

# 電子ビームの傾き制御を用いたコヒーレント THz 放射の高度化に関する研究

## STUDY ON ENHANCEMENT OF COHERENT THz RADIATION USING ELECTRON BEAM TILTING

蓼沼優一<sup>#,A)</sup>, ブラメルド真理<sup>A)</sup>, 沈奕璋<sup>A)</sup>, 村上達希<sup>A)</sup>, 坂上和之<sup>A)</sup>, 鷲尾方一<sup>A)</sup>

Yuichi Tadenuma<sup>#,A)</sup>, Mari Brameld<sup>A)</sup>, Yiwei Shen<sup>A)</sup>, Tatsuki Murakami<sup>A)</sup>, Kazuyuki Sakaue<sup>A)</sup>, Masakazu Washio<sup>A)</sup>

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

### Abstract

The terahertz wave is located in the intermediate frequency band between radio waves and light waves, and the development of light sources, detectors and the like is not be matured compared to those. Recently, with the development of femtosecond laser and photoconductive switching technology, studies of terahertz wave are becoming popular, and we propose the possibility of coherent THz radiation using the tilt control of electron beam as a new terahertz light source. Cherenkov radiation emitted when high speed charged particles exceed the light velocity in the medium has a peak at an angle depending on the refractive index of the medium. Coherent radiation can be realized by controlling the tilt of the electron beam with high precision and making it coincide with this Cherenkov radiation angle. In this method, it is necessary to investigate the relationship between the length that the electron beam moves in the medium and the number of photons emitted per unit length, and to optimize the target medium. High intensity THz light can not be obtained by previous research using silicon as a medium having higher density and higher refractive index. Therefore, THz light intensity was compared by using silica aerogel as a low-density medium. In this presentation we report on the experimental results of optimization of these target media and future prospects.

### 1. はじめに

テラヘルツ(THz)波は周波数 0.1~10THz の電磁波であり、ちょうど電波と光波の中間に位置する。その応用としては、通信やセキュリティ、また医療や生物学など多岐にわたる。近年フェムト秒レーザーや THz-FEL の登場により、THz 波の光源や検出器、それらを用いた応用の面で研究が盛んになっているが、未だ成熟していないというのが現状である。特に光源は THz 研究の基礎ともなるべき開発対象でありながら、現状で最大出力を誇っている THz-FEL は、その規模の大きさから利用できる研究内容が限定されてしまう。

我々は電子ビームの傾きを制御することでコヒーレントチェレンコフ放射を実現しており、非常にコンパクトかつ広帯域、高出力な THz 波光源を開発するべく研究を進めてきた。光源に用いる電子ビームは、早稲田大学が保有するフォトカソード RF-Gun により生成する。RF-deflector を用いて生成した電子ビームに傾きを付与し、ターゲットに照射を行う。この電子が媒質中の光速を超えると、媒質の屈折率に依存した角度にピークを持つチェレンコフ放射が発生する。この時、電子ビームの傾き角をチェレンコフ放射角と一致させ、かつターゲット材料も同様に形状を最適化させることでコヒーレント放射を達成する。チェレンコフ放射は理論的に放射角及び放射光子数が解析されており、ターゲット材料によってそれらが異なることがわかっている。そこで、電子ビームが媒質を進む距離と単位長さ当たり放射される光子数の関係を明らかにするために、3 つの異なるターゲット媒質を用いて THz 光生成を行い、その強度を比較した。本発表では、これらのターゲット媒質の最適化の結果および今

後の展望について報告する。

### 2. コヒーレントチェレンコフ放射の原理

本章では、電子ビームの傾きを制御することでコヒーレントチェレンコフ放射を達成する原理について説明する。まず、チェレンコフ放射は高速の荷電粒子が媒質中を通過する際にその速度が媒質中の光速度を超えると衝撃波のように光子を放出する現象である。その放射角度 $\theta_c$ は、媒質の屈折率  $n$  と荷電粒子の速度  $\beta$  によって以下のように表せる。

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

本研究で用いる電子ビームは約 5 [MeV]であり、ほぼ光速と扱えるため $\theta_c$ は屈折率のみに依存することがわかる。この性質を利用することでコヒーレント放射を実現することが出来る。その原理図を Fig. 1 に示す。

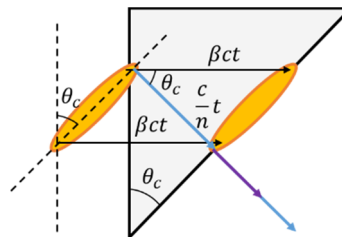


Figure 1: Phase matching by electron beam tilting.

電子ビームを傾けずにターゲットに照射した場合、ターゲット中で放射される光は互いが重なり合うことなく進む。しかし、電子ビームにチェレンコフ放射角と同等の傾きを付与することで、自動的に各点で放射される光が

<sup>#</sup> yt4869@ruri.waseda.com

重なり合って位相整合が達成される。電子ビームがある瞬間に放出した光子は  $t$  秒後には、 $\theta_c$  の方向に  $ct/n$  だけ進む。この時電子ビームは速度をほぼ変えずに  $\beta ct$  だけ進むため、ちょうど最初の光子と  $t$  秒後に放射される光子が重なり合う。これと同様なことが Fig. 1 の青いラインに平行な各ラインで起きるため全体としてコヒーレントな THz 放射が達成されるわけである。また、この手法ではコヒーレント放射となる条件は、電子バンチのバンチ長には依存せず、傾ける前のビームサイズが重要となる。すなわち、傾き付与の前のビームサイズが放射波長よりも小さい場合にコヒーレント放射となる、ということである。本実験における電子バンチのビームサイズは 0.3 [mm] 付近であるので、ちょうど THz 帯のコヒーレント放射になることがわかる。

ビームサイズやエミッタンスの制限があるために実際には不可能であるが、完全にコヒーレント放射となる場合には、その全放射強度  $P$  は電子 1 つからの放射強度  $p_0$  に対して電子数  $N_e$  の 2 乗に比例することが知られている [1]。

$$P = \begin{cases} p_0 N_e & (\text{incoherent}) \\ p_0^2 N_e^2 & (\text{coherent}) \end{cases} \quad (2)$$

従って電子ビームの傾きを制御し、THz 帯のコヒーレント成分を増やすことで、電子ビームに含まれる電子数だけ THz 光の強度を高めることが可能である。

### 3. 実験セットアップ・実験手法

#### 3.1 ビームライン

実験に使用したビームラインを Fig. 2 に示す。

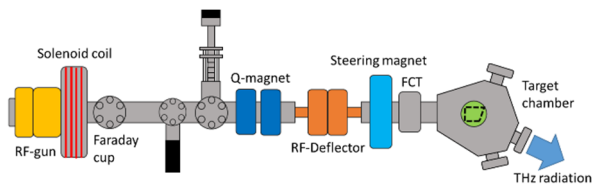


Figure 2: Experimental setup of coherent terahertz radiation using electron beam tilting.

早稲田大学の保有する CsTe フォトカソード RF-Gun で生成した約 5MeV の電子ビームを、四重極電磁石によりターゲット地点で最も収束されるように調整し、RF-deflector によってチェレンコフ放射角に傾けターゲットに照射する。後述するように、実験には異なる種類のターゲット媒質を用いるため、ターゲットを設置するチャンバーはその放射角度に合わせて回転させて設置する。生成したコヒーレント THz 波は結晶水晶窓から取り出し、2 枚の THz レンズで輸送し、準光学ショットキーダイオード(QOD)で検出する。この QOD は広帯域な検出が可能であるが、実際の測定では周波数を特定するために検出器直前でバンドパスフィルターを透過させ検出を行う。

#### 3.2 ターゲット媒質

すでに述べて来たように、本実験では異なるターゲット

媒質を用いて THz 光生成をおこない、その強度比較を行う。先行研究においてターゲットとして検証されてきた媒質は TOPAS という環状オレフィン・コポリマーとシリコンである。これらの結果としては、TOPAS では電子ビームの傾き付与による THz 光強度の増加が確認できたことに対して、シリコンでは THz 光の増加が確認できないというものになった。その要因として考えられたのが、ターゲット媒質内を電子ビームが通過する長さ、すなわち飛程である。電子ビームの飛程はターゲット媒質の密度や原子量などに依存し、その値は Bethe によって導き出されたエネルギー損失の式から求めることができる。また、チェレンコフ放射で放射される光子数  $N$  は理論的に解析されており、以下のように表せる [2]。

$$N = 2\pi\alpha x \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \sin^2 \theta_c \quad (3)$$

ここで、 $\alpha (= e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c)$  は微細構造定数、 $x$  は電子の移動距離(飛程)であり、ある 2 つの波長( $\lambda_1, \lambda_2$ )の間に含まれる波長の光子数を表す。

一般に屈折率が大きくなるほど密度も大きくなり、電子ビームの飛程は短くなる。すなわち、単位長さ当たりの放射光子数と電子ビームの飛程はトレードオフの関係があることがわかる。

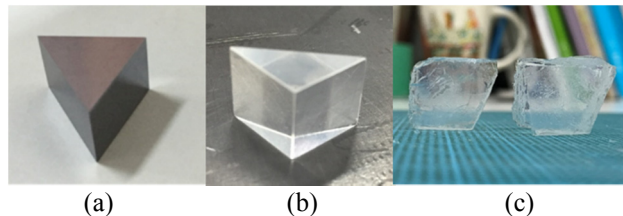


Figure 3: The visual comparison of target mediums (a)Silicon (b)TOPAS (c)Silica aerogel.

Table 1: Parameters of Target Mediums

	Silicon	TOPAS	Aerogel
Refractive index	3.40	1.52	1.03
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.33	1.02	0.10
Ratio of number of photons per unit path	1.61	1	0.165
Range (cm)	0.105	0.225	2.435
Ratio of number of photons	0.749	1	1.78

そこで高密度・高屈折率な媒質として用いたシリコンと対称に、今回は低密度・低屈折率なエアロゲルを用いて THz 光生成を行うことで、これらの中間に位置する TOPAS を合わせた 3 種の比較を行い、ターゲット媒質の最適化を図る。3 種のターゲット媒質の外観は Fig. 3 のようになっている。

Bethe の式及び放射光子数の理論式から求めたター

ゲット媒質のパラメータを Table 1 に示す。単位長さ当たりの放射光子数比に関しては、式(2)における $\sin^2 \theta_c$ の値から比率を計算したものととなっている。また、飛程は Bethe の式から計算した値のうち約 10%がコヒーレント放射に寄与しているという仮定での数値となっている。

Table 1 の数値からわかるように、TOPAS よりも大きな飛程を持つエアロゲルは、放射光子数としても TOPAS を上回ることが予想される。

### 3.3 THz 光生成

TOPAS とエアロゲルを用いた時の、電子ビームの傾き変化に対する THz 光強度の変化の結果を Fig. 4 に示す。この際、電子ビームの電荷量は約 90 [deg]、バンドパスフィルター(BPF)は 0.3 [THz]のものを使用した。

結果は、最大強度となる電子ビームの角度はエアロゲルの時に 17.4 [deg]、TOPAS の時に 45.4 [deg]程度となった。チェレンコフ放射角の値はエアロゲル、TOPAS でそれぞれ 17.8 [deg]、48.9 [deg]であるので、両者ともにチェレンコフ放射角付近で THz 光強度が最大となっていることが確認できた。これはシリコンでは確認できなかった事実であり、電子ビームの傾き付与による THz 光の増大にはある程度の飛程が必要であることを示している。

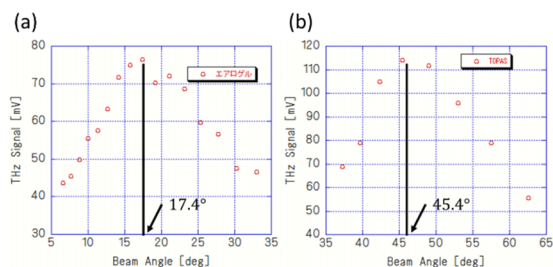


Figure 4: Plot of THz intensity as a function of beam angle (a)aerogel (b)TOPAS.

### 3.4 コヒーレンス測定

次にエアロゲルと TOPAS を用いて生成した THz 光がコヒーレント放射となっているか確認するために電荷量を変化させた時の THz 光強度の変化を測定した。その結果を Fig. 5 に示す。前述の通り、2 乗の成分が多いほどコヒーレントと言える。

また、実際のパワーを測定するためにパワーメータを用いて測定も行った。しかし、エアロゲルによる THz 光は

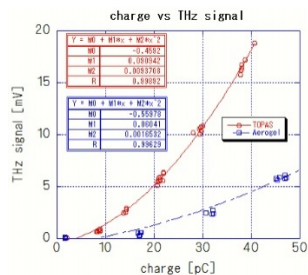


Figure 5: Plot of THz intensity as a function of bunch charge.

パワーメータでは測定できないほど弱い強度であったため、TOPAS による THz 光の強度のみ測定を行った。その結果は、THz 光 1 パルス当たり約 22.4 [nJ]という結果となった。

## 4. 考察

### 4.1 コヒーレント放射に寄与する電子数

3.2 で述べたように予想される光子数はエアロゲルが上回っていたが、実際の THz 光強度は TOPAS の方が高いという結果が得られた。Table 1 で示した放射光子数とは、単位長さ当たりの放射光子数と飛程との積で表したものである。しかし、この値には放射光子数のうちの程度がコヒーレントであるかは考慮していない。そこで、コヒーレント放射に寄与する電子数を比較することで実験結果を理解することを試みた。

その模式図を Fig. 6 に示す。オレンジ色の四角い図形が電子ビームの飛程であり、青いラインのひとつひとつが THz 光の位相整合するラインである。すなわち、この青いライン一つの上により多くの光子が乗っている程、THz 光強度が増大すると言える。ここで、単位長さ当たりの光子数は TOPAS が上回っていたことを踏まえると、1 つの青いライン上には TOPAS の方が多くの光子が乗っていると言える。つまり、コヒーレント放射に寄与する光子の割合が TOPAS の方が多いために、結果としてエアロゲルよりも高い THz 光強度が得られたと考えられる。

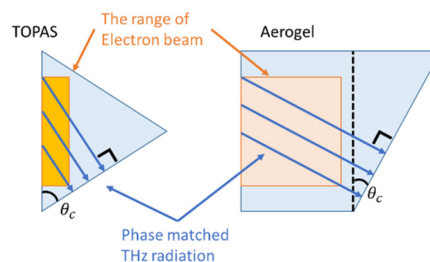


Figure 6: Schematic of range of electron beam and phase matched THz radiation.

### 4.2 ターゲット形状の最適化

4.1 の考察を踏まえると、現在の Fig. 6 に示したターゲット形状よりも本実験に最適な形状を考えることが出来る。これまでは、入射面が電子ビームの進行方向と垂直になり、かつ放射方向にチェレンコフ放射角を持つような形状としていた。この形状に対して、今回新たに考案した形状を Fig. 7(b)に示す。Fig. 7(a)は今回まで用いた形状である。

新しい形状では入射面とビーム進行方向との成す角をチェレンコフ放射角にすることで、Fig. 7(b)の右に示したように THz 光の位相整合する青いラインが最長となる事がわかる。これにより、コヒーレント放射に寄与する電子の割合を最大化でき、より高強度な THz 光生成が期待される。

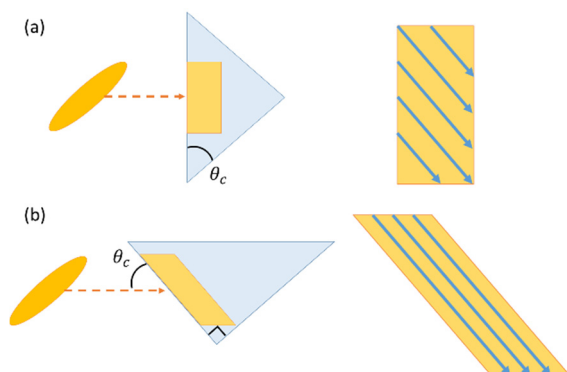


Figure 7: Comparison of target form and effect to phase matched THz radiation.

## 5. まとめと今後の展望

フォトカソード RF-Gun から生成した電子ビームの傾きを制御することで、コヒーレントチェレンコフ放射を生成した。電子ビームの傾きはチェレンコフ放射角に一致するときに THz 光の強度が最大となり、さらに電荷量の 2 乗に比例して THz 光強度が増加することからコヒーレント放射となっていることも確認することができた。

本実験における THz 光生成では、その強度がターゲットに大きく依存するため、先行研究のシリコン、TOPAS に加えて新たにエアロゲルを含めてターゲット媒質の最適化を試みた。放射光子数の式から予想される結果はエアロゲルが優位なものであったが、実際の実験結果では TOPAS を用いた際に最も高強度な THz 光を生成できることが分かった。この結果から、放射光子数だけでなく、コヒーレント放射に寄与する電子の割合が重要だと考察した。この考察を踏まえ、新たに最適化したターゲット形状を考案した。

今後、今回考案した形状が最適となっているかを実験的に確認する予定である。コヒーレント放射に寄与する電子数から概算すると、従来の形状よりも 5~10 倍は強度が増加すると見込んでいる。また、それとともにビームライン上にスリットを挿入することで電子ビームに周期構造を持たせ、準単色化および更なる THz 光強度の増加を試験していく予定である。

## 参考文献

- [1] Y. Shibata *et al.*, The Japanese Society for Synchrotron Radiation Research, 5(1) (1992).
- [2] J. V. Jelly, United Kingdom Atomic Energy Authority, Cherenkov radiation and its application (1958).