

## 電子ビームの傾き角制御によるコヒーレントテラヘルツ光の生成と性質の評価

### GENERATION AND EVALUATION OF COHERENT TERAHERTZ WAVES USING TILTED ELECTRON BEAMS

ブラメルド真理<sup>#, A)</sup>, 柳沢稔<sup>A)</sup>, 蓼沼優一<sup>A)</sup>, 鷲尾方一<sup>A)</sup>, 坂上和之<sup>B)</sup>, 黒田隆之助<sup>C)</sup>, 平義隆<sup>C)</sup>

Mari Brameld<sup>#, A)</sup>, Ryo Yanagisawa<sup>A)</sup>, Yuichi Tadenuma<sup>A)</sup>, Masakazu Washio<sup>A)</sup>,

Kazuyuki Sakaue<sup>B)</sup>, Ryunosuke Kuroda<sup>C)</sup>, Yoshitaka Taira<sup>C)</sup>

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

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

<sup>C)</sup> National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

#### Abstract

Terahertz (THz) waves are produced by exposing a target medium to electron beams travelling at relativistic speeds. Cherenkov radiation is released at a different angle to the direction of travel of the electron beams. The radiation becomes more coherent when the electron beams are tilted to match this angle. This Cherenkov radiation angle differs according to the refractive index, thus the tilt of the electron beams must be controlled to match each target medium. At Waseda University, research on generation of high-quality electron beams using a Cs-Te photocathode RF-Gun takes place. By using a RF-Deflector, which was originally developed to measure the bunch length of electron beams, the deflection angle can be manipulated. The THz wave intensity was successfully increased when the electron beam deflection angle was matched to the Cherenkov radiation angle. Also, the frequency spectrum measurements and spacial resolution measurements have led to the evaluation of THz waves. These results are important guidelines towards the generation of high-intensity THz waves. At this conference, the principle of generation of coherent THz waves using a RF-gun and results on the characteristic evaluation along with future prospects will be reported.

#### 1. はじめに

近年テラヘルツ (THz) 光の生成及び応用研究への期待がとて高まっている。THz 光とは周波数が  $10^{12}$  Hz 程度の電磁波のことであり、0.1 THz ~ 10 THz の周波数領域に位置する。この領域は電波と光波の境目に位置するため、応用技術開発の研究が遅れていた。現在は様々な THz 光の生成方法や観測方法が確立され、応用もより容易となってきている。また、THz 光は電波の物質を透過する性質及び光波の直進性を兼ね備えていることより、光学系を用いた空間輸送も可能である。

X線等に比べ、THz 光は非常に低エネルギーであり、人体に与える害が少ない。さらに、THz 光はプラスチックや紙等を透過、金属等で反射、水等で吸収され、この周波数領域に固有の指紋スペクトルを持つ物質も存在する。これらの性質を活かし、工業・医療・バイオ・セキュリティ・情報通信などの幅広い分野への THz 光応用への研究がなされている。具体的な応用例としては、反射イメージングによる空港での危険物所持検査、透過イメージングによる野菜等の生鮮食品の水部分布測定、THz 指紋スペクトルを用いた郵便物内の麻薬検査があげられる。今後より実用的な THz 技術を開発する上で、光源の小型化や高強度出力光の生成方法などが課題である。[1][2]

早稲田大学では Cs-Te フォトカソード RF 電子銃を用いた高強度のコヒーレント THz 光の生成に成功している。そして、その応用研究として THz イメージングの試験を実施している。Figure 1 と Figure 2 はそれぞれ実際に取得し

た電子マネーカードの THz 透過イメージング結果と 10 円玉の THz 反射イメージング結果である。

今後の THz イメージングの画質向上及び THz 光源の高強度化に向け、THz 周波数スペクトル測定やイメージング応用に向けた空間分解能測定を行った。本発表では RF 電子銃を用いたコヒーレント THz 光の生成の原理とその特性評価結果及び今後の展望について報告する。

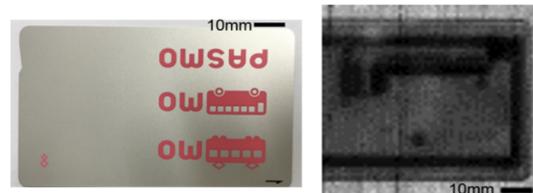


Figure 1: THz Transmission Image of IC money card[3].

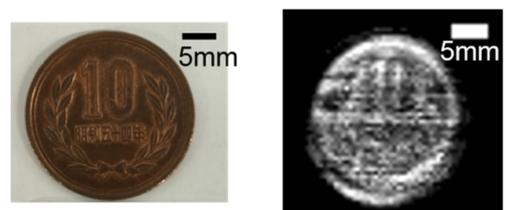


Figure 2: THz Reflection Image of 10 yen coin[3].

<sup>#</sup> maribrameld@fuji.waseda.jp

## 2. テラヘルツ光生成の原理

### 2.1 チェレンコフ放射

電子ビームがその速度が媒質中の光速を上回ることによって電磁波が発生する現象をチェレンコフ放射と呼ぶ。荷電粒子が通過する際に誘電体が分極を起し、元に戻るときに電磁波を放射する仕組みである。電子の速度を $v$ 、媒質の屈折率を $c$ とすると、チェレンコフ放射の条件は

$$v > \frac{c}{n} \quad (1)$$

と表される。ローレンツ因子 $\beta = v/c$ を用いると、チェレンコフ放射の条件は

$$n\beta > 1 \quad (2)$$

と定義される。この時、チェレンコフ放射の角度は

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta} \quad (3)$$

より求まる。これらの式より、チェレンコフ放射では媒質屈折率が重要なファクターであることが分かる。

### 2.2 コヒーレンス

THz 光の強度を増大にするあたりコヒーレンスを考慮する必要がある。コヒーレントな放射は電子バンチ長が放射光よりも十分に短い時に生成され、位相整合作用によって光強度が増大する。光強度は電子数  $N$  の二乗に比例する。一方、インコヒーレントな放射は電子バンチ長が放射光よりも長いときに生成され、放射光が互いに打ち消しあうため光強度が低くなる。光強度は電子数  $N$  に比例する。全放射強度 $P_{all}$ はコヒーレントな放射とインコヒーレントな放射の強度の和であり、

$$P_{all} = \begin{cases} NP_R & (\text{incoherent}) \\ N^2 P_R & (\text{coherent}) \end{cases} \quad (4)$$

と定義される。ここで、 $P_R$ は電子一個あたりの放射強度を表す。[4]

## 3. 早稲田大学の実験装置概要

### 3.1 ビームラインセットアップ

本実験では、電子ビームをターゲット媒質 TOPAS に照射することでチェレンコフ放射による THz 光生成を行っている。Figure 3 はビームラインの概要図であり、全長約 3m と非常にコンパクトな加速器システムを用いている。UV レーザーパルス を Cs-Te フォトカソードに照射すると光電効果によって電子が取り出され、RF-gun によって加速される。RF-gun 直下にあるソレノイドコイルによって電子ビームのエミッタンスやビームサイズの補正を行う。さらに、電子ビームは二つの四重極電磁石によって収束され、RF-deflector を通過し、ステアリング電磁石で位置補正を行ってターゲット媒質に照射される。RF-deflector を用いて電子ビームに傾きを付与することで、よりコヒーレントな放射が得られ、光強度が増大する。用いた THz 生成チャンバーは TOPAS、シリコン、ブリュースター角シリコンの三つのターゲット媒質のチェレンコフ放射角に対応した THz 窓が設置されているが、本実験では TOPAS に対応した THz 窓より THz 光を観測した。生成された THz 光は広帯域の準光学的検波器(QOD: Quasi-Optical Schottky Diode Detector)を用いて観測した。

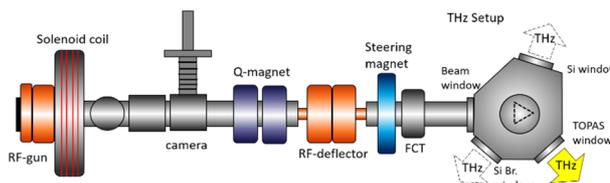


Figure 3: Layout of electron beam line.

### 3.2 ターゲット媒質 TOPAS

ターゲット媒質に用いた TOPAS は透明な高分子誘電体であり、屈折率が THz の周波数帯でほぼ一定の値を持つことが特徴としてあげられる。[5] そのため、広帯域な THz 光をほぼ同じ角度で生成することが可能である。屈折率 $n$ は約 1.52 であることより、式(3)を用いてチェレンコフ放射角 $\theta_c = 48.9^\circ$ が求まる。本実験では Figure 4 のように TOPAS を二等辺三角形に加工し、底辺の二つの角度をチェレンコフ放射角と同じ角度  $48.9^\circ$ にした。また、Figure 5 のように電子ビームに傾きを付与しないで TOPAS に照射した場合、放射方向から見た長さが長いいため、コヒーレント放射に寄与する電子数がより減ることになる。一方、電子ビームをチェレンコフ放射角と一致するよう傾きを付与すると、放射方向から見た長さが最も短くなり、よりコヒーレントな放射が得られる。よって、RF-deflector を用いた電子ビームの制御によって高強度 THz 光を得ることが可能となる。

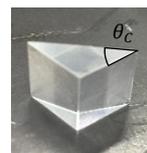


Figure 4: Target medium TOPAS.

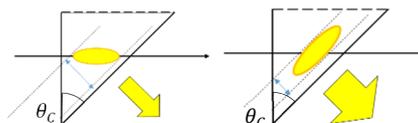


Figure 5: Relation between deflection angle of electron beam and coherence of THz signal.

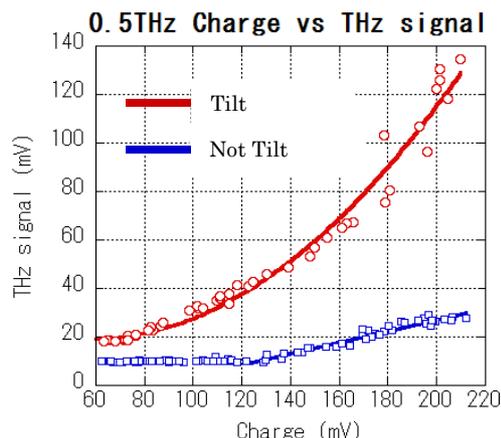


Figure 6: Relationship between electron beam charge and THz signal with use of 0.5THz BPF.

Figure 6 は電子ビームの電荷量を変化させたときのコヒーレントチェレンコフ放射とインコヒーレントチェレンコフ放射の光強度測定結果であり、式(4)に従った挙動が見受けられた。電子ビームをチェレンコフ放射角に傾けた Tilt の状態でよりコヒーレントな放射、傾き付与していない Not Tilt の状態でよりインコヒーレントな放射が確認された。

#### 4. マイケルソン干渉計を用いた THz 光の周波数スペクトル測定

マイケルソン干渉計を用いてコヒーレントチェレンコフ放射から得られた THz 光の周波数スペクトル取得を試みた。本実験におけるセットアップを Figure 7 に示す。入射光をシリコンを用いて二つの経路に分割し、可動ミラーを用いて光路長に差を与えた後、再度合流させて干渉縞を発生させる。この干渉縞の THz シグナル強度を QOD を用いて観測し、フーリエ変換で解析することで THz 光の周波数スペクトルが得られるという仕組みである。測定に際して計測の評価を行うために QOD の手前にバンドパスフィルター(BPF)を設置することで観測周波数を限定した測定も行った。

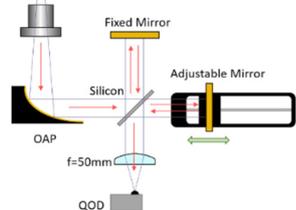


Figure 7: Setup of Michelson Interferometer.

Figure 8 は 0.5THz BPF と 0.3THz BPF を用いた THz 光の周波数スペクトル測定の結果である。可動ミラーのステップ幅の間隔を 2 $\mu$ m, プロット数を 2048 点として測定を行った。結果より、スペクトルのシグナル強度ピークが現れる周波数が使用した BPF の周波数と一致することが確認された。これにより、干渉計としては正常に動作していることを確認した。また、Figure 9 は THz 光全体における周波数スペクトル測定の結果である。可動ミラーのステップ幅の間隔を 4 $\mu$ m, プロット数を 2048 点として測定を行った。これより、広帯域な周波数での THz 光の生成が確認された。しかしながら、QOD の感度が高周波側で低下するためにより低周波側が協調されたスペクトルとなっていると推察している。

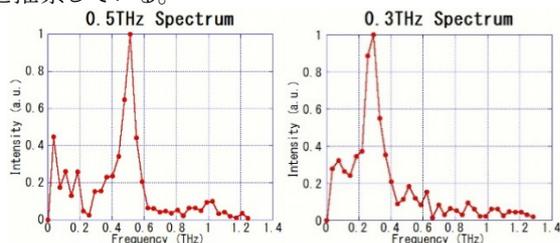


Figure 8: THz Spectrum using 0.5THz and 0.3THz BPF.

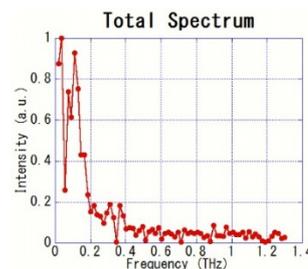


Figure 9: Total Spectrum of THz waves produced.

#### 5. 空間分解能測定

先行研究で THz イメージングを行ってきたが、空間分解能の有無は目視で判断していたため画質を数値評価することは困難であった。よって、本実験ではスリットスキャンによる THz 光の空間分解能測定を行い、コントラスト比を導出することで数値評価を試みた。スリットスキャンの THz 光路セットアップを Figure 10 に示す。生成された THz 光はレンズで平行にして金ミラーで 90 度曲げた後、レンズを用いて集光される。最も集光された点でスリットスキャンを光路に対して垂直方向に行った。透過した THz 光は再度レンズで集光され、QOD を用いてシグナル強度が観測される。QOD の直前には 0.5THz, 0.3THz, 0.2THz の BPF を設置し、周波数を限定して測定を行った。スリットスキャンに用いたスリットは金属板に等間隔でスリットが 3 つ開いており、スリット幅 0.6mm~2.0mm のスリットを使用した。

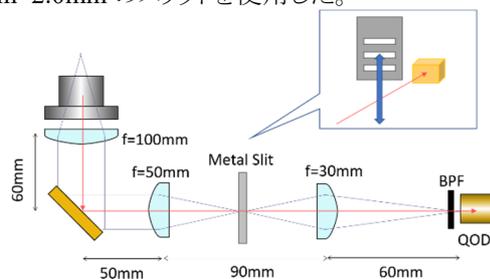


Figure 10: Experimental Setup of Slit Scan.

回折限界の理論によると、理想的な光は波長程度のスリット幅に対し空間分解能を持ち、それより小さいスリット幅に対して空間分解能を持たない。スリットスキャンの測定結果の一例として 0.3THz BPF を用いた 2.00mm スリットのスキャン結果を Figure 11 に示す。スリットが開いている三箇所でシグナル強度はピークとして現れ、スリット間の二つの金属箇所はピークに対してシグナル強度が低くなる。ここで、ピーク三箇所のシグナル強度の平均を  $S_{max}$ 、二つの金属箇所のシグナル強度の平均を  $S_{min}$  とすると、コントラスト比  $C$  は

$$C = \frac{S_{max} - S_{min}}{S_{max} + S_{min}} \quad (5)$$

で求められる。コントラスト比が非常に小さい、もしくは算出できない時に光はスリット幅に対して空間分解能を持たない。一般的にコントラスト比は実測値で約 0.1、計算値で約 0.02 まで算出が可能であった。

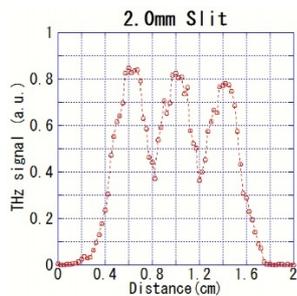


Figure 11: Result of Slit Scan (2.0mm slit, 0.3THz BPF).

Figure 12 は異なる BPF を用いた際のスリットサイズに対するコントラスト比の測定結果である。また、計算値を導出して実測値と比較した。測定可能であったスリットサイズの限界は、すなわち空間分解能は同じ BPF を用いた実測値と計算値を比較すると挙動としてはほぼ一致することが確認された。これより、波長程度の空間分解能が得られることが確認され、生成した光も非常に空間分解能を持つ光であることが分かる。また、スリットサイズが小さくなるほどコントラスト比が小さくなるという傾向があり、スリットサイズが小さいほど THz 光が通りにくいことが見受けられた。実測値と計算値のコントラスト比を比較すると、絶対値が完全には一致しなかった。これは計算値が理想的な THz 光に対して導出している一方、今回用いた光生成手法による光源点の大きさが特に高周波側に強く寄与しているものと考えている。

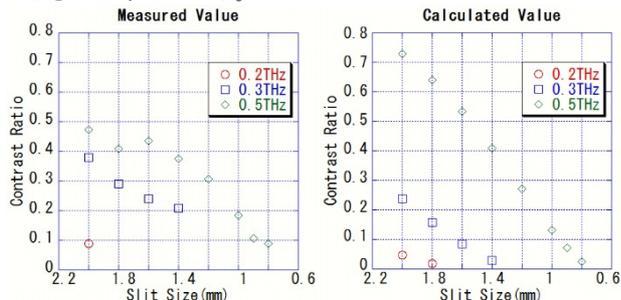


Figure 12: Summary of measured and calculated Contrast Ratio according to THz Wave Frequency and Slit Size.

## 6. まとめと今後の展望

加速した電子ビームに傾きを付与してターゲット媒質に照射することでコヒーレントなチェレンコフ放射を得た。本実験では取り出した THz 光の空間分解能を導出するため、スリットスキャンを用いたコントラスト比測定を実施した。これより、ほぼ理想に近い空間分解能が得られていることが確認された。そして、実測値と計算値のコントラスト比の挙動が一致することが確認された。

今後は、今回の結果を応用し、サンプル選定等を行ったうえでよりインパクトのあるイメージング試験に挑戦する予定である。さらに、最適なターゲット媒質を探求し、THz 光のシグナル強度の増強試験も実施する。

## 参考文献

- [1] 工業調査会,西澤潤一,テラヘルツ波の基礎と応用,2005.
- [2] オーム社,斗内政吉,テラヘルツ技術,2006.

- [3] 西田万里子,加速器電子ビームによるコヒーレントテラヘルツ光生成及びテラヘルツ応用研究,早稲田大学修士論文,2016.
- [4] 熊木雅史,極短パルス電子ビームによるコヒーレント THz 生成及び分光システム開発,早稲田大学修士論文,2012.
- [5] TOPAS®環状オレフィン・コポリマー(COC),ポリプラスチック株式会社; [https://www.polyplastics.com/jp/product/lines/topas/general\\_j.pdf](https://www.polyplastics.com/jp/product/lines/topas/general_j.pdf)