

チェレンコフ放射を用いたビーム位置モニターの開発

DEVELOPMENT OF BEAM MONITOR UTILIZING CHERENKOV RADIATION

南部 健一, 日出 富士雄, 柏木 茂, 武藤 俊哉, 齊藤 寛峻, 山田 悠樹, 寺田 健人, 石附 勇人, 山本 大喜,
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, Hirotooshi Saito, Hiroki Yamada, Kento Terada,
Yuto Ishizuki, Daiki Yamamoto, Ken Kanomata, Ken Takahashi, Ikuro Nagasawa, Koutaro Shibata, Sadao Miura,
Hiroyuki Hama

ELPH, Tohoku University

Abstract

Laser-wake field accelerator (LWFA) have attracted much attention and have been developed actively towards practical applications worldwide. LWFA can accelerate electrons to high energies within a very short distance. The recent development of plasma micro optics technology has dramatically improved their beam quality. However, their beam pointing stability is still low compared to conventional RF accelerators. In addition, their beam repetition rate is very low, thus a beam pulse has to be diagnosed simultaneously with its application. Therefore the non-invasive beam monitor using Cherenkov diffraction radiation (ChDR) will contribute to the practical applications of LWFA. We have been conducting a basic study of a beam position monitor using ChDR. Here we report the hole diameter considering attenuation constant in the hollow radiator and estimated accuracy of the beam position monitor.

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、従来の高周波型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。現時点において、電子ビームのポインティングスタビリティには改善の余地があり[1]、シングルショットかつ非破壊でビーム位置測定ができれば、レーザープラズマ加速器の実用化に貢献することができる。東北大学電子光物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光を用いた非破壊ビーム位置モニターの開発を行っている。誘電体の形状や測定精度など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[2]。チェレンコフ光の放射角度は以下の Eq. (1) で表される。

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

ここで、 θ_c , n , 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するときに放射するチェレンコフ光の光子数 N_0 は次の Eq. (2) で表される。

$$\frac{d^2 N_0}{d\lambda dl} = \frac{2\pi\alpha Z_e^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \quad (2)$$

ここで、 λ , α , Z_e はそれぞれチェレンコフ光の波長、微細構造定数、荷電粒子の電荷である[2]。荷電粒子が誘電体近傍を通過した際の放射強度は、誘電体中を通過

するときに比べ小さくなり Coupling factor: K と呼ばれる係数を、Eq. (2) に乗ずることで得ることができる。

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

ここで、 d 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[3, 4]。Equation 3 から荷電粒子と誘電体表面の距離に近いほど減衰が小さく、観測する波長が長いほど減衰が小さいことがわかる。Figure 1 にビームと誘電体間の距離を 3.5mm としたときの、ビームエネルギーの違いによる Coupling factor の変化を示す。レーザープラズマ加速器の到達目標である 1 GeV では赤外線領域から Coupling factor が立ち上がることがわかる。一方 100MeV ではテラヘルツ領域、10MeV ではミリ波領域で Coupling factor が立ち上がり、同じセットアップでもビームエネルギーに応じて観測波長領域が大きく異なる。

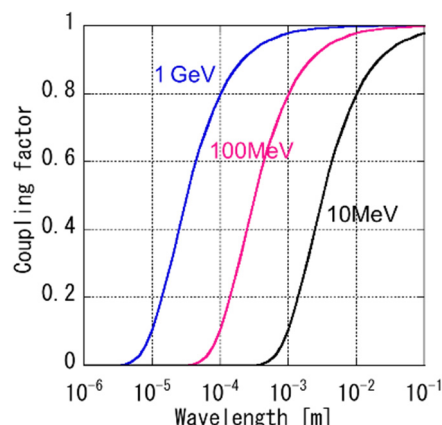


Figure 1: Solid lines show the variation of Coupling factor (K) for different electron beam energy. The distance from beam to dielectric medium is set to 3.5mm.

nanbu@ins.tohoku.ac.jp

3. ビーム位置モニターの検討

3.1 チェレンコフ光の方位角分布

Coupling factor は、荷電粒子と誘電体表面からの距離に応じて値が大きく変化する。このことから、チェレンコフ光の放射強度は誘電体からの距離、すなわち電子ビーム通過位置に強く依存することを示唆している。電子ビームが中空誘電体中を通過する際、ビームの通過位置と中空誘電体間の距離 l は次の Eq. (4) で表すことができる。

$$l = \sqrt{R^2 + r_0^2 - 2r_0R \cos(\varphi - \varphi_0)} \quad (4)$$

ここで、 R は誘電体にあけた穴の半径、 θ は穴の中心から観測方向を見たときの方位角、 r_0 と θ_0 はビームの通過位置の極座標表示である。Eq. (3) および Eq. (4) から Coupling factor の方位角分布 $K(r_0, \varphi_0, \varphi)$ を得る事ができる。

$$K(r_0, \varphi_0, \varphi) = \exp\left(-4\pi \frac{\sqrt{R^2 + r_0^2 - 2r_0R \cos(\varphi - \varphi_0)}}{\beta\gamma\lambda}\right) \quad (5)$$

電子が中空誘電体の中央を通る場合、ビームと誘電体間の距離は方位角によらず変化しないため、Fig. 2(右)の赤線で示すように Coupling factor は方位角によらず一定の値となる。一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、Fig. 2(右)の青・緑線のように Coupling factor の値も大きく変化することがわかる。

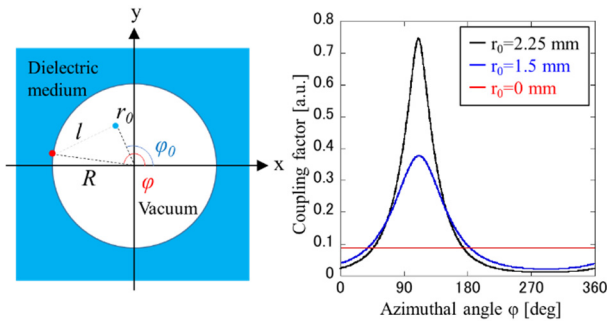


Figure 2: (Left) Schematic view of the positional relationship between the beam and the hollow dielectric. The blue and the red dots indicate the beam position and the intersection point of the observation direction with the inner surface of the dielectric, respectively. (Right) Plot of the coupling factor as a function of the azimuthal angle for different r_0 at $\varphi_0 = 110^\circ$; here, the inner radius of the hollow dielectric medium is set to 2.5 mm. The solid red line shows the coupling factor when the beam passes through the center of the hollow dielectric.

3.2 中空誘電体の厚み

Equation (2) からわかるように、チェレンコフ光の強度は誘電体の厚みに比例する。しかしながら誘電体中での吸収が大きい場合、その強度は吸収係数で制限される

ため、頭打ちとなる。減衰を考慮した時のチェレンコフ光の強度 $I(r_0, \varphi_0, \varphi)$ を Eq. (6) に示す。

$$I(r_0, \varphi_0, \varphi) = \frac{\eta}{A} (1 - e^{-AL}) \cdot K(r_0, \varphi_0, \varphi) \quad (6)$$

ここで A は誘電体の減衰係数、 L は誘電体の厚み、 η は減衰が無い場合のチェレンコフ光の強度である。Figure 3 に減衰係数を 0.05 から 1.6 まで変化させたときの強度変化を示す。このことから誘電体の減衰係数に応じて厚みを調整する必要があることがわかる。

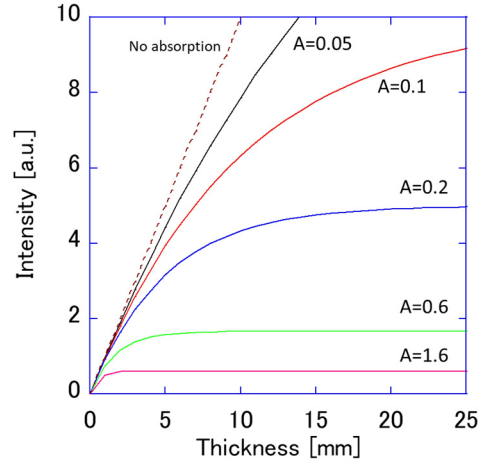


Figure 3: Plot of the intensity as a function of the dielectric thickness. Solid lines shows variation of attenuation constant.

3.3 中空誘電体の穴の大きさ

ビームから誘電体まで最も遠い点を K_1 、最も近い点を K_2 とすると、2 点間のチェレンコフ光の強度比 L_r は各々の Coupling factor の比で表すことができる。強度比が最も高くなるのは、Fig. 4 に示すように、この 2 点と電子が中空誘電体の中心を通る直線上にあるときである。このとき K_1, K_2 点の強度比 L_r は次の Eq. (7) で表すことができる。

$$L_r = \frac{K_2}{K_1} = \exp(B(l_2 - l_1)) \quad (7)$$

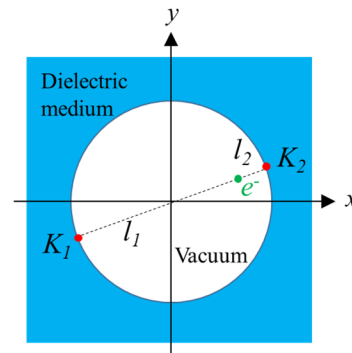


Figure 4: Schematic view of the positional relationship between the beam and observation points. The green dots indicate the beam position.

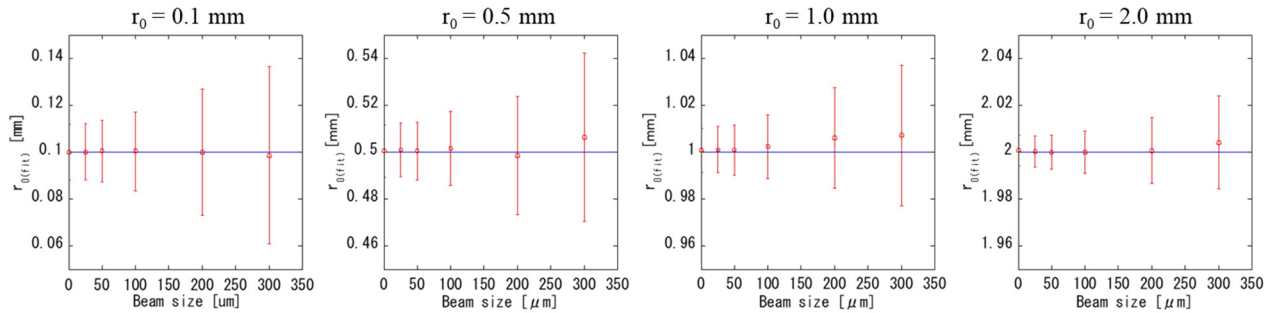


Figure 5: Dependence of the intrinsic position error on the beam size. σ_b is the beam size at the hollow dielectric position.

ここで $B=4\pi/\beta\lambda$ である。Equation (7)を用いて検出器のダイナミックレンジ、観測波長、ビームエネルギーから中空誘電体の穴径を見積もることができる。たとえば検出器のダイナミックレンジを 10dB とし、ビームと誘電体間の最小距離を 0.1mm、ビームエネルギーが 1GeV、観測波長が $10\mu\text{m}$ のとき、中空誘電体の穴の直径は約 7mm となる。

3.4 ビーム位置の算出

電子ビームが中空誘電体中を通過する際に放射するチェレンコフ光の方位角方向の強度分布 (Eq. (6)) は、誘電体中での吸収や厚みに依存せず、Coupling factor にのみ依存する。すなわちチェレンコフ光の方位角分布から中空誘電体中のビーム通過位置を Coupling factor を用いて導出することができることを示唆している。チェレンコフリング全体を観測し、それを方位角積分して得られるチェレンコフ光の方位角分布に Coupling factor を当てはめることで、ビーム位置を導出することができる。

3.5 ビームサイズの影響

ビームサイズの影響を調べるために、3.3 節で見積もったセットアップでビーム位置とビームサイズを各々変えてシミュレーションを行った。ここで電子ビームが中空誘電体の中心を通過するときの Coupling factor は 0.11 であった。Figure 5 にシミュレーション結果を示す。これらの結果からビームサイズが大きくなると位置精度が悪化するため、ビームサイズは小さいほうが望ましいことが示唆された。仮に穴の直径が 7mm、観測波長が $10\mu\text{m}$ 、ビームエネルギーが 1GeV とすると、 $5\mu\text{m}$ 以下の位置分解能を達成するためには、少なくともビームサイズ σ_b を $100\mu\text{m}$ 以下に制限しなければならないことがわかった。

4. 実験計画

中空誘電体からのチェレンコフ光の観測実験は東北大学電子光物理学研究センターの試験加速器 t-ACTS のビーム診断部で行われた[5]。実験では、中空誘電体としてシリカエアロゲル(穴径: 直径 5mm、厚さ: 25mm、屈折率: 1.03)を用い、1THz 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。一方、光取り出し窓での吸収に起因する測定精度の課題が残った。そこで窓材にテラヘ

ルツ帯域での吸収が極めて小さいポリメチルペンテン (PMP) [6]を採用した真空窓を設計・製作し、これを用いて中空輻射体からのチェレンコフ光の観測実験を計画している。現在真空耐用試験の準備を進めている。

5. まとめ

東北大学電子光物理学研究センターでは、電子ビームが中空誘電体中を通過したときに放射するチェレンコフ光を用いた非破壊ビーム位置モニターの開発を行っている。チェレンコフ光リングの強度はビーム位置による Coupling factor の方位角依存性のみ支配されるため、Coupling factor を用いて中空誘電体中のビーム位置を導出することが可能である。検出器のダイナミックレンジや誘電体の吸収特性などから中空誘電体の穴の大きさや厚さを見積もり可能であることがわかった。また測定精度はビームサイズに影響されるが、その影響は限定的であることが示唆された。現在、原理実証実験に向け、中空誘電体からのチェレンコフ光の特性を明らかにするために、新たに開発した PMP 真空窓を用いた ChRD 観測実験を計画している。

謝辞

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] André, T., Andriyash, I.A., Loulergue, A. *et al.*, Control of laser plasma accelerated electrons for light sources. *Nat Commun* 9, 1334 (2018). ; <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03776-x>
- [2] I. M. Frank and I. E. Tamm, *Compt. Rend. Acad. Sci. URSS* 14, pp.109–114 (1937).
- [3] R. Ulrich, *Z. Phys.* 194, 180 (1966).
- [4] T. Takahashi *et al.*, *Phys. Rev. E* 62 (2000) 8606.
- [5] S. Ninomiya *et al.*, in *Proc. 10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'19)*, Melbourne, Australia, May, 2019, pp. 2536-2538.
- [6] <https://jp.mitsuichemicals.com>