

電子線傾き制御によるコヒーレントテラヘルツ放射の生成

COHERENT THZ GENERATION BY USING ELECTRON BUNCH TILTING

坂上和之^{#,A)}, 西田万里子^{B)}, 鷲尾方一^{B)}, 平義隆^{C)}, 黒田隆之助^{C)}, 浦川順治^{D)}

Kazuyuki Sakaue^{#,A)}, Mariko Nishida^{B)}, Masakazu Washio^{B)}, Yoshitaka Taira^{C)}, Ryunosuke Kuroda^{C)}, Junji Urakawa^{D)}

^{A)} Waseda Institute for Advanced Study, Waseda University

^{B)} Research Institute for Science and Engineering, Waseda University

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

^{D)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

Cherenkov radiation radiates at an angle determined by the electron velocity and refractive index of the material. The radiations from different point of the target are not coherently enhanced without any additional scheme. We tried to generate a coherent Cherenkov radiation using electron bunch tilting. The correct tilt by rf transverse deflector provides us to achieve more than 10 times higher intensity of THz pulse at 1 THz frequency. We used TOPAS polymer target for Cherenkov radiation. In this conference, the principle of coherent Cherenkov radiation by electron bunch tilting, experimental result of coherent Cherenkov radiation and future prospective will be presented.

1. はじめに

テラヘルツ光は電波と光波の間に位置する周波数帯であり、近年その有用性が認められ、光源・検出器ともに広く開発が進められている。特に、紙やプラスチックなどを透過する特性から、非破壊検査への応用や特定の分子などの回転・振動に一致した周波数であることから、その吸収スペクトルを利用することによる物質同定などへの応用が期待されている。光源開発としては、テラヘルツよりも長波長側からのアプローチとして、マイクロ波生成を応用したもの、短波長側からのアプローチとして、レーザー光を利用したものが開発されているが、未だ利用に堪える十分な強度を持ったテラヘルツ光源は実現されていない。これは検出器の感度との兼ね合いにもなるため、光源・検出器両面からの開発が急務となっている。加速器を利用したテラヘルツ光源としては、FEL (自由電子レーザー)が非常に強い強度を得ることに成功しており、検出器の校正などに利用されている。また、コヒーレント放射も利用されており、ピーク強度の高いテラヘルツ波が利用されている。[1][2]しかしながら、加速器をベースとした光源は装置が大きくなるために、やはり利用への展開には障害とならざるを得ない。そこで我々は、電子銃のみから構成されるテラヘルツ光源を開発するべく、本研究に着手した。

本研究で利用するチェレンコフ放射は物質中において荷電粒子の速度が光速を上回った際に生成される。また、放射の手法として、シンクロトロン放射などと比較すると、物質に直接打ち込むことで、物質内の分子と相互作用することから、非常に効率の良い放射手法であることがわかる。ただし、チェレンコフ放射は電子ビームの進行方向に対してある角度を持って放出するために、長い領域に渡ってコヒーレントに生成することが困難であった。そこで我々は電子線に傾きを付加することによってコヒー

レントチェレンコフ放射を生成することを着想し、現在原理実証試験を行っている。本論文では、次章においてコヒーレントチェレンコフ放射の原理に関して説明し、3章にて実験のセットアップ及びその試験結果に関して述べる。最後にまとめと今後の展望に関して説明する。

2. 電子線傾き制御によるコヒーレントチェレンコフ放射

2.1 チェレンコフ放射

チェレンコフ放射は荷電粒子が誘電体中を通過する際にその速度が媒質中の光速を超える場合に衝撃波のように生成される。その放射角度 θ_c は媒質の屈折率 n と電子のローレンツファクタ β を用いて以下のように表すことができる。

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

式からわかるとおり、ほぼ光速の電子線を用いた場合には屈折率のみに依存した角度で放射が成されることがわかる。テラヘルツをよく透過する素材として、高抵抗率のシリコン(屈折率 3.42)や特定の高分子材料(たとえば、TOPAS 屈折率 1.52)などが挙げられるが、それぞれに対して放射角は 72.84 度、48.4 度となることがわかる。このように電子線と異なる角度に放射される場合、媒質中の各点における放射が位相を一致させてコヒーレントに放射させることはできない。したがって、放射の波長よりも小さな領域における放射のみがコヒーレント放射として取り出すことができることになる。

2.2 コヒーレントチェレンコフ放射

本研究では、電子線に傾きを付加することによって、この『コヒーレントに取り出せる領域』を大きくすることを提案している。以下の Fig. 1 にその概念図を示す。図中の

[#] kazuyuki.sakaue@aoni.waseda.jp

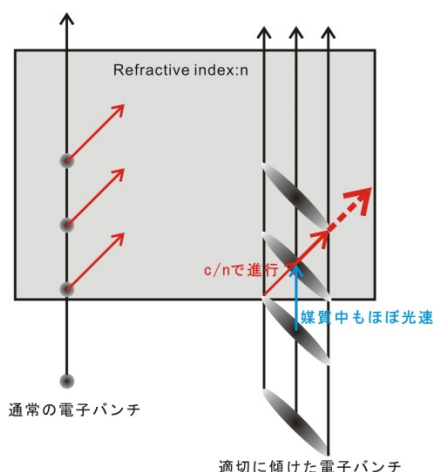


Figure 1: Schematic Cherenkov radiation from the electron bunch.

左には通常の電子バンチからの放射の模式図を示している。以下に小さな電子ビームを用いても、媒質中の各点において放射された光は互いに相互作用しないことがわかる。そこで、本提案の傾きを付加した場合を右側に示した。電子バンチとしては、左よりも大きなものとなっており、かつ傾きとして、チェレンコフ放射角に合致したものになっている。すると、バンチ先頭から生成されたチェレンコフ放射は角度を持って放射され、ちょうど真ん中に来た際に電子バンチも中心が媒質に移動してきていることになる。これは媒質中の光速と電子ビームが光速で進行することによって可能となる。したがって、矢印で示したようにこの矢印内の領域ではチェレンコフ放射はコヒーレントに生成されることがわかる。また、コヒーレント放射の条件としては、傾ける前の電子バンチのサイズが放射の波長よりも十分小さければ良い、ということがわかる。この手法はもともと、レーザーを用いて提案・行われていた手法を基に着想している。レーザーでは、可視光とテラヘルツ光における屈折率差を用いて放射を起こしている。[3]レーザーを用いた場合と比較すると、現状ではレーザーを用いた場合の方が強度も強く生成されているが、電子ビームを用いた場合には連続パルス光として高繰り返しに生成できる可能性があり、かつ FEL として発振させることも視野に入れると非常に拡張性のある手法となりえる。

チェレンコフ放射の放射体としては、今回の場合はテラヘルツ波の透過材料が必須となる。ターゲット内において生成されるためである。今回の試験では、TOPAS(環状オレフィン・コポリマー)と呼ばれる、テラヘルツレンズにも用いられる高分子材料を用いた。[4]また、より透過率の高い高抵抗率シリコンでも今後試験して行く予定である。TOPAS におけるチェレンコフ放射角は 48.4 度であり、この角度で製作したプリズム状のターゲットを用意した。

3. コヒーレントチェレンコフ放射生成と結果

3.1 実験セットアップ

電子線傾き制御によるコヒーレントチェレンコフ放射の実験セットアップを Fig. 2 に示す。

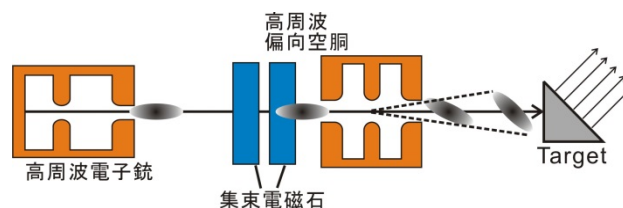


Figure 2: Beam line layout of proof-of-principle experiment at Waseda university.

電子ビームは早稲田大学に設置しているフォトカソード高周波電子銃から生成された、ピコ秒の電子バンチを用いている。非常にエミッタンスが小さいため、非常に良く絞ることが可能である。電子ビームのバンチ長としては、3ps (rms)程度であり、長さとしては 1mm とテラヘルツ光の波長よりも長いものの、横方向に集束することによって、前述のようにコヒーレントなチェレンコフ放射を得ることが可能である。電子ビームは四極電磁石によってターゲット上で収束するように調整後、高周波偏向空洞を ON にすることによって、傾きを付加する。高周波偏向空洞に印加する RF の位相とパワーはそれぞれ Phase Shifter と Variable Attenuator によって調整できるようになっており、傾きの角度と傾ける方向を決めることになる。[5]ターゲットから放射されたチェレンコフ光は 45 度方向に設置された真空窓(z-cut 結晶水晶)から待機中に取り出され、検出器によって検出する。検出器としては、準光学ショットキー検出器(QOD: VDI 社製)を用いているが、2THz 程度を上限に広帯域な感度を持つことから、周波数を限定するためにバンドパスフィルタ(BPF)を用いている。BPF は各中心周波数のものを用意し、プラスマイナス 10%程度のバンド幅を持っている。

3.2 コヒーレントチェレンコフ光の検出

Fig. 3 に QOD によって検出したテラヘルツパルス、Fig. 4 にその電子ビームの電荷量に対する強度のプロットを示す。

Fig. 3 に示す通り、電子バンチ 10 バンチに対して、テラ

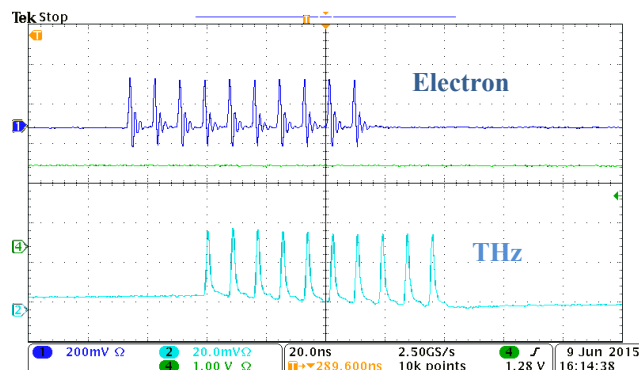


Figure 3: Typical waveform of THz radiation.

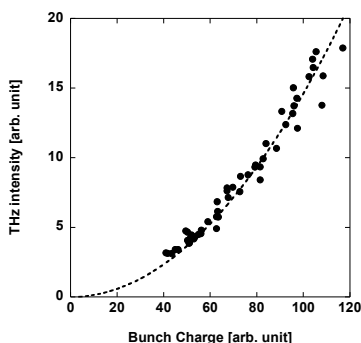


Figure 4: Plot of THz intensity at 0.9 THz as a function of bunch charge.

ヘルツパルスが 10 パルス生成されていることがわかる。上のプロットは FCT による電子ビームの信号を示しており、下のプロットが QOD によるテラヘルツパルスの信号となっている。この信号は 1THz 帯の BPF を用いて計測した結果となっており、1THz のテラヘルツ波が生成されていることがわかる。また、複数の帯域の BPF を用いることによって 0.05THz~2THz までのテラヘルツ波が含まれたテラヘルツパルスが生成されていることも確認している。これはターゲットとして用いた TOPAS がテラヘルツ帯において屈折率が変化しないため、広帯域なテラヘルツパルスが得られている。次に Fig. 4 では電子ビームの電荷量に対するテラヘルツ強度のプロットを示している。コヒーレント放射では、位相が合致して増強が得られるため、電子ビームの電荷量の 2 乗に比例して放射強度が増強されることになる。Fig. 4 を見ると、実際に 0.9THz 帯において、電子ビームの 2 乗に比例する放射強度が確認されていることがわかる。これは実際にコヒーレントにチェレンコフ光が生成されていることを確認できるとともに、広帯域で放射が確認できていることを示している。

3.3 電子ビームの傾きによる増強試験

電子ビームの傾きは、高周波偏向空洞の位相を変化させつつ、ターゲット上の位置がどのように変化するかによって算出することが可能である。また、傾き自体は印加する RF のパワーを変化させることによって、変更可能である。以下の Fig. 5 に電子ビームの角度と電子ビームの位置に対するテラヘルツ強度のマップを示した。

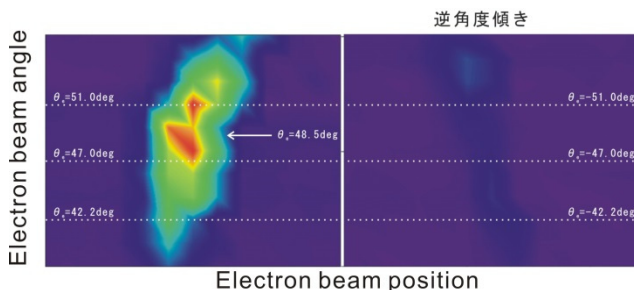


Figure 5: THz intensity map as a function of bunch tilt and position.

左のマップは検出器に対して正しい向きに傾けた際のテラヘルツ強度を、右はその逆向きに傾けた場合の強度を

示している。実際に左図を見ると、チェレンコフ放射角の 48.5 度付近において最大の強度が得られていることがわかる。また、逆傾きと比較すると、10 倍以上の強度のテラヘルツ光が得られており、本提案が正しく、動作していることを確認することができた。逆傾きにおいてもテラヘルツ強度が確認できていることに関しては、前述の通り、逆傾きにおいて一部コヒーレント放射として取り出されるため、検出されている。したがって、傾きによって増強された強度としては、1THz 帯においては 10 倍程度であると結論することができる。この増強は高周波数になるほど大きくなることが予想されるため、今後詳細に計測して行く必要がある。

4. まとめと今後

電子線の傾きを制御することによるコヒーレントチェレンコフ放射に関して提案し、実際に試験を行った。電子線をチェレンコフ放射角に一致させて傾けることにより、コヒーレントチェレンコフ放射を広い領域から得ることが可能である。実際に早稲田大学加速器において試験した。電子線に対して高周波偏向空洞で傾きを付加することによって、コヒーレントチェレンコフ放射を確認するとともに、マルチバンチビームからの放射を確認することにも成功している。また、傾き制御が実際に動作していることを確認するために傾きに対する放射強度を確認すると、傾きのみによって 10 倍以上の強度増強を確認することができた。

今後、ターゲット材料として TOPAS 以外にシリコンを用いた放射に関して比較検討していくとともに、テラヘルツ帯における周波数解析を行うことによって、テラヘルツ光のスペクトルを計測・評価していく予定である。また、最終的にはレーザーとして発振することを目指しており、より損失の少ない共振器を設計することによって実際のレーザー発振、つまり、電子線をポンプ光として、チェレンコフ放射によって発振を実現していく予定である。

参考文献

- [1] R. Kuroda *et al.*, Nucl. Instrum. Meth., A637(2011)S30.
- [2] K. Kan *et al.*, Appl. Phys. Lett., 99 (2011)231503.
- [3] H. Hirori *et al.*, Appl. Phys. Lett., 98(2011)091106.
- [4] P. D. Cunningham *et al.*, J. Appl. Phys., 109(2011)043505.
- [5] K. Sakaue *et al.*, Jpn J. Appl. Phys., 54(2015)026301.