

研究

SR リソグラフィービームラインの新しい光軸調整法

島野 裕樹・糸賀 賢二・丸本 健二

三菱電機(株)先端技術総合研究所 〒661 尼崎市塚口本町 8-1-1

(1995年7月20日受付, 1995年9月27日受理)

A New Methodology of Optical Alignment of SR Lithography Beamline

Hiroyuki SHIMANO, Kenji ITOGA and Kenji MARUMOTO

Advanced Technology R & D Center, Mitsubishi Electric Corp.,
8-1-1, Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki 661

(Received July 20, 1995; Accepted September 27, 1995)

A high power X-ray delivery system consisting of a superconducting compact storage ring of racetrack type and a novel beamline with double ellipsoidal focusing mirror optics has been in use for synchrotron radiation (SR) lithography since 1993. Using aberration-free focusing property of the beamline optics, we presented a new methodology to precisely and effectively adjust the mirror arrangement. As a result, the observed optical performance showed fairly good agreement with the designed one.

1. はじめに

設計寸法が $0.15\mu\text{m}$ 以下の半導体デバイスの実現に向けて、1993年から自社内シンクロトロン放射光(SR)リングを用いて、SRリソグラフィーの開発を行っている。SRリングは、ビームエネルギー600 MeVのレーストラック型超伝導小型ストレージリングである¹⁾。SRリングからX線ステッパー(カールズース製XRS-200)へのX線ビーム輸送は、露光面上のX線強度を増大させる集光光学系ビームラインを使用している²⁾。

SRリソグラフィーの立ち上げを早めるため、ビームラインの建設をSRリングおよびX線ステッパーを設置するクリーンルーム(CR)とほぼ同時進行で実施した。Fig. 1はビームラインの設計配置図を示しているが、SR光発光前にSRリング内の電子ビームの設計軌道から定義されるSR光軸に沿って各コンポーネント(ミラーチャンバー、衝撃波遅延管等)およびX線ステッパーをアライメントして配置した。SR光発光後の実際の電子ビーム軌道は、SRリングの設置誤差、電磁石の磁場誤差、冷却水の温度および室内外の気温変化等に

よって当初の設置軌道からずれてくる。この軌道のずれは、SRリングに配置してあるステアリング電磁石の励磁によって補正することができる³⁾。一方、ミラーによって定義されるビームライン光軸もミラーステージに取り付けた6軸ゴニオメーターによってミラーの位置、姿勢を制御することで補正ができるようにした。

電子ビーム軌道補正によって、実際のSR光軸をビームライン光軸近傍に合わせた後、ミラーの位置および姿勢の補正によって残りの光軸のずれを補正し、X線ステッパーに輸送できるX線ビーム形状を光学設計値になるような調整を行った。

ビームライン設置施設がオープンフロアスペースであることを利用して、SR発光後にミラーチャンバー、X線ステッパー等の位置を自由に再配置させて、最終像面(すなわち露光面)上のX線ビーム形状が設計値になるように調整しているところもある⁴⁾。しかし、筆者らの施設はフロアスペース、およびX線ステッパーの位置の調整範囲が、制約されたものであり、一度アライメント設置したコンポーネントを固定した条件のもとで調整を行った。

光軸調整にあたって、まずSR光軸とビームライン光

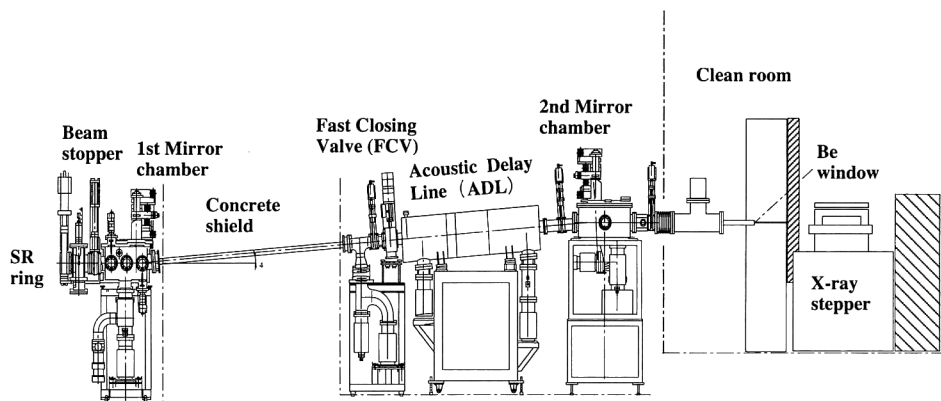


Fig. 1 Design configuration of the beamline.

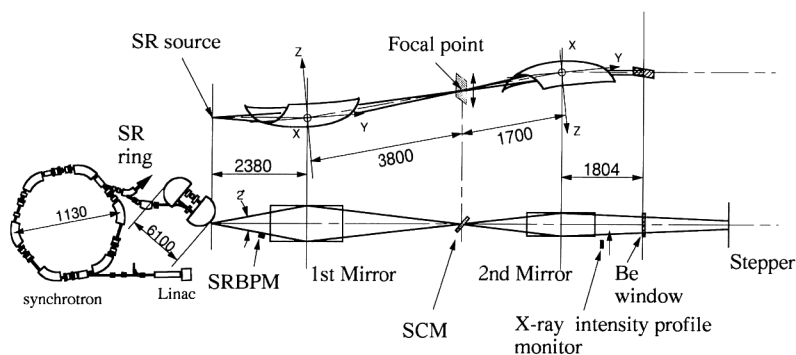


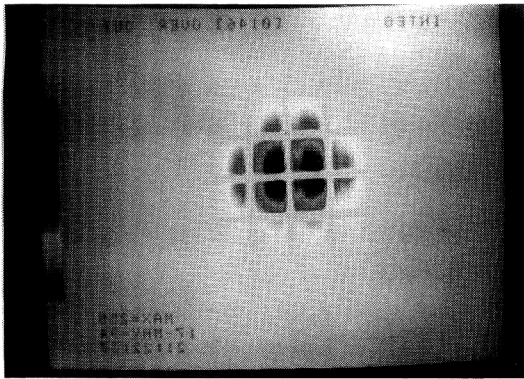
Fig. 2 Schematic diagram of the beamline optics.

軸のずれ量およびその方向を把握しなければならない。一般にはビームライン光軸上で十分に離れた2箇所ですRリングからの直接光の中心位置をSR光モニター等に計測して求めることができる。しかし、Fig. 1に示すように第1段ミラーとSRリング間の距離が十分とれない場合、この手法は適用できなくなる。収差のない集光特性をもつ光学系で構成される筆者らのビームラインでは、その結像でのX線ビームの位置、形状が光軸のずれ情報を与えてくれることを見出した。この情報をもとに電子ビーム軌道およびミラーの位置、姿勢の補正を行った。

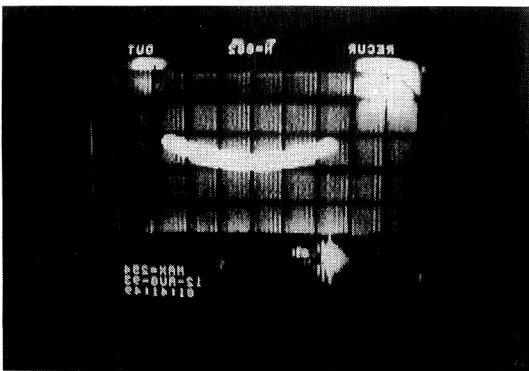
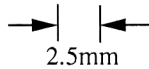
2. ビームライン光学系

ビームラインは、Fig. 2で示すように2枚の回転楕円体ミラーで構成する集光光学系を有する。集光特性を確認するため、第1段ミラーの焦点（以下、中間結像点と呼ぶ）、その1m下流の2箇所蛍光板モニター

(SCM)を、さらに第1段ミラーのすぐ上流には光電子放出型のSR光モニター(SRBPM)⁵⁾をそれぞれ配置した。ミラーは、SiO₂基板を切削加工し、Pt膜を100nm蒸着したもので、基板形状精度±0.6μm、表面粗度0.5nm・rmsに仕上がっており、有効反射面のサイズは、第1段ミラー：幅83mm×長さ349mm、第2段ミラー：幅42mm×長さ332mmである⁶⁾。第1焦点がSR光源点に一致するように配置した第1段ミラーは、水平方向に大きな発散角をもって放射するSR光のうち2°の発散角を取り込み、第2焦点にX線ビームをFig. 3(a)に示すようにいったん、集光させる。ミラーは無収差の集光特性をもっているが、SR光源の空間的広がりによって約4mm×3mmのビームサイズに広がっている(ガウス分布する電子ビームの2σの空間広がり、2.68mm×1.68mmの大きさを第1段ミラーの倍率、1.6倍した程度のビームサイズになっている)。さらに、第2段ミラーは第1焦点がこの結像点に一致するように



(a)



(b)

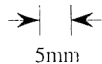
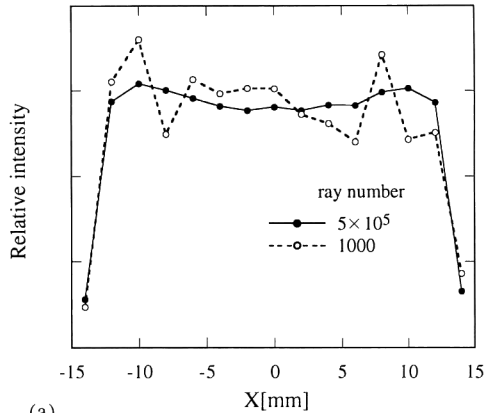
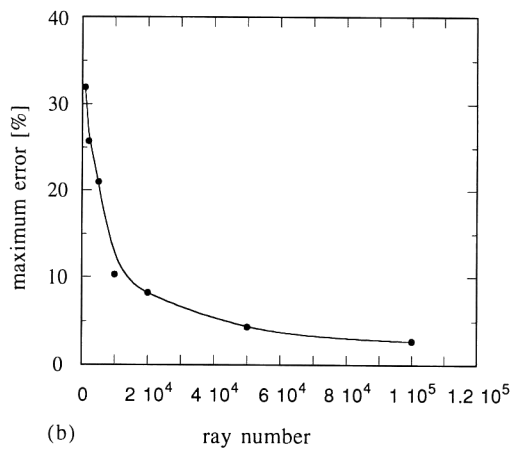


Fig. 3 Fluorescence images of the SR beam, (a) at the focal point and (b) after Be window.

配置してあり、X線ビームを7000mm離れた位置にある第2焦点に再度、集光する特性をもっている。X線ステッパー内の露光面を第2段ミラーから1800mmの位置に置き、厚さ20 μ mのベリリウム窓を介し、X線ビームを導くとFig. 3(b)に示すように水平方向の幅、約26mm、垂直方向の幅、約2mmの円弧の帯状の照射領域が得られる。したがって、X線ステッパーでのX線マスクウエハを一体化した垂直方向の走査機構によって25 \times 25mm²の露光領域となる。ここで位相空間(X-X', Y-Y')上でガウス分布し($\sigma_x=0.67$ mm, $\sigma_y=0.42$ mm, $\sigma_{x'}=1.58$ mrad, $\sigma_{y'}=0.42$ mrad), 円弧状の電子ビーム軌道上一様分布する光源点からSR波長スペクトル分布に従った光子エネルギーをもつ光線ベクトルを発生させるSR光源モデル^{7,8)}を取り入れた光線追跡法を使って、露光強度の均一性を解析したと



(a)



(b)

Fig. 4 (a) Calculated intensity profiles when ray number=5 \times 10⁵ and 1000, (b) maximum error percentage vs ray number.

ころ10% ($\pm 5\%$)と見積もられた。しかし、光軸調整後のGaAsPフォトディテクターを用いたX線強度分布の測定では実際の均一性は、16% ($\pm 8\%$)になった⁹⁾。第2段ミラーにまだFig. 2に示すY, Z軸まわりの回転誤差(roll, yaw)が残っていると考えている。光線追跡本数を増やしていくと計算結果は、Fig. 4(a)に示すように、求めたい強度分布に収束していく。例えば光線追跡本数5 \times 10⁵による計算結果を基準とする最大誤差($\max\{[I(X)-I_0(X)]/I_0(X)\}$, $I_0(X)$:基準強度分布)と光線追跡本数との関係をFig. 4(b)に示した。光線追跡本数を5 \times 10⁴以上にすれば誤差はかなり収束することがわかる。さらに、ステアリング電磁石の励磁によるSR光源点の位置変化とX線強度プロファイル形状の変化との関係が、光線追跡と測定結果の間で良い

一致を示した⁹⁾。以上から今回の光線追跡による解析が信頼性の高いものと考えている。

3. 光軸調整

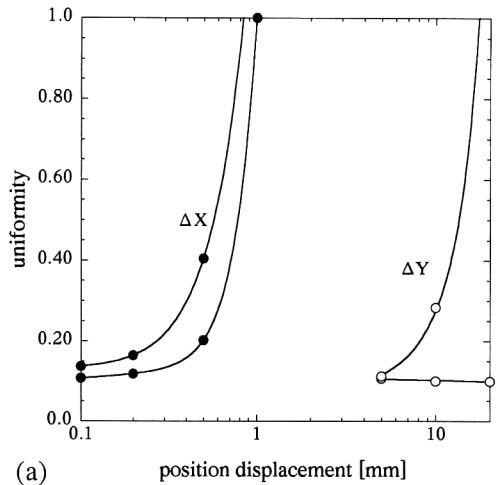
3.1 光軸調整目標精度の検討

ビームライン光軸は各回転楕円体ミラーの焦点とポール (Fig. 2 中のミラー面上の原点) を結ぶ直線で定義される。したがって、Fig. 2 中のミラー面上で定義した局所座標系 ($\angle XYZ$) 上でミラーを X, Y, Z 方向へ移動 ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) あるいは、 X, Y, Z 軸まわりに回転 ($\Delta\psi_x, \Delta\psi_y, \Delta\psi_z$) させると光軸は変位する。

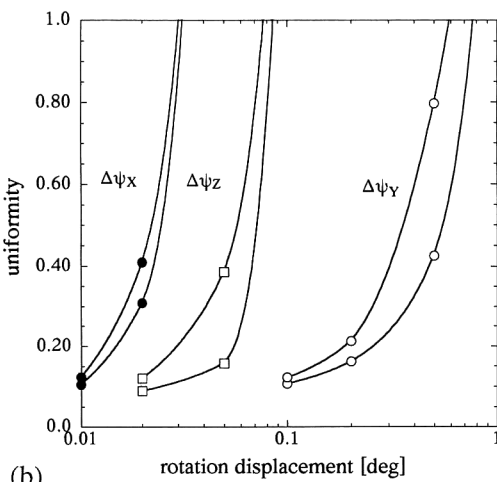
光軸の変位は、ビームラインの光学特性、例えば露光

面上の X 線強度の均一性、転写パターンの位置精度に影響を及ぼす。最近、Cerrina のグループでは、彼らの 2 枚トロイダルミラー光学系の光軸調整にあたって、入射角度のずれと転写パターンの位置ずれの関係を光線追跡から解析し、 0.029° の許容範囲を示した¹⁰⁾。筆者らは、ミラーの位置、姿勢に変位が存在する場合の光線追跡¹¹⁾ によって、すべての自由度に対する許容範囲を明確にした。Fig. 5 は第 1, 第 2 段ミラーの各自由度に対する変位によって X 線強度の均一性の取り得る範囲を示している。特に $\{\Delta X, \Delta\psi_x\}$ の変位が均一性に一番大きく影響を与えることがわかる。Fig. 6 は同じく、2 枚のミラーを各自由度に変位させたときのウェハ-マスク間ギャップ $20\ \mu\text{m}$ での転写パターンの位置ずれのベクトルマップ図である。ここでは、集光光学系がもともと持っているランアウト誤差を補正した X 線マスクパターンによる転写を仮定している。

図中で $\{\Delta X_1, \dots, \Delta\psi_{z1}\}$ は第 1 段ミラーの変位、 $\{\Delta X_2, \dots, \Delta\psi_{z2}\}$ は第 2 段ミラーの変位を表している。各自由度における変位に対して転写の位置ずれの大きさは、ほぼ比例したが、ここでも $\{\Delta X, \Delta\psi_x\}$ の変位に對



(a)



(b)

Fig. 5 Calculated horizontal uniformity over 25 mm exposure field vs displacement of the mirrors. (a) translation along X or Y axis and (b) rotation along (X, Y, Z) axis.

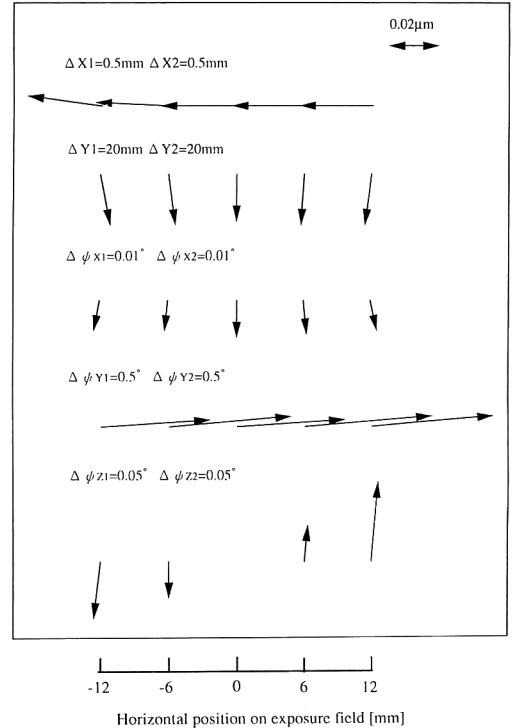


Fig. 6 Position error map of pattern transfer at mask-wafer gap of $20\ \mu\text{m}$ vs displacement of the mirrors, translation or rotation.

する感度が一番大きかった。

以上のデータを基にして均一性の劣化を18%以下、転写の位置ずれを $0.05\ \mu\text{m}$ 以下に抑える光軸調整目標精度として以下の値を設定した。

$$\begin{aligned} \Delta X &\leq 0.2\ \text{mm}, \\ \Delta Y &\leq 7\ \text{mm}, \\ \Delta\phi_x &\leq 0.01^\circ, \\ \Delta\phi_y &\leq 0.1^\circ, \\ \Delta\phi_z &\leq 0.03^\circ \end{aligned} \quad (1)$$

3.2 光軸ずれの推定

光軸がずれるとビームライン上のX線ビームの位置、形状は変位するが、この変位の仕方が前項で述べたミラー変位の自由度と密接な関係があることを見出した。これは無収差の集光光学系に特有なものである。トロイダルミラー等の収差の大きいミラーで構成した光学系では焦点での集光ビーム形状がもともと大きく歪んでいるため、この関係がはっきりと認識できなくなる。光線追跡によって求めた、中間結像点におけるSCM上、およびビームラインエンドでのX線ビーム形状の $\{\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta\phi_x, \Delta\phi_y, \Delta\phi_z\}$ 依存性をFig. 7に示した。X線ビーム形状、位置の変位は、 $\{\Delta X, \Delta\phi_y\}$ 、 $\{\Delta Y, \Delta\phi_x\}$ 、 $\{\Delta\phi_z\}$ の3タイプに類別することができる。例えば、第1段ミラーの補正を考えてみる。中間結像点でのX線ビームが垂直方向にボケて、中心位置が水平方向にずれている場合、 $\{\Delta X, \Delta\phi_y\}$ 方向の補正を考える。また同じ方向にボケた形状になり、中心位置がずれていない場合は $\{\Delta\phi_z\}$ 方向の補正を考える。一方、X線ビーム形状が水平方向にボケて、中心位置が垂直方向にずれている場合、 $\{\Delta Y, \Delta\phi_x\}$ 方向の補正を考えればよい。ここで、Fig. 6に示したように $\{\Delta X, \Delta\phi_y\}$ および $\{\Delta Y, \Delta\phi_x\}$ の変位による転写の位置ずれ方向がそれぞれ同じであり、X線ビームの歪み方も同じであることからこの $\{\}$ 内の2自由度の変位は分離できないことになるが、式(1)で示したように一方の自由度に対する許容範囲が大きいので問題にはあまりならないと考える。X線ビーム形状の変位が識別できる最小のミラー変化量をもって補正精度を定義すると第1段ミラーの補正精度は次のようになった。

$$\begin{aligned} \Delta X &\approx 0.3\ \text{mm}, \\ \Delta Y &\approx 5\ \text{mm}, \\ \Delta\phi_x &\approx 0.005^\circ, \\ \Delta\phi_y &\approx 0.2^\circ, \\ \Delta\phi_z &\approx 0.01^\circ \end{aligned} \quad (2)$$

以上から第1段ミラーに対しては目標精度：式(1)を

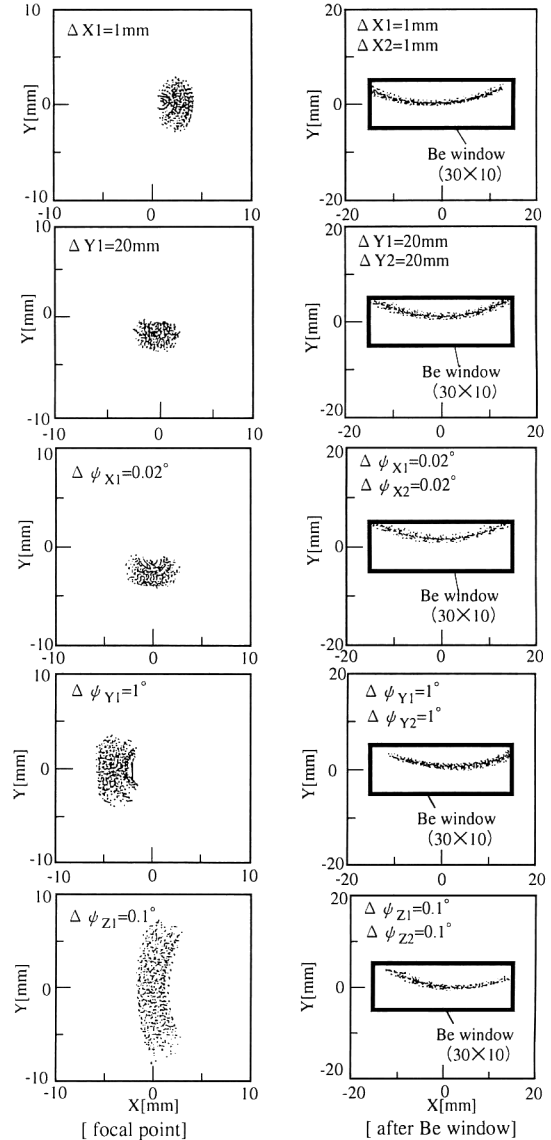


Fig. 7 Spot diagrams of X-ray beam at two positions on the beamline vs displacement of mirrors. (left) at the focal point, (right) after Be window.

ほぼ満たす補正が期待できる。しかし、第2段ミラーに関しては、ビームラインエンドでのX線ビーム形状の変位は、中間結像点の位置ほどは顕著には現れないため、X線ビーム形状からある程度補正しておき、あとは第2段ミラーの下流に設置したX線強度プロファイルモニターによる水平方向のX線強度分布が設計値に近づくように微調整をすることにした。

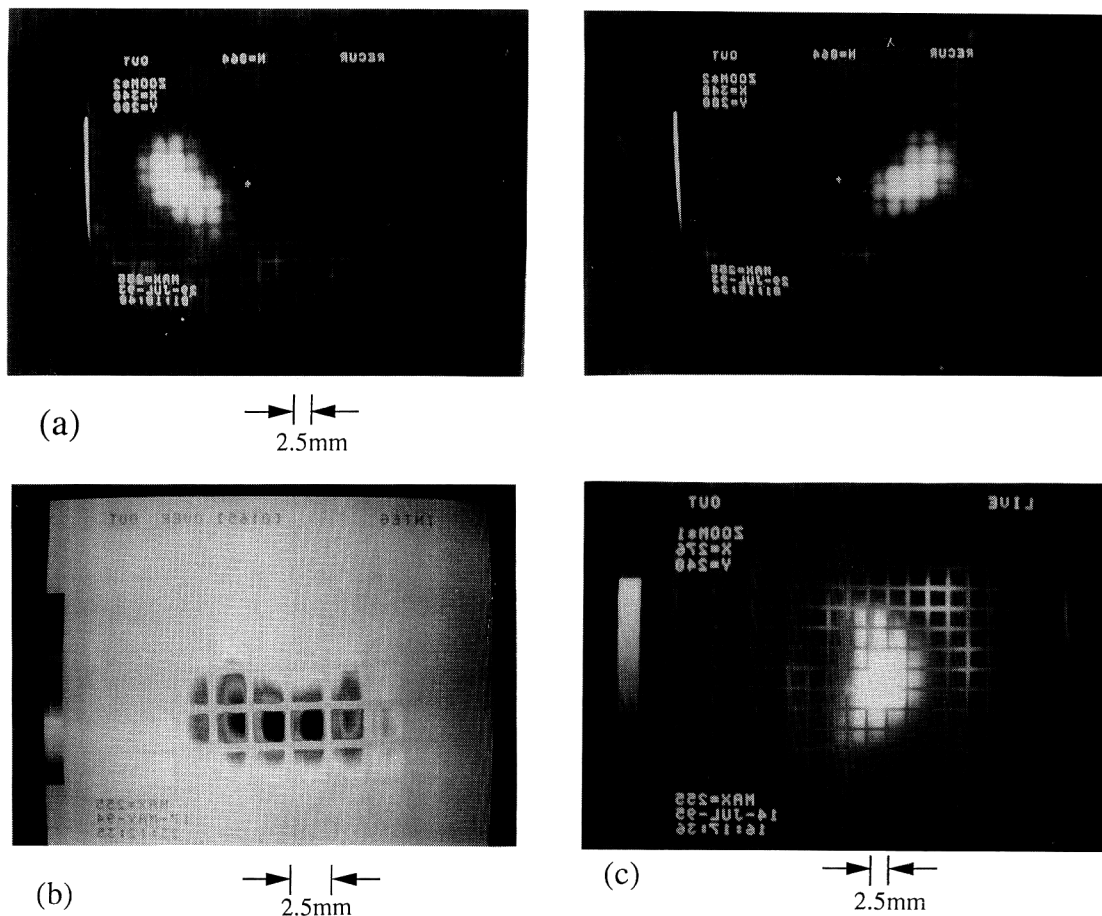


Fig. 8 Fluorescence images of the SR beam at the focal point when 1st mirror is displaced. (a) translate in X direction (b) in Y direction and (c) rotate along Z axis.

3.3 光軸調整の実際

ミラーステージに取り付けた6軸ゴニオメーターはミラーのポールを原点とする絶対座標系上の(X, Y, Z)軸に沿ってミラーを移動、回転する機構をもっている。したがって、(Y, Z)軸は前項で定義した局所座標系とは 2° の傾きの違いがある。

Fig. 8(a)は第1段ミラーを X 軸方向に移動させたときの中間結像点での X 線ビームの蛍光像を示す。Fig. 7で示した、 ΔX 依存性と同じく、 X 方向に移動し、垂直方向にボケた像となっている。さらにFig. 8(b)は Z 軸方向に移動させたときの蛍光像である。

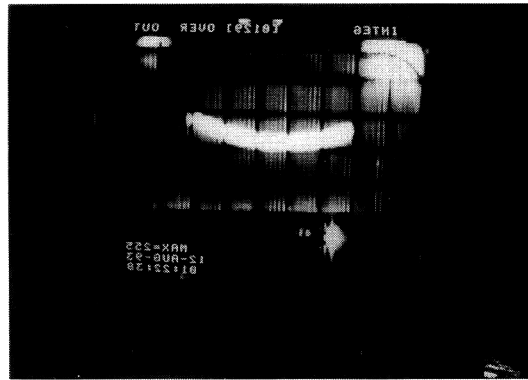
この Z 軸方向のミラー移動は、SRビームからみると相対的に局所座標系上での Y 軸方向の移動と同じと考えられる。したがって、Fig. 7中の ΔY 依存性と同じく、垂直方向に移動し、水平方向にボケた像となってい

る。Fig. 8(c)は Z 軸まわりに回転させたときの蛍光像である。Fig. 7での $\Delta\phi_z$ 依存性と同じく、中心位置は移動せずに垂直方向にボケた像となっている。

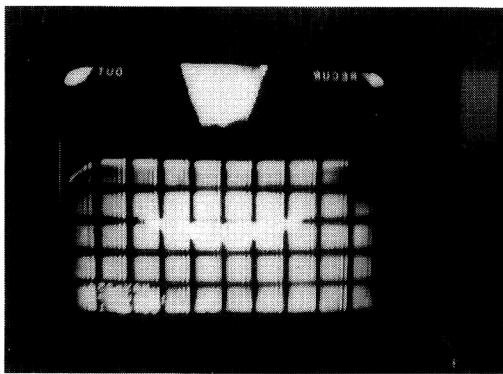
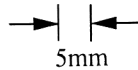
以上のようにSCM上の蛍光像の変位は、光線追跡の結果と同じ傾向を示し、Fig. 3(a)の集光ビームになるように第1段ミラーを調整した。

Fig. 9(a)は第2段ミラーを X 軸方向に移動させたときのBe窓通過後の X 線ビームの蛍光像である。Fig. 3(b)の蛍光像が、そのまま水平方向に移動した形になっており、端部、数mm程度がBe窓を通過できずに欠けている。この傾向は Y 軸まわりの回転でもみられた。一方、Fig. 9(b)は Z 軸方向に移動させたときの蛍光像である。蛍光像は垂直方向に移動し、上に移動すると水平方向の X 線ビーム幅は狭くなった。

予想したとおり、ビームラインエンドでの X 線ビー



(a)



(b)

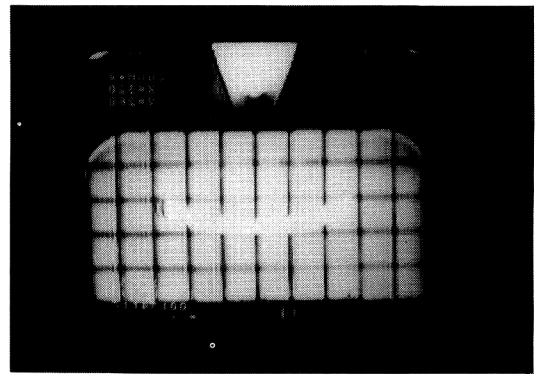
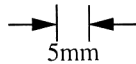


Fig. 9 Fluorescence images of the SR beam after Be window when 2nd mirror is displaced. (a) translate in X direction and (b) in Z direction.

ムの変位は中間結像点ほどは顕著には現れず、蛍光像のみでは第2段ミラーの調整はかなり粗くなってしまった。

4. ま と め

SR光を集光し、露光面上のX線強度を増大させる光学系をもつビームラインを完成させた。光線追跡の結果、途中のX線ビーム形状、位置の変位が、光軸のずれ方向と密接な関係があることを見出し、光軸調整に応用した。この結果、蛍光板モニターによるX線ビーム形状、X線強度プロファイルモニターによるX線強度分布からほぼ設計通りの光学特性が実現していることを確認した。

文 献

- 1) 田中博文, 中西哲也, 松田哲也, 竹内敏恵, 奥田壮一郎: “シンクロトロン放射光装置”, 三菱電機技報, 68 (1994) 136-140.
- 2) H. Shimano, T. Hifumi and Y. Ozaki: “Design optimization of synchrotron radiation lithography beamline for a compact storage ring,” Jpn. J. Appl. Phys., 31 (1992) 4185-4188.
- 3) H. Tanaka and T. Nakanishi: “Studies of beam dynamics of a compact storage ring using superconducting bending magnets,” Rev. Sci. Instrum., 66 (1995) 1971-1973.
- 4) R. K. Cole and F. Cerrina: “Novel toroidal mirror enhances X-ray lithographic beamline at CXrL,” Proc. SPIE, 1465 (1991) 111-121.
- 5) T. Mitsuhasi, A. Ueda and T. Katsura: “High-flux photon beam position monitor,” Rev. Sci. Instrum., 63 (1992) 534-537.

- 6) 鈴木浩文, 小寺 直, 島野裕樹: “非球面創成研磨に関する研究 (第2報) —非軸対称非球面形状の研磨加工—”, 精密工学会誌, **60**, (1994) 827-832.
- 7) A. Ogata: “Focusing of synchrotron radiation,” Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. Sect. A, **259** (1987) 566-575.
- 8) G. K. Green: “Spectra and optics of synchrotron radiation,” BNL Rep., 50522 (1976).
- 9) H. Shimano, K. Asano, Y. Ozaki and Y. Matsui: “Effect of electron beam orbit distortion on optical performance of the synchrotron radiation lithography beamline,” Jpn. J. Appl. Phys., **33** (1994) 6888-6893.
- 10) G. Chen, K. Yamazaki, W. Waldo, J. Welnak, G. M. Wells and F. Cerrina: “Synchrotron radiation X-ray lithography beamline optics alignment using the hartmann method,” J. Vac. Sci. Technol. B, **12** (1994) 4013-4017.
- 11) S. Goto, T. Taguchi, T. Osada, S. Okamura and T. Hisatsugu: “Synchrotron radiation beamline for X-ray lithography,” J. Vac. Sci. Technol. B, **11** (1993) 286-295.