

# PRESENT STATUS OF ACCELERATOR-BASED THz TIME-DOMAIN SPECTROSCOPY SYSTEM AT AIST

Masafumi Kumaki<sup>1#</sup>, Ryunosuke Kuroda<sup>2</sup>, Eriko Yamaguchi<sup>2</sup>, Hiroyuki Toyokawa<sup>2</sup>, Kawakatsu Yamada<sup>2</sup>, Kazuyuki Sakaue<sup>1</sup>, Yohei Kawauchi<sup>1</sup>, Masakazu Washio<sup>1</sup>

<sup>1</sup>RISE, Waseda University

3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555, Japan

<sup>2</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568, Japan

## Abstract

The high-power terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) system has been developed on the basis of a compact S-band electron linac at AIST, Japan. The 40 MeV, 1 nC electron bunch is generated with the linac which consists of photocathode rf-gun and two acceleration tubes. Then, a magnetic compressor compresses it less than 1 ps. The short bunch is bended by a 90-degree bending magnet, which causes generation of the THz coherent synchrotron radiation (CSR). It has useful characteristics such as high power, a short pulse and continuous spectrum. In particular, the peak power of THz-CSR is estimated to be about  $10^6$  times larger than that of the conventional THz source on the basis of the mode-locked fs laser. The THz-TDS is based on the EO sampling methods with the pump-probe technique. The frequency spectrum is obtained by Fourier transform of the measured temporal THz waveform. In addition, it is applied to the ultra-short bunch length monitor by analysing the THz spectrum. In this paper, we will describe details of our system and present status of THz-TDS system.

## 加速器ベース THz 時間領域分光システム開発の現状

### 1. はじめに

未踏領域とも呼ばれていた THz 領域の電磁波発生・検出技術は近年発展目覚ましく、THz 波の様々な特徴が明らかとなってきた。特に THz 領域での物質固有の指紋スペクトルの存在が確認され、分光測定を用いた物質の識別など、産業応用としても期待されている<sup>[1]</sup>。

これまで、産業技術総合研究所（産総研）では、加速器を用いたコヒーレント・シンクロトロン放射により高強度な THz 波(THz-CSR)の発生と、応用研究を行っている。本研究では得られた THz-CSR の周波数スペクトルの取得を目的とした THz 時間領域分光法 (THz-TDS) の開発の現状について報告する。

### 2. コヒーレント・シンクロトロン放射

シンクロトロン放射 (SR) は相対論的速度の電子に加速度を付けると接線方向に放射される光で、電子バンチ内の各電子から放射される。光の波長よりも電子バンチの長さが短い時、各 SR 光の位相が揃った THz-CSR が発生する (図 1 右図)。

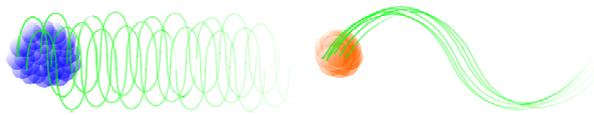


図 1 : インコヒーレントな SR (左) とコヒーレントな SR (右) の概念図

<sup>#</sup>rogus@asagi.waseda.jp

コヒーレント放射を含めた SR 光の強度  $I_{tot}(\omega)$  は、インコヒーレントな SR の強度を  $I_{inc}(\omega)$  の強度とすると次の式で与えられる。

$$I_{tot}(\omega) = (1 + (N - 1)f(\omega))I_{inc}(\omega) \quad (1)$$

ここで  $N$  はバンチ内の電子数、 $f(\omega)$  はフォームファクターと呼ばれるバンチの形状によって決まる値であり、バンチ形状をガウシアンと仮定すると、バンチ長  $\sigma_z$  を用いて

$$f(\omega) = e^{-\frac{(\omega\sigma_z)^2}{2}} \quad (2)$$

で与えられる。

図 2 に電子バンチの電荷量 1nC、エネルギー 30MeV の条件での、各バンチ長での放射光スペクトルの計算値を示す。

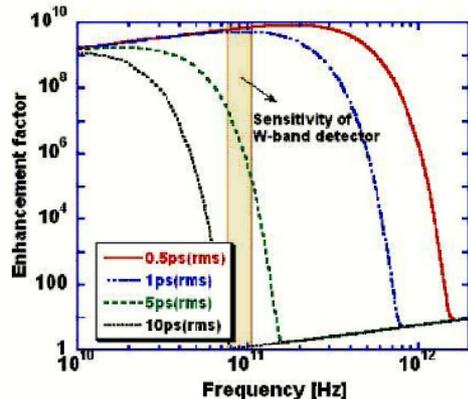


図 2 : 各バンチ長におけるシンクロトロン放射の周波数スペクトル (計算値)

バンチ長  $\sigma_z$  が波長  $\omega$  に比べて十分に小さい時、フォームファクター  $f(\omega)$  が 1 に近づき、コヒーレントな SR の強度はインコヒーレントな SR の強度に比べて約  $N$  倍 ( $10^9 \sim 10^{10}$ ) となる。また、図 2 より、W-band 帯域である 0.1THz 以上の放射光を得る為には、バンチ長が 1ps 以下の短バンチであることが要求される。

## 2. 実験装置

本研究は産総研の施設である S-band 小型 Linac 装置を用いて行っている。図 3 に加速器ビームラインの概略図を示す。

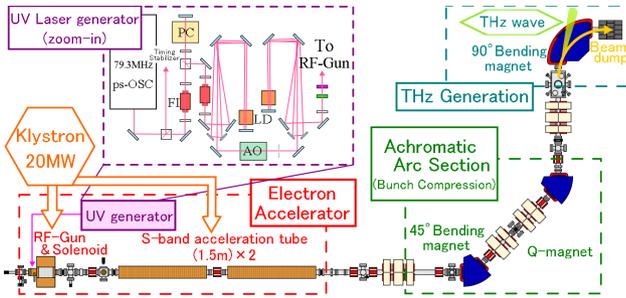


図 3 : S-band 小型 Linac ビームライン

電子のインジェクターとして  $\text{Cs}_2\text{Te}$  のフォトカソード RF-Gun を用いており、フォトカソードに UV レーザーを照射することにより、エネルギー 5MeV、バンチ長約 3ps (rms)、電荷量 1nC の電子バンチを生成する。次に 1.5m の加速管 2 本によって、電子のエネルギーを約 35MeV まで加速する。この時、電子バンチの前方の電子が高いエネルギーとなり、後方の電子が低いエネルギーとなるような位相で加速を行う。

この加速した電子バンチを、アхроマティックアークセクションを用いて、バンチ長の圧縮を行う (図 4、図 5)。

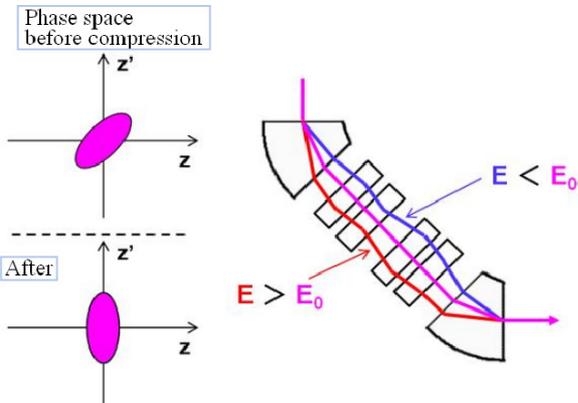


図 4 : アхроマティックアークセクション (バンチ圧縮部) の概念図

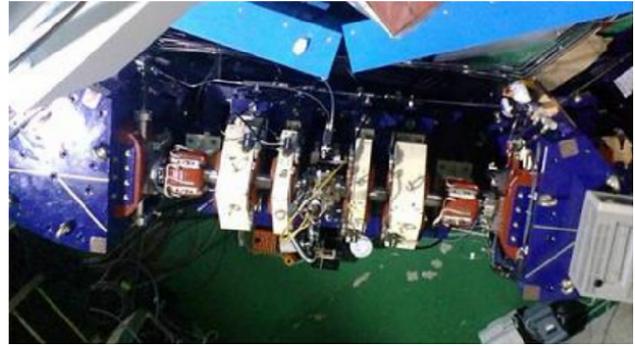


図 5 : アхроマティックアークセクション外観

アхроマティックアークセクションに入射した電子バンチは、前段の加速管によって図 4 の左上部の図のような位相空間となっている。45° 偏向電磁石によって、電子バンチ内のそれぞれの電子の光路が、各電子のエネルギー毎に分けられる。分けられた内のエネルギーの高い電子は長い光路を通り、一方で、エネルギーの低い電子は短い光路を通る。これにより、電子バンチは図 4 の左下の図のような位相空間を持ったバンチに変化して圧縮される。この圧縮部を用いて、バンチ長を約 3ps から、0.1THz 以上の CSR の条件である 1ps 以下まで圧縮することに成功している<sup>[2]</sup>。

加速及び圧縮によって 1kA を超えるピーク電流となった電子バンチを、90° 偏向電磁石で曲げることに、我々は CSR による高強度な THz 波を発生させている。生成した電子バンチのパラメータを表 1 に示す。

表 1: 電子バンチのパラメータ。

Energy	35 MeV
Energy spread	< 5 %
Bunch length	< 1 ps
Charge per bunch	1 nC
Rep. rate	10 Hz
Beam size	1 mm × 1 mm

## 3. EO サンプルング法

THz-CSR の電場を検出する為、EO 結晶 ZnTe を用いた。図 6 に EO サンプルング法の概念図と使用した EO 結晶 ZnTe の写真を示す。

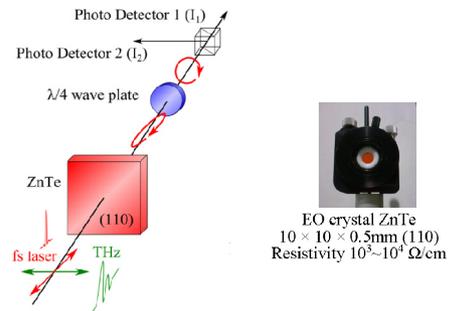


図 6 : EO サンプルング法 (左) と EO 結晶 (右)

予め THz 波が発生していない状態で、二つの Photo Detector (PD) のシグナル  $I_1$  と  $I_2$  を 1:1 となる様に  $\lambda/4$  板を調整する。この時、fs レーザーは EO 結晶後では直線偏光、 $\lambda/4$  板後に円偏光となっている。

THz 波が入射すると、THz 波の持つ電場によってポッケルス効果が発生し、EO 結晶に複屈折が生じる。従って、THz 波と fs レーザーが同時に入射すると、fs レーザーは位相の変化を受け、EO 結晶後では楕円偏光となる。これにより、 $\lambda/4$  板後の円偏光も崩れ、PD1 の強度  $I_1$  と PD2 の強度  $I_2$  の差  $\Delta I = I_2 - I_1$  が生じるため、 $\Delta I$  を計測すれば THz 波の電場を検出することが出来る。THz 波の電場  $E_{THz}$  によって生じる位相差  $\Gamma$  は式(3)によって表せられる。

$$\Gamma = \frac{\Delta I}{I_0} = \frac{2\pi d}{\lambda} n_0^3 r_{41} E_{THz} \quad (3)$$

ここで  $I_0$  は THz 波の入射していない時の信号強度、 $\lambda$  は fs レーザーの波長、 $d$ 、 $n_0$  及び  $r_{41}$  はそれぞれ EO 結晶の厚さ、屈折率、ポッケルス定数を表す。我々が用いている  $d=0.5\text{mm}$  の ZnTe 結晶では、ピーク電場強度が  $E_{THz} \approx 20\text{kV/cm}$  の THz 波が入射すると、位相差が  $\lambda/4$  変化する。

#### 4. THz 集光実験

発生した THz 波は単結晶水晶窓(z-cut)を通して真空から大気中に取り出して実験を行っている。EO 結晶に入射する THz 波のフルエンス増大のため、焦点距離  $f=100\text{mm}$ 、 $30\text{mm}$  の THz レンズ 2 枚 (Tsurupica®)を用いて集光実験を行った (図 7)。

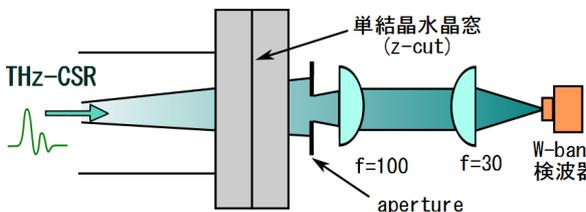


図 7: THz 集光実験のセットアップ

検波器は 0.075-0.11THz 帯域にバンド幅を持つショットキーダイオード (Wise Wave 製 FAS-10SF-01) を用いており、直径約 2cm のアパーチャーから 55mm 離れた位置に、XY ステージに取り付けた検波器を設置してスキャンした。

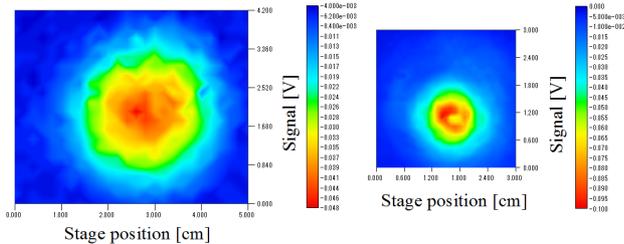


図 8: 集光前 (左) と集光後 (右) のプロファイル

実験結果 (図 8) より、集光前のサイズ 9.3mm (rms) に対して、集光後は 5.2mm (rms) となり、また、強度も検波器の信号で約 2 倍 (THz の Power としては約 4 倍) となる集光に成功した。

#### 5. THz 時間領域分光法 (THz-TDS)

THz-TDS はテラヘルツの時間波形を取得して、得られた波形をフーリエ変換することで周波数スペクトルを得る手法である。

放射されるテラヘルツパルスのパルスは電子バンチのバンチ長に依存した数 ps の短バンチのパルスとなるが、ショットキーダイオードやボロメーター等では時間応答の問題で、分解能の良い時間波形を得られず、フーリエ変換を行っても正しい周波数スペクトルを得ることが出来ない。

一方で、EO サンプルングを用いた THz-TDS では、レーザーのパルス長に分解能が依存するため、我々のシステムでは分解能 50fs の時間波形を得られる。この THz-TDS システム (図 9) は現在開発中である。

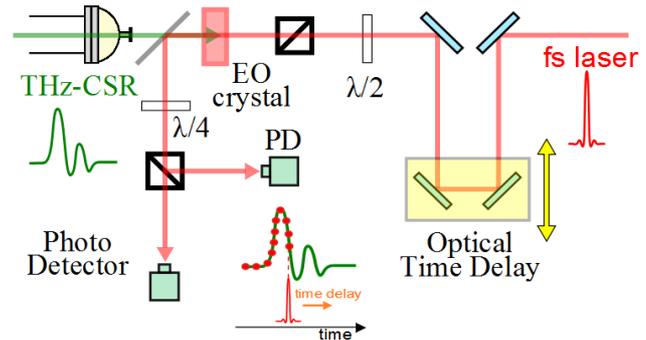


図 9: THz-TDS システム (開発中)

#### 6. まとめ

産総研では S-band 小型 Linac 装置を用いて高強度 THz-CSR の発生に成功しており、この THz 波の分光を目的として、EO サンプルング法を用いた加速器ベース THz-TDS システムの開発を進めている。

EO 結晶の複屈折による位相差を大きくするためには EO 結晶に入射する THz 波のフルエンスを増やす必要があり、発生した THz-CSR をレンズシステムによって集光することに成功した。

今後はレンズシステムを THz-TDS に組み込むとともに、EO 結晶をより厚いものを用いた検出系を検討する等、THz 波の検出感度の向上を行い、EO サンプルング法による THz-TDS システムでの THz 波の検波を目指す。

#### 参考文献

- [1] K. Kawase et al., Opt. Exp. 11 (20), 2549-2554 (2003)
- [2] R. Kuroda et al., Infra. Phys. Tech. 51 390-393 (2008)