

t-ACTS における中空誘電体からのチェレンコフ光の測定

MEASUREMENT OF CHERENKOV RADIATION FROM HOLLOW DIELECTRIC AT t-ACTS

南部 健一[#], 日出 富士雄, 柏木 茂, 武藤 俊哉, 齊藤 寛峻, 森田 希望, 山田 悠樹, 鹿又 健, 高橋 健,
長澤 育郎, 柴田 晃太郎, 三浦 禎雄, 濱 広幸

Ken-ichi Nanbu[#], Fujio Hinode, Shigeru Kashiwagi, Toshiya Muto, Hirotoishi Saito, Nozomu Morita, Hiroki Yamada,
Ken Kanomata, Ken Takahashi, Ikuro Nagasawa, Koutaro Shibata, Sadao Miura, Hiroyuki Hama
ELPH, Tohoku University

Abstract

Cherenkov radiation when electron beam passes vicinity the dielectric material, will offer non-destructive beam diagnostics for Laser plasma accelerators. A basic experimental study on Cherenkov radiation for developing a novel beam position monitor has been conducted at test accelerator facility, t-ACTS. We measured the intensity distribution of Cherenkov radiation with respect to the beam position. If the azimuth distribution of Cherenkov light from hollow dielectric is measured, we can derive the beam position from a coupling factor. The position resolution in this beam monitor was estimated. If the beam size is small enough compared to the radius of the hollow dielectric medium, the position resolution in this system is less than 5 μm .

1. はじめに

近年、テーブルトップサイズの超小型加速器実現に向け、従来の加速器に比べて加速勾配が大きいレーザープラズマ加速器の研究が世界中で行われている。ビーム繰り返し度が非常に低いなどの課題もあるものの、プラズママイクロオプティクスなどの技術が開発されるなど再現性の改善は図られつつある[1, 2]。しかしながらレーザープラズマ加速器の実用化のためには、ビーム位置などをシングルショットかつ非破壊で測定することができるビームモニターが必須であり、また一方では近年チェレンコフ放射を用いた非破壊型ビームモニターの研究が盛んにおこなわれている[3, 4]。このような背景のもと東北大学電子光理学研究センターでは、中空誘電体内部を電子ビームが通過した際に放射されるチェレンコフ光を測定することにより、非破壊でビーム位置を測定するビーム位置モニターの研究を行っている。これまでに円柱状の穴を有する中空誘電体(ラジエーター)内部を電子ビームが通過する際に放射されたコヒーレントチェレンコフ光の観測に成功するとともに、電子ビームとラジエーターとの距離に依存してチェレンコフ光の強度が変化することを確認した。また測定精度について検討を行ったので報告する。

2. 中空誘電体からのチェレンコフ光

チェレンコフ光とは、荷電粒子が誘電体中を通過する際に、荷電粒子の速度が誘電体中における光の位相速度を超えることで発生する光のことである[5]。チェレンコフ光の放射角度は(1)式で表される。

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n_{(\omega)} \beta}, \quad (1)$$

ここで、 θ_c 、 $n_{(\omega)}$ 、 β はそれぞれ、チェレンコフ角、誘電体の屈折率、荷電粒子の速度である。また荷電粒子が誘

電体中を通過したときに波長 λ_1 から λ_2 の間で発生するチェレンコフ光の光子数 N は式(2)で表される。

$$N = 2\pi\alpha L \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n_{(\omega)}^2}\right) \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right), \quad (2)$$

ここで、 α は微細構造定数であり、 L は荷電粒子の軌跡に沿った誘電体の厚みである[5]。荷電粒子が誘電体近傍を通過した際の放射強度に関しては、荷電粒子の横方向のフーリエ成分と誘電体までの距離を用いた Coupling factor: K と呼ばれる係数を、(2)に乗ずることで表すことが出来る。

$$K = \exp\left(-4\pi \frac{r}{\gamma\beta\lambda}\right), \quad (3)$$

ここで、 r は荷電粒子と誘電体間の距離、 γ はローレンツファクター、 λ は観測波長である[6]。(3)式から荷電粒子と誘電体表面の距離が近いほど減衰が小さく、観測する波長が短いほど減衰が大きくなる。Figure 1 にレーザープラズマ加速器の目標性能であるビームエネルギーが 1 GeV のときと、後述するビーム実験時のビームエネルギー 22 MeV の場合の Coupling factor の波長依存性を示す。

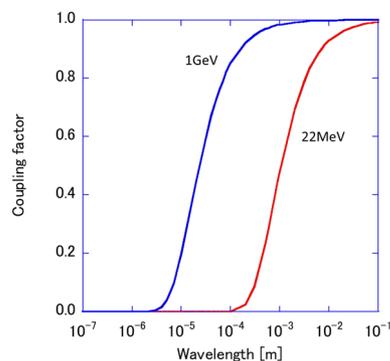


Figure 1: Solid lines show the variation of Coupling factor (K) for different wavelength. The distance from beam to dielectric medium is set to 2.5 mm.

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

Figure 1 から、レーザープラズマ加速器のビーム診断に中空誘電体からのチェレンコフ光を用いる場合、観測波長域としては、 $10\ \mu\text{m}$ 程度の中赤外領域となることがわかる。試験加速器 t-ACTS のようにビームエネルギーが低い場合は Coupling factor による減衰の効果により、可視光領域はもちろんのこと、中赤外領域でもチェレンコフ光を観測することが出来ない。Figure 1 から 22 MeV の場合はテラヘルツ領域であれば、Coupling factor による減衰効果は限定的となり観測が可能になると考えられる。しかしながらチェレンコフ光の強度は(2)式から波長 λ に反比例して減少するため、テラヘルツ領域でのインコヒーレント放射の観測は困難である。しかしながらチェレンコフ光の波長がバンチ長よりも長い場合はコヒーレント放射となり、放射される光の強度は電子数の 2 乗に比例するようになる。試験加速器 t-ACTS は、Velocity bunching 法により 100 フェムト秒以下の極短電子バンチを生成することができ、1 THz 程度であれば形状因子の値は 0.8 を超えるためコヒーレント放射[7]となり、観測可能と考えた。

3. ビーム位置モニターシステムの検討

3.1 Coupling factor の方位角分布

Coupling factor は電子ビームと誘電体間の距離に対応して値が大きく変化する。言い換えればこれは、チェレンコフ光の放射強度がビーム通過位置に強く依存することであり、ビーム位置モニターへの応用ができないか検討を行った。

中空誘電体中をビームが通過する場合、ビームの通過位置と中空誘電体間との距離 l は、次の(4)式で表すことができる。

$$l = \sqrt{r_0^2 + R^2 - 2r_0R(\sin\theta \sin\theta_0 + \cos\theta \cos\theta_0)}, \quad (4)$$

ここで R は中空誘電体の穴の半径、 θ は観測方向の方位角、中心からビームの通過位置までの距離と角度がそれぞれ r_0 と θ_0 である。(4)式を(3)式に代入すると Coupling factor の方位角分布 $K(\theta)$ を得ることが出来る。理想的な場合を考えると、ビームが中空誘電体の中心を通過する場合、ビームと誘電体間の距離は一定であるためリングの輝度も同様に一定の値となるはずである。

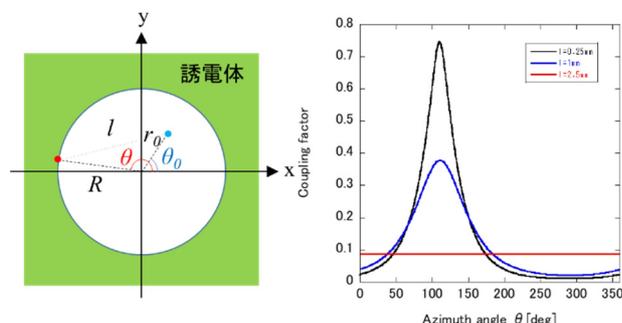


Figure 2: Left schematic view indicates the positional relationship between the beam and the hollow dielectric medium. Blue dot indicates the beam position. Right plot shows the variation of coupling factor for different distance from the beam to the dielectric medium at $\theta_0 = 110$ degree.

方ビームが中空誘電体の中心を通過しない場合は、ビームと誘電体間の距離が変化するため、Coupling factor の値が方位角によって大きく変化することがわかる (Fig. 2)。

3.2 ビーム位置の算出

放射されるチェレンコフ光の方位角分布は、チェレンコフ光の放射強度 $I(\omega)$ に媒質内での吸収と Coupling factor を乗じた(5)式で表すことができる。

$$I(\theta) = I(\omega) \cdot \exp(-A_{(\omega)}L) \cdot K(\theta), \quad (5)$$

ここで、 $A_{(\omega)}$ は光吸収係数、 L は誘電体の厚みである。ビームエネルギーと観測波長を決めると理想的な条件下では、 $I(\omega)$ 、 $A_{(\omega)}$ 、 L に方位角依存性はなく、チェレンコフ光の方位角分布は $K(\theta)$ にのみ依存する。すなわちチェレンコフ光リングの方位角分布 $I(\theta)$ からビーム位置(r_0 , θ_0)を算出することができる。

3.3 位置測定精度の評価

本ビーム位置モニターシステムの位置分解能を評価する。ビームが中空誘電体の中心を通過するときの Coupling factor が 0.1 となるように、ビームのローレンツ因子 γ と中空誘電体の穴の半径 R 及び測定波長 λ を設定し、シミュレーションを行った。Figure 3 にビームサイズを変化させたときの位置分解能を示す。ビームサイズ σ_b が大きくなると、 $\Delta r_0/R$ 、 $\Delta\theta_0$ 、共に大きくなり測定精度が悪化することがわかる。一方 σ_b/R が 0.04 以下であれば、 $\Delta r_0/R$ は 0.001 以下となり、また同様にビームサイズが小さければ $\Delta\theta_0$ も十分小さな値であることから比較的良好な位置精度が得られることがわかった。具体的には原理実証実験を行う試験加速器 t-ACTS のビーム ($\gamma = 43$) 計測を考えると、観測波長を 1 THz、中空誘電体の穴の半径を 2.5 mm とすると、ビームが中空誘電体の中心を通過する際の Coupling factor は 0.09 となり、このときビームサイズが $100\ \mu\text{m}$ 以下であれば位置精度は $5\ \mu\text{m}$ 以下となる。このことから理想的な条件ではあるが一般的な BPM とほぼ同じ測定精度が得られる可能性が示唆された。

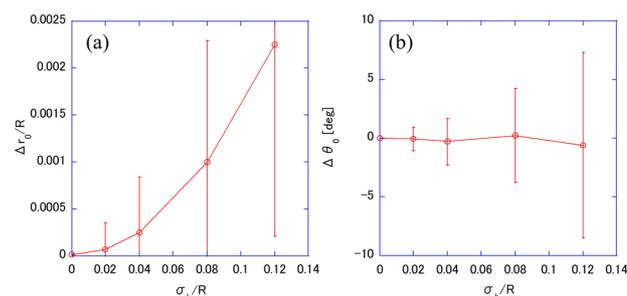


Figure 3: The position resolution for different beam size. An error bar represents the typical standard deviation of the fitting results.

4. 中空誘電体からのテラヘルツ領域におけるチェレンコフ光の観測

中空輻射体からのチェレンコフ光の観測実験は試験加速器 t-ACTS のビーム診断部で行われた[8]。実験で

はシリカエアロゲル製中空輻射体(孔径: 直径 5 mm、厚さ: 25 mm、屈折率: 1.03)を用い、1 THz 程度のコヒーレントチェレンコフ光の観測に成功するとともに、ビーム位置によるチェレンコフ光の強度変化すなわち Coupling factor 依存性を確認することができた(Fig. 4)。一方、実験セットアップに起因する回折放射や、エアロゲルの透過率に起因するチェレンコフ光の強度低下などの課題が残った。

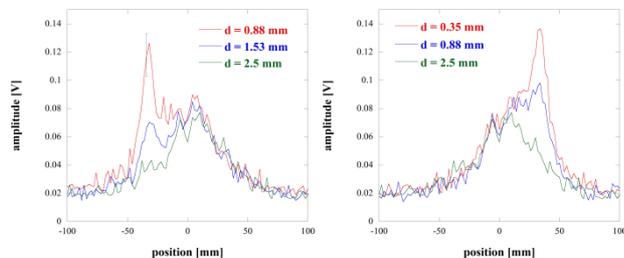


Figure 4: Beam position dependence of the radiation intensity. The beam was steered to -1.05, -1.65 mm (left) and +1.35, +1.85 mm (right). An error bar represents the typical standard deviation of the measured signal amplitude from a Pyroelectric detector.

5. 実験計画

4章で述べたように中空誘電体にエアロゲルを用いた場合でもビーム位置によるチェレンコフ光の強度変化を確認することができたが、セットアップに起因する回折放射や、チェレンコフ光の取り出しに使用した真空窓とエアロゲル中での吸収などにより観測されるチェレンコフ光の強度が小さく、S/N 比が悪いため、このままではビーム位置測定を行うことは難しい。ビーム位置測定を行うためにはチェレンコフ光の輝度向上が必要不可欠であるため、現在 THz 領域での吸収が小さい高密度ポリエチレン (High Density Polyethylene (HDPE)) を中空誘電体として使用する実験を計画している。実験に使用する HDPE の透過率はテラヘルツ光サンプリング解析システム (TAS7500TS @ADVANTEST Corp.) を用いて測定され、1THz での吸収係数は 0.02 と非常に小さな値であった。また HDPE の屈折率は 1.53 とエアロゲルの 1.03 に対して大きいことから原理的に放射されるチェレンコフ光の光量も多くなる。これらを考慮するとエアロゲルを用いた従来の実験セットアップと比べ、チェレンコフ光の輝度は二桁程度の向上が見込まれ、S/N 比の向上が期待できると考えている。

6. まとめ

東北大学電子光理学研究センターでは中空誘電体中をビームが通過した際に放射されるチェレンコフ光を応用した非破壊ビームモニターの開発を行っている。チェレンコフ光リングの輝度分布すなわち Coupling factor の方位角分布をビーム位置モニターに応用できないか検討を行った。その結果、中空誘電体内を通過するビームサイズが大きくなると、位置精度が悪化するため、ビームサイズを $\sigma_b/R = 0.04$ 以下程度に制限する必要があることが分かった。この場合の位置精度は

$\Delta r_0/R = 0.001$ 以下となる。原理実証実験は t-ACTS で実施され、中空誘電体としてエアロゲルを用いた実験では、ビーム位置に応じて放射されるチェレンコフ光の強度変化、すなわち Coupling factor 依存性を確認することが出来た。しかしながらチェレンコフ光の強度が弱く、このままではビーム位置測定を行うことが難しい。そのため中空誘電体に HDPE を用いた実験を計画している。

謝辞

チェレンコフラジエーターとして使用した疎水性シリカエアロゲルは千葉大学の河合秀幸准教授と田端誠博士に提供していただきました。また本研究の一部は、JSPS 科研費 18K11915 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] T. Hosokai, A. Zhidkov, A. Yamazaki *et al.*, Appl. Phys. Lett. 96, (2010) 121501.
- [2] Y. Mizuta, T. Hosokai, S. Masuda *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams. 15, (2012) 121301.
- [3] R. Kieffer, “Direct observation of incoherent Cherenkov diffraction radiation in the visible range”, in Phys. Rev. Accel. Beams, vol. 121, no. 5, Aug. 2018.
- [4] M. Bergamaschi *et al.*, “Recent Results Using Incoherent Cherenkov Diffraction Radiation for Non-invasive Beam Diagnostics”, in Proc. IPAC’19, Melbourne, Australia, 2019, pp. 2654-2567.
- [5] I. M. Frank and I. E. Tamm, Compt. Rend. Acad. Sci. URSS 14, pp.109–114 (1937).
- [6] R. Ulrich, Z. Phys. 194, 180 (1966).
- [7] S. Kashiwagi *et al.*, Energy Procedia, vol.89, pp. 346-352, 2016.
- [8] S. Ninomiya *et al.*, “Measurement of Cherenkov Diffraction Radiation from a Short Electron Bunch at t-ACTS”, in Proc. IPAC’19, Melbourne, Australia, 2019, pp. 2536-2538.