

不等間隔溝平面回折格子を用いた斜入射モノクロメータ — 第三世代低エミッタンス放射光源への応用 —

小池 雅人

ローレンス・バークレー国立研究所 X線光学センター

Grazing Incidence Monochromators Equipped with Varied Line Spacing Plane Gratings

— Application to the Third Generation Low Emittance Synchrotron Light Sources

Masato KOIKE

Center for X-Ray Optics, Lawrence Berkeley National Laboratory

Grazing incidence objective Monk-Gillieson type varied line spacing plane grating monochromators with a magnification of $\sim 1/10$ have been designed by means of the hybrid method that takes advantages of both the ray-tracing and analytic methods. The resolving power of two monochromators thus designed was assessed experimentally at a bending magnet of the Advanced Light Source, Lawrence Berkeley National Laboratory and found to be ~ 6000 and >10000 both at 401 eV. These values were well agreed with those estimated by ray tracing that takes into account the slope errors of the optical components. The effect of the thermal deformation of the optical components on the resolving power was simulated. Also discussed are the versatility of the designed monochromators and an improved design with a wide wavelength scanning range of 0.5-10 nm.

1. はじめに

最近の極紫外域での放射光(SR)を用いた実験では、簡単な光学系と、波長走査機構を持ち、かつ高分解能、高スループットを実現する斜入射分光器に対する要求が益々高まっている。この要求に答えるため、近年数々の新型斜入射平面回折格子分光器が開発されている。Petersenの軸外楕円鏡を持ちいたSX-700型分光器¹⁻³⁾、またその球

面鏡版^{4,5)}、原田らの自己結像型不等間隔溝(Varied Line Spacing, VLS)平面回折格子分光器^{6,7)}などがその好例である。これらとは別に、Hettrickらはプラズマ診断用としてMonk-Gillieson型分光器⁸⁻¹¹⁾にVLS平面回折格子を用いた分光器^{12,13)}を開発し、その後、Hettrick¹⁴⁾とAsfawら¹⁵⁾によって、SR用として設計した例が報告されている。ただ注意したいのは、彼らは共に球面鏡の像

* Center for X-Ray Optics, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California
1 Cyclotron Road, MS 2-400 Berkeley, CA 94720 USA
TEL +1-510-486-4131 FAX +1-510-486-4550

倍率が約 1:1 と収差が最も小さい条件を使用していることであり、この条件を守って SR 用として高スループットの入射スリット無しの分光器を設計した場合、球面鏡の曲率半径が大きくなりすぎ製作が困難になる他、回折格子と出口スリットが離れすぎ、コンパクトで安定した分光器にはなり得ない欠点がある。

SR ビームライン光学系の設計にあたっては、SR の発光点から最後の検出器に至るまでの全光学系を一体とした、いわゆるトータルデザインの考えかたが必要であると言われている。筆者等はこれを実現する一歩として hybrid 設計法^{16,17)} と呼ばれる光線追跡法の汎用性、解析的設計法¹⁸⁻²⁰⁾ の厳密性の長所を兼ね備えた設計法を開発した。次に筆者等はこの設計法を (1) コンパクトで安定した分光器を実現するために高縮小倍率光学系、(2) 高スループットを得るため入射スリット無し、(3) 簡単な波長走査機構で高分解を実現する収差補正等の望ましい特性を持った Monk-Gillieson 型斜入射不等間隔溝平面回折格子分光器 (以下では VLS-PGM と略する) の設計に適用した。

本稿では、hybrid 設計法による VLS-PGM の設計と、光学素子のスロープ・エラーや熱変形を考慮した光線追跡法による性能予測の方法、光線追跡結果と実験との比較、VLS-PGM の拡張性の検討およびホログラフィック回折格子の適用例、さらに、広い走査波長域を単一の回折格子でカバーする改良型 VLS-PGM について述べる。なお、本稿では、モノクロメータのみしか扱わないので、以下では分光器をモノクロメータの意味で使用する。

2. VLS-PGM の設計

2.1. 光学配置

図 1 に本稿で扱う光学系を示す。光源の中心を S とする SR (又はアンジュレータ光, UR) は水平折り曲げ球面鏡 (又は平面鏡) M1 により 1:1 の倍率で水平方向に結像される (又は正反射され

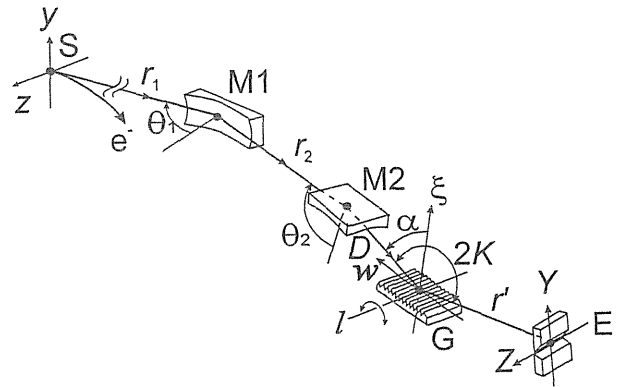


Figure 1. Schematic diagram of the monochromator system to be treated. The relevant coordinate axes are also indicated. S, center of SR (or undulator, UR); M1, horizontally-focusing (or reflecting) spherical (or plane) mirror; M2, vertically-focusing spherical mirror; G, varied line spacing grating; and E, exit slit.

る)。ここで、M1 に対する入射角は θ_1 とする。垂直曲げ球面鏡 M2 で反射された垂直面内の収束光は不等間隔溝平面回折格子 G を照射し、そこで垂直面内に分散された光は出射スリット E 面上に結像する。ここで、M2, G への入射角をそれぞれ θ_2 , α とする。計算に必要な座標軸を図 1 の S, G, E について示してある。ここで z , l , Z 軸は水平面内、 y , ξ , Y 軸は垂直面内に存在する。波長走査は M1, M2, E などの素子が固定のまま、 l 軸回りの回折格子の回転のみで行うものとする。

設計すべきパラメータとしては不等間隔溝の刻線パラメータ $2a$, $6b$, $4c$ ¹⁸⁾, GE 間の距離 r' がある。 n 番目、 $n+1$ 番目の間の溝間隔 d_n は

$$d_n = d + a - b + 2an + 6bn^2 + 4cn^3, \quad (1)$$

で与えられる。ここで d は有効格子定数である。他のパラメータはその都度任意に与えるか、実用上の理由から決定される。

2.2. Hybrid 設計法

Hybrid 設計法^{16,17)} では解析的評価関数

$$\begin{aligned}
Q &= \sum_i Q(\lambda_i) = \sum_i \left[q_y^2(\lambda_i) + \mu q_z^2(\lambda_i) \right] \\
&= \sum_i \left[\frac{1}{WLH} \int_{-W/2}^{W/2} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-H/2}^{H/2} (Y - \bar{Y})^2 dw dldz \right. \\
&\quad \left. + \frac{\mu}{WLH} \int_{-W/2}^{W/2} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-H/2}^{H/2} Z^2 dw dldz \right], \quad (2)
\end{aligned}$$

を極小化することにより設計パラメータを最適化する。ここで Y, Z は光源点 (O, Z) から入射し、 G 上の点 (W, l) で回折された光の像点を表わし、さらに

$$\bar{Y} = \frac{1}{WLH} \int_{-W/2}^{W/2} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-H/2}^{H/2} Y dw dldz, \quad (3)$$

である。

また、 μ, W, L, H, λ_i ($i=1, 2, \dots, N$) はそれぞれ、重み関数、回折格子の刻線全幅、刻線全高、有効光源全高、設計波長を表す。ここで注意したいのは Y, Z は波長の関数であることである。さらに波長 λ_i の無限大本数光線を追跡したとき得られる点像分布の分散を表わす $q_y(\lambda_i), q_z(\lambda_i)$ の表式は

$$\begin{aligned}
q_y(\lambda_i) &= \frac{1}{12} W^2 f_{100}^2 + \frac{1}{360} \left[W^4 (2f_{200}^2 + 9f_{100}f_{300}) \right. \\
&\quad \left. + 2L^4 f_{020}^2 + 2H^4 f_{002}^2 \right] \\
&+ \frac{1}{144} \left[2W^2 f_{100} (L^2 f_{120} + H^2 f_{102}) + L^2 H^2 f_{011}^2 \right] \\
&+ \frac{1}{960} W^2 \left[2W^2 f_{300} (L^2 f_{120} + H^2 f_{102}) + L^4 f_{120}^2 \right. \\
&\quad \left. + H^4 f_{102}^2 \right] \\
&+ \frac{1}{448} W^6 f_{300}^2 + \frac{1}{1728} W^2 L^2 H^2 (f_{111}^2 + 2f_{120} f_{102}), \quad (4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
q_z(\lambda_i) &= \frac{1}{12} (L^2 g_{010}^2 + H^2 g_{001}^2) + \frac{1}{40} L^4 g_{010} g_{030} \\
&+ \frac{1}{144} \left[W^2 L^2 (g_{110}^2 + 2g_{010} g_{210}) \right. \\
&\quad \left. + H^2 \{ W^2 (g_{101}^2 + 2g_{001} g_{201}) + 2L^2 (g_{010} g_{012} + g_{001} g_{021}) \} \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&+ \frac{1}{960} \left[W^2 L^2 g_{210} (W^2 g_{210} + 2L^2 g_{030}) + L^2 H^2 g_{012} \right. \\
&\quad \left. (2L^2 g_{030} + H^2 g_{012}) + H^2 (W^4 g_{201}^2 + L^4 g_{021}^2) \right] \\
&+ \frac{1}{448} L^6 g_{030}^2 + \frac{1}{864} W^2 L^2 H^2 (g_{210} g_{012} + g_{021} g_{201}), \quad (5)
\end{aligned}$$

と表わされる。先の Y, Z と同様 f_{ijk}, g_{ijk} も波長の関数である。

つぎに、(4), (5) 式中の f_{ijk}, g_{ijk} の光線追跡法に基づく求めかたについて述べる: 1) 波長 λ_i の 9 本の光線 ($n=1, 2, \dots, 9$) を無限小幅 ($y_n=0$) の線光源上でランダムに生成する, 2) 9 本の光線それぞれについて S-M1-M2-G-E の系で光線追跡を行ない (M1 は平面鏡とする) 回折格子面との交点 (w_n, l_n) と出射スリット E 面との交点 (Y_n, Z_n) を求める, 3) ステップ 2) で得られた (w_n, l_n), (Y_n, Z_n) と光源上の点 z_n をスポットダイアグラムの解析的表式

$$\begin{aligned}
Y_n &= w_n f_{100} + w_n^2 f_{200} + l_n^2 f_{020} + l_n z_n f_{011} + z_n^2 f_{002} + w_n^3 f_{300} \\
&\quad + w_n l_n^3 f_{300} + w_n l_n^2 f_{120} + w_n l_n z_n f_{111} + w_n z_n^2 f_{102}, \\
Z_n &= z_n g_{001} + l_n g_{010} + w_n g_{110} + w_n z_n g_{101} + w_n^2 l_n g_{030} \\
&\quad + l_n^3 g_{030} + l_n^2 z_n g_{021} + l_n z_n^2 g_{012} + w_n^2 z_n g_{201}, \quad (6)
\end{aligned}$$

に代入する, 4) (6) 式の二つの連立方程式を f_{ijk}, g_{ijk} に対して解く, 5) (4), (5) 式に $f_{ijk}, g_{ijk}, W, L, H$ の値を代入し $q_y(\lambda_n), q_z(\lambda_n)$ を求める, 6) ステップ 1)-5) を他の設計波長に対しても繰り返す。そして与えられた拘束条件下で評価関数 Q を極小化するように設計パラメータを決定する。

2.3. 設計パラメータ

ここでは図1で示した光学系を2.2節で述べた設計法を用いて設計した3種の例(System I, II, III)について述べる。System I と System II は共に SR 光源を使用し、走査波長域は 2-5 nm で、System I は高分解能 (≥ 10000)、System II は中分解能、高スルーputt を得ることを目的にした。System III は UR による熱負荷と光学素子のスロー

プ・エラーの影響を検討するため設計されたもので、波長域は10-16 nmとした。その他の設計条件を以下に示す。

System I : m (回折次数) = +1, r_1 (SM1間の距離) = 11800 mm, R_1 (M1の曲率半径) = 270 m, $\theta_1 = 87.50^\circ$, r_2 (M1M2間の距離) + D (M2G間の距離) = ~ 4400 mm, R_2 (M2の曲率半径) = 47.9 m, $\theta_2 = 87.00^\circ$, $2K$ (Gの偏角) = 174.00° ; $d = 1/1000$ mm, 刻線面積 $60(W) \times 15(L)$ mm².

System II : $m = -1$, $r_1 = 11800$ mm, $R_1 = 270$ m, $\theta_1 = 87.50^\circ$, $r_2 + D = \sim 4400$ mm, $R_2 = 82.3$ m, $\theta_2 = 88.00^\circ$, $2K = 172.00^\circ$, $d = 1/1200$ mm, 刻線面積 $60(W) \times 25(L)$ mm².

System III : $m = +1$, $r_1 + r_2 = 16800$ mm, $R_1 = \infty$, $\theta_1 = 87.50^\circ$, $D = 200$ mm, $R_2 = 25.8$ m, $\theta_2 = 83.50^\circ$, $2K = 160.00^\circ$, $d = 1/2400$ mm, 刻線面積 $50(W) \times 25(L)$ mm².

それぞれの系についてHybrid設計法により決定された設計パラメータを以下に示す。

System I : $r_2 = 4243.88$ mm, $D = 155.88$ mm, $r' = 1214.75$ mm, $2a = 1.642402 \times 10^{-9}$ mm, $6b = 2.022584 \times 10^{-15}$ mm, $4c = 2.347981 \times 10^{-21}$ mm.

System II : $r_2 = 4222.95$ mm, $D = 177.00$ mm, $r' = 1395.03$ mm, $2a = 9.880941 \times 10^{-10}$ mm, $6b = 2.649034 \times 10^{-15}$ mm, $4c = 1.147652 \times 10^{-20}$ mm,

System III : $r' = 1403.04$ mm, $2a = 2.426309 \times 10^{-10}$ mm, $6b = 1.026485 \times 10^{-16}$ mm, $4c = 3.426627 \times 10^{-23}$ mm.

3. 設計の評価

3.1. 分解能の定義

分光器により得られるスペクトル線像は光学系の収差や光学素子の欠陥により多かれ少なかれ非対称の形をしているだけでなく、肩(shoulder)や翼(wing)を伴っていることが多い。同様のこ

とが光線追跡により得られる点像分布に基づくラインプロファイルも見られる。そこで、このような現実の場合に適した分解能の定義について考えてみる。定義に要求される事項としては、1) スペクトル像の肩(shoulder)や翼(wing)の寄与をよく反映すること、2) 非対称なスペクトル線像にも適用できること、3) Rayleighの定義と整合すること、などが挙げられる。そこで、筆者等は光線追跡により得られる点像分布から分解能を算定するとき、次のような手法をとることにした：(1) 点像分布から分散方向の標準偏差 σ_Y を計算する、(2) σ_Y に波長 λ における逆線分散を掛けてスペクトル広がり σ_λ に変換する、(3) σ_λ を分解能 R の定義式

$$R \equiv \lambda / \Delta \lambda = \lambda / 2.642 \sigma_\lambda, \quad (7)$$

に代入する。係数2.642を用いる理由は、標準偏差 σ_Y をもつ Gauss型の二本の同強度のスペクトル線が $\Delta \lambda = 2.642 \sigma_Y$ だけ離れている場合、二本のスペクトル線の強度を合成してできるプロファイルにおいて、中間の窪みの極大強度に対しての相対高さが $8/\pi^2$ になる²⁾ からで、この条件はよく知られている Rayleighの分解能の定義により規定される窪みの相対高さと同様である。

3.2. 光学素子のスロープ・エラーと熱変形の影響

光学素子のスロープ・エラーと熱変形の影響を解析するため、光学素子の表面形状は次式で表せるものとする：

$$\xi = f(w, l) + \Delta \xi_{FE}(w, l) + \Delta \xi_{TD}(w, l). \quad (8)$$

ここで、 $f(w, l)$, $\Delta \xi_{FE}(w, l)$, $\Delta \xi_{TD}(w, l)$ はそれぞれ理想面形状、形状誤差(figure error)、熱変形量を表す関数である。さらに一般的なスロープ・エラーと形状誤差の関係を考える意味で、素子表

面上の点 $P(w, l)$ で w, l 方向のスロープ・エラーが2変量正規分布関数

$$p(s_w, s_l) = \frac{1}{2\pi\sigma_w\sigma_l} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{s_w^2}{\sigma_w^2} + \frac{s_l^2}{\sigma_l^2}\right)\right], \quad (9)$$

で表せるものとする。ここで σ_w と σ_l はそれぞれスロープ・エラー s_w と s_l の標準偏差である。また、(9)式中では s_w と s_l との間には相関が無く、素子表面にわたるスロープ・エラーの平均量は零であると仮定した。(9)式の確率密度で分布しているスロープ・エラーの系列, $\{(s_w, s_l)_i\}$, は区間 $[0, 1]$ の均一乱数系列 $\{u_i\}$ を用いて

$$\begin{aligned} (s_w)_i &= \sigma_w \sqrt{-2\log_e u_i} \cos 2\pi u_{i+1}, \\ (s_l)_i &= \sigma_l \sqrt{-2\log_e u_i} \sin 2\pi u_{i+1}, \end{aligned} \quad (10)$$

と表わせる。

これに対応する形状誤差 $\Delta\xi_{FE}(w, l)$ は $\sigma_w = \sigma_l = \sigma_{SE}$ と仮定して $d(\Delta\xi_{FE}) = s_w dw + s_l dl$ を積分することにより

$$\Delta\xi_{FE} = \sigma_{SE} (-2\log_e u_i)^{1/2} [w \cos(2\pi u_{i+1}) + l \sin(2\pi u_{i+1})], \quad (11)$$

となる。(10), (11)式を光線追跡のコード中に組み込めば、正規分布しているスロープ・エラーの寄与をその標準偏差を指標として見積もることが出来る。

URの照射による熱負荷が原因の光学素子の熱変形量 $\Delta\xi_{TD}(w, l)$ は以下の様な手順により見積もることが出来る²³⁾: (1) UR シミュレーションコード URGENT²⁴⁾を用いてそれぞれの次数の高調波毎に光学素子表面での光子密度を計算する, (2) 光学素子表面で吸収されるエネルギー密度を計算する, (3) 冷却などの境界条件を付け加え ANSYS²⁵⁾等の有限要素解析法を用いて熱変形量を算出する, (4) 光学素子表面上での熱変形量分

布の近似多項式

$$\Delta\xi_{TD} = \sum_{ij} A_{ij} w^i l^j, \quad 0 \leq i+j \leq 6, \quad (12)$$

を求める。

回折格子が熱変形した場合格子溝間隔も変化する。これについても類似の方法で格子溝間隔の変化量が計算可能である。興味のある読者は文献23を参照されたい。

3.3. 光線追跡による設計の評価

ここでは光線追跡法による Systems I, II, III の性能評価について述べる。光線発生の際、低エミッタンス放射光源の一つであるローレンス・バークレー国立研究所 (LBNL) の Advanced Light Source (ALS) の装置パラメータを使用した。

SR 光源: 電子エネルギー = 1.518 GeV, $\gamma = 2935.08$, 軌道半径 = 4.81 m, 臨界エネルギー $E_c = 1560$ eV, 受光角度 = 2 mrad, $\sigma_y = 24.1 \mu\text{m}$, $\sigma_z = 95.5 \mu\text{m}$, $\sigma'_y = 16.7 \mu\text{rad}$, $\sigma'_z = 86.3 \mu\text{rad}$.

UR 光源: $\sigma_y = 41.1 \mu\text{m}$, $\sigma_z = 212.7 \mu\text{m}$, $\sigma'_y = 9.7 \mu\text{rad}$, $\sigma'_z = 18.9 \mu\text{rad}$, 全長 $L_u = 4.4$ m.

A. System I (SR 光源)

図2は波長 λ 及び $\lambda \pm \delta\lambda$ のそれぞれ1000本の光線について System I で光線追跡を行ない得られた点像分布と線プロファイルを示す。光線はSR光源を仮定しランダムに発生させた¹⁶⁾。 λ , $\delta\lambda$, σ_λ , R の値はそれぞれの図中に記してある。この図からもし全ての光学素子にスロープ・エラーと熱変形が全理想条件下で System I では2-5 nmの波長領域で~5000-92000の分解能が得られることが予測される。スロープ・エラーの影響を示す一例としては、1.0 μrad rms のスロープ・エラーが M1, M2, G に有るとした場合、 $\lambda = 3$ nm において R の値が理想条件下の~20600 から~9800 と約半分に低下する。

B. System II (SR 光源)

スロープ・エラーが M1, M2, G に有る場合

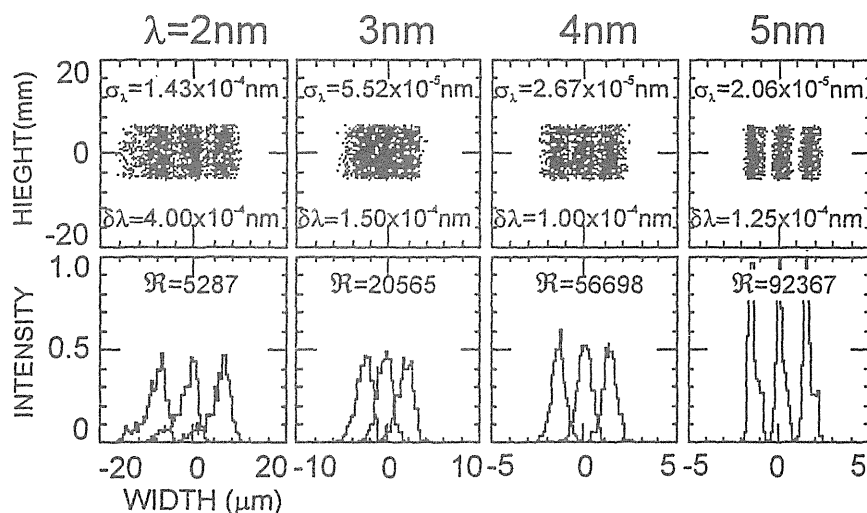


Figure 2. Spot diagrams and line profiles constructed for System I. Each diagram is constructed with 1000 randomly-generated rays for each one of λ and $\lambda \pm \delta\lambda$. The values of λ , $\delta\lambda$, σ_λ , and R are given in each diagram.

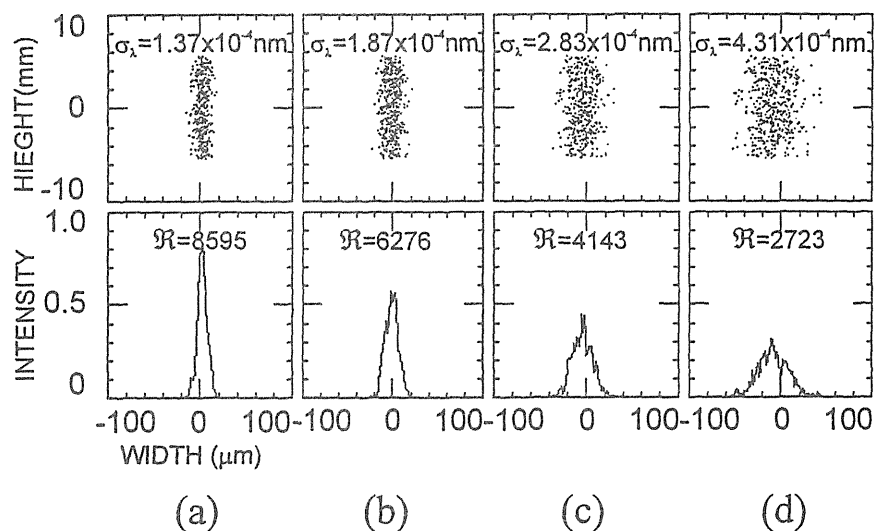


Figure 3. Effect of random slope errors on the performance of System II at $\lambda = 3.1$ nm. (a) $\sigma_{SE} = 0$, (b) $\sigma_{SE} = 0.6 \mu\text{rad}$, (c) $\sigma_{SE} = 1.2 \mu\text{rad}$, and (d) $\sigma_{SE} = 2.0 \mu\text{rad}$. Here, the same amount of σ_{SE} is assumed for M1, M2, and G. The values of σ_λ and R are given in each diagram.

の効果を調べるため幾つかの波長の 1000 本の光線について光線追跡を行なった。光線発生には SR 光源を仮定した。図 3 は其の内 $\lambda = 3.1$ nm で $\sigma_{SE} = 0$ (a), $0.6 \mu\text{rad}$ (b), $1.2 \mu\text{rad}$ (c), $2.0 \mu\text{rad}$ (d), と仮定した場合の結果を σ_λ と R の値とともに示す。図からわかるように σ_{SE} の増加とともに R の値が急激に減少する。これは低エミタンス光源では、光学素子のスロープ・エラーが分解能を制限する重要な要素となりうることを示している。

C. System III (UR 光源)

ここでは UR 光源と M1 として間接水冷された単結晶シリコン基板の上に Cr をコートした平面鏡²⁶⁾を仮定した。M1 は $\lambda = 13$ nm のとき $40(W) \times 4(L)$ mm² の鏡表面で入射パワー 20 W の内 19 W を吸収する。3.2 節で述べた手順にしたがって計算を行なった結果、(12)式で記される M1 の熱変形量 $\Delta \xi_{TD}$ (M1) を表すパラメータは $A_{00} = 4.954 \times 10^{-5}$ mm, $A_{20} = -8.404 \times 10^{-9}$ mm⁻¹, $A_{02} = -1.585 \times 10^{-6}$ mm⁻¹, $A_{40} = -1.505 \times 10^{-10}$ mm⁻³,

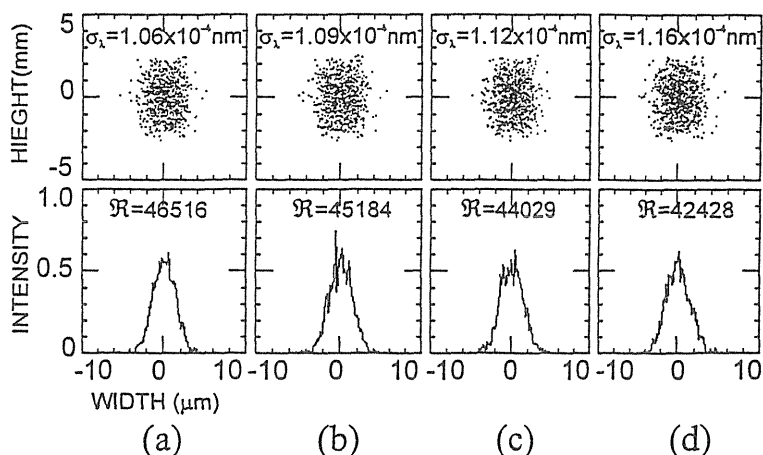


Figure 4. Effect of the thermal deformation and slope error on the performance of System III at $\lambda = 13$ nm. (a) $\sigma_{SE} = \Delta \xi_{TD} = 0$, (b) $\sigma_{SE} = 0$ and $\Delta \xi_{TD} = \Delta \xi_{TD}(M1)$, (c) $\sigma_{SE} = 0.5 \mu\text{rad}$ and $\Delta \xi_{TD} = 0$, and (d) $\sigma_{SE} = 0.5 \mu\text{rad}$ and $\Delta \xi_{TD} = \Delta \xi_{TD}(M1)$. Here, the same amount of σ_{SE} is assumed for M1, M2, and G. The values of σ_λ and R are given in each diagram.

$A_{22} = -4.284 \times 10^{-10} \text{mm}^{-3}$, $A_{04} = 7.111 \times 10^{-9} \text{mm}^{-3}$, $A_{60} = 5.8540 \times 10^{-14} \text{mm}^{-5}$, $A_{42} = 4.884 \times 10^{-12} \text{mm}^{-5}$, $A_{24} = 3.297 \times 10^{-12} \text{mm}^{-5}$, $A_{06} = -4.464 \times 10^{-10} \text{mm}^{-5}$ であり、その他の項は無視できることがわかった。さらに、M2, GにM1と同様の冷却方法を用いた場合、それらの熱変形は計算の結果非常に小さいことが解ったので光線追跡では熱変形はないものと扱った。

図4はM1の熱変形の効果を示すため $\lambda = 13$ nmにおいて1000本の光線について光線追跡を行った例を示す。比較のため、その結果を次の四通りの場合について示す: (a) $\sigma_{SE} = \Delta \xi_{TD} = 0$, (b) $\sigma_{SE} = 0$, $\Delta \xi_{TD} = \Delta \xi_{TD}(M1)$, (c) $\sigma_{SE} = 0.5 \mu\text{rad}$, $\Delta \xi_{TD} = 0$, (d) $\sigma_{SE} = 0.5 \mu\text{rad}$, $\Delta \xi_{TD} = \Delta \xi_{TD}(M1)$ 。ここではM1, M2, Gに対して全て同量の σ_{SE} を仮定した。なを、 σ_λ と R の値は図中に示してある。これらの結果から解るように System IIIにおいては、水冷シリコン鏡M1の熱変形、ならびにM1, M2, Gにおける $0.5 \mu\text{rad}$ rmsのスロープ・エラーは分解能に対して余り影響を与えないことがわかる。

4. 実験との比較

ALSのSR光源を背景光とする窒素ガスの $1s \rightarrow \pi^*$ 共鳴光吸収 (~ 401 eV)を用いて System I,

IIの分解能テスト²⁶⁾を行った。図5に System Iで出口スリット幅 $\sim 5 \mu\text{m}$, System IIで出口スリット幅 $10 \mu\text{m}$ のそれぞれの場合に得られたスペクトルを示す。光源を含む装置としての分解を評価するため測定点(図中黒丸)に寿命広がりを表わす Lorentz型プロファイルと、光源と装置による広がりを表わす Gauss型プロファイルをコンボリューションしたスペクトル波形で測定点のフィッティングを行った。Lorentz型プロファイルの半値全幅を 128meV とし、Gauss型プロファイルの広がり是最も良くフィットするように選んだ。その結果、System IIにおいては図に示した標準偏差 σ_E が 26meV の Gauss型プロファイルを用いたものが最も良くフィットし、(7)式で波長をエネルギーで置き換えた分解能の定義式 $R \equiv E / 2.642 \sigma_E$ より装置としての分解能は ~ 6000 と見積もられた($E = 401 \text{eV}$)。一方、System Iの測定点への最良フィッティングを調べることは測定点が信号処理系により量子化されていることから容易ではなかった。 σ_E が 17meV ($R \sim \sim 9000$)の場合のフィッティングカーブより測定点は量子化誤差を勘案しても明らかによい分解を示した。さらに、 σ_E を 9meV ($R \sim \sim 17000$, 図参照), 又は 0meV ($R = \infty$)としたフィッティングカーブではどちらが良くフィッティングしているか判断付け難かった。

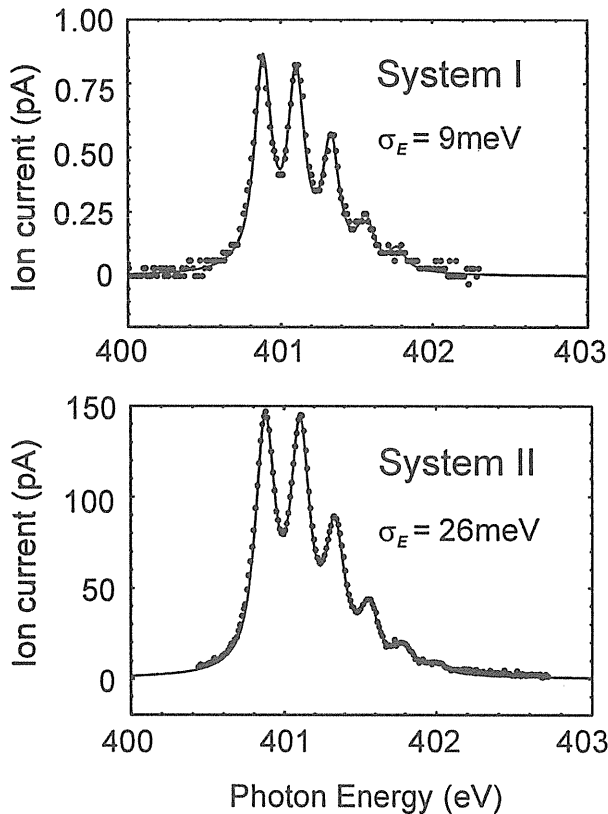


Figure 5. $N_{21s} \rightarrow \pi^*$ resonance photoabsorption spectra taken with a bending magnet source of ALS and System I having an exit slit width of $\sim 5 \mu\text{m}$ and System II having an exit slit width of 10 mm . The solid circles show the data points. The data points were fitted with the convolution of a Lorentzian profile having 128 meV FWHM that represents the lifetime broadening and a Gaussian profile having a standard deviation σ_E that expresses the source size and instrumental broadening. The value of σ_E is given in each diagram.

したがって、この測定データから言えることは、System Iにおいて10000をかなり上回る分解能が得られていることのみである。

実際の装置の光学素子のスロープ・エラーに関しては、唯一System IIのM2が $\sim 0.6 \mu\text{rad rms}$ であることが測定の結果解っている。これに基づきM1, M2, Gに対して $\sigma_{SE} = 0.6 \mu\text{rad}$ と仮定した計算からSystem Iでは $R \sim 14000$ 、またSystem IIでは $R \sim 6200$ (図3(b)) 参照とそれぞれ計算により見積もられる。これらの計算と実験によって得られた分解能を比較することにより、光線追跡に基づく分解能見積もりのおおまかな信頼性を知ることが出来る。

5. VLS-PGMの拡張性とホログラフィック回折格子の利用について

VLS-PGMの拡張性を示す例として不等間隔溝平面回折格子の総ての仕様を変えずに行えるSystem Iの変形例について述べる。同様のことが他のSystemについても言えるが紙面の都合上省略する。

System IではM1とM2の間に球面鏡M2'を挿入することにより波長走査域を $0.9\text{-}2.0 \text{ nm}$ に拡張することが可能である。この変形例をSystem IAとよぶことにする。ここで R_2' (M2'の曲率半径) $=75.0 \text{ m}$ 、 θ_2' (M2'での入射角) $=88^\circ$ 、 $2K' = \angle M2'GE = 176^\circ$ 、 r_2' (M1M2'間の距離) $=4166 \text{ mm}$ 、 D' (M2'G間の距離) $=234 \text{ mm}$ である。

また、System Iでは $r_1 + r_2 = 16 \text{ m}$ としたがこのSystemは他の部分は全く変えずにただ $r_1 + r_2$ の距離を 13 m と短縮しても使用可能である。この変形例をここではSystem IBと呼ぶことにする。さらにSystem IBにおける分解能の低下はM2をM2Gを結ぶ線上に $D = 200 \text{ mm}$ となるように移動させることにより改善することが可能である。この系をここではSystem ICと呼ぶことにする。

図6に総ての光学素子に対して $\sigma_{SE} = 0$ と仮定した場合のSystem I, IA, IB, IC分解能の

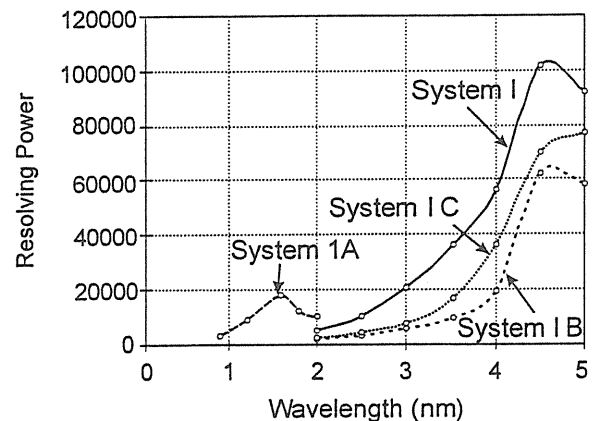


Figure 6. Resolving power of System I and its variations IA, IB, and IC. Here, $\sigma_{SE} = 0$ and $\Delta \xi_{TD} = 0$ are assumed for M1, M2, and G.

計算値を示す。System IB, IC では光源像の像倍率が System I に比べて大きいので、分解能が元の System I に比較して低下するのは自明であるが、図6からこれらの系でも十分高い分解能が得られることがわかる。なお、System IC で用いた D の距離調整のテクニックは M2 の曲率半径の誤差補正にも用いることが出来る¹⁶⁾。

ここまで述べた光学系では全て機械切り法による不等間隔溝平面回折格子を用いたものであったが、ホログラフィック法でも機械切り法と等価な結像特性をもつ VLS-PGM 用の回折格子を製作することが可能である。ただし、格子溝記録時

に、従来の球面波露光法²⁷⁾でなく非球面波露光法²⁸⁻³⁰⁾と呼ばれる新しい方法を用いる必要がある。図7は System II において、(a) 前述の機械切りの不等間隔溝平面回折格子、(b) 新たに hybrid 法により設計した非球面波露光法によるホログラフィック回折格子³¹⁾を仮定し、波長 2, 3, 4, 5 nm の各 1000 本の光線について光線追跡を行ない得られた点像分布と線プロファイルを示す。光線発生では SR 光源を仮定し、スロープ・エラー、熱変形は総ての光学素子に対してないものとした。 λ , σ_y , R の値はそれぞれの図中に記してある。この図からもホログラフィック法により機械切り

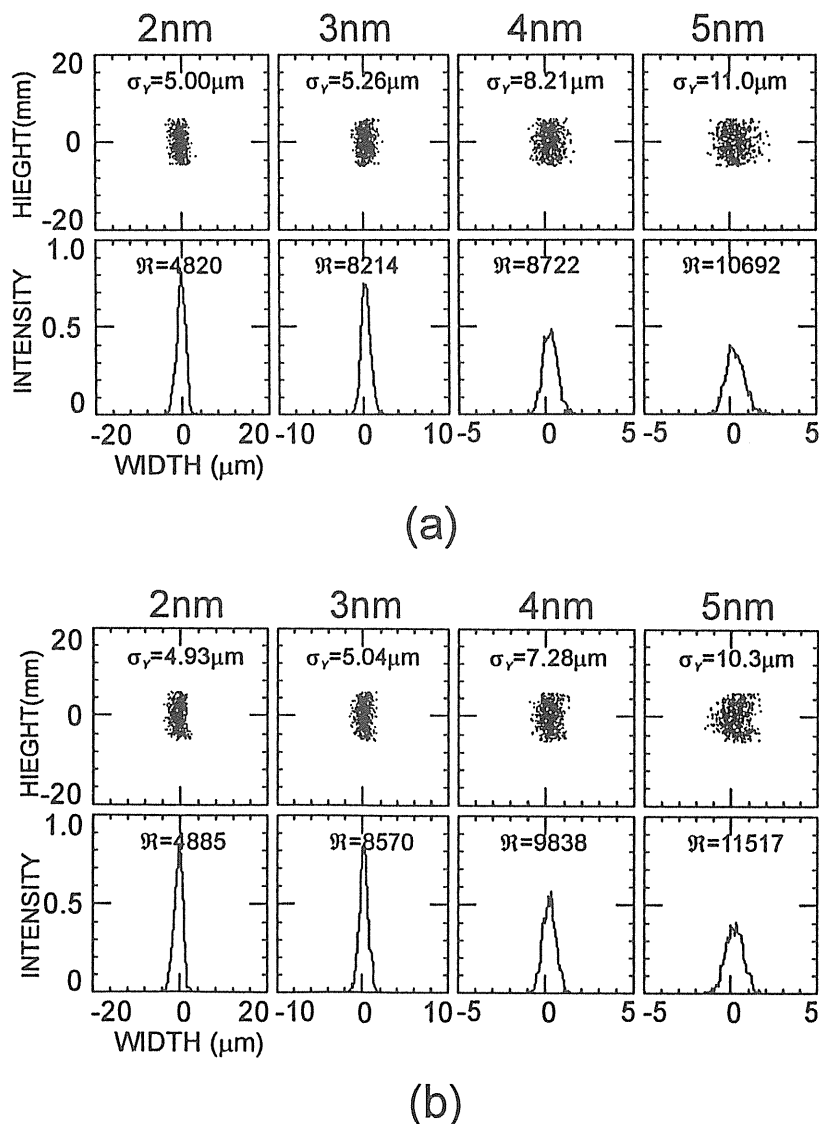


Figure 7. Spot diagrams and line profiles constructed for System II at $\lambda=2, 3, 4,$ and 5 nm. (a) mechanically ruled varied line spacing plane grating and (b) holographic plane grating recorded with the aspheric wave-fronts.

法によるものに遜色ない性能をもつ回折格子を作成できることが解る。ホログラフィック法は各種のエッチング法を組み合わせることにより、ラミナー型等の溝を直接基板上に作成可能であり、VLS-PGM へのホログラフィック回折格子の応用は高次光の低減や、基板への直接刻線による耐熱性能向上の点からも注目される。

さらに付け加えるべきこととしては、これらの VLS-PGM でのスペクトル結像面は出口スリット面に対してほぼ垂直、かつ平面であるので最近進歩が著しいマイクロチャンネルプレート、CCD (charge coupled device) 等の半導体イメージ素子などの検出器を用いたスペクトログラフにも容易に変換可能であるということである。

6. 改良型斜入射 VLS-PGM

ここでは 0.5-10 nm の波長領域を一枚の回折格子で波長走査できる改良型斜入射 VLS-PGM¹⁷⁾ について述べる。図 8 にその光学系を示す。UR 光源 S からの光は固定球面鏡 M1 によって垂直方向の収束光になり不等間隔溝平面回折格子 G を照明する。分散された回折光は、可動平面鏡 M2 で反射された後出口スリット E 面上に結像する。波長走査は M2 の回転並びに並進と G の面内回転の三つの同期した運動により行うが、出口スリット E からの射出光の方向は M2 が出口スリット E 面中心の垂線上で移動するため変化しない。M2 の主な役割は、波長走査につれて、G での偏角と M2 への入射角を変化させ、出来る限りオンプレズの条件を満たすことと、高次光を減少させることにある。詳細な設計パラメータは文献 17 に記しているののでそちらを参照されたい。

図 9 に ALS アンジュレータ光源を仮定した場合の予測分解能を示す。ここでは、収差を無視し光源像幅できまる最大分解能、 $\sigma_{SE}=0, 0.5, 1.0 \mu\text{rad}$ と仮定し光線追跡により得られた分解能の予測値を示す。 $\sigma_{SE}=0$ の場合のカーブは光源像幅できまる分解能とほぼ同じであり設計上では分

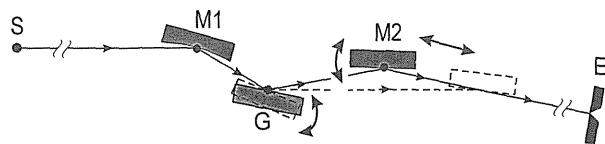


Figure 8. Schematic diagram of the improved design. S, center of undulator; M1, vertically-focusing spherical mirror; G, varied line spacing grating; M2, movable plane mirror; and E, exit slit. Wavelength scanning is carried out by combining simultaneous rotation and translation of M2 with simple rotation of G about its central groove, while the direction of exiting beam through E is kept unchanged by the motion of M2.

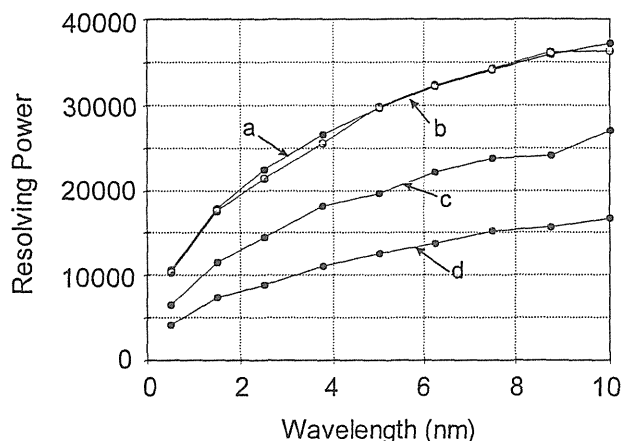


Figure 9. Resolving power of the improved system. The curve a shows the source image size limited resolving power obtained by the paraxial theory. The curves b, c, and d are for $\sigma_{SE} = 0, \sigma_{SE} = 0.5 \mu\text{rad}$, and $\sigma_{SE} = 1.0 \mu\text{rad}$, respectively. Here, the same amount of σ_{SE} is assumed for M1, G, and M2

散方向で収差が殆ど無いことがわかる。また、 $\sigma_{SE}=0.5 \mu\text{rad}$ を仮定した場合でも ~6500-27000 の分解能が得られると予測される。

7. まとめ

第三世代低エミッタンス放射光源の一番機として '93 年に ALS が稼動を初めてから早二年になる。高輝度化に対応した直接水冷金属鏡などの要素技術の開発もあって、ビームライン、測定器系を含む総合システムとしても完成の域に近づきつつある。ここでは、低エミッタンス放射光源の利点を積極的に生かし、高分解能、高スループットという相反する要求を同時に満たし、さらに製作、操作共に容易で拡張性に富む軟 X 線分光ビームラインの開発を目的として LBNL X 線光学セン

ターで行った VLS-PGM の研究の一部について述べた。従来の第一, 二世代の放射光源において, 高分解能, 高スループットを両立させることは不可能に近かったので, 低エミッタンス放射光源がビームライン及び分光器設計に与える意味は大きいと言える。

本稿では殆ど VLS-PGM を用いた SR 分光系での分解能のみの議論に終始したが, 一般の SR ビームライン光学系に要求される性能は, スペクトル純度¹⁶⁾, スループット¹⁶⁾, コヒレンシー³²⁾, F ナンバーマッチング, 高次光の処理, 偏光特性等多様多様であり, それぞれのビームラインの用途, 目的により勘案されなくてはならない。また, 光学系の性能以上に優先されるのが, 安全設計を含むフロントエンドの仕様, 光学素子, およびスリット, アパチャー等の耐熱性に基づく仕様であり, そうした意味で SR ビームライン光学系に課せられた課題としては光源から検出系に至るトータルな系として, 必要とされる総ての面で最適化されることが重要である。欧米諸国では以上のような経緯からビームラインに関する光学が専門分野として既に認知されているが, 日本においても各要素技術の研究開発は勿論のこと, 各要素技術を包括した総合技術としてのビームライン開発が可能な体制作りが望まれる。

本稿で述べた研究の大部分は波岡武東北大学名誉教授との共同研究によるものである。また, ALS における実験では, LBNL X 線光学センター J. H. Underwood 博士, E. Gullikson 博士, 他の協力の下に行った。さらに, URGENT, ANSYS の計算は同センター R. Beguiristain 氏の協力によった。以上の共同研究者及び, ALS, X 線光学センターのスタッフの方々に対して深謝の意を表す。さらに本研究は the Director, Office of Energy Research, Office of Basic Energy Sciences, Materials Sciences Division, the US Department of Energy (contract No. DE-AC03-76SF00098) 及び the Advanced Re-

search Projects Agency, the US Department of Defense からの援助の下におこなったことを付記する。

文献

- 1) H. Petersen, *Opt. Commun.*, **40**, 402 (1982).
- 2) G. Kaindl, M. Domke, C. Laubschat, E. Weschke, and C. Xue, *Rev. Sci. Instrum.*, **63**, 1234(1992).
- 3) W. Jark, *Rev. Sci. Instrum.*, **63**, 1241 (1992).
- 4) H. A. Padmore, *Rev. Sci. Instrum.*, **60**, 1608 (1989).
- 5) H. Petersen, F. Senf, F. Schäfers, and J. Bahrtdt, *Rev. Sci. Instrum.*, **66**, 1777 (1995).
- 6) T. Harada, M. Itou, and T. Kita, *Proc. SPIE*, **503**, 146 (1984).
- 7) M. Itou, T. Harada, and T. Kita, *Appl. Opt.*, **28**, 146 (1989).
- 8) G. S. Monk, *J. Opt. Soc. Am.*, **17**, 358 (1928).
- 9) A. H. C. P. Gillieson, *J. Sci. Instr.*, **26**, 335 (1949).
- 10) T. Namioka and M. Seya, *Appl. Opt.*, **9**, 459 (1970).
- 11) T. Kaneko, T. Namioka, and M. Seya, *Appl. Opt.*, **10**, 367 (1971).
- 12) M. C. Hettrick and J. H. Underwood, *AIP Conf. Proc.*, **147**, 237 (1986).
- 13) M. C. Hettrick and J. H. Underwood, P. J. Batson, and M. J. Eckart, *Appl. Opt.*, **27**, 200 (1988).
- 14) M. C. Hettrick, *Nucl. Instr. and Meth.*, **A266**, 404 (1988).
- 15) A. Asfaw, D. L. Ederer, L. Zhou, L. Lin, K. Osborn, T. A. Callcott, K. E. Miyano, and E. Morikawa, *Rev. Sci. Instrum.*, **66**, 1627 (1995).
- 16) M. Koike, R. Beguiristain, J. H. Underwood, and T. Namioka, *Nucl. Instr. and Meth.*, **A347**, 273 (1994).
- 17) M. Koike and T. Namioka, *Rev. Sci. Instrum.*, **66**, 2144 (1995).
- 18) T. Namioka and M. Koike, *Nucl. Instr. and Meth.*, **A319**, 219 (1992).
- 19) M. Koike and T. Namioka, *Appl. Opt.*, **33**, 2048 (1994).
- 20) T. Namioka, M. Koike, and D. Content, *Appl. Opt.*, **33**, 7261 (1994).
- 21) J. E. Mack, J. R. Stehn, and B. Edlé, *J. Opt. Soc. Am.*, **22**, 245 (1932).
- 22) T. Namioka, M. Koike, H. Kinoshita, and T. Haga, *Proc. SPIE*, **2576**, 94 (1995).
- 23) R. Beguiristain, M. Koike, J. H. Underwood, and T. Namioka, *Proc. SPIE*, **2011**, 559 (1993).
- 24) R. Walker and B. Diviacco, *Rev. Sci. Instrum.*, **63**, 392 (1992).
- 25) ANSYS, registered trademark of Swanson Analysis System, Inc., Houston, Texas.
- 26) J. H. Underwood, E. M. Gullikson, M. Koike, P. J. Batson, P. E. Denham, K. D. Frank, R. E. Tackaberry, and W. F. Steele, *Nucl. Instr. and Meth.*, (印刷中).
- 27) T. Namioka, M. Seya, and H. Noda, *Jpn. Appl. Phys.*, **15**, 1181 (1976).
- 28) M. Koike, Y. Harada, and H. Noda, *Proc. SPIE*, **815**,

- 96 (1987).
- 29) H. Noda, Y. Harada, and M. Koike, *Appl. Opt.*, **28**, 4375 (1989).
- 30) T. Namioka and M. Koike, *Appl. Opt.*, **34**, 2187 (1995).
- 31) M. Koike et al., unpublished data.
- 32) M. Koike, *Proc. on Soft-X-Ray Projection Lithography*, A. M. Hawryul and R. H. Stulen, eds. (Optical Society of America, Washington, DC 1993), Vol. 18, p. 167.

きいワード

非球面波露光法によるホログラフィック回析格子

ホログラフィック回析格子は、一般に基板に感光性樹脂（フォトレジスト）を塗布し、レーザを光源とする二光束干渉縞を記録することで、格子溝のもとになるパターンを作製する。その際用いる二つの干渉波面の種類（平面、球面、非球面）、形状、入射角度等の組み合わせで回析格子の収差補正機能を含む結像特性を制御できる。従来、設計製作が容易なことから主として平面波と球面波が干渉波面として用いられてきたが、設計上の自由度（パラメータ）が少なく、VUV、軟X線領域分光器用の回析格子などにおいて

場合によっては十分な収差補正が不可能であった。非球面波露光法では干渉波面として平面波、球面波を高精度な鏡面が製作できる球面鏡などで反射させて得られる非球面波を用いる。この場合、設計上の自由度は飛躍的に（機械切り法による不等間隔溝回析格子以上に）増加し、より完全な収差補正が可能となるが、パラメータと結像特性の間の非線形性から最適化設計が逆に困難になる。しかし、この問題は Hybrid 設計法を用いることで大巾に改善できる。