準単色 THz パルス計測のための EO sampling システムの開発

DEVELOPMENT OF AN EO SAMPLING SYSTEM FOR QUASI-MONOCHROMATIC THz PULSE MEASUREMENT

村越孔太 #, A), 蓼沼優一 A), 村上達希 A), 王鵬 A), 小柴裕也 A), 鷲尾方一 A), 坂上和之 B) A), 黒田隆之助 C),
Kota Murakoshi A), Yuichi Tadenuma A), Tatsuki Murakami A), Weng Peng A), Yuya Koshiba A), Masakazu Washio A),
Kazuyuki Sakaue B), A), Ryunosuke Kuroda C)
A) Waseda Research Institute for Science and Engineering
B) Photon Science Center of the University of Tokyo
C) National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Abstract

Accelerator based THz light sources are very attractive in terms of its high power and are expected to utilize applied research, but they require large facilities due to their principle. We have developed a THz light source using a small electron accelerator and have generated a broadband THz pulse by coherent Cherenkov radiation from a tilted electron beam. In addition, we produce a quasi-monochromatic THz pulse by the spatially modulated electron beam using a slit. Currently, the quasi-monochromatic THz pulse is measured using bandpass filters. For more rigorous evaluation, we are trying to obtain the waveform in time domain of the quasi-monochromatic THz pulse by EO sampling. In this conference, We will report the evaluation of the probe laser system for EO sampling, the results of EO sampling measurement for the quasi-monochromatic THz pulse, and future prospects.

1. 序論

テラヘルツ(THz)波は、電波と光波の中間に位置することから、電波のような物質透過性や光波のような直進性を兼ね備えている。また、X 線などと比較してエネルギーが低く、物質に固有な指紋スペクトルを有する。これらの性質から、THz パルス照射によるイメージング技術[1]や高分子の物性改変[2]を始めとした応用研究に期待されている。加速器を利用した THz 光源は高い強度が得られる点で非常に魅力的であるが、その原理上施設の大規模化を避けることが困難である。このような現状を踏まえ、我々は大型加速器施設に比肩する強度を持つ小型単色 THz 光源の開発を目指し、全長 3 m の線形電子加速器による THz パルス生成実験を実施している。また、スリットを用いて電子ビームに空間変調を施すことで、スリット周期に対応した周波数のみを持つ準単色 THz パルスの生成に挑戦した。現状では、バンドパスフィルターを用いた簡易的な測定にとどまっているが、準単色 THz パルスをより厳密に評価するためには、その時間波形やスペクトルを取得する必要がある。そこで、本研究では準単色 THz パルスのスペクトルを取得するための electro optic (EO) sampling システムを構築し、これを用いて準単色 THz パルスのスペクトルの取得を試みた。

2. THz パルス生成

2.1 コヒーレント放射

多数の電子で構成される電子バンチ全体における放射光強度は、バンチ内の各電子からの放射の重なり合いが重要となる。電子バンチからの放射強度$P_{total}(\lambda)$は

$$P_{total}(\lambda) = P_0(\lambda)N\{1 + (N-1)f(\lambda)\} \qquad (1)$$

と定義される。ここで、$P_0(\lambda)$は一つの電子からの放射光強度、Nはバンチ内に含まれる電子の総数、λは放射光の波長であり、$f(\lambda)$は形状因子$(0 \le f(\lambda) \le 1)$と呼ばれる、放射方向に対する電子の密度分布を表すパラメータである[3]。放射光の波長に対して電子バンチのサイズが十分に小さい場合、すなわち Fig. 1(右)のような放射光の位相が揃った状態では$f(\lambda) \to 1$となり、これをコヒーレント放射と呼ぶ。一方で、Fig. 1(左)のような位相の揃っていない状態では$f(\lambda) \to 0$となり、これをインコヒーレント放射と呼ぶ。Eq. (1)はコヒーレント、インコヒーレント放射それぞれの極限をとると、

$$P_{total}(\lambda) = \begin{matrix} NP_0(\lambda) \ \text{(incoherent limit)} \\ N^2P_0(\lambda) \ \text{(coherent limit)} \end{matrix} \qquad (2)$$

と表すことができる。Equation (2)を考慮すると、コヒーレント放射に寄与する電子数を増加させることで放射光強度の大幅な向上が見込める。

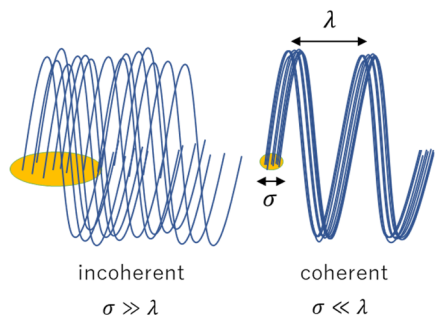

Figure 1: Diagram of coherent radiation and incoherent radiation.

mura_koshi@akane.waseda.jp

2.2 チェレンコフ放射

チェレンコフ放射は、電子の速度vが媒質内における光の位相速度c/nを上回った際に発生する。チェレンコフ放射の発生条件を Eq. (3)、原理図を Fig. 2 に示す。

$$\beta > \frac{1}{n} \tag{3}$$

ここで、$\beta(=v/c)$は光速度cに対する電子の相対速度、nは媒質の屈折率である。また、チェレンコフ放射角θ_cは、Eq. (4)で表され、電子の速度と媒質の屈折率に依存する[4]。

$$\theta_c = \cos^{-1}\left(\frac{1}{n\beta}\right) \tag{4}$$

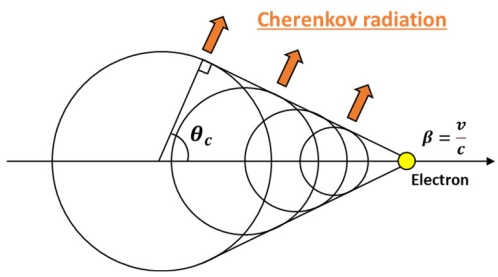

Figure 2: Schematic figure of Cherenkov radiation.

2.3 傾き制御電子ビームを用いた THz パルス生成

THz パルス生成手法の原理図を Fig. 3 に示す。チェレンコフ放射角に傾けた電子ビームをターゲット媒質へ入射させると、電子バンチの先頭および後部からのチェレンコフ放射光が同位相で重なる。さらに、放射方向に対する電子バンチのビームサイズが、電子ビームを傾けることで放射光の波長λよりも十分小さくなり、形状因子$f(\lambda)$が 1 に近づくことで、コヒーレントチェレンコフ放射光が得られる。この手法で得られる放射光の波長は、放射方向のビームサイズσ_xに依存し、実験で用いる電子ビームは$\sigma_x \approx 280$ μmであるため、0.3 THz よりも低周波数領域のスペクトルを有することが見込める。

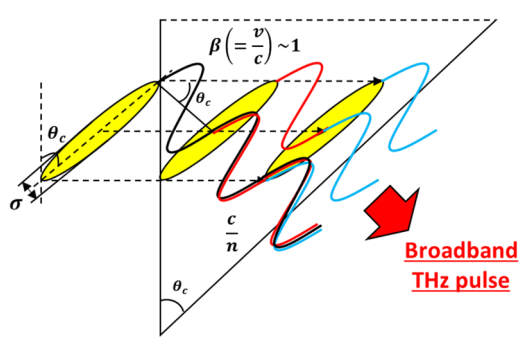

Figure 3: THz pulse generation by coherent Cherenkov radiation.

3. 準単色 THz パルス

傾き制御電子ビームを用いた手法では、ビームサイズよりも短い波長領域で広帯域なパルスを生成することができる。この手法に加えて、スリットを用いた電子ビームの空間変調によってパルスの準単色化が可能となる。その概念図を Fig. 4 に示す。電子ビームをスリットに透過させて空間変調を施した後にビーム全体を傾けることで、電子バンチの空間構造がパルスの時間構造に変換される。従って、櫛状電子ビームの空間的な間隔に対応する波長を有する準単色 THz パルスを生成することができる。この手法では、スリット間隔を適切に選定することで任意の波長を準単色化させることができる。本研究では Table 1 に示す 2 種類のパラメータのスリットを用いて準単色 THz パルス生成実験を行った。

Table 1: Slit Design

	Slit①	Slit②
Slit period d	1.3 mm	0.8 mm
Corresponding frequency f	0.2 THz	0.3 THz

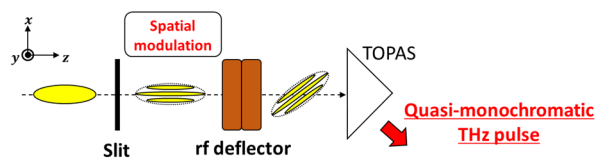

Figure 4: Quasi-monochromatic THz pulse generation.

4. EO sampling

EO sampling は、検出困難な THz 領域の光を検出する技術であり、高い S/N で電場と位相の情報を同時に取得可能である[5]。EO sampling の原理図を Fig. 5 に示す。EO 結晶は、外部電場がない状態では等方的であるが、電場がある状態では屈折率に異方性(複屈折)が生じる。そのため、THz パルスを EO 結晶に入射させると同時に、円偏光に調整された Probe laser を入射することで、Probe laser の偏光状態が変化する。この偏光変化の差分をバランス検出し、THz パルスの入射タイミングを時間走査することで、THz パルスの時間波形を再現する。

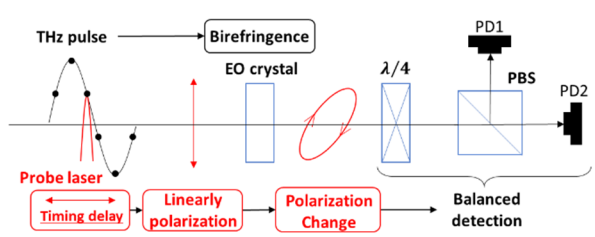

Figure 5: Principle of EO sampling.

5. Probe laser システム

Probe laser システムは、発振器・増幅部・圧縮部の 3 部構成で構築した。Probe laser のパラメータを Table 2 に示す。Yb を用いた発振器では、非線形偏波回転による受動モードロックを行うことで、中心波長 1030 nm のレーザーパルスを生成している。生成されたレーザーパルスは、増幅部によって強度を約 3 倍に増大させ、透過型回折格子対を用いて分散を補償することで、パルス幅を圧縮する。想定される THz パルスのパルス幅は、3.5 ps であるため、十分な時間分解能を得るための Probe laser は sub-ps が求められるが、構築したレーザーのパルス幅は 180 fs を達成している。また、Probe laser を時間走査して THz パルスの時間波形を取得するには、THz パルスと Probe laser のタイミングを同期する必要があるため、Probe laser の繰り返し周波数を、rf-gun の共振周波数である 2856 MHz の 1/72 となるように設計した。実験時のタイミング同期精度は、1.3 ps であった。

Table 2: Laser Parameters

Central Wavelength	1030.4 nm
Repetition frequency	39.66 MHz
Pulse energy	3.73 nJ
Pulse duration(FWHM)	180 fs

6. EO sampling 測定

6.1 実験セットアップ

ビームラインの概略図を Fig. 6、電子ビームのパラメータを Table 3 に示す。波長 262 nm の UV パルスレーザーを Cs-Te フォトカソードに入射させて電子バンチを生成し、共振周波数 2856 MHz の 1.6 Cell rf-gun によってエネルギー4.8 MeV まで電子バンチを加速させる。スリットにより空間変調を施した電子ビームを、高周波偏向空胴を用いてチェレンコフ放射角に傾けてターゲット媒質に入射することで、準単色 THz パルスを生成する。ターゲット媒質は、THz 帯の光に対する吸収係数が小さく、屈折率が一定な TOPAS を用いた[6]。

Table 3: Beam Parameters

Max charge	400 pC
Energy	4.8 MeV
Repetition frequency	5 Hz
Beam size(rms)	280 μm
Bunch length(rms)	2.3 ps

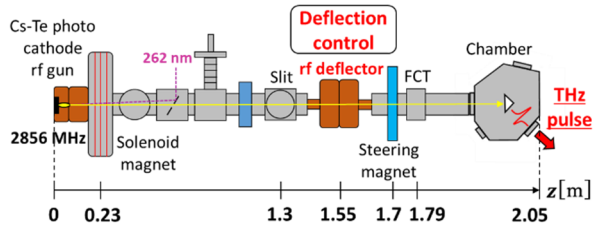

Figure 6: Beamline Layout.

EO sampling による時間波形測定用実験セットアップを Fig. 7 に示す。Probe laser の EO 結晶に対する照射タイミングは、遅延ステージを用いて 100 fs のステップで制御している。また、ペリクルビームスプリッターを用いることで、EO 結晶に対する準単色 THz パルスと Probe laser の同軸入射を実現した。EO 結晶は、我々の手法によって得られる THz パルスの持つ周波数成分を高感度に検出できる厚さ 1 mm の(110)ZnTe を用いた。THz パルスによる偏光変調を受けた Probe laser を、Polarization Beam Splitter (PBS)を用いて P 偏光と S 偏光に分離し、2 つの Photo Detector (PD)によって各成分の光強度をバランス検出する。

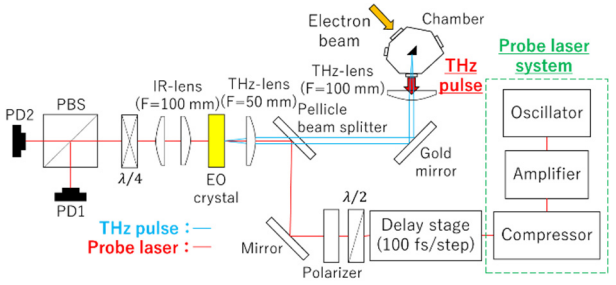

Figure 7: Experimental setup for EO sampling measurement.

6.2 結果及び考察

Figure 7 のセットアップを用いて、準単色 THz パルスの時間波形の取得実験を行ったが、現時点では明瞭な時間波形の取得には至っていない。その要因として、以下の 2 点が考えられる。1 点目は、準単色 THz パルスの強度が不十分だった点である。この点に関しては、準単色 THz パルスの生成原理上、現在のセットアップではエネルギーや電荷量に上限があるため、新たに光共振器を構築することで準単色 THz パルスの強度を増幅することを検討している。2 点目は、タイミング同期精度が十分ではなかった点である。要求される同期精度は sub-ps だが、本研究では 1.3 ps であった。そこで、タイミング同期システムを最適化した結果、同期精度 114 fs が得られ、要求値を達成した。今後は、最適化したタイミング同期システムを用いて EO sampling 測定を実施し、準単色 THz パルスの時間波形の取得を目指す。

7. 総括

我々は、EO sampling 用の Probe laser システムを構築し、これを用いて準単色 THz パルスの時間波形の取得実験を行った。Probe laser は、発振器・増幅部・圧縮部の 3 部構成であり、180 fs のパルス幅を達成した。現時点では、準単色 THz パルスの明瞭な時間波形の取得には至っていない。その主な原因は、EO sampling 実験時の THz パルスと Probe laser のタイミングの同期精度が 1.3 ps であり、十分な時間分解能が得られていないことだと考えられる。そこで、タイミング同期システムの最適化を行ったところ、114 fs の同期精度を達成した。

今後、最適化したタイミング同期システムを用いて、時間波形取得実験に再度挑戦する。また、時間波形の測定結果を解析することで、目的周波数に対するスリットの最適化や適切な EO 結晶の選定も実施する予定である。

参考文献

[1] P Knobloch *et al.*, "Medical THz imaging: an investigation of histo-pathological samples", Physics in Medicine & Biology 47, 3875 (2002); https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9155/47/21/327/meta

[2] Hiromichi Hoshina *et al.*, "Polymer Morphological Change Induced by Terahertz Irradiation", Scientific Reports 6, 27180 (2016); https://www.nature.com/articles/srep27180

[3] Toshiharu Takahashi *et al.*, "Observation of coherent Cherenkov radiation from a solid dielectric with short bunches of electrons", Physical Review E 62, 8606 (2000); https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.62.8606

[4] J.V.Jelly *et al.*, "Cherenkov radiation and its applications", British Journal of Applied Physics 6, 207 (1955).

[5] S.Casalbuoni *et al.*, "Numerical studies on the electro-optic detection of femtosecond electron bunches", Physical Review Special Topic Accelerators And Beams 11, 072802 (2008); https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevSTAB.11.072802

[6] Paul D. Cunningham *et al.*, "Broadband Terahertz Characterization of the Refractive Index and Absorption of Some Important Polymeric and Organic Electro-optic Materials", Journal of Applied Physics 109, 043505 (2011); https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.3549120