

## Yb ファイバレーザーを用いたテラヘルツパルスの時間領域分光

### TIME DOMAIN SPECTROSCOPY OF THZ PULSE USING YB FIBER LASER SYSTEM

坂上和之<sup>#,A)</sup>, ブラメルド真理<sup>B)</sup>, 柳沢稜<sup>B)</sup>, 蓼沼優一<sup>B)</sup>, 鷲尾方一<sup>B)</sup>, 東口武史<sup>C)</sup>, 平義隆<sup>D)</sup>, 黒田隆之助<sup>D)</sup>,  
浦川順治<sup>E)</sup>

Kazuyuki Sakaue<sup>#,A)</sup>, Mari Brameld<sup>B)</sup>, Ryo Yanagisawa<sup>B)</sup>, Yuichi Tadenuma<sup>B)</sup>, Masakazu Washio<sup>B)</sup>, Takeshi  
Higashiguchi<sup>C)</sup>, Yoshitaka Taira<sup>D)</sup>, Ryunosuke Kuroda<sup>D)</sup>, Junji Urakawa<sup>E)</sup>

<sup>A)</sup> Waseda Institute for Advanced Study, Waseda University

<sup>B)</sup> Research Institute for Science and Engineering, Waseda University

<sup>C)</sup> CORE, Utsunomiya University

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

<sup>E)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

We have been studying on a coherent Cherenkov radiation using electron bunch tilting in the THz frequency range. Time-domain spectroscopy (TDS) is a useful technique to evaluate both the THz pulse waveform and the spectrum. TDS can measure the electric field of THz pulses directly and its Fourier transform is a spectrum. Spectrum, pulse duration, peak intensity, electric field strength etc, can be obtained. We have developed a Yb fiber laser system for TDS measurement. Electro-Optic (EO) sampling method using ZnTe crystal was used for TDS. Recently, we successfully measured the TDS measurement. In this conference, coherent Cherenkov generation, Yb fiber laser system for TDS, experimental results of TDS measurement and future prospective will be presented.

#### 1. はじめに

テラヘルツ光は電波と光波の間に位置する周波数帯であり、近年その有用性が認められ、光源・検出器ともに広く開発が進められている。特にテラヘルツ帯に指紋スペクトルと呼ばれる物質特有の吸収を持つことから、物質同定やその吸収を用いた物質改変などへの応用が非常に有効である。テラヘルツ光源としては、レーザーをベースとした光源の開発が著しく、広く用いられ始めているが、加速器によるコヒーレント放射・自由電子レーザー(FEL)光源も高強度性や単色性といった特徴から利用されている。

我々はこれまでに電子銃のみを用いて、その電子ビームの傾きを制御することによってコヒーレントチェレンコフ放射によってテラヘルツ光の生成を行ってきた[1]。チェレンコフ放射の角度に対して適切に電子ビームに傾きを付加することで周波数帯にもよるが10倍程度の強度増強を確認している。前述の通り、このようなテラヘルツ光を利用するためには、様々なパラメータに関して明らかにする必要がある。また、生成したテラヘルツパルスを詳細に評価することは今後より光源として高度化していく際に非常に重要である。そこで我々は時間領域分光(Time-domain spectroscopy: TDS)を行いテラヘルツパルスを評価することで非常に多くのパラメータを評価できるよう、試みた。本論文では、次章にてコヒーレントチェレンコフ放射の原理を簡単に説明し、3章で構築したTDSシステムを示し、4章にてその計測結果に関して述べる。

#### 2. 電子線傾き制御によるコヒーレントチェレンコフ放射

本章では、我々が行っているコヒーレントチェレンコフ放射生成に関して簡単に説明する。詳細は[1]を参照されたい。チェレンコフ放射は荷電粒子が誘電体中を通過する際にその速度が媒質中の光速を超える場合に衝撃波のように生成される。その放射角度 $\theta_c$ は媒質の屈折率 $n$ と電子のローレンツファクタ $\beta$ を用いて以下のように表すことができる。

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta} \quad (1)$$

式からわかるとおり、ほぼ光速の電子線を用いた場合には屈折率のみに依存した角度で放射が成されることがわかる。今回ターゲットとして用いているTOPAS(環状オレフィン・コポリマー)と呼ばれる高分子では、屈折率1.52となり、放射角度は48.5度程度である。このように角度を持って放射されるチェレンコフ光に対して、よりコヒーレント放射に寄与する電子数を増やす手法として、電子ビームに傾きを付与することを発案し、試験している。以下のFigure 1の右に示す通り、電子ビームに適切な傾きを付与することによって電子バンチ前方で放射された光と媒質中の別の点において他の電子が生成する光が同位相で重なり、よりコヒーレントな放射となることがわかる。ここで重要な点として、放射方向から見た電子の長さが十分に短く、コヒーレント放射として取り出せることが挙げられる。これは電子ビームを傾ける前のビームサイズに当たり、非常に容易に条件を満たすことが可能である。また、広帯域なテラヘルツ放射を得るためには周波数によって屈

<sup>#</sup> kazuyuki.sakaue@aoni.waseda.jp

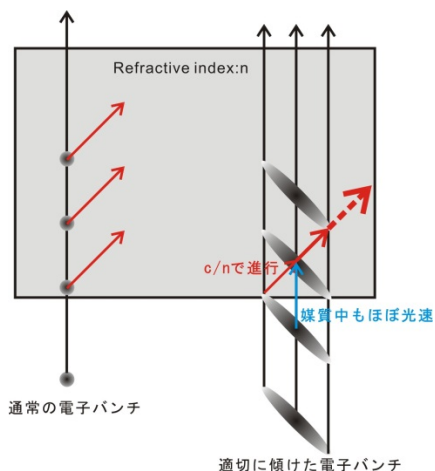


Figure 1: Schematic Cherenkov radiation from the electron bunch.

折率が大きく異なることは好ましくない。式(1)に示した通り、屈折率が異なると放射方向も異なるため、前述の条件を同時に満たす電子ビームの角度を得ることが出来なくなってしまう。そこで今回は広帯域なテラヘルツ放射を得るために TOPAS を用いている。TOPAS はテラヘルツ光の透過材として用いられているばかりでなく、屈折率もほぼテラヘルツ帯において一様であり、広帯域な放射が期待できる[2]。

### 3. 実験セットアップ

#### 3.1 コヒーレントチェレンコフ放射生成セットアップ

まず電子ビームとその傾き制御及びチェレンコフ放射生成のセットアップを以下の Figure 2 に示す。電子線傾き制御によるコヒーレントチェレンコフ放射の実験セットアップを Fig. 2 に示す。

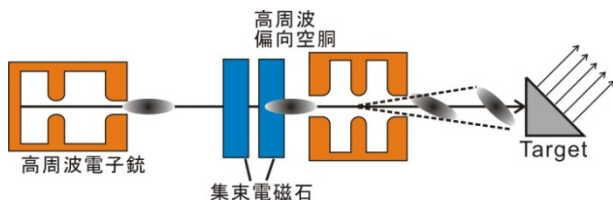


Figure 2: Beam line layout of coherent Cherenkov radiation experiment at Waseda University.

早稲田大学設置のフォトカソード高周波電子銃より生成した電子ビームを集束電磁石で収束した後、高周波偏向空洞を用いて傾きを付与する。電子ビームの傾きは高周波偏向空洞に印加する RF のパワーを変化させることによって制御可能である。適切に傾けられた電子ビームは TOPAS の三角柱がターゲットに照射され、チェレンコフ光を生成する。生成されたテラヘルツパルスは次節に述べる TDS システムで評価されるとともに、他の検出器としてショットキーバリアダイオード、テラヘルツパワーメータなどを用いて評価・調整している。

#### 3.2 テラヘルツ時間領域分光システムの構築

本節ではテラヘルツ時間領域分光の原理説明と今回構築したセットアップに関して述べる。時間領域分光とは、テラヘルツ波の時間波形を直接観測し、それをフーリエ変換することによって分光することである。1THz の周波数では、波長 300 $\mu\text{m}$ 、時間にして 1ps 程度であるため、通常の計測器を用いては電場を観測することはできない。そこで今回は Electro-Optic (EO) サンプリングによる波形計測を用いた。この手法は極短パルスのパルス長計測などにも用いられている手法である。Figure 3 に EO サンプリングの原理図を示す。テラヘルツパルスとそれよりも十分に短いパルス幅のレーザー光を同時に EO 結晶に入射する。EO 結晶ではそのテラヘルツ電場に応じて複屈折が発生し、レーザーの偏光が変化する。その変化を検出することによってプローブレーザーパルスが照射されたタイミングでのテラヘルツ電場強度が逆算できるという手法である。プローブレーザーパルスとテラヘルツパルスの時間遅延を変化させて電場強度を取得することによってすべてのテラヘルツパルス時間波形を取得することが可能となる。

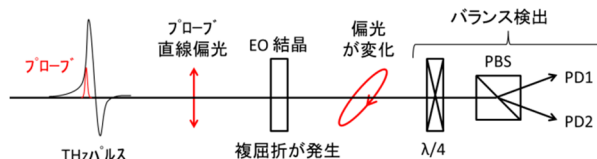


Figure 3: Schematic of EO sampling.

EO サンプリングには EO 結晶として 1mm 厚の ZnTe 結晶を用い、プローブレーザーとしては独自に開発した Yb ファイバレーザーを用いた。製作したファイバレーザーの構成図を以下の Figure 4 に示す。

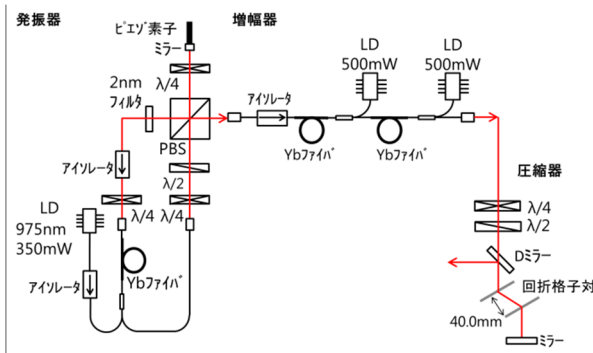


Figure 4: Setup of Yb fiber laser system for EO sampling.

ゲイン媒質としては全て Yb 添加ファイバを用いて校正している。発振器では、ファイバ内における非線形偏波回転を用いたモード同期によるパルス化を行っている。発振器内には 2nm 線幅のバンドパスフィルタを設置しており、周囲ごとにファイバから与えられる分散を切り取る役割をしている。これによって分散補償なくパルス発振が可能である。また、発振器にはピエゾ素子にマウントしたミラーを導入しており、これを用いて加速器電子ビームとの時間同期が可能である。発振したパルスはある程度の分散を持って出力されるため、そのまま 2 台の増幅器を経て、分散補償によるパルス圧縮を行い、EO サンプリン

グに用いる。得られたレーザーの性能を以下の Table 1 に示す。

Table 1: Parameters of Yb Fiber Laser System for Time-domain Spectroscopy

Parameter	Value
Power	167 mW
Repetition	119 MHz
Center wavelength	1036 nm
Spectrum width	18 nm
Pulse duration (FWHM)	192 fs

Table 1 を見てわかる通り、十分なパルス幅のプロローブレーザー光を構築できていることがわかる。微細な偏光の変化を観測するために十分な出力を確保しているとともに、加速器と同期させるために RF 周波数の 24 分周である 119MHz での発振で構成した。

#### 4. 実験結果と考察

以上のように構築したチェレンコフ放射システム、TDS システムを用いて、テラヘルツパルスの評価試験を行った。まず TDS 計測の前に、テラヘルツパワーメータを用いたパルスエネルギーの計測を行った。テラヘルツパワーメータの計測値としては、パルスあたり 33.2 nJ のテラヘルツパルスが得られており、同様の計測を電子ビームに傾きを付加せずに行くと 4.5 nJ であったことから、電子ビームに傾きを付加することにより、多くの電子がコヒーレント放射に寄与できるようになっていることがわかる。

次に TDS 計測を行った。その際のセットアップ図を以下の Figure 5 に示す。取り出されたテラヘルツパルスと

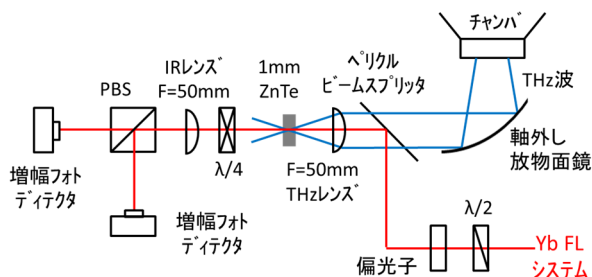


Figure 5: Setup of EO sampling measurement for THz pulses.

プローブ用のレーザー光はペリクルビームスプリッターを用いて合流させている。テラヘルツ光は EO 結晶内で集束し、より電場を感じるようにセットアップしている。レーザー光は別途遅延を調整できるようになっており、入射 THz パルスとの遅延により EO 計測を実現している。

以下の Figure 6 に TDS 計測の結果を示す。左図は時間領域の電場波形を、右図はそのフーリエ変換であるスペクトルの波形を示している。まず左図より、非常に綺麗なシングルサイクルのテラヘルツパルスが生成されていることがわかる。これはつまり、広帯域なパルスである

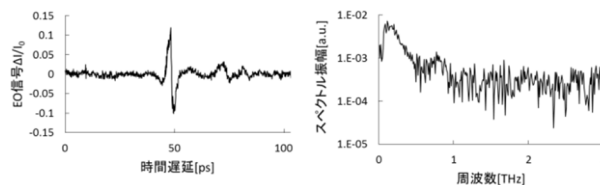


Figure 6: Results of THz pulse measurement by TDS (left: time domain, right: frequency domain).

ことを間接的に示している。次に周波数スペクトルを見ると、低周波数が強く生成されていることがわかる一方、1THz 程度までの放射を確認することができる。これはもとのテラヘルツパルスのスペクトルをある程度反映しているものであるが、現在の ZnTe 結晶 1mm 厚と Yb ファイバレーザーの構成では高周波側の感度が低下することが計算からわかっている。ビームのプロファイル等からの予想では 2~3THz 程度までの周波数成分を含んでいることが得られており、今後 EO サンプリングシステムの改善を行っていく。TDS 計測によって得られたパルス幅は 3.5ps 程度であり、パルスエネルギーは 25.2 nJ 程度となった。これは前述のパワーメータによる計測と同等である。また、ピークパワーを算出すると、7.2 kW となり、非常に高ピークパワーなテラヘルツパルスであることを確認した。

#### 5. まとめと今後

電子ビームの傾き付与によるコヒーレントチェレンコフ放射で得られたテラヘルツパルスに対して時間領域分光計測を行った。TDS 計測用プロローブレーザーシステムを開発し、EO サンプリングによって実現することができた。結果として非常に短パルス、高ピーク強度、広帯域なテラヘルツパルスが得られていることを確認した。得られた結果は他の計測とほぼ一致する結果であり、独自に構築したシステムが正常に動作していることも確認できた。

今後、課題として、現在のシステム構成では 1THz 以上の高周波成分に対して感度が非常に低いことが挙げられる。これは EO 結晶内におけるテラヘルツ波とプロローブレーザー光の進行速度の違いによるものである。解決策として、1. EO 結晶を GaP に変更する、2. ZnTe 結晶を薄くする、3. レーザー光の波長を変更する、が挙げられるが、1, 2 に関しては感度も同様に低下するため、まずは 3 としてレーザー光の波長を 775nm (Er ファイバレーザーの 2 倍波)に変更することを予定している。これにより 3THz 程度までの計測が可能になると考えている。また、シングルショットの EO 計測や広帯域でなく単色なテラヘルツパルス生成なども同時に推進し、応用研究等へ展開していく予定である。

#### 参考文献

- [1] K. Sakaue *et al.*, Proc. of IPAC 2017(2017).
- [2] P. D. Cunningham *et al.*, J. Appl. Phys., 109(2011)043505.