

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：82626
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2011～2012
課題番号：23654097
研究課題名（和文） 強誘電体チューブを用いた単色可変高出力テラヘルツ光源の開発
研究課題名（英文） Development of the monochromatic and tunable high-power THz source using ferroelectrics tubes
研究代表者 黒田 隆之助（KURODA RYUNOSUKE） 独立行政法人産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・主任研究員 研究者番号：70350428

## 研究成果の概要（和文）：

本研究では、Sバンド小型リニアックによる高輝度・超短パルス電子ビームと、種々の誘電体キャピラリーチューブを用いることで、テラヘルツ領域のコヒーレント・チェレンコフ放射の生成を行い、同時にシミュレーションによる生成条件と放射特性の計算を行った。また、強誘電体を放射材料として用いた実験を行い、ショットキーダイオード測定によりテラヘルツ放射を確認することに成功した。

## 研究成果の概要（英文）：

This study was performed to generate the coherent Cherenkov radiation (CCR) in the THz region using the high-brightness and ultra-short pulse electron beam obtained from the S-band compact electron linac. The numerical simulation was also performed to find the optimum condition for generating the THz-CCR and to research the characteristics of the THz-CCR. The generation and observation of the THz radiation from the ferroelectrics tube was also successfully performed in this study.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：加速器

## 1. 研究開始当初の背景

（1）光と電波の境界領域、テラヘルツ（THz）領域（0.1～10 THz）は、分子の回転・振動の周波数に相当し、物質の指紋スペクトル

が存在するため、世界各国で研究が進められている。しかしながら、近年のテラヘルツ光源としては、市販されているものを含めレーザーベースの光源が主流であり、フェムト秒モードロックレーザーを光伝導アンテナや

EO 結晶に照射することにより、パルス幅 1 ps (ピコ秒) 程度の THz パルスを得ているが、その出力は数 mW 程度と大変弱く、特に 1 パルスあたりのエネルギー及びピーク強度は大変微弱なものであった。

(2) 一方産総研では、S バンド小型リニアックによる超短パルス電子ビームを用いたテラヘルツ領域のコヒーレント・シンクロトロン放射を発生させており、そのピーク強度は kW 以上であるが、そのスペクトルはブロードであり単色ではなかった。そのため、さらに高強度で単色可変のテラヘルツ光源の開発のため、本研究で提案するような超短パルス電子ビームと強誘電体チューブを用いるような新たな手法を開発する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究は、高輝度・超短パルス電子ビームと誘電体キャピラリーチューブを用いたテラヘルツ領域のコヒーレント・チェレンコフ放射の生成を行うものである。更に、強誘電体を用いた単色可変の高出力テラヘルツ光源の可能性を探索することを目的とする。

## 3. 研究の方法

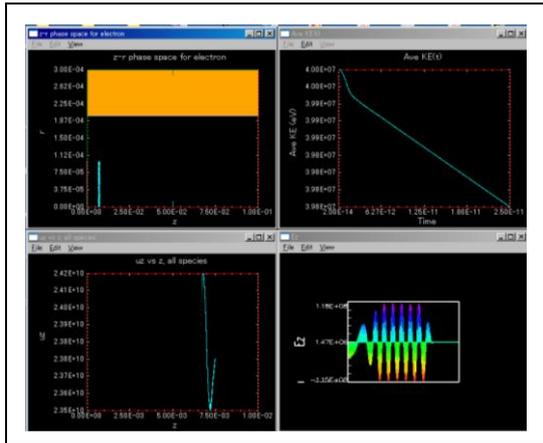
本研究は、産業技術総合研究所のレーザーフォトカソード RF 電子銃を電子源とする S バンド小型リニアック及び磁気パルス圧縮器を用いて、キロアンペア級のピーク電流値を持つ高輝度・超短パルス電子ビーム (電荷量 1 nC 以上、パルス幅 500fs (フェムト秒) 以下) を生成し、4 極磁石によって数百  $\mu\text{m}$  以下に強収束させ、外面を金属コーティングした誘電体キャピラリーチューブを通過させることにより、チェレンコフ航跡場を誘起し、単一周波数モードのテラヘルツ領域チェ

レンコフ放射を生成する。次に、その放射をテラヘルツ領域に感度のあるゼロバイアス・ショットキーダイオードにより計測する。更に、誘電体材料に強誘電体を用いることで、高出力の波長可変単色テラヘルツ光源の可能性を探求する。

## 4. 研究成果

(1) 本研究においては、S バンド小型リニアックを用いて、キロアンペア級のピーク電流値を持つ高輝度・超短パルス電子ビーム (エネルギー約 40MeV、電荷量 1 nC 以上、パルス幅 500fs 以下) を生成し、誘電体キャピラリーチューブを通過させることでテラヘルツ領域のコヒーレント・チェレンコフ放射を生成させることに成功した。

(2) 最初の実験では、誘電率 2.1、内径 1/8 インチ、外径 1/16 インチのポリテトラフルオロエチレン (PFA) チューブを用いて実験を行った。その結果、真空中に導入したキャピラリーチューブに電子ビームを集光させ、進行方向にテラヘルツ光を発生させ、ショットキーダイオードによって検出することに成功した。しかしながら、上記種類のポリマーでは、電子ビームにより材料が焼けてしまうといった問題があった。また、ビーム軸上での観測では、電子ビームをビームダンプへ導く偏向電磁石からのコヒーレント・シンクロトロン放射と、本研究目的のコヒーレント・チェレンコフ放射との区別が困難であることがわかり、それらを分離するため偏向電磁石の手前に穴あき軸外放物面ミラーを導入した。



(3) 本研究に最適な条件探索のため、シミュレーションコードによる放射計算を行った。本計算では、電磁場シミュレーションコード (OOPIC) を用い、誘電率 3.8 の石英チューブ (内径:  $200\ \mu\text{m}$ 、外径:  $300\ \mu\text{m}$ 、長さ  $1\text{cm}$ ) に電荷量  $0.75\text{nC}$ 、ビーム径  $50\ \mu\text{m}$  (rms)、パルス幅  $500\text{fs}$  (rms) の電子ビームを集光させたときに、放射特性を計算した。図 1 に計算の様子を示した。図右下は、誘電体管の中心の穴を電子ビームが通過するとき得られる軸方向電場分布である。この電場分布は、電子ビームのパルス幅、管の内径と外径に依存するが、誘電体は遅波構造として機能し、電子ビームの位相速度と同じ位相速度を持つ TM (Transverse Magnetic) モードとして解析解を得ることが出来る。ここでは、電子ビームが  $1\text{cm}$  進んだ時の結果である。左上図がチューブ断面を示し、右上図は、電子ビーム自身のエネルギー減衰、すなわちテラヘルツ放射へのエネルギー変換量を示す。

また、電場分布をフーリエ変換することにより図 2 のような放射スペクトルを得た。この計算から、上記条件において  $0.45\text{THz}$  帯で  $10\ \mu\text{J}$  以上のコヒーレント・チェレンコフテラヘルツ放射が得られることがわかった。この中心周波数  $0.45\ \text{THz}$  は、解析解と一致している。

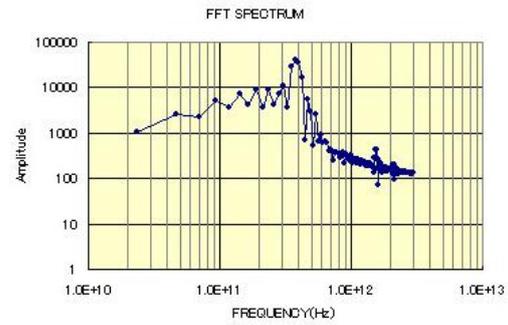


図 2 : THz-CCR のスペクトル分布 (計算)

(4) 単色可変テラヘルツ光源を目指し、強誘電体材料として PVDF (ポリフッ化ビニリデン) フィルムを用いた放射実験を行った。実験では、フィルムを円筒状にし、穴加工を施した金属に投入することで、キャピラリー状態とし、電子ビームを集光させた。得られた放射は、軸外し放物面鏡によってビーム軸から取出すことで計測を行った。本研究では、ショットキーダイオードによって測定することで、強誘電体からのテラヘルツ放射生成を確認した。しかしながら、放射測定の安定性から、強誘電体を用いたスペクトル測定までは至らなかった。スペクトル測定に関しては、石英チューブを用いた場合に、マイケルソン干渉計により単色性の高い放射が得られることが確認できている。これらの結果により、本研究における単色可変テラヘルツ光源実現への目処が立ったと言える。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 黒田 隆之助、産総研 S バンド小型リニアックを用いたコヒーレント・テラヘルツ光源の開発と利用、Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan、査読なし、1 巻、2012、222-224、なし

〔学会発表〕（計 5 件）

- ①黒田 隆之助、コヒーレント THz 光の発生  
応用、未来エネルギーシンポジウム、2012  
年 7 月 2 日、早稲田大学（東京）
- ②黒田 隆之助、小型加速器による LCS-X 線  
とコヒーレント・テラヘルツ電磁波の生成  
と先端計測応用、産総研本格研究ワークシ  
ョップ in 仙台、2012 年 3 月 7 日、ホテル  
仙台ガーデンパレス（宮城県）
- ③黒田 隆之助、産総研におけるフェムト秒  
ビーム生成と誘電体加速の可能性について、  
第 4 回「機構の研究推進について」の 意見  
交換会、2012 年 1 月 30 日、高エネルギー  
加速器研究機構（茨城県）

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

黒田 隆之助 (KURODA RYUNOSUKE)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測フ

ロンティア研究部門・主任研究員

研究者番号：70350428