# 電気光学サンプリングによる電子ビーム周りのテラヘルツ電場計測

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

菅晃一<sup>#, A)</sup>, 太田雅人<sup>B)</sup>, 中嶋誠<sup>B)</sup>, 有川安信<sup>B)</sup>, 清水智貴<sup>B)</sup>,  
瀬川定志<sup>B)</sup>, 坂和洋一<sup>B)</sup>, 駒田蒼一郎<sup>C)</sup>, 松井龍之介<sup>C)</sup>

Koichi Kan<sup>#, A)</sup>, Masato Ota<sup>B)</sup>, Makoto Nakajima<sup>B)</sup>, Yasunobu Arikawa<sup>B)</sup>, Tomoki Shimizu<sup>B)</sup>,  
Sadashi Segawa<sup>B)</sup>, Youichi Sakawa<sup>B)</sup>, Soichiro Komada<sup>C)</sup>, Tatsunosuke Matsui<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> ISIR, Osaka University

<sup>B)</sup> ILE, Osaka University

<sup>C)</sup> 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, terahertz (THz) electric field around electron beam of 35 MeV was measured using electro-optic (EO) sampling.

### 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照射し、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

<sup>#</sup> koichi81@sanken.osaka-u.ac.jp

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、結晶の複屈折性を利用する[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、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 サンプリングによる電子ビーム周りのテラヘルツ電場の計測を行った。EO 結晶(ZnTe (110), 1 mm 厚)および適宜光学遅延したフェムト秒レーザーを用いて、電子ビームの周りに誘起されたテラヘルツ電場を解析した。

### 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。2019 年はカソード駆動用の Nd:YLF ピコ秒レーザーから紫外光パルスを発生できていたが、現在 2020 年は不調である。そのため、Ti:Sapphire フェムト秒レーザー(800 nm, <800 μJ/pulse, 1 kHz)からの 3 倍高調波(266 nm, <80 μJ/pulse, 1 kHz)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、THG(third

harmonic generation)と電子銃の間に反射型の可変 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<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、 $40^\circ$ 、 $100^\circ$  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の一部の光は測定系でも使用できるように、電子ビームが測定系へ到達する時刻と光の輸送による光学遅延の両方を考慮し、測定系を構築した。

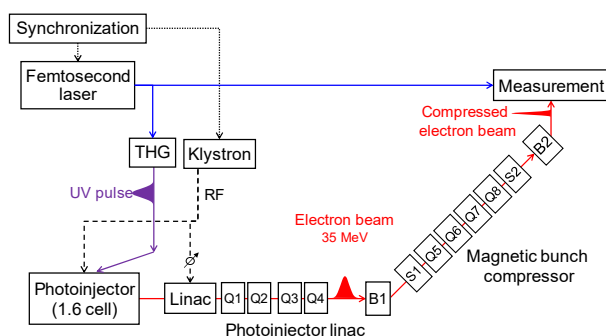


Figure 1: Photocathode RF gun linac and THz measurement. THG: a third harmonic generation. Q: a quadrupole magnet. B: a bending magnet. S: a sextupole magnet. A part of femtosecond laser was also used for THz measurement.

## 2.2 電子ビーム測定系

Figure 2 に電子ビーム測定系を示す。Figure 2(a)に測定光学系の模式図を示す。ビームポートから出射した 35 MeV のフェムト秒電子ビームの測定を行った。CT (current transformer) により、電子ビームの電荷量を測定した。測定系で用いるレーザー光は絞りで 1 mm 以下の径で使用し、適宜 ND フィルターにより光強度を増減させた。元のレーザー光は、水平方向 (x) に偏光しているが、 $\lambda/2$  板により偏光を調整できるようにしている。 $\lambda/2$  板を通過した光は自動ステージによる光学遅延 (Delay line) を通過した後、水平偏光の純度を高めるために、偏光板 (Pol) を設置した。その後、電子ビームの光学素子通過時の散乱を低減するために、アルミ蒸着 (蒸着膜厚 100 nm 台) ペリクルを用いて、電子ビームと合流させた。この測定では、金属境界条件と EO 結晶 (ZnTe (110), 1 mm 厚) の距離  $z_0$  は 57 mm とした。バランス検出を行う場合、電子ビームの周りのテラヘルツ電場により偏光が変化した光は  $\lambda/4$  板により円偏光となるように、 $\lambda/4$  板を調整した。円偏光となった光の水平 x 偏光成分を P、鉛直 y 偏光成分を S とし、グランレーザー偏光プリズム (GL) により偏光成分の分離を行い、それぞれのフォトダイオード (PD, S1226-8BQ) により光強度測定を行った。

Figure 2(b)に信号の処理の模式図を示す。差動増幅

器 (NF5307) による高感度化について検討を行った。従来は、PD(P)と PD(S)の信号を直接オシロスコープの  $50 \Omega$  終端されたチャンネルへ接続を行っていた。本研究では、PD からの信号について、 $50 \Omega$  インラインターミネータを介して差動増幅器に接続し、分岐した信号を  $1 M\Omega$  終端されたオシロスコープで読み取った。同時に、差動増幅された信号  $100 \times (P-S)$  も読み取った。これらの信号処理により、光強度全体に対して、電子ビームの電場が EO 結晶に誘起するポッケルス効果由来の偏光成分の変化 ((P-S)/(P+S)、以下で偏光変化)を解析することが可能である。また、強度の解析では 200 ns の時間窓の電圧波形積分値を用いて解析を行った。

Figure 2(c)に光学系の写真を示す。電子ビーム測定部のみでは面積として、600 mm  $\times$  600 mm 程度である。

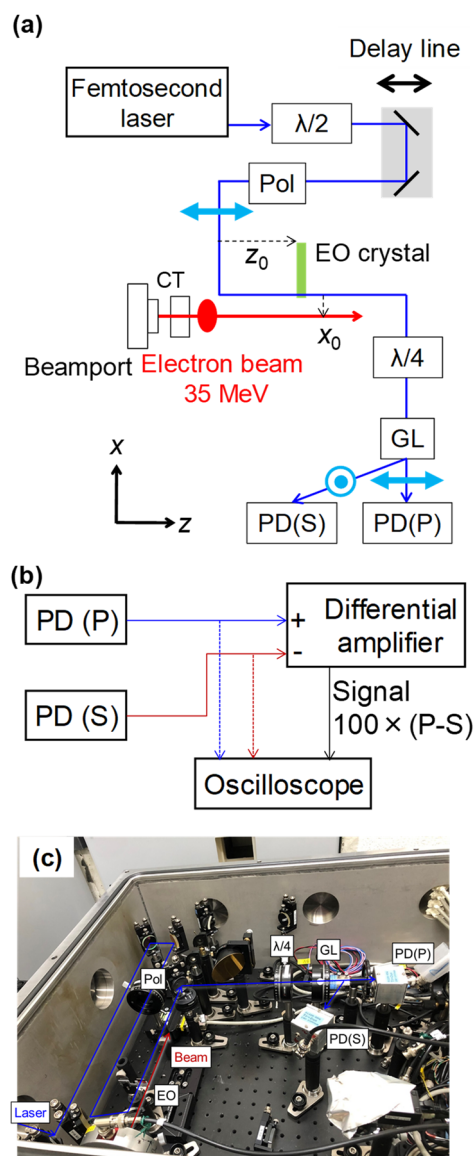


Figure 2: (a) Schematic diagram of the measurement optics. CT: a current transformer. Pol: a polarizer. GL: a Glan-Laser polarizer. PD: a photodiode. (b) Process of signals using a differential amplifier. (c) Picture of the measurement optics.

### 3. 測定結果

Figure 3 に、差動増幅器の効果を示す。ビームの位置  $x_0 \sim -2$  mm (電子ビーム軸とレーザー光軸の距離 $\sim 2$  mm) であり、電荷量は 124 pC であった。PD(P)の信号強度を PD(S)の信号強度に一致させるため、PD(P)の前に ND フィルターを設置した。

Figure 3(a)は、PD および差動増幅器の信号強度の光学遅延依存性であり、光学遅延の掃引回数 1 回のデータある。差動増幅器の信号は、元の PD 信号と同じ縦軸に表示するために、増倍率で除して表示している。この結果、時刻 $\sim 283$  ps では、P と S が逆相で増減しており、電子ビームとレーザーが同時に EO 結晶近辺を通過する時刻であることが分かる。また、差動増幅の信号も出力できていることが分かった。

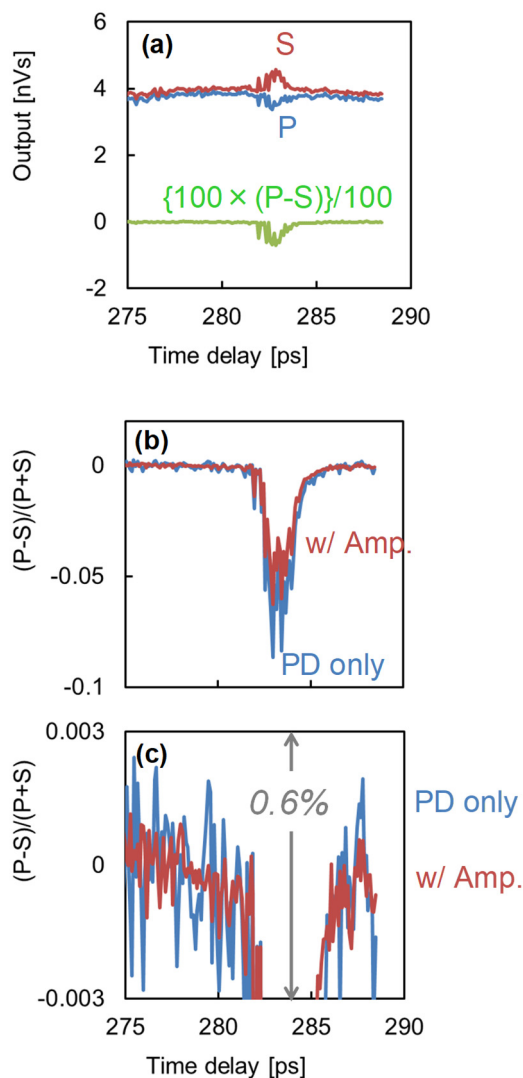


Figure 3: (a) Signals of PDs and differential amplifier as a function of time delay are shown (1 sweep). The signal from the amplifier was divided by 100 for comparison. (b) Polarization changes from PDs only or amplifier are shown (average of 5 sweeps). (c) Polarization changes near baseline are shown (average of 5 sweeps).

Figure 3(b)は、偏光変化の光学遅延依存性として演算した結果である。光学遅延の掃引回数 5 回の平均値を示す。先ほどの図からも予想されるように、PD のみを用いても、差動増幅した信号を用いても電子ビームによる電場の時間プロファイルが得られた。PD のみの解析では偏光変化の最大値は $\sim 9\%$ であった。しかし、差動増幅信号を用いた偏光変化は、PD のみからの演算より低く算出された。200 ns の時間窓では、CT の波形はほぼ 0V まで減衰していたのに対して、PD と差動増幅の波形は 0V 近くまで減衰していなかった。つまり、帯域のため PD よりも遅れた信号を出力する差動増幅の波形全体を取得できていなかったことが、偏光変化の違いにつながった可能性が有る。今後、同時測定のおシロスコープを増やし、被測定対象への時間窓の融通性を高めて、再確認を行う。

Figure 3(c)は、Fig. 3(b)のベースライン近くの拡大図である。光学遅延の掃引回数 5 回の平均値を示す。275 $\sim$ 280 ps はビームが EO 結晶に到達する前の時刻であるため、理想的には光量変化の増減が無い時刻である。差動増幅による信号の方が、PD のみを用いた算出よりもばらつきが小さいことが分かった。差動増幅を行う場合は、0V (増幅器のオフセットが無い場合) を中心にオシロスコープの電圧レンジを拡大することができるが、PD の信号のみを用いる場合は光強度に合わせたオシロスコープの電圧レンジを使用することになり、差動増幅を行う方がオシロスコープの分解能ビットを有効に使用でき、S/N が改善したと考えられる。差動増幅の効果の定量性として、PD のみの 275 $\sim$ 280 ps の標準偏差と Fig. 2(b)の偏光変化絶対値の最大値の比率から、P と S 成分の逆相信号の差動増幅により 1.7 倍の高感度化を行う事ができた。

### 4. まとめ

電気光学 (EO) サンプリングにより、電子ビーム (35 MeV, 100 pC 台) 周りのテラヘルツ電場計測を行った。EO 結晶は、ZnTe (110) 1 mm 厚を使用した。フォトダイオードのみの信号解析では、偏光変化の最大値は $\sim 9\%$ であった。偏光変化は差動増幅器を用いて、フォトダイオードのみを用いた測定よりも 1.7 倍の高感度化を行う事ができた。今後、測定時間分解能の向上、シングルショット測定系の構築等の研究を行う。

### 謝辞

本研究は、科研費(15H05565, 17H01374, 19K05331, 20H00364) による支援を受けました。

### 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, 101146 (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).