

空間変調電子ビームを用いたコヒーレントチェレンコフ放射の 準単色化に関する研究

STUDY ON QUASI-MONOCHROMATIC COHERENT CHERENKOV RADIATION USING SPATIALLY MODULATED ELECTRON BEAM

村上達希^{#, A)}, ブラメルド真理^{A)}, 蓼沼優一^{A)}, 沈奕璋^{A)}, 鷲尾方一^{A)}, 坂上和之^{B)}, 黒田隆之助^{C)}, 平義隆^{C)}
Tatsuki Murakami^{#, A)}, Mari Brameld^{A)}, Yuichi Tadenuma^{A)}, Eki Shin^{A)}, Masakazu Washio^{A)}, Kazuyuki Sakaue^{B)},
Ryunosuke Kuroda^{C)}, Yoshitaka Taira^{C)}

^{A)} Waseda Research Institute for Science and Engineering

^{B)} Photon Science Center

^{C)} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Abstract

The THz wave refers to an electromagnetic wave in an intermediate frequency band between radio waves and light waves, and is characterized by fingerprint spectrum, substance permeability, low energy. Although various applications are expected from these characteristics, the present condition is that the performance of a detector or a light source is inferior to other frequency bands. For this reason, Washio Lab has conducted experiments to generate THz waves with an electron beam using an accelerator system. Irradiating the medium with an electron beam generates THz waves by Cherenkov radiation. Since this radiation angle is determined from the refractive index of the medium, a coherent THz wave can be obtained by giving an appropriate tilt to the electron beam. In this study, we will consider the generation of quasi-monochromatic THz waves using a spatially modulated electron beam. When the multi slit is inserted into the beam line, the electron beam can be spatially modulated in a comb shape. At this time, since the THz wave is generated from each comb-like electron of the space modulation electron beam, only the intensity of the wave having the wavelength which is in the interval of the comb-like electron beam increases. Therefore, by changing the slit width, it is possible to intensify waves of any wavelength. This time, THz waves were generated using multi-slits having different slit widths, and comparisons were made by measuring the intensity for each frequency using a band pass filter. In this presentation, we will report on the relationship between the spacing of the spatially modulated electron beam and the corresponding frequency and the future prospect.

1. はじめに

THz 波は電波と光波の間である 0.1~10 THz の周波数を持つ電磁波を指し、その特徴として物質を特定できる指紋スペクトルや物質透過性を持つこと、低エネルギーであることなどが挙げられる。また、これらの特徴により、非破壊検査やイメージングなど、様々な応用が期待されている。しかし、他の周波数態に比べて光源や検出器の性能が劣っているのが現状である。そのため、鷲尾研究室では、小型かつ高強度な THz 光源の開発を行っている[1, 2]。

鷲尾研究室では、THz 波を得るための物理現象としてチェレンコフ放射を用いている。チェレンコフ放射は媒質の屈折率に依存するチェレンコフ放射角の方向に放射されるため、電子ビームを RF-Deflector を用いてチェレンコフ放射角に傾けることでコヒーレントな THz 波を得ることができる。現状の研究成果としては、この方法による高強度な THz 波の生成に成功しているものの、そのスペクトルは広帯域なもののみとなっている[3]。そこで今回は、さらなる THz 光源の高度化として、マルチスリットによる空間変調電子ビームを用いたコヒーレントチェレンコフ放射の準単色化について実験を行った。本発表ではバン

ドパスフィルタ(BPF)を用いた周波数毎の強度比較による準単色化に関する考察と今後の展望について発表する。

2. コヒーレントチェレンコフ放射の原理

本章では本実験で用いられるコヒーレントチェレンコフ放射の生成原理について説明する。チェレンコフ放射は媒質中を運動する荷電粒子の速度が媒質中の光の速度よりも速い場合に光を発生させる現象で、その放射角度 θ_c は媒質の屈折率 n と荷電粒子の速度 β を用いて以下の式で表される。

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

電子ビームは多数の電子の塊であるため、そのそれぞれからチェレンコフ光が発生する。この波長に対して光源のサイズが十分小さく、それぞれの光の位相がそろっているときをコヒーレントな状態と呼ぶ。放射光強度 P は電子一つからの放射光強度 p_0 と電子数 N_e により

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

と表されるため、より高強度な放射光を得るためにはコヒーレントな状態にあることが重要になる。

[#] tatsuki-1996@ruri.waseda.jp

鷲尾研究室では、電子ビームにチェレンコフ放射角に対して垂直な傾きを付与することでコヒーレントチェレンコフ放射を生成している。原理図を Figure 1 に示す。

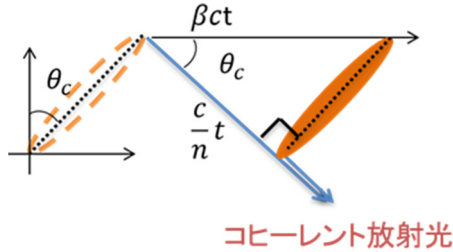


Figure 1: Principle of coherent Cherenkov radiation.

図において点線の楕円は電子ビームの初期位置、塗りつぶされた楕円は t 秒後の電子ビームを示している。ここで、初期位置のビームから発生したチェレンコフ光は t 秒後にはビーム進行方向から θ_c の方向に ct/n 進んでいる。また、電子ビームは進行方向に βct だけ進む。よって、位相整合条件は

$$\beta ct \cdot \cos \theta_c = \frac{c}{n} t \quad (3)$$

と書ける。この式が成立するとき、初期位置で発生した光と t 秒後発生した光が重なり合うため全体としてコヒーレントな光が発生する。ここで式(1)より位相整合条件(3)は常に成立するため、傾きを付与するだけで自動的にコヒーレントチェレンコフ放射が達成される。鷲尾研究室ではこの手法を Phase Matching Coherent Cherenkov Radiation (PMCCR) と呼んでいる。また、PMCCR においては電子ビームのバンチ長ではなくビームサイズが重要になる。チェレンコフ光の進行方向から見た放射源のサイズはビームサイズと一致するため、傾きを付与していないときに比べて放射源のサイズが小さくなり、よりコヒーレントな光が得られる。

3. 実験セットアップ・実験手法

3.1 ビームライン

本実験で使用したビームラインを Figure 2 に示す。

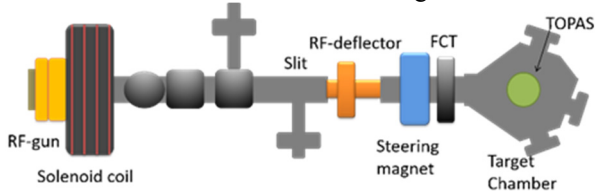


Figure 2: Experimental setup.

本ビームラインでは、電子源として CsTe フォトカソードを用いている。カソードで発生した電子は RF-Gun で加速され、5 MeV の電子ビームとなり、ソレノイドコイルで収束を受ける。その後電子ビームはスリットによって楕円状に空間変調され、RF-Deflector によって傾きを付与された後、ターゲット媒質に入射され、コヒーレントチェレンコフ光を発生させる。本実験においては、ターゲットに TOPAS を用いている。TOPAS はノルボルネンとエチレンをメタロセン触媒にて共重合したシクロオレフィンコポリマーで、THz 帯で透明かつ屈折率一定であるという特徴

を持つ。また、チェレンコフ放射角は屈折率 $n \approx 1.52$ から $\theta_c \approx 48.9^\circ$ と計算され、PMCCR のために Figure 3 のような形状に加工されている。

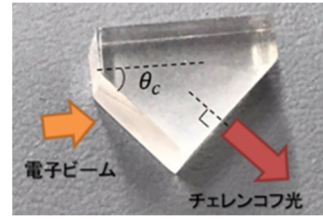


Figure 3: The appearance of TOPAS.

発生したチェレンコフ光はチャンバーの窓から取り出された後、ミラーによって輸送され QOD 検出器によって検出される。この時、バンドパスフィルタ(BPF)を用いることで特定の周波数の強度のみを測定し、比較を行うことで準単色化について考察を行う。

3.2 マルチスリットによるチェレンコフ光の準単色化

本実験では、チェレンコフ光の準単色化のため、マルチスリットによる空間変調電子ビームを利用した。スリットを透過した電子ビームは楕円状に整形され、RF-Deflector によって傾きを付与される。このとき、楕円状電子ビームのそれぞれの電子バンチの間隔に合う波長を持つ波は重なり合い高強度となるが、間隔に合わない波長の波は重ならないため強度が小さくなる。よって、スペクトル上ではバンチ間隔に合う波長付近のみピークが現れる準単色化の効果が期待できる。また、この方法による準単色化には、スリット幅を適切に設計することで任意の周波数を準単色化することができる、波長可変性というメリットも挙げられる。

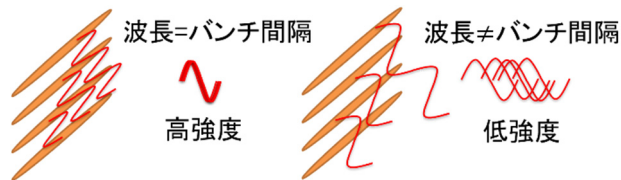


Figure 4: Quasi-monochromatic coherent Cherenkov radiation using spatially modulated electron beam.

3.3 スリット幅計算

スリットを用いた準単色化にはスリット幅が重要になる。そのため、適切なスリット幅を計算するために簡略化した電子ビームを用いて計算を行った。

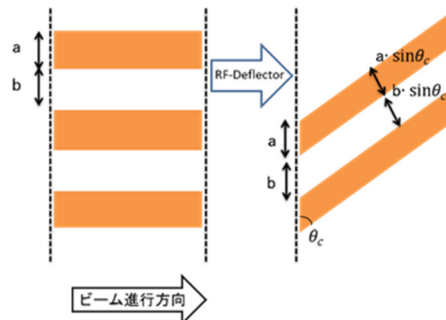


Figure 5: The schematic of spatially modulated electron beam.

Figure 5は簡略化した空間変調電子ビームを表している。スリットの電子が通り抜ける部分をスリット幅 a 、通らない部分を金属幅 b とすると傾き付与後のバンチ間隔 L は

$$L = a \sin \theta_c + b \sin \theta_c \quad (4)$$

と書ける。媒質中の電子ビームを Figure 6 に示す。

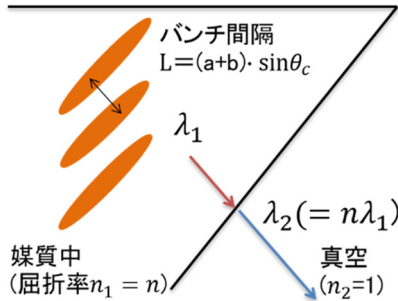


Figure 6: The schematic of spatially modulated electron beam in medium.

媒質中のチェレンコフ光の波長を λ_1 、媒質から出て、実際に検出されるとき波長を λ_2 とすると媒質の屈折率 n を用いて

$$L = (a + b) \cdot \sin \theta_c = \lambda_1 = \frac{\lambda_2}{n} \quad (5)$$

となる波長の波が準単色化されると考えられる。よって、式(5)から、準単色化させたい波長 λ_2 を用いて逆算することでスリット幅を計算する。ここで、TOPAS の屈折率 $n \approx 1.52$ であるため、 $\sin \theta_c \approx 0.754$ となる。また、各スリットでビームサイズを統一するため、スリット幅 $a=0.5(\text{mm})$ と固定すると式(5)より金属幅 b が決定できる。この計算方法により設計し、実際に使用したスリットの値を Table 1 に示す。ここで、対応周波数は λ_2 に対応する周波数の値を示している。

Table 1: The Parameters of The Used Slit (mm)

想定対応周波数	0.2THz	0.3THz
スリット幅 a	0.5	0.5
金属幅 b	0.8	0.3
スリット周期	1.3	0.8

3.4 ビームプロファイル

Figure 7 に TOPAS 挿入位置で撮影した空間変調電子ビームのプロファイルを示す。

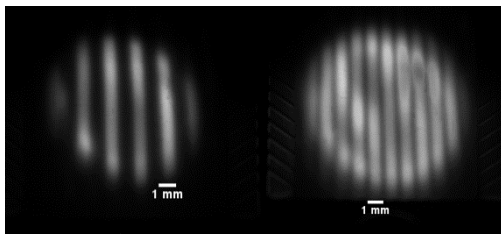


Figure 7: Profiles of spatially modulated electron beam. (left: 0.2THz_slit, right: 0.3THz_slit solenoid:100A).

このように、マルチスリットによって楕円の電子ビームが生成されていることが確認できた。

本実験のビームラインでは空間電荷効果によるビーム

の広がりを抑制するため、ソレノイドコイルによって収束が行われている。よって、このソレノイドの値によって楕円電子ビームのバンチ間隔が変化するため対応周波数も変化することが考えられる。そのため、各ソレノイドの値でビームプロファイルを撮影し、マルチガウシアンフィッティングを行うことでそのバンチ間隔から対応周波数をそれぞれ計算し、強度と比較することとした。

4. 実験結果と考察

4.1 ビーム傾き角とチェレンコフ光強度

PMCCR によるコヒーレントチェレンコフ光の生成を実証するために、ビームの傾き角に対する光強度の測定を行った。結果を Figure 8 に示す。ここで 0.2 THz, 0.3 THz, 0.5 THz の BPF を用いた時の結果はそれぞれ赤、青、緑のプロットを用いて示されている。

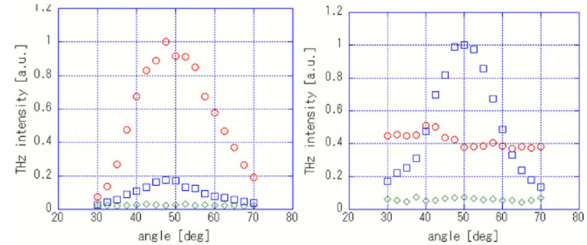


Figure 8: Relationship between beam tilt angle and radiation intensity. (left: 0.2THz_slit, right: 0.3THz_slit).

グラフより、ビームの傾き角がチェレンコフ放射角である 48.9° 付近の場合に強度が最大になることがわかった。よって、PMCCR によるコヒーレントチェレンコフ放射に成功しているといえる。また、周波数毎の強度は Figure 9 に示されているスリットを用いていないときの結果と比較すると、0.2THz_slit を用いたときは 0.2 THz 強度と 0.3 THz 強度の差がより大きくなり、0.3THz_slit を用いたときは強度比の逆転が起きているという結果が得られた。これは、空間変調電子ビームによる準単色化の兆候であると考えられる。

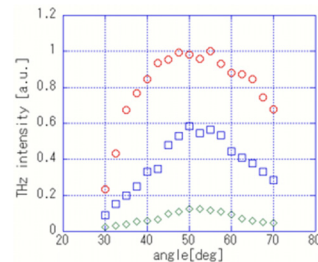


Figure 9: Relationship between beam tilt angle and radiation intensity. (no slit).

4.2 対応周波数変化とチェレンコフ光強度

0.2THz_slit を用いたときのソレノイドコイルの値とチェレンコフ光強度及び対応周波数の変化の関係を Figure 10 に示す。この結果から、ソレノイドコイルの値が上昇するにつれ、対応周波数は 0.15~0.2 THz 程度に変化していることがわかる。また、そのチェレンコフ光強度は対応周波数に一致する 0.2 THz が最大であることがわかった。

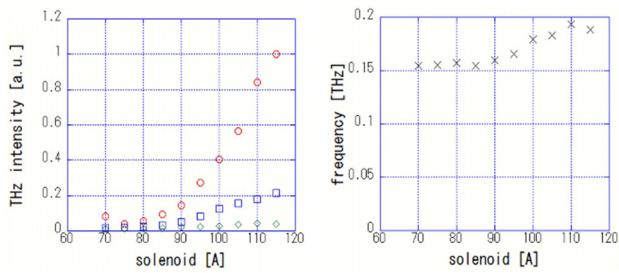


Figure 10: Relationship between the current value of the solenoid coil and the radiation intensity and the corresponding frequency. (0.2THz_slit).

0.3THz_slit を用いたときの結果を Figure 11 に示す。この結果から、ソレノイドコイルの値が上昇するにつれ、対応周波数は 0.25~0.3 THz 程度に変化していることがわかる。また、そのチェレンコフ光強度はスリットを用いていないとき 0.2 THz 強度がもっとも大きいのにに対して、対応周波数に一致する 0.3 THz が最大となっていることがわかった。これらの結果から、マルチスリット挿入による空間変調電子ビームを用いたコヒーレントチェレンコフ放射の準単色化に成功したと言える。

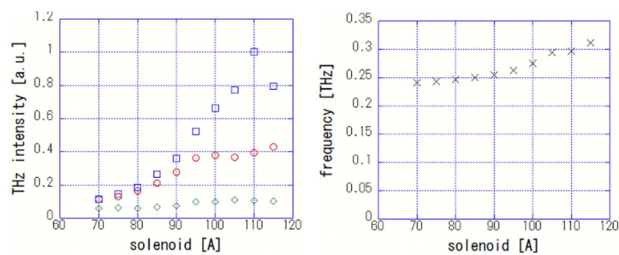


Figure 11: Relationship between the current value of the solenoid coil and the radiation intensity and the corresponding frequency. (0.3THz_slit).

5. 実験結果と考察

フォトカソード RF-Gun を用いて生成した電子ビームをマルチスリットにより空間変調させることで楕円電子ビームを生成した。また、空間変調電子ビームの傾きを制御することで THz 帯のコヒーレントチェレンコフ光を発生させることに成功した。

本実験の目的である準単色化の検証のためにバンドパスフィルタを用いて周波数毎の強度を比較した。その結果、0.2 THz に対応するスリット幅を持つスリットを用いたときは、スリットを用いていないときよりも 0.3 THz に対する 0.2 THz の強度が大きくなり 0.3 THz に対応するスリット幅を持つスリットを用いたときは、強度比が逆転し、0.3 THz の強度がもっとも大きくなるという結果が得られた。

ビームラインに挿入されているソレノイドコイルの収束力により空間変調電子ビームの電子バンチの間隔が変化することが考えられた。そのため、撮影したビームプロファイルをフィッティングすることで対応周波数を算出した。その結果、対応周波数と一致する周波数でチェレンコフ光強度が大きくなっていることがわかった。よって、空間変調電子ビームによるコヒーレントチェレンコフ放射の準単色化が実証された。

今後の展望としては、異なるスリット幅を持つスリットを作成し同様に実験を行い、スリットの効果をより理解していくとともに、より正確な準単色性の比較のため、THz-TDS によるスペクトル取得のためにレーザー系の構築も進めていきたい。

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.
- [2] Ohmsha 斗内政吉, テラヘルツテクノロジー動向調査委員会, テラヘルツ技術.
- [3] 2017 年度修士論文, 柳澤稔, コヒーレント THz 光計測に向けた時間領域分光システムの開発.