

t-ACTS における狭帯域チェレンコフ回折放射光の測定

MEASUREMENT OF NARROWBAND CHERENKOV DIFFRACTION RADIATION IN THE THz REGION AT t-ACTS

南部健一[#], 柏木茂, 日出富士雄, 濱広幸

Kenichi Nanbu[#], Shigeru Kashiwagi, Fujio Hinode, Hiroyuki Hama

Research Center for Accelerator and Radioisotope Science (RARiS), Tohoku University

Abstract

We have been conducting studies on non-invasive beam monitor using Smith-Purcell radiation (SPR) and on the application of Cherenkov diffraction radiation (ChDR) when relativistic electrons pass in the vicinity of the dielectric medium at the test accelerator as a coherent terahertz source (t-ACTS) of the Research Center for Accelerator and Radioisotope Science (RARiS), Tohoku University. Although the ChDR spectrum is generally broadband, using a radiator with a periodic structure likely induces monochromatization via interference effects, similar to SPR. While narrowband Cherenkov diffraction radiation (NBChDR) has been achieved in the GHz region using a periodic radiator, our study aimed for the first observation of NBChDR in the THz region. We report the successful narrowing of the ChDR bandwidth in the terahertz region through a proof-of-principle experiment at t-ACTS.

1. はじめに

東北大学先端量子ビーム科学研究センターの試験加速器 t-ACTS (test Accelerator as Coherent THz Source) は、バンチ長が 100 fs 以下の極短電子ビームを安定的に生成できる。我々はこのビームを用いて、チェレンコフ回折放射 (ChDR) やスミス=パーセル放射 (SPR) を応用した非侵襲ビームモニター[1,2]や高輝度 THz 光源に関する研究などを行ってきた。一般に ChDR のスペクトルは広帯域である。我々は荷電粒子が周期的構造を持った金属表面近傍を通過する際に発生する SPR の干渉効果に着目し、周期的構造を有するラジエーターを用いることで、干渉効果により ChDR を、同様に狭帯域化することが期待できると考えた。ギガヘルツ帯での周期構造を有するラジエーターからの ChDR の観測[3]はすでに行われているが、我々はテラヘルツ帯域における狭帯域チェレンコフ回折放射 (NbChDR) の初観測を目指すとともに、テラヘルツ領域の NbChDR の基礎的な放射特性を把握するために、その角度分布や分光測定を行ったので、その結果を報告する。

2. 狭帯域チェレンコフ回折放射

2.1 狭帯域チェレンコフ回折放射

基本的に、ChDR のスペクトルは、チェレンコフ放射と同様に広帯域である。我々はこれまで、SPR の放射特性を応用した非侵襲バンチ長モニターの研究を行ってきた。SPR は、干渉効果によって、狭帯域スペクトルを得ており[4]、これから着想を得て、周期的な構造を有する誘電体を用いることで、同様に干渉効果により ChDR を単色化できるのではないかと考えた。Figure 1 に SPR と NbChDR の概念図に示す。両者共に干渉効果により放射を狭帯域化している。ChDR の狭帯域化が可能になれば、ラジエーターの周期長制御による波長可変性を有する狭帯域 THz 光源や、非侵襲ビーム診断ツールとしての展開

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

が期待できると思われる。

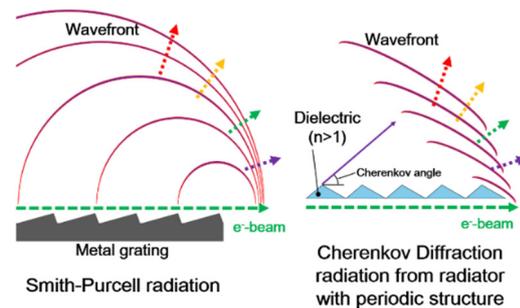


Figure 1: Schematic view of SPR (left) and NBChDR (right) both representing radiation from periodic structures.

2.2 放射波長

NbChDR の放射波長を考える。Figure 2 に示すようなラジエーターの形状を仮定し、電子が A 点から B 点に移動する 1 周期内の同じ位置で、P1s と P2s から放射される光の到達時間を比較する。t1 は P1s で放射された光が P1e に到達するまでの時間であり、t2 は P2s で放射された光が P2e に到達するまでの時間に、電子が A 点から

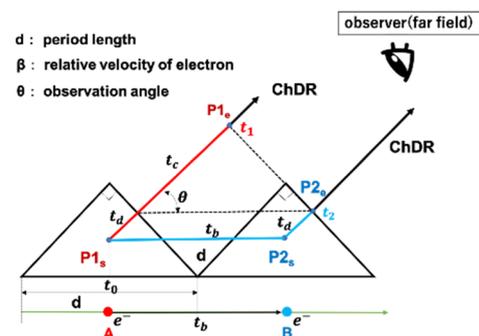


Figure 2: Schematic of ChDR from periodic structures.

B 点移動する時間を足し合わせたものがある。このとき、時間差 $\Delta t = t_2 - t_1$ は、次の Eq. (1) 用いて表すことができる。

$$\Delta t = \frac{d}{\beta c} - \frac{d \cos \theta}{c}, \quad (1)$$

ここで、 d は周期長、 β は電子の相対速度、 θ は観測角である。ホイヘンスの定理より共鳴条件は位相差 $\Delta\varphi$ を用いて $\Delta\varphi = \omega\Delta t = 2\pi m$ ($m = 0, 1, 2, \dots$) とあらわすことができ、この共鳴条件を満たす、波長は、次の Eq. (2) で与えられる。

$$\lambda = \frac{d}{m} \left(\frac{1}{\beta} - \cos \theta \right), \quad (2)$$

この共鳴波長の式は、SPR と同一である。

2.3 NbChDR の放射スペクトル

NbChDR のチェレンコフ角における、放射スペクトルの見積を行った。誘電体内を伝搬する電場の速度は、真空中の伝搬速度より屈折率で除した分だけ低下する。三角形のラジエーターを仮定しているため、電場がラジエーターに入射する位置によって位相差が変化することから、解析的に解くことは難しい。そこでラジエーターの屈折率を 1.536、周期長が 1.6 mm、その周期数が 20 とし、電子とラジエーター間の距離であるインパクトパラメータを 1 mm、電子のローレンツ係数を 43 とし、遅延ポテンシャルを用いた数値計算を行い放射スペクトルの見積を行った。Figure 3 に NbChDR と ChDR の放射スペクトルの計算結果を示す。これらの結果より、周期構造を有するラジエーターを用いることで、チェレンコフ回折放射を狭帯域化できる可能性が示唆された。

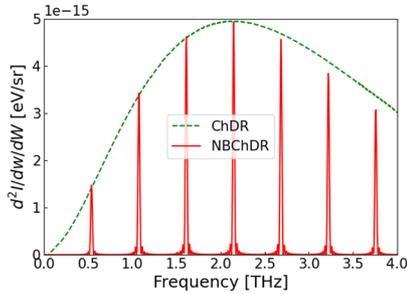


Figure 3: ChDR and NBChDR spectra.

3. 実験セットアップ

3.1 t-ACTS

実験は、東北大学先端量子ビーム科学研究センターの試験加速器 t-ACTS で行われた。実験に用いたビームパラメータを Table 1 に示す。バンチ長は、コヒーレント光学遷移放射のスペクトル解析から求められた。

Table 1: t-ACTS Beam Parameters

Parameter	Value
Beam energy	22 MeV
Macropulse duration	~ 2 μ s
Normalized horizontal emittance	~ 3 mm.mrad
Normalized vertical emittance	~ 30 mm.mrad
Micro-bunch charge	7 pC
Bunch length	~ 80 fs
Beam size	$\sigma_x, \sigma_y \approx 100 \mu$ m

3.2 ラジエーター

実験に使用するラジエーターは、高密度ポリエチレンで製作した。検出器の応答と、ラジエーターの加工性を考慮し、チェレンコフ角において、基本周波数が 0.5 THz もしくは 1 THz となるように、周期長は 0.8 mm もしくは 1.6 mm とした。また周期数は、真空容器の制約から、それぞれ 40 周期と 20 周期とした。ChDR と NbChDR の放射特性を直接比較するために、周期長が 32 mm で、1 周期のラジエーターも準備した。加工に用いる母材の光学特性は、THz-TDS システム(Advantest TAS7500TS-000)で測定され、屈折率は 0.5 から 4 THz までほぼ一定の 1.536 ± 0.003 であった。製作したラジエーターの外寸寸法の確認は、光学顕微鏡で取得したラジエーター端部の画像を解析して行った。Table 2 にその解析結果を示す。周期長と角度の製造誤差はそれぞれ、概ね 3% 及び 2% 以下となり、ほぼ設計値通りのラジエーターを製作できたことがわかった。

Table 2: Measured Values of Radiators

Designed Period Length [mm]	Measured Period length (d) [mm]	Angle (θ) [°]
0.8	0.817 (0.021)	48.02 (0.54)
1.6	1.601 (0.047)	51.53 (0.96)

3.3 実験セットアップ

実験セットアップを Fig. 4 に示す。NbChDR の計測には焦電検出器(Sensor and Lasertechnik GmbH, THz10 [5])を用い、真空容器からの取り出しには、厚み 4 mm、有効径 100 mm の z-cut 水晶窓を用いた。測定システム全体を、高分子膜式エアドライヤーで製造した露点温度が -20 度以下の乾燥空気を常時供給して連続置換することで、水蒸気による吸収の影響を抑制している。焦電検出器からラジエーターの中心までの距離は 190.6 mm で、検出器のアクセプタンスは $\pm 1.5^\circ$ である。検出器は自動ステージを用いて、常にラジエーターの中心に正対するように位置調整を行った。測定毎に、z-cut 真空窓の大気側にアルミ板を設置し、バックグラウンドを測定し、測定値から差し引いた。

ビームの位置とプロファイルは、ラジエーター入口に設置したプロファイルモニターで測定し確認した。ビーム電流は、実験セットアップの上流と下流にビーム電流モ

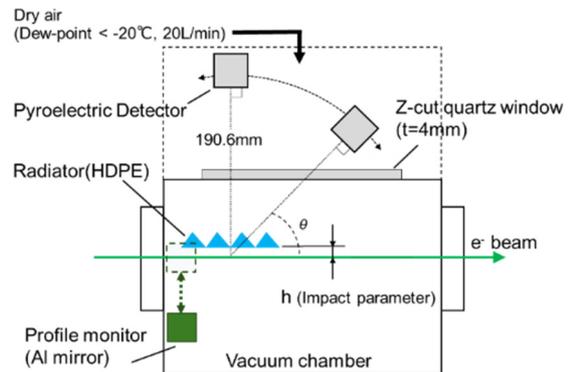


Figure 4: Schematic of detection apparatus for NBChDR.

ニターで測定を行い、実験中のビーム透過率が変動しないか監視を行った。ビームとラジエーター間の距離すなわちインパクトパラメータを 0.5 mm に設定すると、ビーム電流の透過率は変化しないが、真空容器中の真空度が僅かに変化することが確認された。そこでインパクトパラメータを 1.0, 1.5, 2.0 mm に設定して実験を行った。

4. 実験結果

4.1 角度分布測定

Figure 5 に ChDR と NbChDR の放射角度分布測定結果を示す。検出器は、ラジエーター中心からビーム軸方向の垂線と、ビーム軸との交点を中心とする円弧に沿って、30 度から 90 度まで、5 度刻みで移動させて角度分布の測定を行った。各位置で各々 30 回測定し、その平均値を測定値、その標準偏差をエラーバーとしてプロットした。いずれの測定結果も、チェレンコフ角の近傍に、放射のピークが現れることが確認できた。また ChDR の測定結果と比較して、NbChDR はチェレンコフ角から離れた角度においても、有意な放射があることが確認できた。

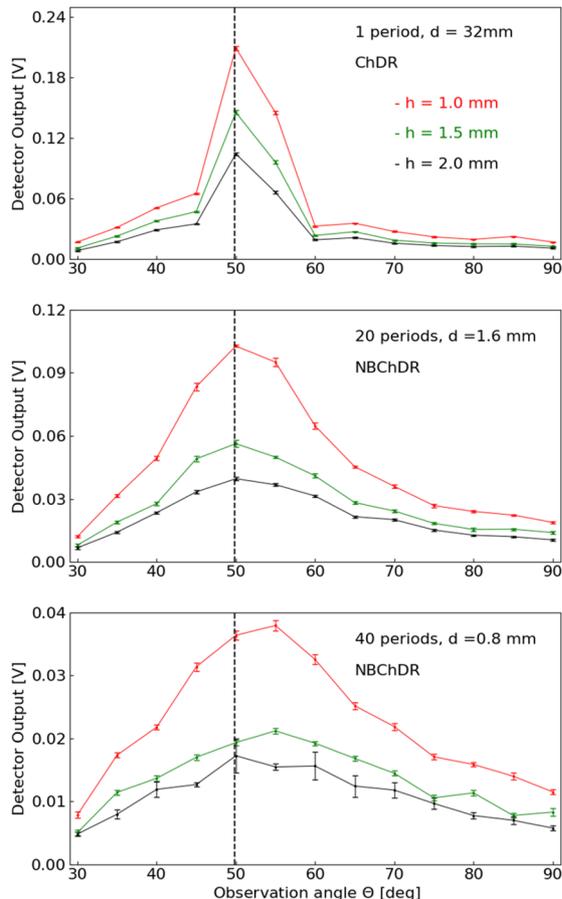


Figure 5: Measured angular intensity distributions of ChDR and NbChDR. Dashed black vertical lines denote the Cherenkov angle.

4.2 分光測定

分光測定は、マイケルソン干渉を用いて行った。角度分布測定において、検出器を設置した位置に、有効焦点距離が 190.6 mm の非軸放射面鏡を設置し、平行光

に変換した後、それを干渉計に入射して測定を行った。干渉パターンは、40 度から 60 度まで 5 度刻みで取得し、それをフーリエ変換することで、周波数スペクトルを得た。Figure 6 に測定された基本周波数と観測角の関係を示す。推定された基本波長の FWHM をエラーバーとしている。基本周波数すなわち共鳴周波数は、周期長と放射角度によって変化していることが確認でき、また予測ともよく合っていることがわかった。

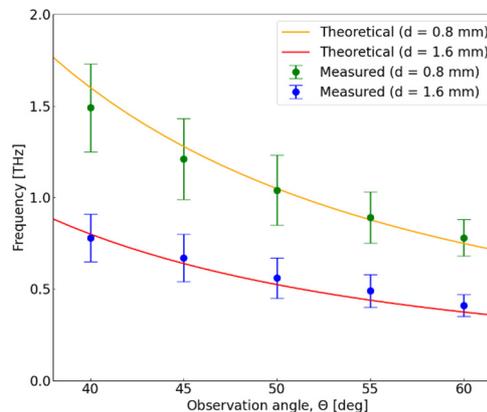


Figure 6: Comparison between estimated and observed 1st order frequency vs. radiation angle.

5. まとめ

t-ACTS において、周期的構造を有する高密度ポリエチレンをラジエーターに用いた、テラヘルツ領域の NbChDR の観測を試み、それに成功した。放射角度分布の測定では、チェレンコフ角近傍に、放射強度のピークを観測し、それ以外の角度においても有意な放射が存在することが確認できた。また分光測定においては、観測された共鳴周波数が、放射角度と周期長から導かれる理論値とよく一致していることが確認できた。

NbChDR をビーム診断のプロブとして使用するためには、NbChDR の基礎的な放射特性をより深く理解する必要がある。測定された干渉パターンは、予測と比べ干渉縞が不明瞭であり、詳細な調査を行う必要があると考えている。現在真空窓通過時の屈折効果を抑制した、新しい実験セットアップの構築を進めている。これを用いて放射特性の測定実験を再度行う予定である。

謝辞

本論文の一部は、熊谷航平氏の修士論文[6]の一部です。また本研究の一部は、JSPS 科研費 18K119154 及び 22K12660 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] H. Hama and K. Nanbu, “Study of Cherenkov Diffraction Radiation for Beam Diagnostics”, in Proc. IPAC’22, Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 320-323.
doi:10.18429/JACoW-IPAC2022-MOPOPT033
- [2] H. Yamada *et al.*, “Study of Coherent Smith–Purcell Radiation in the Terahertz Region Using Ultra-Short Electron Bunches”, Particles 2023, 6(3), 693-702.
https://doi.org/10.3390/particles6030042.

- [3] P. Karataev, G. Naumenko, A. Potylitsyn, M. Shevelev and K. Artyomov, “Observation of quasi-monochromatic resonant Cherenkov diffraction radiation,” *Results Phys.*, vol. 33, p. 105079, Feb. 2022. doi:10.1016/j.rinp.2021.105079
- [4] S. J. Smith and E. M. Purcell, “Visible Light from Localized Surface Charges Moving across a Grating,” *Biophys. Rev.*, vol. 92, no. 4, pp. 1069–1069, Nov. 1953. doi:10.1103/physrev.92.1069
- [5] SLT, Sensor-und Lasertechnik, <https://www.pyrosensor.de/Standard-924644.html>
- [6] K. Kumagai, “Study of narrow-band Cherenkov diffraction radiation in the THz region”, thesis, Tohoku University, Sendai, Japan (2023).