

## LFC カメラ用シリカエアロゲル輻射体の真空中での特性評価 OPTICAL TEST OF SILICA AEROGEL RADIATOR FOR LFC CAMERA

南部健一<sup>#</sup>, 柏木茂, 日出富士雄, 柴崎義信, 武藤俊哉, 長澤郁郎, 永沢聡, 高橋健,  
Anusorn Lueangaramwong, 濱広幸  
Kenichi Nanbu <sup>#</sup>, Shigeru Kashiwagi, Fujio Hinode, Yoshinobu Shibasaki, Toshiya Muto, Ikuro Nagasawa,  
Satoru Nagasawa, Ken Takahashi, Anusorn Lueangaramwong and Hiroyuki Hama  
Electron Light Science Centre, Tohoku University

### Abstract

A test accelerator for the coherent THz light source (t-ACTS) has been constructed at Tohoku University, in which the generation of intense coherent THz radiation from sub-picosecond electron bunches will be demonstrated. Measurement of initial electron distribution in the longitudinal phase space produced by an electron gun is crucial for stable production of very short electron bunches. Therefore LFC (Linear Focal Cherenkov) camera has been proposed for measurement of longitudinal phase space distribution directly. A thin silica aerogel in the vacuum chamber is used as Cherenkov radiator for the LFC camera. Absolute value of refractive index of silica aerogel is crucial to calibrate the electron energy observed by the LFC camera. For this reason, we measured it in both the atmospheric pressure and the vacuum. According to measurement results, the refractive index of aerogel in the vacuum diminishes by 0.36% from one in the atmospheric pressure.

### 1. はじめに

東北大学電子光理学研究センターでは、電子加速器を用いたコヒーレントテラヘルツ光源用試験加速器 (t-ACTS) を開発中である。THz 領域の高輝度なコヒーレント放射光生成のためには、100 フェムト秒程度のバンチ長を持つ電子バンチが必要になる。このような極超短バンチ電子ビームを安定に生成するためには、特にビーム生成から加速までの非相対論的領域におけるビームの縦方向位相空間分布を把握しなければならない。そこでシングルショット計測で比較的低いエネルギーの電子ビームの縦方向位相空間を可視化する Liner Focal Cherenkov ring (LFC) カメラの研究開発を行っている。本測定システムは、測定対象となる電子ビームをチェレンコフ光発生用輻射体に入射し、そこから放射されるチェレンコフ光を直線上にチェレンコフ角に応じて焦点を結ぶ特殊な非線形光学系とストリークカメラを組み合わせ、縦方向位相空間の直接観測を行うものである。チェレンコフ光発生用の輻射体として低屈折率のシリカエアロゲルを真空中で使用するが、屈折率などの光学性能が大気中で測定した値と異なると、測定精度に大きな影響を与えてしまう。そこで真空中でのシリカエアロゲルの屈折率の評価を行ったので報告する。

### 2. LFC カメラ

東北大電子光理学研究センターでは、高輝度コヒーレントテラヘルツ光源用加速器の開発を行っている[1][2]。高輝度なコヒーレントテラヘルツ光生成には、100 フェムト秒以下の超短バンチ電子ビーム

の生成が必要不可欠で、現在、試験加速器 t-ACTS (test Accelerator as Coherent THz Source)を使って、極超短バンチ生成実験を行っている[3]。t-ACTS ではバンチ圧縮に電子ビームをゼロクロス近傍のオフレスト位相で加速管に入射し、電子の速度差を利用してバンチ圧縮を行う velocity bunching を用いるため、最終的なバンチ長は加速管に入射する電子ビームすなわち、電子銃から引き出された電子ビームの縦方向位相空間分布に強く影響される。t-ACTS は電子銃にセンターで開発した ITC RF-gun を使用する[4]。ITC RF-gun は 2 つの独立した空洞を持ち、それぞれの空洞に入力する電力と位相を調整して、電子銃出口での縦方向位相空間を操作することが可能であり、velocity bunching に適した縦方向位相空間分布を持つ電子ビームを生成することが可能である。最終的なバンチ長は、電子銃から引き出される電子ビームの縦方向位相空間分布に大きく依存するため、バンチ圧縮に適した縦方向位相空間分布を持つ電子ビームが生成されているか直接観測するために、チェレンコフ光の放射角と電子の速度 (=エネルギー) に (1)式の関係があることを利用し、

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

ここで  $\theta_c$ 、 $n(\omega)$ 、 $\beta$  は、それぞれ、放射角、屈折率、速度である。放射角度に応じて直線状に焦点を結ぶ放物-球面鏡 (Turtle back mirror) 用いてエネルギー分解と時間分解を同時に行い、縦方向位相空間分布を直接観測可能な測定システム LFC カメラの開発に着手した[5][6]。

Turtle back mirror は(2)式で表されるようにチェレンコフ角を直線焦点上の位置情報に変換してエネルギー

<sup>#</sup> nanbu@lms.tohoku.ac.jp

ギー分解を行うため、Figure 1 に示すように電子ビームエネルギーの絶対精度は、チェレンコフ放射体の屈折率に大きく影響される。

$$sf(\beta) = A \cdot n \cdot \beta \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1}{n\beta} \right)^2} \right) \quad (2)$$

ここで  $sf(\beta)$ 、 $A$ 、 $n$ 、 $\beta$  は、それぞれ、直線焦点上の位置、放物面パラメータ、放射体の屈折率、速度である。

LFC カメラはチェレンコフ光発生用の放射体としてシリカエアロゲルを真空中で使用するが、もしシリカエアロゲルの屈折率が 0.5% 変化すると、同じエネルギーの電子ビームを測定しても集光位置が 10mm 程度変化し、これは電子ビームのエネルギーに換算すると 250keV 以上に相当する量になるため問題になると考えられる。Richter らにより、真空中ではシリカエアロゲルの屈折率が大きなもので 2% 程度低下することが報告されている[7]。我々が使用するシリカエアロゲルについても、真空中でこのような大きな屈折率変化が生ずると測定精度に大きな影響が出るため、真空中でのシリカエアロゲルの屈折率測定を行った。

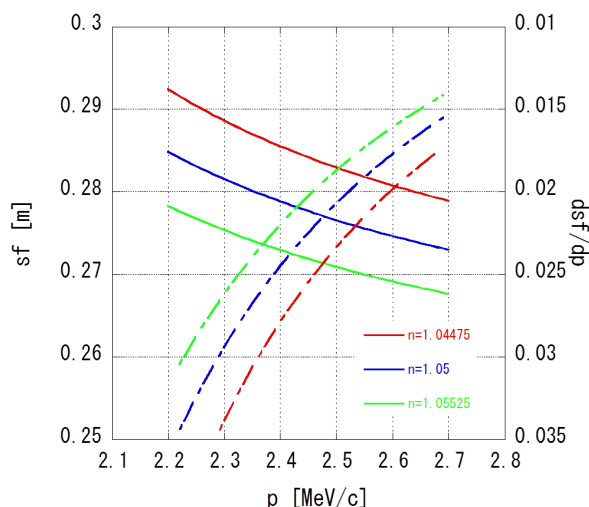


Figure 1: Solid lines denote the focal positions calculated using Eq.(2). Dotted lines indicate those derivatives of the focal position with respect to the momentum. If refractive index differs by 0.5%, observed electron energy is changed more than 200KeV.

## 4. 屈折率測定

### 4.1 測定方法

一般に屈折率は最小偏角法や臨界角法、V ブロック法など様々な測定手法により測定可能であるが、LFC カメラで用いるような薄いシリカエアロゲルの真空中での測定には向いていない。そこで真空容器内でエアロゲルを回転させ、回転によって生じる光路差から屈折率を求める手法を用いた。

エアロゲルを回転させた時の光路差は(3)式で表すことができる。

$$\Delta d = t(n \cos \theta_r - \cos \theta_i) - t(n - 1) \quad (3)$$

ここで  $\Delta d$ 、 $t$ 、 $\theta_i$ 、 $\theta_r$  は、それぞれ光路差、エアロゲルの厚さ、入射角、屈折角である。この式を屈折率についてまとめると(4)式を得ることができ、この式から屈折率を求めることが出来る。

$$n = - \frac{(m\lambda)^2 + 2t(m\lambda - t)(\cos \theta_i - 1)}{2t\{t(\cos \theta_i - 1) + m\lambda\}} \quad (4)$$

ここで  $m$ 、 $\lambda$  は、それぞれ干渉縞の反転回数、レーザーの波長である。

光路差の検出には自由度が高いマッハ・ツェンダー干渉計を使用し、干渉縞のフリッジの変化を測定することで、回転によって発生する光路差を測定する。Figure 2 に測定システムの概略を示す。測定するシリカエアロゲルの屈折率は 1.05 程度であるため回転角を精密に管理する必要があることから、回転角はステッピングモーター (1step : 0.001125deg) で制御することにした。

一般にシリカエアロゲルは脆弱物質であり割れやすいが、使用予定のものは、十分自立する強度を有していたため、Figure 3 のように金属製のホルダーにシリカエアロゲルを固定し、真空容器内に設置することにした。このホルダーは回転導入機を介して真空容器中に設置し、自由に回転させることが出来る。

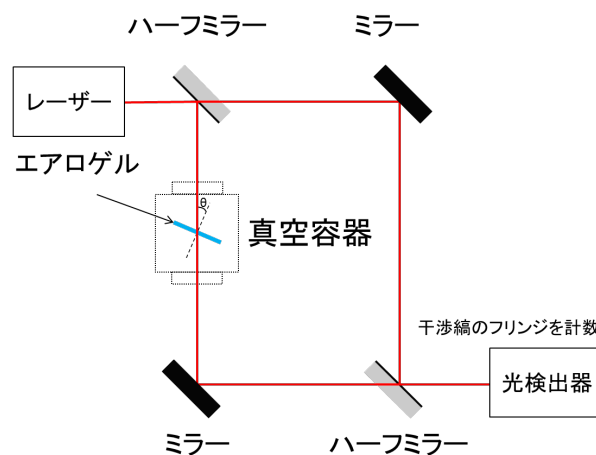


Figure 2: Schematic view of the interferometer for refractive index measurement. Silica aerogel is placed in the vacuum chamber with a rotary manipulator. It is possible to rotate in vacuum. The light source for interferometer is a diode laser with a laser beam expander. The photo detector is photodiode with an amplifier. Output signal of the photo detector is measured by Analog Digital Converter (ADC).

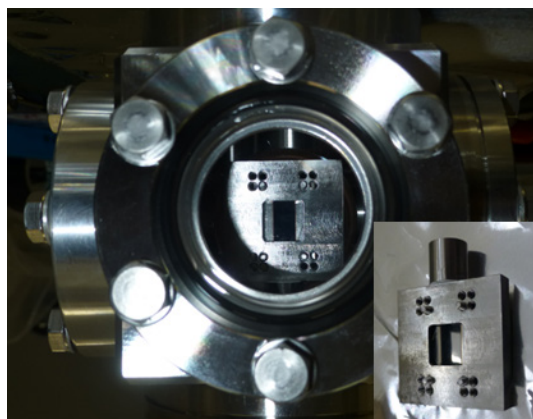


Figure 3: Silica aerogel is supported on a holder made by SUS304 in the chamber.

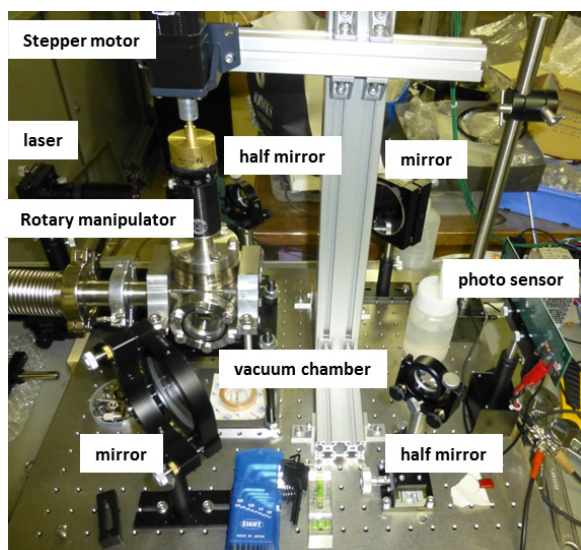


Figure 4: Photo of measurement system.

シリカエアロゲルにレーザーが直入射するとき、干渉縞の明るい部分の中間に光検出器の検出部が位置するように干渉計を調整して測定を行った。ステッピングモーターの回転によって生じる振動が、干渉計に影響し干渉縞が乱れてしまうため、回転後 100 ミリ秒待ってから光強度の測定を行った。測定は各サンプルについて 20 回程度行い、干渉縞の反転回数は光強度信号を 2 次多項式で用いてピーク値検出を行い反転位置と反転回数を求めた。測定装置全体の写真を Figure 4 に示す。

#### 4.3 測定結果

測定は、シリカエアロゲルのサンプル 1、サンプル 2 と測定システムの絶対精度を確認するための屈折率が既知の BK7 製の光学基板(シグマ光機製・OPB-20S01-P) の 3 つに対して行った。解析は、各測定データに対して、干渉縞のフリンジ計測から得られ

た 1 波長毎に光路差と回転角から屈折率を求め、10 波長までの測定結果の平均値を求める屈折率とし、その標準偏差を誤差とした。

測定データを解析して得られた屈折率を Table 1 に示す。光学基板の屈折率は 633nm で 1.515 に対し、測定値は 1.4974(53)であることから、絶対値で 0.0157 程度違っていることが分かった。サンプル 2 は、作製時に屈折率(大気圧)を測定しており、屈折率が 1.049 であることがわかっていた。本測定では、1.0488(6)とかなり近い値を得ることができた。本測定システムは屈折率が小さなものほど測定精度が高いという特徴を有している。これは屈折率が小さくなると、回転に伴う光路差の変化量すなわち干渉縞のフリンジの変化量が小さくなるため、相対的に角度分解能が高くなるためである。ここで本測定システムの角度分解能が屈折率に与える影響を比較すると、本測定においては光学基板では 0.33%、シリカエアロゲルの場合は 0.01%と 1 桁異なる。これらの結果を踏まえると、屈折率が大きな光学基板の測定では誤差が大きいものの、屈折率が小さなサンプル 2 では理論値に近い値を得ることができたので、屈折率が 1.05 近傍では測定システムは十分な精度を有していると考えられる。また大気圧と真空中での屈折率変化に着目すると、サンプル 1 では真空中では僅かに屈折率が小さくなっているが誤差が大きいため有意に変化しているとは言えない。しかしサンプル 2 は大気圧と真空中で誤差を考慮しても有意に屈折率が変化していることが分かった。これらの結果からシリカエアロゲルについては、サンプル数が少ないので断定はできないが真空中では大気中と比較して、僅かながら屈折率が低下する傾向があり、大気中と比較し真空中での屈折率の低下率は大きなものでも 0.36%程度であることが分かった。またこの結果は、Richter らの報告とも矛盾しない。

Table 1: Measurement Result

	大気圧	真空 ( $3 \times 10^{-5}$ Pa)	差分
サンプル 1	1.0448(13)	1.0440(20)	0.0008(23)
サンプル 2	1.0488(6)	1.0450(6)	0.0038(8)
光学基板	1.4974(53)	-	-

## 5. まとめ

LFC カメラでの縦方向位相空間測定のためのチェレンコフ光発生用輻射体として使用するシリカエアロゲルの大気圧及び真空中での屈折率の評価を行った。その結果、使用予定のシリカエアロゲルは、大気圧と比較し真空中では、屈折率が僅かに低下することが分かった。LFC カメラでは、チェレンコフ輻射体の屈折率変化に直接影響を受けるのはエネルギーの絶対精度である。サンプル 2 の屈折率は大気

圧と比較し真空中では 0.36% 程度低下していることが確認できたが、この値を LFC カメラに適用すると、測定によって得られるエネルギーの絶対値が 200keV 程度異なることを意味し、測定精度の点から大きな問題となる。しかし、真空中でシリカエアロゲルの屈折率を測定し、LFC カメラのエネルギー校正を行う際に真空中の屈折率を適用することで、電子ビームエネルギーの絶対値の確度を向上させることが出来ると考えられる。

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 25790078 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] H. Hama et al., N. J. of Phys. 8 (2006) 292.
- [2] H. Hama and M. Yasuda, Proc. of FEL2009, (2009) 394.
- [3] 柏木茂 他 第 11 回日本加速器学会年会(SUOM02)
- [4] T. Tanaka et al., Proc. 27th Int. FEL Conf., Stanford (2005) 371.
- [5] H.Hama et al, Proc of BIW10, (2010) TUCNB03
- [6] K. Nanbu et al., Proc. of FEL2011, (2011) 576.
- [7] D. Richter et al., Measurement of the refractive index of silica aerogel in vacuum, NIM. A 513 (2003) 635.