

テラヘルツ領域におけるチェレンコフ回折放射の測定

MEASUREMENT OF CHERENKOV DIFFRACTION RADIATION IN THE TERAHERTZ REGION

南部 健一[#], 日出 富士雄, 柏木 茂, 鹿又 健, 柴田 晃太郎, 高橋 健, 長澤 育郎, 三浦 禎雄, 武藤 俊哉,
山田 悠樹, 山田 志門, 熊谷 航平, 濱 広幸

Kenichi Nanbu[#], Fujio Hinode, Shigeru Kashiwagi, Ken Kanomata, Kotaro Shibata, Ken Takahashi, Ikuro Nagasawa,
Sadao Miura, Toshiya Muto, Hiroki Yamada, Shimon Yamada, Kohei Kumagai and Hiroyuki Hama

Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University

Abstract

Vavilov-Cherenkov diffraction radiation (ChDR) is expected to be a promising probe for non-destructive beam monitors. However, not all the characteristics of ChDR are understood. Thus, we carried out a basic experimental study on ChDR to develop a novel beam monitor. ChDR at a THz frequency region was produced by ultra-short electron bunches traveling at relativistic speed through a hollow dielectric medium made of high-density polyethylene (HDPE). We observed the angular distribution of ChDR and confirmed that its peak position corresponded to the Cherenkov angle. The measured spectra suggested that high-frequency components of ChDR is suppressed at larger impact parameters.

1. はじめに

東北大学電子光理学研究センターでは、電子ビームが誘電体近傍を通過する際に放射するチェレンコフ回折放射を非破壊ビーム診断のプロープに応用できないか研究を進めている[1]。チェレンコフ回折放射をビームモニターに応用する場合、その放射特性を把握することが必要不可欠である。しかしながら、放射強度が小さいため正確な測定を行うことが難しく、そのためまだ十分に理解されていない点がある。チェレンコフ放射は屈折率が高いほど強度が大きくなるため、今回、屈折率が1.536の高密度ポリエチレン製のラジエータを用いて、テラヘルツ領域のチェレンコフ回折放射を発生させ、その角度分布や分光測定[2, 3]を行ったので報告する。

2. チェレンコフ回折放射

2.1 チェレンコフ放射

チェレンコフ放射とは、荷電粒子が誘電体中を運動するときに、荷電粒子の速度が、誘電体中の光の位相速度を超えるときに発生する光のことである。チェレンコフ放射の単位角度、単位立体角当たりの強度は、以下の Eq. (1) で表される。

$$\frac{dW}{d\omega d\Omega} = \frac{\mu_0 e^2 \omega^2}{4\pi 4\pi^2 c_n} \sin^2\theta \left(\frac{\sin\alpha}{\alpha}\right)^2 (\Delta z)^2 \quad (1)$$

$$\alpha \equiv \frac{1}{2}(1 - \beta n \cos\theta)\omega\Delta t \quad (2)$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率、 e は素電荷、 c_n は誘電体中の光速、 ω はチェレンコフ放射の角周波数、 β は荷電粒子の相対速度、 θ はチェレンコフ角である。また Δz と Δt は誘電体中を電子が通過する距離と、それに要する時間である。またチェレンコフ角は以下の Eq. (3) で表される。

$$\cos\theta = \frac{1}{\beta n(\omega)} \quad (3)$$

ここで、 $n(\omega)$ は誘電体の屈折率である。

2.2 チェレンコフ回折放射

電子が誘電体近傍を通過する際においても、誘電体内の電場の伝搬速度よりも、電子の速度が大きい場合は、チェレンコフ光の放射条件を満たすことから、光は放射され、チェレンコフ回折放射と呼ばれている。またその放射強度は電子ビームによって誘電体内に生じる電場強度に依存するため、次式の K に従い減衰する[4, 5]。

$$K = \exp(-2\xi) \quad \text{with} \quad \xi \equiv \frac{h\omega}{\beta\gamma c} \quad (4)$$

ここで γ はローレンツ因子、 c は真空の光速、 h はインパクトパラメータであり、ビームと誘電体間の距離である。インパクトパラメータが大きいほど減衰が大きく、また放射波長すなわち観測波長が長いほど減衰しないことがわかる。一般に観測波長とビームエネルギーは、大きく変化しないため定数として取り扱えば、チェレンコフ回折放射の強度は、インパクトパラメータに依存する。またラジエータに中空誘電体を用いた場合は、ビーム通過位置によって、方位角強度分布が変化すると予想される。

2.3 コヒーレントチェレンコフ回折放射

今回実験は、東北大学電子光理学研究センターの試験加速器 t-ACTS のビームを用いて行った。インパクトパラメータが小さくなるに従い、放射強度は大きくなるが、ラジエータでのビーム損失を考慮し、本実験においてはインパクトパラメータを 0.5 mm ~ 5 mm に設定した。この場合、t-ACTS のビームエネルギーは 22 MeV であるため、 K が有意な値を取るのには、テラヘルツからミリ波よりも波長が長い領域となり、それよりも短い波長領域では、 K はほぼ 0 となることから、テラヘルツ領域での観測が要求された。しかしながらチェレンコフ放射は波長が長くなるに

[#] nanbu@lms.tohoku.ac.jp

従い、強度が低下することから、一般にテラヘルツ帯域でのチェレンコフ光の観測は困難である。よく知られているように、電子ビームのバンチ長が、放射波長よりも短い場合、その放射はコヒーレント放射となり、その強度は電子数の2乗に比例し増加する。t-ACTSは100 fs以下の極短バンチ電子ビームを安定的に生成することができ、そのバンチ長はテラヘルツ帯域の波長よりも十分短い。また1バンチ中に含まれる電子数は 1×10^8 程度であることから、コヒーレント放射により非常に大きな増幅度を得る事ができるため、このような長波長領域であっても観測が可能であると考え、本実験ではテラヘルツ領域のコヒーレントチェレンコフ回折放射の計測を行った。

3. 実験

3.1 チェレンコフラジエータ

チェレンコフ回折放射の強度を向上させるために、ラジエータには、高い屈折率と透過率を有する材料を用いる必要がある。そこでテラヘルツ帯域で透過率が高く、屈折率の高い高密度ポリエチレン(HDPE)を採用することにした。ラジエータに用いるHDPEは、あらかじめTHz-TDSシステム(Advantest社製、TAS7500TS)で屈折率を測定した。測定された屈折率の分散は極めて小さく、0.5~4 THzの平均値は 1.536 ± 0.003 であり、この測定値に基づきラジエータ形状の最適化を行った。また吸収係数は1 THzで0.24、1.5 THzで0.42であり、比較的高い透過率を有していることがわかった。Figure 1に作成したHDPE製のラジエータの形状とラジエータアッセンブリを示す。ラジエータはアルミ製のハウジングに固定され、直線導入機で、ビーム軸上に挿入される。

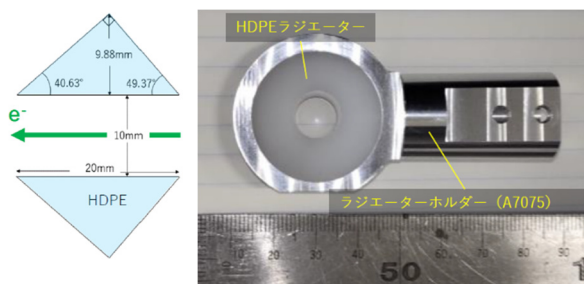


Figure 1: Cross section view of the HDPE radiator (left) and a photo of radiator assembly (right).

3.2 角度分布測定の設定アップ

角度分布測定セットアップを Fig. 2 に示す。チェレンコフ回折放射は厚み4 mm、有効径100 mmのz-cut水晶窓を用いて真空容器から取り出し、焦電素子(Sensor und Lasertechnik GmbH, THz10)を用いて測定した。水蒸気の吸収を抑制するため、真空窓と焦電素子間をポリエチレン製のブーツで囲い、その中に露点-20 °C以下の乾燥空気を常時20 L/min供給して測定を行った。焦電素子は、XY自動ステージ上にマウントし、最初に2次元スキャンを行い、チェレンコフ回折放射が想定された位置に放射されていることを確認した後に、ビームラインに

沿って1次元スキャンを行い角度分布の測定を行った。ラジエータ入口でのビーム位置及びビームサイズは、プロファイルモニターを用いて調整及び測定を行った。ビームサイズは水平・垂直共に100 μm程度になるように調整した。バンチ長はプロファイルモニターで発生したコヒーレント遷移放射(CTR)の、インターフェログラムを取得することで確認した。得られたインターフェログラムを Fig. 3 に示す。バンチ内に電子がガウス分布していると仮定すると、ラジエータ入口でのバンチ長はおおよそ80 fs程度であると見積もられた。

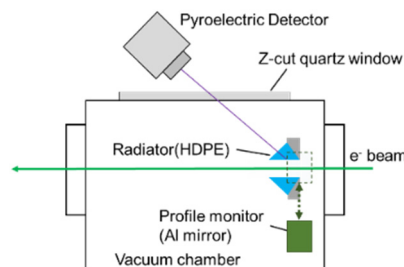


Figure 2: Schematic view of the experimental setup. The profile monitor and the hollow radiator are arranged to intersect at right angle along the beam axis. Thickness of the z-cut quartz vacuum window is 4 mm, and its effective aperture is approximately 100 in diameter. The distance from the radiator to the detector is 104.5 mm at the Cherenkov angle.

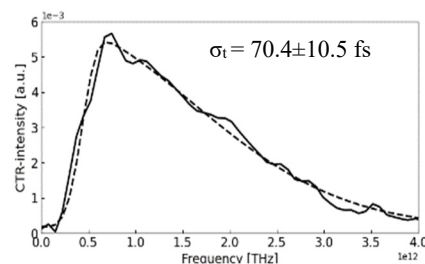
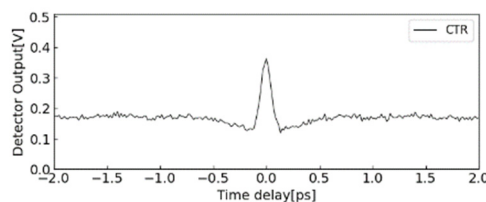


Figure 3: An interferogram of CTR measured by a Michelson interferometer (upper), and estimated frequency spectrum (lower).

3.3 角度分布測定結果

インパクトパラメータを変えた時のチェレンコフ回折放射の角度分布の測定結果を Fig. 4 に示す。ビームがラジエータの中心を通過したときのインパクトパラメータは

5 mm である。インパクトパラメータが 3 mm より大きいとチェレンコフ回折放射は検出されなかった。一方ビームを誘電体に近づけると、チェレンコフ角の周辺にチェレンコフ回折放射が観測され、その強度はインパクトパラメータが小さくなるに従い指数関数的に増加した。

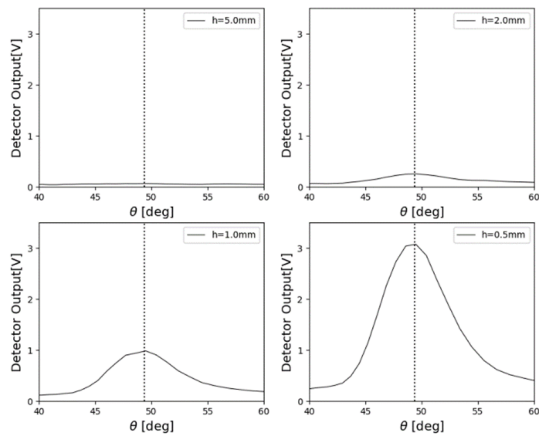


Figure 4: Angular distribution for various impact parameters from 5 mm to 0.5 mm. Dotted lines indicate the Cherenkov angle.

3.4 分光測定の設定アップ

マイケルソン干渉計を用いてチェレンコフ角における分光測定を行った。そのセットアップを Fig. 5 に示す。チェレンコフ回折放射は軸外し放物面鏡で、集光し干渉計に導入した。軸外し放物面鏡の光軸はチェレンコフ角に合わせて設置した。水蒸気の吸収を避けるために、干渉計の光路全体をポリエチレン製のフードで囲い、角度分布測定と同様にその中に露点-20 °C以下の乾燥空気を常時 20 L/min 供給して測定を行った。検出器も同様に THz10 を用いた。なお本干渉計は先ほど述べた CTR の分光にも使用している。移動鏡はリニアステージ上に設置され、5 μm ステップで移動させてインターフェログラムの取得を行った。

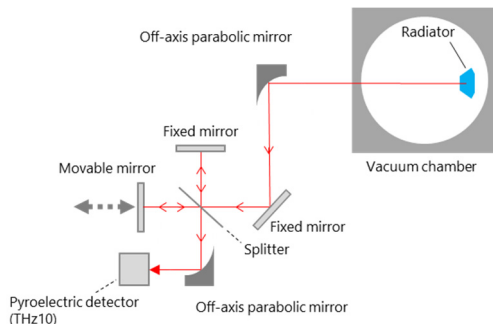


Figure 5: Schematic view of the measurement system using the Michelson interferometer.

3.5 分光測定の結果

Figure 6 に干渉計で測定したインターフェログラムから得られたチェレンコフ回折放射のスペクトルを示す。インパクトパラメータが大きいほど、高周波成分の減衰が大きいことがわかる。観測されるチェレンコフ回折放射のスペ

クトルは、チェレンコフ放射の強度、カップリングファクター、バンチ形状因子、光取り出し窓や HDPE の透過率の影響を受け、見積もりでは、1 THz 程度にピークが見られるはずであったが、測定結果は、0.4 THz 周辺の強度が最も高くなった。また CTR の高周波成分は 4 THz 程度まで伸びているのに対して、チェレンコフ回折放射は 2 THz 程度であった。両測定時のバンチ形状因子が同一であると仮定すれば、この差異は、カップリングファクターに起因すると思われるが、より詳細な調査が必要である。

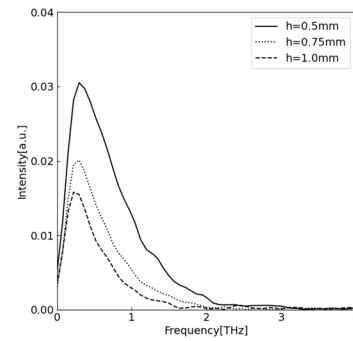


Figure 6: Measured spectra for various impact parameters from 0.5 mm to 1.0 mm. The high-frequency component of ChDR is suppressed at larger impact parameters.

4. まとめ

東北大学電子光物理学研究センターでは、チェレンコフ回折放射を用いた非破壊ビーム診断手法の研究を行っている。ビーム診断にチェレンコフ回折放射を用いる場合、その放射特性の理解が必要不可欠である。今回、チェレンコフ回折放射の角度分布測定と分光に成功したものの、予想とは異なる結果が得られたため、その放射特性について、更なる調査が必要であることが明らかとなった。シミュレーションを併用し、カップリングファクターの適用範囲などを、今後詳細に調査する予定である。また中空誘電体中のビーム位置に対する、放射強度の方位角分布などを測定するための真空容器の検討を行っている。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 18K119154 及び 22K12660 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] S. Ninomiya *et al.*, Proc. of IPAC2019, Melbourne, Australia, (2019) 2536-2538.
- [2] D. Yamamoto, “Basic study of beam diagnostics employing coherent Cherenkov diffraction radiation”, Master Thesis, Tohoku University (2022).
- [3] H. Hama *et al.*, Proc. of IPAC2022, Bangkok, Thailand, (2022) 320-323.
- [4] R. Ulrich, Z. Phys., 194 (1966) 180.
- [5] J. D. Jackson, Classical Electrodynamics, 2nd ed., Wiley, New York (1975).