

OPTICS OF SCREEN MONITOR FOR XFEL/SPring-8

Kenichi Yanagida^{1A)}, Shinobu Inoue^{B)}, Hiromitsu Tomizawa^{A)}, Akihiro Yamashita^{A)} and Yuji Otake^{B)}

^{A)}JASRI, XFEL Joint Project /SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

^{B)}RIKEN, XFEL Joint Project /SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148

Abstract

A screen monitor with a resolution of less than 10 μm was developed for XFEL/SPring-8. The optical system comprises an OTR foil, lenses for focusing, a movable iris and a CCD camera. In order to realize this resolution, the lenses are placed close to the foil, the distance between the lenses and the foil is 100 mm, and the lenses have a large diameter (2 in.). This optical-geometrical structure contributes much to increase the numerical aperture or to reduce the airy radius of a near field image. Although the range of an observation wavelength is wide as which is from 400 to 800 nm, the resolution on the foil is calculated as 2.5 μm . The experimental data of the developed optics also suggested the same resolution.

XFEL用スクリーンモニタの光学系

1. はじめに

現在 SPring-8 では X 線自由電子レーザー (XFEL) が建設されている。XFEL 実現のためには高品質ビームの生成及びそれを可能にする高精度なビーム計測が必要となる。特にアンジュレータ区間に於いては放射光と電子ビームのオーバーラップを最大化するため横方向空間構造を分解能 10 μm 以下で測定する必要がある。我々は上記精度での空間構造測定を実現するため、スクリーンモニタ (SCM) の開発を行った。

SCM は真空中の蛍光板から発生する蛍光や金属フォイルから発生する OTR (Near Field) を合成石英窓を通して空気中へ取り出し、レンズにより集光し、CCD 上に結像させて撮像する装置である。一般に SCM の撮像には市販のズームレンズを CCD カメラにマウントして行う場合が多い。この場合、各レンズの曲率や硝材の広帯域にわたる分散値やアッペ数、レンズ間距離などの詳細なデータが公開されていないために光学設計・評価ソフトウェアを使用した幾何収差や色収差の計算・検証ができず、得られた画像に関して明確な知見が得にくい。我々は全光学素子のパラメータが既知になるように設計を進める方針とした。そのため、レンズは詳細データが公開されているものを使用するか、新規に設計・製作することにした。本学会では光の発生、集光・結像に関する光学系と SCSS 試験加速器で行った OTR 観測試験の結果に就いて述べる。

2. 光学系の設計

XFEL の全 SCM において、観測すべき発光点の大きさや必要な測定精度によって何種類かの光学系が用意される。ここでは、最小の分解能が要求される 4 倍ズーム光学系の設計条件や有すべき諸性能などを設計思想を含む形で述べることにした。

2.1 視野

CCD カメラは現在のところ CV-M4+CL (JAI) を考えている。CV-M4+CL は 1392(H) \times 1040(V) の画素数を持ち、画素サイズは 6.45 μm (スクエア) である。視野は倍率 4 倍時に 2.2 \times 1.7 mm、倍率 1.2 倍時に 7.4 \times 5.5 mm と比較的小さい。倍率 1.2 倍が必要な理由は発光点を探すためである。

2.2 発光点-レンズ間距離

OTR は AF995R (DESMARQUEST) や Ce:YAG 等の蛍光に比べて測定立体角に入る光量が著しく少ない。特に、四極電磁石の設定が適切でない場合等では、電子ビームのサイズが大きくなり OTR が観測されない場合も起こり得る。そこで、光学系を明るくする為に可能な限り発光点にレンズを近づけることとした。但し、レンズは大気中に置くことを前提とする。これはレンズを開口とする F 値を小さくすることと、ラグランジュの不変量を小さく保てることと同じで分解能を良くするのに寄与する。SCM には照明用の LED や倍率校正用のターゲットを置く必要があり、機器の干渉や設置時の作業性等を考慮して、発光点から最初のレンズ面までの距離を 100 mm とした。

2.3 光学素子の開口

明るく分解能の良い光学系にするためには開口数を出る限り大きく取る必要がある。開口数は光線を遮っている光学素子の開口で制限される。使用する光取り出し窓 (VQ-070、浜松ホトニクス) の開口は $\phi 34$ mm であり、絞り (V-6335RH、日本精密測器) は最大 $\phi 35$ mm である。レンズの開口はこれらの光学素子が確保している開口数を下げないように $\phi 50$ mm 程度 (2 インチ) とした。

¹ E-mail: ken@spring8.or.jp.

2.4 低収差レンズ

OTRの光量を稼ぐため観測波長を400から800 nmと広くした。この広帯域を実現するためレンズは低分散ガラスを使用し、色収差や幾何収差を回折限界程度まで小さくする構成とした。反射によるロス及び迷光を少なくするために、レンズ枚数を極力少なく4枚(2群または3群)とし、1つの鏡筒にマウントすることとした。1つの鏡筒にマウントしたのは、光軸のアライメントを容易に行うためである。

2.5 倍率

CCDカメラを使用して像を観測する場合、CCD画素サイズ以下に光を集光しても、観測されるサイズは画素サイズの大きさとなり、それ以下にはならない。そこで、収差や回折で生じる最小像サイズがCCD画素サイズよりも十分に大きくなる設計とした。

CV-M4+CLを使用する場合、光学倍率が2.1倍の時に最小像サイズとCCD画素サイズが等しくなる。最小像サイズは一般に倍率に比例して大きくなるから、設置場所のスペースなどを考慮して、光学倍率を4倍まで大きくすることにした。

3. 光学系の製作

上記概念設計を踏襲し、光学素子やズーム用ステージ等が配置可能なように、CAD上での機械設計を行った。レンズの設計及び製作に関しては、許容される機械的・光学的仕様を提示した上で藤井光学(株)へ依頼した。設計された光学系の評価及び検証にはソフトウェアZemax(ZEMAX DEVELOPMENT CORPORATION)を使用した。

図1は計算された4倍(有限共役)光学系のレイアウト及び光線追跡である。レンズは3群4枚である。

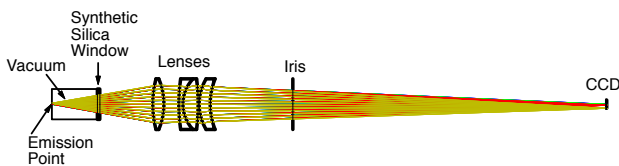


図1: 光学系のレイアウト及び光線追跡

光学系に悪影響を与える合成石英窓は厚さ2.5 mmと薄い。大気と真空の圧力差による窓の歪みは曲率半径が15 m程度と計算され、設計に反影させている。計算により得られた分解能は波長400から800 nmの帯域をフルに活用して、像面で10 μm 、物体面(発光点)で2.5 μm 程度であった。

絞りは最終レンズ面より81.5 mm像側に置かれる。この位置はテレセントリック条件に合致する位置である。絞りは遠隔での瞳半径の設定と読み出しが可能で、読み出し電圧と瞳半径はほぼリニア(一次関数的)であった。瞳半径は通常全開で使用するが、積極的に開口数を変化させたい場合や被写界深度を広く取りたい場合に小さくする。

図2は光学系の写真で、SCSS試験加速器に設置している時のものである。レンズ+絞りとCCDカメラ

はそれぞれ別の駆動ステージに乗っている。レンズを乗せたステージの位置により倍率を決め、CCDカメラを乗せたステージの位置によりピントを調整する^[1]。

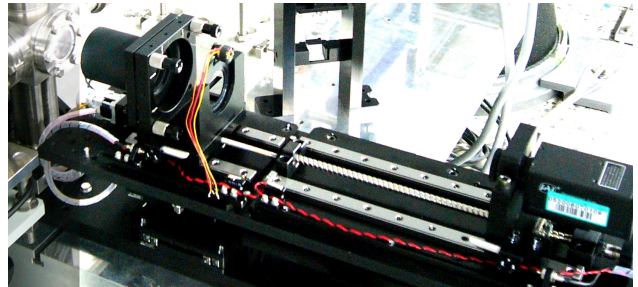


図2: SCSS試験加速器に設置された光学系の写真

4. 評価

4.1 光学系の評価

試験加速器に設置してOTRを観測する前に、暗室で倍率と駆動ステージ位置に関するデータ取得や分解能測定などの光学系評価を行った。使用したターゲットはグリッド・ディスティーション図表(EDMUND OPTICS)で、ドット直径が62.5 μm 、ドット間隔が125 μm のものである(図3参照)。

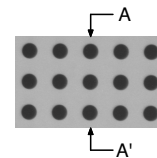


図3: グリッド・ディスティーション図表の画像

図3において、A-A'線に沿った画素強度分布を図4の黒線で示す。強度の高い部分は白であり、低い部分は黒である。青線は強度分布の位置微分である。位置微分の広がり光学系の分解能を表している。半値半幅(HWHM = Half Width at Half Maximum)は9.9 μm (像面)であった。これはZemaxでの計算値、像面で10 μm (物体面で2.5 μm)とほぼ一致している。倍率と駆動ステージの位置関係もほぼ設計通りであることが確かめられた。

4.2 ビーム試験

SCSS試験加速器の250MeV電子ビームを金属フォイルに当て、OTRを観測した。図5はOTRの画像である。OTRの特性を知るために、絞りの瞳半径を変化させ、開口数を変化させて画像データを取得した。ここで、開口数N.A._oは物体(発光点)側で定義されるものとする。取得した画像は開口数が0.011から0.152までの14枚である。電子ビームは四極電磁石を調整して水平軸への射影サイズを最小にした、図5の状態を保持したままとした。

図6は各画像データの画素強度を鉛直方向に足したもの、つまり水平軸への射影で、4つの異なる開口

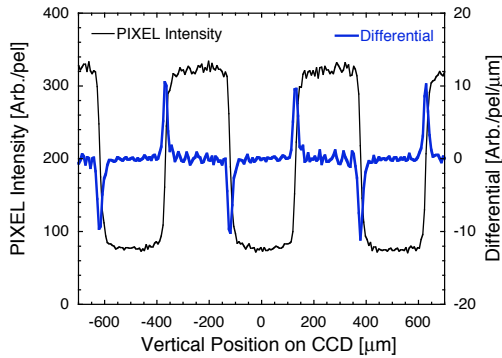


図 4: A-A' 線に沿った画素強度分布 (黒線) とその位置微分 (青線)

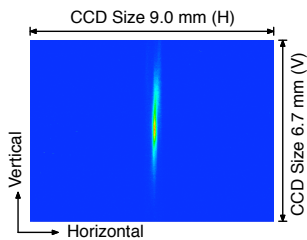


図 5: OTR の画像 (水平軸への射影サイズが最小)

数のものである。各開口数での像強度 (光量の総和) を図 7 の点で、射影分布の半値半幅 (HWHM) サイズを図 8 の点で示す。

OTR は式 (1) に示す角密度分布を持つ [2]。

$$\frac{\theta^2}{(\gamma^{-2} + \theta^2)^2} \quad (1)$$

開口数を変化させた場合の像強度を得るには開口数が規定する角度範囲内で式 (1) を積分すれば得られる。図 7 の実線は像強度の計算値で、測定値 (点) とはスケールの違いを除いてグラフの傾向はほぼ一致している。

図 8 に於いて、開口数を小さくすると像サイズが増大するのは回折による現象である。OTR の回折のみよる像サイズを計算したものを実線で示す。実線と測定値 (点) が一致しないのは、発光点が大きさを持つ

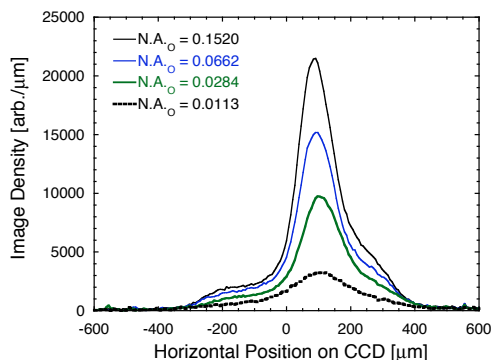


図 6: 各画像データの水平軸への射影

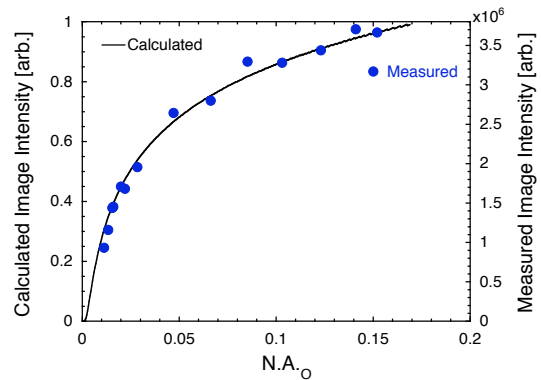


図 7: 開口数を変化させた場合の像強度

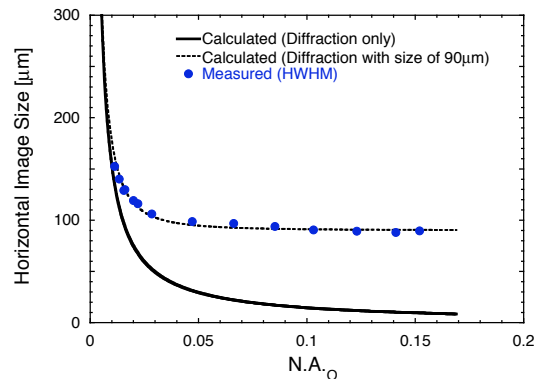


図 8: 開口数を変化させた場合の像サイズ

つためである。仮に像面で $90 \mu\text{m}$ (HWHM) のサイズを想定すると計算値 (点線) と測定値がほぼ一致するため、発光点のサイズはその $1/4$ の $23 \mu\text{m}$ (HWHM) 程度だと思われる。

5. まとめ

SCM 光学系に求められる分解能は $10 \mu\text{m}$ 以下である。レンズは分解能を可能な限り良くするため大口径 ($\phi 2$ インチ) 且つ低色収差 ($400 \sim 800 \text{ nm}$) のものを設計・製作した。分解能は設計値も測定値も共に $2.5 \mu\text{m}$ 程度で要求値に対しては十分な性能であろう。SCSS 試験加速器の 250 MeV 電子ビームを使用した OTR 観測試験では、四極電磁石でビームを絞った時のビームサイズが $23 \mu\text{m}$ (Horizontal) と測定された。8 GeV でのビームサイズは $10 \mu\text{m}$ 以下となるが、現状のシステムで問題は無いであろうと考えている。

参考文献

- [1] S. Inoue, et al., "Screen Monitor Prototype for XFEL/SPring-8", Proc. of the 5th Particle Accel. Soc. of Japan (2008), in Japanese.
- [2] P. Catravas, et al., "Beam Profile Measurement at 30 GeV Using Optical Transition Radiation", Proc. of the 18th Particle Accel. Conf. New York, March 1999, pp. 2111-2113.