

## 傾き制御電子バンチによるコヒーレントテラヘルツ光発生

### GENERATION OF COHERENT THZ RADIATION BY ELECTRON BUNCH TILTING

坂上和之<sup>#, A)</sup>, 西田万里子<sup>B)</sup>, 水柿将貴<sup>B)</sup>, 鷲尾方一<sup>B)</sup>, 浦川順治<sup>C)</sup>, 黒田隆之助<sup>D)</sup>, 平義隆<sup>D)</sup>  
Kazuyuki Sakaue<sup>#, A)</sup>, Mariko Nishida<sup>B)</sup>, Masataka Mizugaki<sup>B)</sup>, Masakazu Washio<sup>B)</sup>, Junji Urakawa<sup>C)</sup>,  
Ryunosuke Kuroda<sup>D)</sup>, Yoshitaka Taira<sup>D)</sup>

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

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

<sup>C)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>D)</sup> National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

#### Abstract

We have been developing an rf transverse deflecting cavity for ultra-short electron bunch diagnostics. Our rf deflector system has 150 fs temporal resolution for 5 MeV electron beam. The rf deflecting cavity not only can measure the bunch length by sweeping directly the electron bunch but also tilt the electron bunch. We considered to use this bunch tilting for generating the coherent Cherenkov radiation. At Waseda university, we tested this scheme with photocathode rf electron gun, rf deflecting cavity and triangular prism made by TOPAS polymer as a target. The resulting radiation has a property of broad bandwidth, high peak power and coherent THz radiation. In this conference, the principle of coherent Cherenkov radiation by electron bunch tilting, recent experimental results and future prospective will be reported.

#### 1. はじめに

電子ビームからの放射は放射光施設に代表されるように広く利用され、革新的な成果を挙げてきた。その中でもコヒーレント放射は非常に高強度な放射を得るために重要な技術として認識されている。コヒーレント放射はこれまで電子ビームの集束や圧縮によって 3 次元的に小さな空間集め、その大きさを波長以下とすることによって観測、実現されてきた。また、自由電子レーザーにおいてはアンジュレータを用いることによってある種の共鳴状態を利用し、その波長に合致した密度変調を得ることによってコヒーレントな放射として取り出している。放射を取り出す手法としては、偏向磁石によるシンクロトロン放射や物質との境界面を利用する遷移放射、誘電体中もしくは誘電体近傍を荷電粒子が通過することによるチェレンコフ放射におけるコヒーレント放射が研究されてきている<sup>[1][2]</sup>。

早稲田大学では光陰極高周波電子銃を用いて短パルスの電子線を生成し、様々な研究を行ってきた。短パルス電子線を利用する研究としては、レーザーコンプトン散乱による軟 X 線の生成<sup>[3]</sup>、パルスラジオリシスによる放射線誘起反応の解析研究<sup>[4]</sup>などが挙げられる。それと並行して電子銃自身の開発を行い、電子銃のみによって極短バンチを生成する高周波電子銃 (ECC RF gun) の開発を行い、その極短バンチ計測手法として高周波偏向空洞 (RF Transverse Deflecting Cavity) の導入を行った。我々の開発した高周波偏向空洞システムでは 5MeV の電子バンチに対して 150fs (rms) の分解能を持ってバンチ長計測が

行えることを確認した<sup>[5]</sup>。高周波偏向空洞自体も非常に良い性能を得ることができ、バンチの縦方向分布計測や位相空間分布計測などを行うことができたが、これをさらに応用することを検討した。電子バンチを直接掃引する高周波偏向空洞は電子バンチの進行方向に対してビームを傾けるということが可能である。さらに偏向空洞に印加する高周波の強度を調整することによって傾き角も変更可能である。そこでこのような傾きビームを用いたコヒーレント放射の取出し手法に関して検討を行った。本論文では電子バンチ傾きによるコヒーレント光生成の原理、早稲田大学にて行った原理試験の結果、及び今後の展望に関して報告する。

#### 2. 傾き電子線によるコヒーレント光生成

##### 2.1 チェレンコフ放射

チェレンコフ放射は非常に良く知られた放射であるので、詳細は割愛するが、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  $\theta_c$  は媒質の屈折率  $n$  と電子のローレンツファクタ  $\beta$  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(1)に示す通り、ほぼ光速の電子線を用いた場合には屈折率にのみ依存した角度に放射が生成されることがわかる。したがって、電子線の進行方向とは異なった角度  $\theta_c$  の方向にチェレンコフ光は生成される。

<sup>#</sup> kazuyuki.sakaue@aoni.waseda.jp

## 2.2 傾き電子線によるコヒーレント光生成

2.1 節で示した通り、チェレンコフ光は電子線の進行方向とは異なった方向に生成されることがわかる。Figure 1 にその模式図を示す。左図に示してい

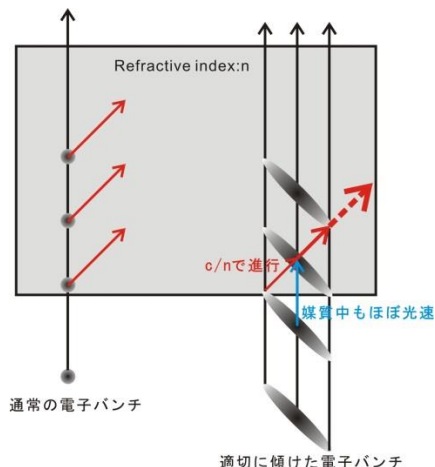


Figure 1: Schematic Cherenkov radiation from the electron bunch.

るように、ビームが進行していく間に生成されるチェレンコフ放射はそれぞれ重なりあわさることはないことがわかる。そこで電子バンチを傾けることを考える。このアイデアは元々レーザーを用いて行われていたテラヘルツ光発生を電子線に適用したものである<sup>[6]</sup>。チェレンコフ放射の放射角に傾けた電子バンチを用いる(右図)ことによって、バンチ先頭が生成したチェレンコフ光とその後続く電子バンチの放射が同位相で重なり合うことができ、コヒーレント放射として取り出すことができる。これは、電子は媒質中でもほぼ光速で移動し、放射は  $c/n$  で進行することによって実現される。さらに、コヒーレント放射として重要なバンチ長の圧縮としては、そこまで必要なく、ビームサイズを波長以下まで集束して傾きを与えることによってコヒーレント放射を取り出すことができる。

## 2.3 ターゲット材料

今回の原理試験では放射波長としてテラヘルツ波を選択した。研究用途として、利用価値がある点、波長がちょうどよく、原理試験として価値がありつつ電子線の収束も波長以下が得られやすい点を考慮して選定した。テラヘルツ光を生成するためのターゲットとして、環状オレフィン・コポリマー (TOPAS) を用いた。高分子材料で、テラヘルツ帯で非常に吸収が小さく、かつ屈折率変化が少ない<sup>[7]</sup>ため、前述の位相整合が広いテラヘルツ帯域で実現することが可能である。この TOPAS を三角柱型に加工し、ターゲットとして用いた。これを用いたチェレンコフ放射の様子を以下の Figure 2 に示す。三角柱はほぼチェレンコフ放射角の 48.5 度(屈折率 1.52 に対応)の角度になるように加工してあり、これに合わせて電子バンチも傾けることになる。このような放射セットアップによって電子バンチ傾き制御による

コヒーレントチェレンコフ放射の原理試験を行った。

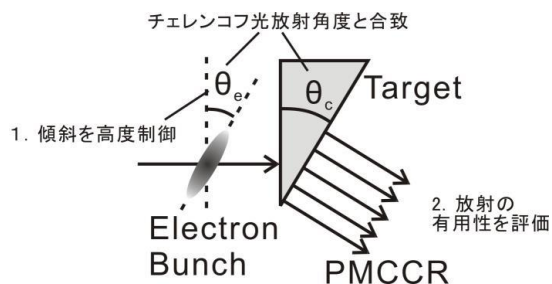


Figure 2: Schematic of coherent Cherenkov radiation generation by tilted bunch.

## 3. テラヘルツコヒーレント光生成試験

### 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原理試験のために以下の Figure 3 のようなセットアップを構築した。電子ビームには早稲田大

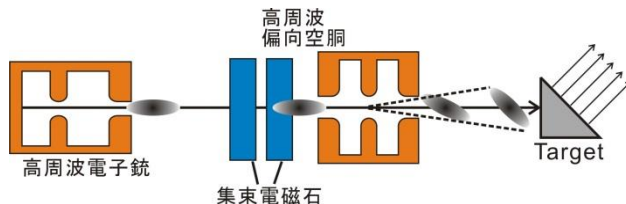


Figure 3: Beam line layout of proof-of-principle experiment at Waseda university.

学に設置している光陰極高周波電子銃を用いる。約 3ps (rms) の電子バンチが得られ、四極電磁石によってまずはターゲット上に集束する。ターゲットホルダーは出し入れすることによって蛍光スクリーンに切り替えることが可能である。まず蛍光スクリーンにて電子線の集束を調整し、その後高周波偏向空洞によって電子線を傾けることになる。電子線の傾きに関しては始めに高周波偏向空洞に印加する高周波の位相を変化させつつ電子バンチの位置がスクリーン上でどの程度変化するかを計測することによって校正している。取り出したテラヘルツパルスはショットキーバリアダイオードを用いて検出しており、検出器前にバンドパスフィルタを導入することによって特定の周波数のみを検出することも可能である。

### 3.2 コヒーレント光観測

まずはターゲットからのチェレンコフ放射がコヒーレント放射となっていることを、ビーム電荷量を変えながら強度測定を行うことによって確認した。実際には電荷量を大きく変えてしまうとビームサイズも多少変化してしまうため、できるだけ少ない電荷量に設定して行った。また、この効果は特に高周波数帯において顕著に現れるため、バンドパスフィルタを用いて 0.9THz 近傍の周波数に限って計測を行った。その結果を以下の Figure 4 に示す。Figure 4 を見てわかる通り、ビーム電荷量に対して 2 乗で放

射強度が増えていることがわかる。これは実際にコ

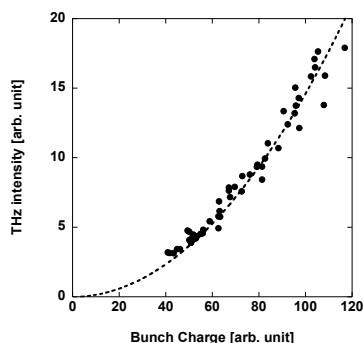


Figure 4: Plot of THz intensity at 0.9 THz as a function of bunch charge.

ヒーレント放射が得られていることを示している。また、間接的ではあるが、広帯域のテラヘルツ放射が得られていることを確認した。0.1~2THz までの範囲に感度を持つショットキーバリアダイオードとバンドパスフィルタ(それぞれ±10%の帯域幅を持つ、中心周波数 0.5/0.9/1.0/1.5/2.0THz)を組み合わせることによって計測した結果、すべてのバンドパスフィルタにおいて信号を検出することができた。したがって、非常に広帯域なテラヘルツ光を本手法によって得ることができたと言える。テラヘルツパルス検出時の典型的な波形を以下の Figure 5 に示す。

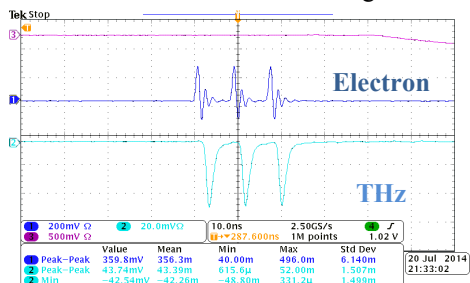


Figure 5: Typical waveform of THz radiation.

Figure 5 は 3 バンチの際の波形であるが、電子電荷量の Current Transformer から得られた信号とショットキーバリアダイオードによるテラヘルツパルスの信号両方が得られており、それぞれ同じ 3 パルス構造となっていることがわかる。

### 3.3 傾き制御によるコヒーレント光の実証

本節では実際に傾き制御によってコヒーレント放射の増強が実施されたことに関して述べていく。前述の通り、高周波偏向空洞に印加する高周波のパワーを変化させることによって傾きを変えることができ、さらに高周波の位相を変化させることによってビームの中心位置を変化させることが可能である。位相に対する位置の変化はそれぞれの高周波のパワーによって変わってくることになる。これらを変化させながらテラヘルツ光の強度を確認することによって実際に傾きによるコヒーレント放射を実証することができる。ただし、放射の波長が長い場合には通常のビームでもコヒーレント放射として出力されてしまうので、今回は 1THz±10%のバンドパス

フィルタを用いて 1THz 帯のみにおいて計測を行った。その結果を以下の Figure 6 に示す。左図は

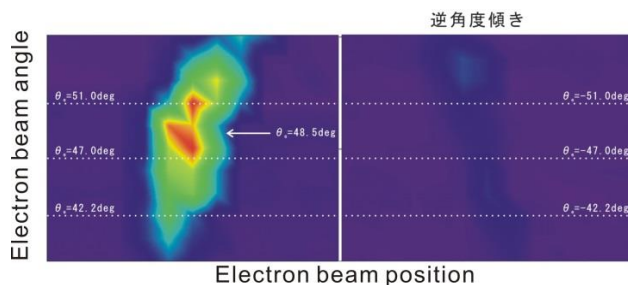


Figure 6: THz intensity map as a function of bunch tilt and position.

Figure 2 に示す通り想定している方向に傾けた場合、右図はそれとは逆の傾きに傾けた場合を示している。まず左図に矢印で示したが、ほぼ計算通りの 48.5 度に傾けた場合に最も放射が強く得られていることがわかる。強い強度が得られた範囲としては±2 度程度であることも認識できる。右図を見ると、多少は放射が確認できることがわかる。これは傾けていることでバンチ長が放射角度方向から見ると短く見えるため、多少のコヒーレント放射が含まれていることによると考えている。最大強度が得られた角度の左右の結果を比較すると約 10 倍テラヘルツ光強度が適切に傾けることによって増強されていることが確認できた。これは 2 章で示したように傾けることでコヒーレント放射に寄与する電子数が増大したことによると結論付けて良いであろう。

## 4. まとめと今後の展望

電子線に傾きを与えることによってコヒーレントチェレンコフ放射を増強できることを考案し、実験的に示すことに成功した。まずはテラヘルツ帯において実施し、テラヘルツ帯で広帯域なコヒーレント放射を確認した。また、適切な傾きを与えることで、約 10 倍の増強が可能であることを確認した。

現在までは傾きが有効であることを確認しただけと認識しているので、放射のスペクトル計測や波形の直接計測を通して、シングルサイクルのテラヘルツパルスが得られていることを検証するとともに、ターゲット材料や形状の最適化を行っていく予定である。また、すでに本放射を用いたテラヘルツイメージング研究も開始している。今後テラヘルツ光を用いた応用などにも展開していければと考えている。

## 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] K. Sakaue et al., Radi. Phys. Chem., 77(2008)1136.
- [4] Y. Hosaka et al., Radi. Phys. Chem., 84(2013)10.
- [5] K. Sakaue et al., Jpn J. Appl. Phys., 54(2015)026301.
- [6] H. Hirori et al., Appl. Phys. Lett., 98(2011)091106.
- [7] P. D. Cunningham et al., J. Appl. Phys., 109(2011)043505.