

OTR Measurement System at LEBRA

Keisuke Nakao*, Ken Hayakawa, Yasushi Hayakawa, Toshinari Tanaka, Kyoko Nogami, Manabu Inagaki
Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Nihon Univ.
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, Chiba, 274-8501

Abstract

An Optical Transition Radiation (OTR) monitoring system has developed for the PXR (Parametric X-ray Radiation) beam line of the Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Nihon University. OTR is emitted from the first Si crystal of the PXR generator and the light is captured by a CMOS camera. Since the radiation directions of OTR and PXR differ, observation of OTR does not affect irradiation of PXR. The images of OTR are obtained in real time in the control room.

LEBRAにおけるORT光観測システム

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA: Laboratory for Electron Beam Research and Application) では、赤外線領域の自由電子レーザー (FEL) および軟 X 線領域の PXR (Parametric X-ray Radiation) を発生させ、医学、歯学、工学系のユーザに提供している。LEBRA では、電子ビームを Si の (111) または、(220) 面に当て PXR を発生させているが、電子ビームが Si 結晶に当たった時に発生する OTR (Optical Transition Radiation) 光を、加速器制御室内で常時観測できるシステムが導入されている。このシステムでは、Si 結晶で発生した OTR 光を、放射線シールドの加速器本体から見て反対側まで導いて CMOS カメラで観測している。カメラで取得された画像は、大実験室内に設置されている PC で取り込まれ、制御室内のディスプレイに表示される。OTR を観測することにより、結晶の位置におけるビームの形状およびビームと結晶の相対位置を常時観測することができ、観測中も PXR 照射に影響を及ぼさない。本発表では、この PXR 運転時の OTR 光観測システムについて報告する。

2. 目的

LEBRA の PXR 発生装置は、PXR を発生させる第 1 結晶と、発生した PXR を反射して取り出しポートに導く第 2 結晶の 2 枚の Si 結晶を用いている。OTR 光観測システムを導入した目的は、ビームが PXR 第 1 結晶に当たっている場所を特定し、PXR 第 1 結晶の位置におけるビームサイズおよび形状を非破壊で測定し、PXR 実験に影響を与えずに観測することである。

3. PXR 発生装置

LEBRA の、125MeV 電子線形加速器で加速された電子ビームは、2つの 45 度偏向電磁石で 90 度曲げられた後、PXR 発生装置に入射される。PXR は図 1 のように、相対論的荷電粒子が結晶に入ったときに発生し、結晶の格子定数を d 、PXR の波長を λ 、電子ビームと結晶のなす角を θ 、任意の整数数を n とすると、以下の関係があ

ることが知られている。

$$d \sin \theta \approx n \lambda$$

一方、OTR は $1/\gamma$ 程度の指向性をもつ。すなわち結晶で発生した PXR は、角度 θ の方向に放射し、発生した OTR は直進するので、これらは別の経路を通ることがわかる。よって OTR の観測は、PXR 発生、照射に影響を及ぼさず、常時観測が可能になる。

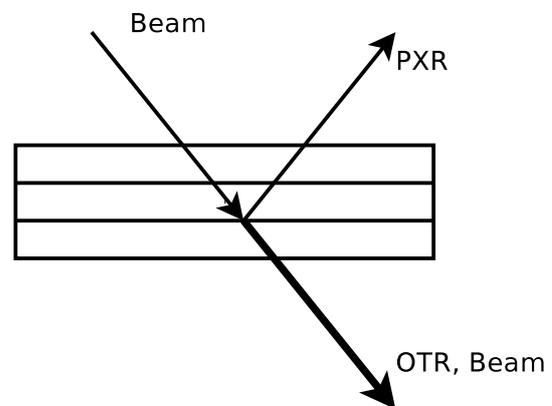


図 1: PXR と OTR の放射方向

4. 光学系

光学系の概略図を図 2 に示す。PXR 第 1 結晶の下流には、ビームをビームダンプに捨てるための偏向電磁石および核チェンバーと呼ばれるチェンバーがあり、OTR 光は核チェンバーにある窓から取り出され、放射線シールドの裏側にある光学系に運ばれる。窓は第 1 結晶からおおよそ 4m のところにあり、直径は 50mm である。窓から出た光は、平面鏡で 90 度上方に曲げられ、さらにもう一度 90 度曲げられ、偏向電磁石の上に設置した平面鏡を経て、放射線シールドと天井の隙間から放射線シールドの裏側にある望遠鏡及び接眼レンズを通り、CMOS カメラに至る。CMOS カメラは移動ステージに乗っており、制御室からフォーカスを調整することができる。

光学系の解像度 δ は、対物レンズの開口数 $N.A.$ と光

* nakao@lebra.nihon-u.ac.jp

の波長 λ で決まり、以下のように書ける。

$$\delta = \frac{0.61\lambda}{N.A.} \quad (1)$$

また、開口数 $N.A.$ は、対物レンズと物体間の媒質の屈折率を n とすると

$$N.A. = n \sin \theta \quad (2)$$

と書ける。ここで θ は、対物レンズに入射できる円錐状の光の角度である。

核チェンバーの窓から望遠鏡のレンズまでの距離は 15.3m、望遠鏡のレンズから接眼レンズまでは、およそ 55cm である。また窓の直径は 50mm であり、発光点から望遠鏡のレンズまでは、真空および空气中を OTR は伝搬する。これらの値を、(1)、(2) 式に代入すると、この光学系の解像度は、 $\lambda = 550\text{nm}$ で $\delta = 0.2\text{mm}$ と算出される。

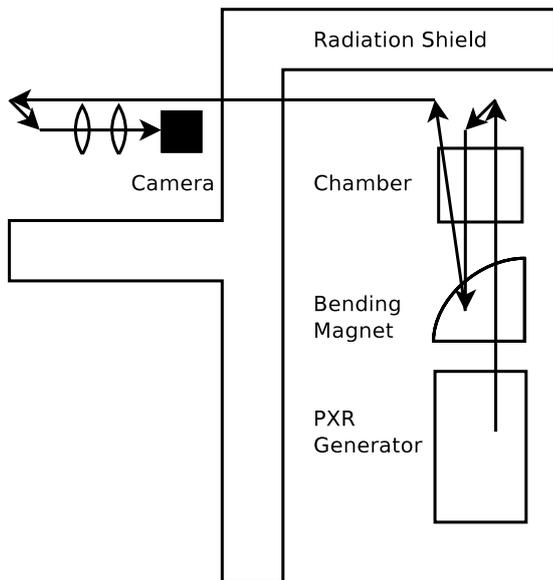


図 2: 光学系の概略図

以前は、PXR 発生装置の上流にあるビームプロファイルモニタのターゲットを 0.1mm 程度の厚さのアルミ板に交換して OTR 光を観測していたが、ターゲットのアルミ板がビームによる損傷をうけたため、PXR 第 1 結晶で発生した OTR 光を観測するようにした。

5. データ収集系

画像を取得するカメラには、Imaging Source 社製の CMOS カメラ DMK21BUC03 を使用している。このカメラは 744x480px の解像度を持つモノクロカメラで、外部トリガーによる同期が可能である。当初、CCD カメラを用いていたが、放射線による素子の損傷が大きく、数日程度の運転でホットピクセルが画面全体に分布することがわかった。また複数の機種の CCD カメラでも同様の損傷があった。一方 CMOS は、CCD に比して放射線耐性があり現在のところ観測に支障がでるほどホットピクセルはできていない。

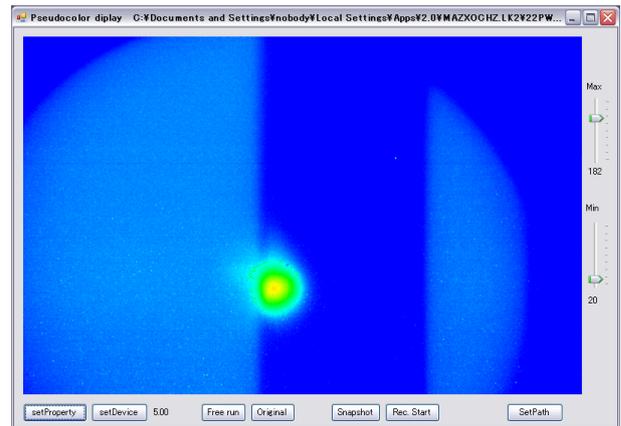


図 3: OTR 画像取得ソフトウェアのスクリーンショット

使用している CMOS カメラは、USB インターフェースを持っている。OTR 観測用にノート PC を大実験室に設置し、この PC のディスプレイ出力を VGA ケーブルで制御室にある CRT に入力している。画像取得用の PC を大実験室に配置し、VGA で制御室まで運んでいるのは、USB の長さ制限で制御室まで届かなかったためである。

OTR 観測ソフトウェアのスクリーンショットを図 3 に示す。このソフトは、フレームレート、ゲイン、シャッタースピード、内部トリガと外部トリガの切り替えなどを行うことはできる。また、取得した画像および動画を保存することができる。

PXR 上流にある、2 番目の 45 度偏向電磁石の窓から、下流に向けて蛍光灯が設置されている。この蛍光灯を転倒すると、第 1 結晶の影を見ることができ、結晶の位置を確認することができる。

取得した OTR 画像の一例を図 4 に示す。この画像を gwyddion^[2] のような画像解析ソフトウェアを用いて、ビームプロファイルを得ることができる。図 5 から、PXR 第 1 結晶でのビームサイズは半値全幅で、鉛直方向が 1.6mm、水平方向が 0.9mm であることがわかる。この時は電子ビームエネルギー 100MeV で、25.6keV の PXR を発生させて動物に照射していたが、この OTR 光の測定は、照射実験に全く影響を及ぼさなかった。

参考文献

- [1] Y.Hayakawa, I.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka: Simulation to the project of a PXR based X-ray source composed of an electron linac and a double-crystal system, Nucl. Instr. and Meth. B 227 (2005) 32-40, Proceedings of the VI Symposium on "Radiation from Relativistic Particles in Periodic Structures" (RREPS-03) (Tomsk, Russia, Sep.8-11, 2003).
- [2] <http://gwyddion.net>.



図 4: OTR イメージの一例

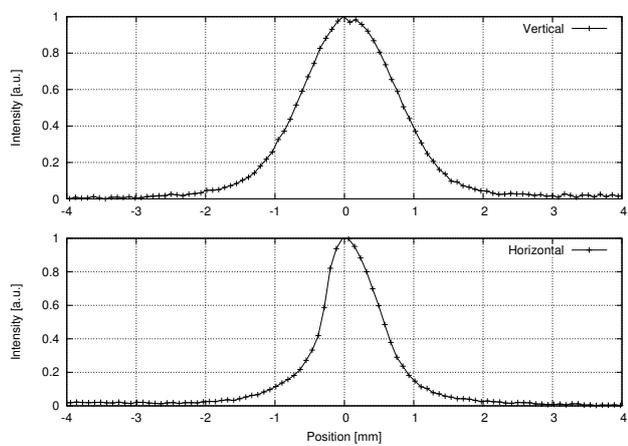


図 5: 図 4 の OTR 画像のプロファイル。上段：鉛直方向、下段：水平方向