

極端紫外光と結像光学系

永井 宏明*・持丸象一郎**・池瀧 慶記**・堀川 嘉明**

極端紫外光と呼ばれる波長が数 nm～数十 nm の領域の光は、可視光と比較すると波長が 1 衍以上短いことから、高解像な結像光学系や、非常に精細なマイクロビームを形成する集光光学系が期待されている。また、この領域の光は物質を構成する各元素の量子状態と選択的に強い相互作用をすることで、この光を用いることで物質の詳細な化学状態や構造に関する情報を得ることができる。近年、これらの性質を利用して、宇宙観測天文衛星、次世代の縮小露光装置、高解像顕微鏡、分光分析装置などの分野で幅広く研究/開発/利用がなされるようになってきており¹⁻³⁾、特性のよくわかった高性能な光学系の必要性がますます高まっている。

しかしながら、光学系の実現という点では

- 1) 極端紫外光領域では空気による吸収が大きいため光学系を真空中に配置する必要がある
 - 2) 物質の屈折率が 1 に近づき、実用的には屈折も反射もしないため、可視領域で通常用いられているレンズや反射鏡等の光学素子が使用できない
 - 3) 波長が非常に短いために加工やアライメントの精度の向上などが求められる
- 等の技術的課題が存在する。

本稿では、極端紫外光領域の代表的な結像光学系を簡単に説明し、そのうちのひとつで収差的にすぐれている Schwarzschild 型多層膜光学系⁴⁾の製作およびその評価方法等について述べる。

1. 極端紫外光領域における結像光学系

すでに述べたように、極端紫外光領域では通常の光学系を用いることはできない。現在、この領域では、回折現象を利用したゾーンプレート光学系、全反射を利用した斜入射光学系、数十～数百の多層膜反射鏡を利用した直入射型反射光学系がおもに使われている。図 1 に代表的な光学系を示す。

1.1 ゾーンプレート光学系

ゾーンプレートは、図 1(a) に示すように入射光に対して透明・不透明の輪帯を交互に繰り返した同心円上の構造の回折格子で、結像作用をもつ。回折光学系なので可視光のレンズのように色収差があるため、入射する光には単色性が要求される。

n 番目の境界の半径 r_n は、焦点距離を f 、入射光の波長を λ としたとき、

$$r_n = (nf\lambda)^{1/2}, \quad n=1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

で表され、一番外側の線幅 d は、

$$d = \frac{\lambda}{2NA} \quad (2)$$

となる。ゾーン数が 200 より多い場合、通常のレンズと同じ解像力があるので⁵⁾、ゾーンプレートの解像限界が $\delta = 0.61\lambda/NA$ で表されるとすれば、

$$\delta = 1.22d \quad (3)$$

となり、空間分解能は波長には依存せず、最外輪帯幅を狭くすればするほど高い値が得られる。

極端紫外光用ゾーンプレートの製作法には紫外線レーザーを用いるフォトグラフィック法と電子ビームリソグラフィー法があるが現在は後者が主流である。現在、最小 19 nm の線幅が得られている⁶⁾。

1.2 斜入射光学系

極端紫外光領域における物質の屈折率は、1 よりわずか

*オリンパス販売(株)新事業本部 (〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台 3-4)

E-mail: koumei@mtb.biglobe.ne.jp

**オリンパス光学工業(株)アドバンストテクノロジーリサーチセンター (〒192-0023 八王子市久保山町 2-3)

に小さいので、可視光の場合とは逆に物質の表面すれすれに入射するときには全反射がおきる。これを用いたのが斜入射光学系である。

この光学系は波長依存性がなく、使える波長範囲が広いという、ほかの2つの光学素子と対照的な特徴を有している。このため、連続波長の光を有効に使うことができるが、分光分析等、帯域幅の小さい光を利用するシステムでは分光素子が別に必要となる。

また、斜入射光学系は、光が斜めに入射するので波長に比べて大きい面形状の誤差が許容できる。一方、開口数を大きくすると収差が急激に悪化するので通常は輪帯遮蔽率で0.9以上を必要とし開口効率が悪い。また、開口数を大きくできないため、回折による解像力の制限が大きい。

この斜入射光学系には回転楕円面鏡や、球面鏡を2枚配置した Kirkpatrick-Baez⁷⁾ 等があるが、結像光学素子としては、収差上 Wolter 型光学系(図1(b))が実用的と考えられている。

Wolter 型光学系は1つの焦点を共有する回転双曲面と回転楕円面あるいは回転放物面で構成され、近似的に正弦条件を満たす光学系である。両曲面の1つの焦点は共有され、ここが物点あるいは像点となる。

Wolter 型光学系の回転双曲面と回転楕円面に入射する光線の斜入射角を θ 、光学系の倍率を M とすると、この Wolter 光学系の開口数は

$$NA = \sin\left(\frac{4M\theta}{1+M}\right) \quad (4)$$

となり、斜入射角と倍率で決まる。斜入射角を決める全反射の臨界角 θ_c は、近似的に鏡の密度 ρ [g/cm³]、波長 λ [cm] から

$$\theta_c = 1.6 \times 10^5 \lambda \sqrt{\rho} \quad (5)$$

で与えられるから⁸⁾、Wolter 型光学系の解像限界が $\delta = 0.43\lambda/NA$ で表されるとすれば、

$$\delta = 0.43 \frac{\lambda}{NA} = \frac{0.43\lambda}{\sin\left(\frac{4M\theta_c}{1+M}\right)} = \frac{1+M}{1.5 \times 10^6 M \sqrt{\rho}} \quad (6)$$

となり、解像限界は倍率と鏡面の密度によって決まる。実際には、分解能は鏡の表面粗さや形状誤差で制限され、実際には 50 nm 程度の値まで得られているのが現状である⁹⁾。

1.3 直入射光学系

直入射光学系は、解像度がよく視野の広い光学系が実現できる。しかし、極端紫外光領域ではあらゆる物質の直入射反射率が実用上ゼロである。最近、光学定数の異なる物質を数十～数百層重ねて反射率を増大する多層膜反射鏡が

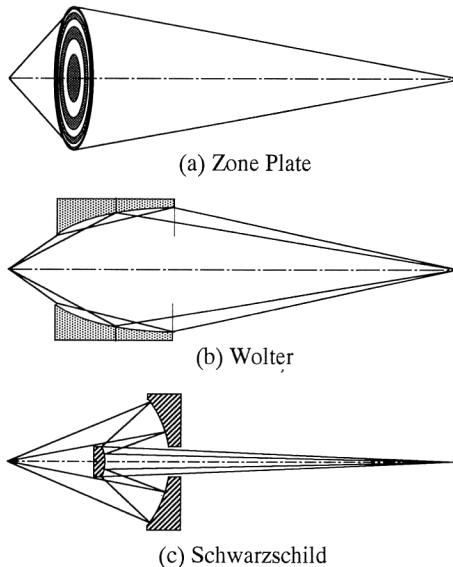


図1 極端紫外光領域における代表的な光学系。

実用化してきた。ただし、可視光領域のように 100% の反射率は得られず、波長によって数～数十% が限度である。多層膜の設計には、可視光の場合と同様フレネルの式を用いた薄膜設計のアルゴリズムが使用できる。屈折率の違う2種類の物質を交互に重ねた多層膜が用いられるが、吸収が大きいので吸収係数に当たる複素屈折率の虚部ができるだけ小さく、実部の差ができるだけ異なる物質を選択するのがよい。設計に用いる光学定数は Henke のデータなどから求められるが、薄膜にした場合の値と必ずしも一致しない。

多層膜を使用した直入射型結像光学系の代表的な例として Schwarzschild 型多層膜光学系がある。これは、図1(c) に示すように凹面と凸面の2枚の球面反射鏡を組み合わせた光学系で、2枚の球面鏡の曲率中心が一致している共心光学系のときは、3次の球面収差とコマをゼロにできることが幾何学的な解析から明らかにされている^{10,11)}。しかしながら、共心光学系はアライメント誤差の影響を受けやすいと考えられるので、誤差の影響を受けにくい非共心光学系が提案されている¹²⁾。

2. Schwarzschild 型光学系の製作と評価

2.1 光学系の設計

前述したように、共心光学系は3次の球面収差とコマをゼロにできるが、非共心系に比べるとアライメントエラーの影響を受けやすい。

図2に凹面鏡と凸面鏡の配置を示す。アライメントエラーが残っていると視野の中心が軸外になる。凹面鏡の曲率中心 C_1 と凸面鏡の曲率中心 C_2 とを通る光軸 O_1 が設計光

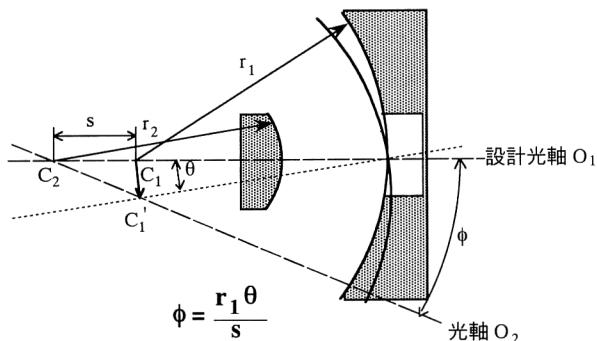


図2 Schwarzschild型光学系の凹,凸面鏡の配置。

軸である。凹面鏡の光軸 O_1 からの傾きの残存誤差を θ とすると、曲率中心は C_1' に移動し、光軸は O_2 となる。したがって、正しい光軸 O_1 は軸外となる。傾きを ϕ とすると曲率中心間距離(非共心量) s との関係は次式のようになる。

$$\phi = \frac{r_1 \theta}{s} \quad (7)$$

また、凹面鏡の光軸 O_1 からの偏芯の残存誤差を δ とすると、非共心量 s に対する光軸の傾き ϕ は

$$\phi = \frac{\delta}{s} \quad (8)$$

と表される。

式(7)および式(8)より、凸面鏡と凹面鏡の曲率中心の距離 s に反比例して影響が大きく、 s が大きいほど誤差の影響を受けにくいことがわかる。

上記の考察から光学系の設計は、

- 1) 開口数 NA 、倍率 M 、物点-像点間距離 L を決める
- 2) 共心系で3次の球面収差とコマをゼロにできる凹面鏡の曲率半径 r_{10} 、凸面鏡の曲率半径 r_{20} を求める¹³⁾
- 3) r_{10} 、 r_{20} を初期値とし、非共心量 s を与えながら凹面鏡の曲率半径 r_1 、凸面鏡の曲率半径 r_2 を変化させ収差を抑える

の手順で行う。なお、目的とする極端紫外光の波長は 13.6 nm である。

表1に、設計した Schwarzschild 型対物レンズのパラ

表1 Schwarzschild型光学系のパラメーター。

倍率	100×	224×
開口数	0.25	0.25
焦点距離	9.811	4.417
凸面鏡の曲率半径 (mm)	10.800	6.451
凹面鏡の曲率半径 (mm)	22.239	32.125
鏡面間隔 (mm)	11.866	24.686
凸面鏡の有効径 (mm)	4.9	2.2
凹面鏡の有効径 (mm)	15.5	18.8
物体-像間距離 (mm)	1000	1000
多層膜	Mo/Si	Mo/Si

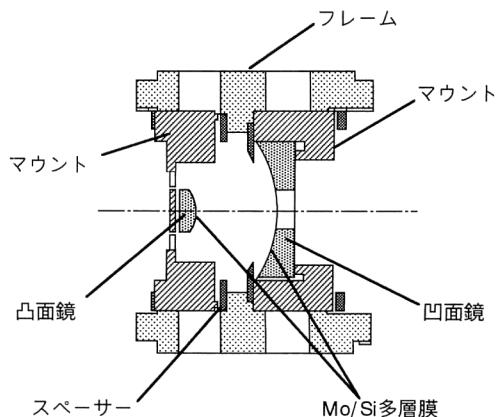


図3 Schwarzschild型光学系の枠構造。

メーターを示す。100倍の対物レンズではアライメントエラーが $0.3 \mu\text{m}$ 存在しても $0.08 \mu\text{m}$ の解像力が得られ、224倍の対物レンズでは同等のアライメントエラーがあつても $0.05 \mu\text{m}$ を超える解像力が期待できる。

2.2 多層膜の球面への成膜

球面基板は合成石英で表面粗さは 0.3 nm (rms) 以下である。形状は凸面鏡で $\lambda/40$ 以下、凹面鏡で $\lambda/30$ 以下である ($\lambda=633 \text{ nm}$)。多層膜は設計波長である 13.6 nm において高反射率が得られる Mo/Si 膜を用い、マグネットロングスパッター法にて成膜を行った。この光学系、極端紫外光の波長の条件では多層膜の角度依存性は大きくないため、凹面鏡と凸面鏡を同時に成膜した。

2.3 組み立て

1つの極端紫外光システムに複数の Schwarzschild 型光学素子を交換して使用することを考えると、個々の光学素子は取りつけ部に対して完全にアライメントされた状態で、交換時の調整が不要であることが望ましい。したがって、2枚の鏡は図3のように1つの枠にマウントする。

図3に示すように、凹面鏡と凸面鏡はエポキシ系の接着剤でそれぞれのマウントに固定され、それぞれのマウントは対物レンズの枠の中で調整ができる。2つのマウントの間隔はスペーサーによる調整で十分である。図4に組み立てた対物レンズを示す。

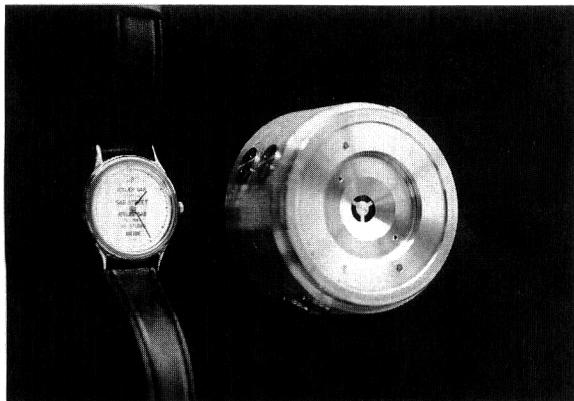


図 4 Schwarzschild 型光学系の外観。

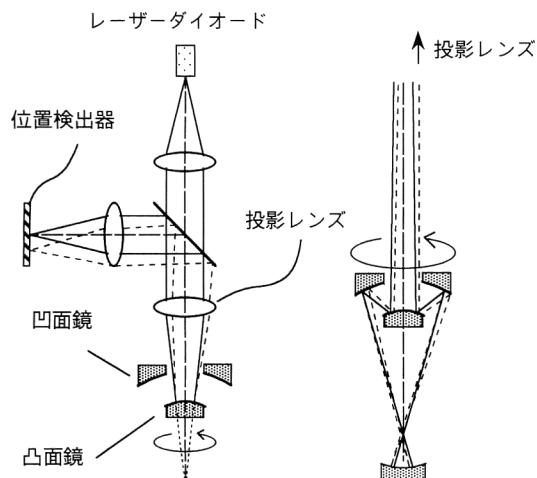


図 5 アライメント装置。

2.4 アライメント

2枚の鏡をアライメントする方法には、干渉計を用いる方法も考えられるが、波面のずれはごくわずか ($2\mu\text{m}$ の偏芯に対しても $4/100\lambda$ 程度) で、球面鏡のゆがみなどの影響との分離も難しい。したがって、以下に述べるレーザーによるアライメント装置を用いた。

図 5 にアライメント装置を示す。この中でアライメント誤差の検出と鏡位置の補正を行なう。被検球面鏡の曲率中心に焦点が合うようにレーザービームを光軸に沿って投射する。球面鏡から反射して戻ってきたレーザービームは位置検出器に入射する。このとき球面鏡に偏芯誤差があれば、反射ビームは傾き、位置検出器上で光軸に垂直な方向に移動する。球面鏡を対物レンズ枠ごと光軸を中心に回転させるとレーザービームは検出器上で円を描く。そして、この円が小さくなるようにマウントを光軸に垂直な方向に移動させる。この円が許容範囲より小さくなれば鏡の位置は補正されることになる。初めに凸面鏡を調整し、その後この調整された凸面鏡を通してレーザービームを凹面

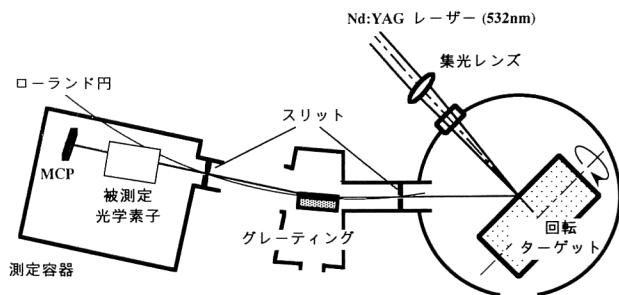


図 6 レーザープラズマ光源を用いた分光透過特性測定装置。

鏡に入射し凹面鏡の調整を行う。この方法によって、許容範囲 $0.3\mu\text{m}$ を十分に達成することができる。

2.5 評価

製作した Schwarzschild 型光学系の評価には解像力の評価のほかに、凹面鏡、凸面鏡のそれぞれに多層膜を成膜していることより、素子の分光透過特性の評価を行う必要がある。

これまで評価用光源には SR 光源を用いることが一般的であったが、われわれは実験室規模のレーザープラズマ光源を用いてこれらの評価を行った^{14,15)}。

2.5.1 分光透過特性

測定装置を図 6 に示す。レーザープラズマ光源、斜入射型分光器、被測定素子、極端紫外光検出器およびこれらを設置する測定用の真空容器から構成されている。Nd:YAG レーザーの 2 次高調波を集光レンズで真空容器内においていた円筒の金属ターゲットに照射する。安定的に光を発生させるためにターゲットを 1 ショットごとにらせん状に移動させ、常に新しい面を照射する。

発生する光は赤外線から真空紫外光を含む広範囲の波長の光を含むため、分光透過特性の測定には分光する必要がある。ここでは真空紫外領域で回折効率の高い斜入射型分光器を用いて分光した。

射出スリットから射出された单色化された光は被測定素子内の反射鏡で反射されたのちに後方のマイクロチャンネルプレート (MCP) で検出される。図 7 に倍率 224 倍の Schwarzschild 型光学系の分光透過特性を示す¹⁶⁾。

2.5.2 結像性能評価

結像性能の評価には解像力チャートを用いた方法が通常用いられるが、極端紫外光領域では解像力が高いので、それに応じたチャートを製作することが難しい。そこで、ナイフエッジ応答によって製作した光学系の結像性能を評価する。

図 8 に測定装置の概略を示す。レーザープラズマ光源の直後にピンホールを置き、これを点光源と見立てる。被測

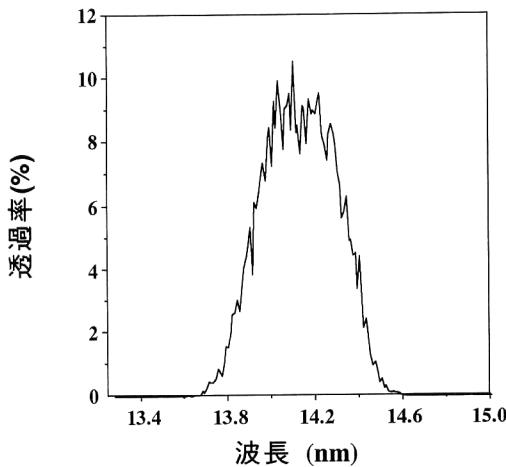


図7 224倍光学系の分光透過率(推定値)¹⁶⁾.

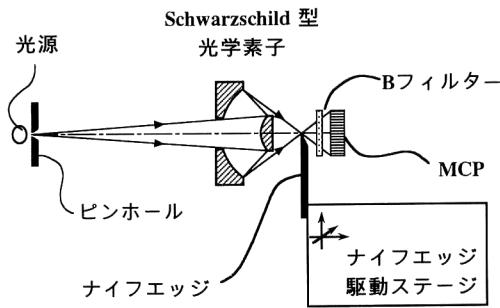


図8 ナイフエッジ法による結像性能評価装置。

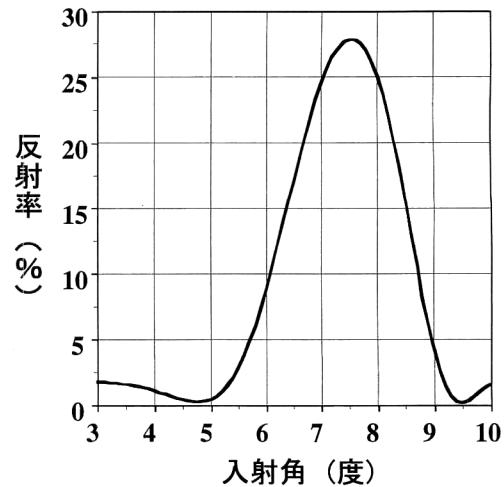


図10 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (0.673/0.709 nm, 401 layers, $\lambda = 2.74$ nm) 平面多層膜の反射率(計算値).

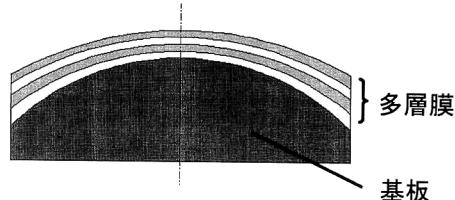


図11 同心円状に膜厚周期を連続的に変化させた凸面鏡.

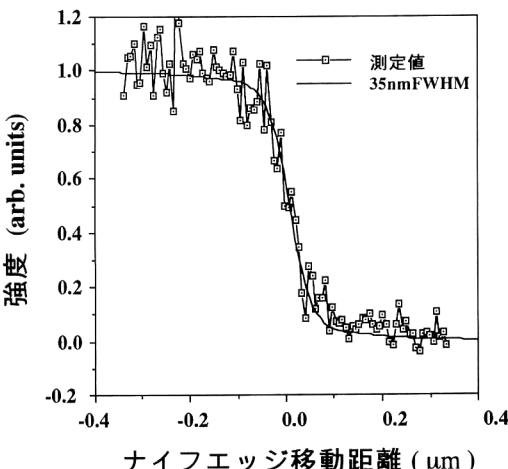


図9 224倍光学系のナイフエッジ応答.

定素子で集光された点像をナイフエッジにより走査し、透過する光をナイフエッジの後に設置したMCPで検出する。図9に5 μm ピンホールを用いて測定した素子の測定結果を示す。

被測定光学素子の点像分布関数を $P(x, y)$ とした場合、素子によって焦点面上にできる点像 $F(x, y)$ はピンホールの半径を r 、素子の倍率を M として次式のように

なる。

$$F(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} R(x', y') P(x-x', y-y') dx' dy'$$

$$R(x, y) = 1 : x^2 + y^2 \leq \left(\frac{r}{M}\right)^2$$

$$0 : x^2 + y^2 \geq \left(\frac{r}{M}\right)^2 \quad (9)$$

また、ナイフエッジ応答 $u(x)$ は次式で表される。

$$u(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(x', y') dx' dy' \quad (10)$$

輪帶瞳光学系の点像分布は、 ρ_0 を遮蔽率として、

$$P(x) = \frac{2J_1(2\pi x)}{2\pi x} - \frac{2\rho_0 J_1(2\pi\rho_0 x)}{2\pi x} \quad (11)$$

J_1 は1次のベッセル関数

で表されるが、図9からは半値幅が35 nmとなるように計算した点像分布関数によるナイフエッジ応答が実測値とよく一致した。理論的には半値幅が25 nmであり、ほぼ設計どおりの性能を有することがわかる。

この他に、被測定光学素子を結像型顕微鏡の対物レンズに用い、ナイフエッジを資料位置におき、この像から分解能を推定する方法も取られているが¹⁷⁾、この場合はコンデンサーレンズの特性も含めた値となる。

3. 今後の課題

極端紫外光の光学系としては縮小露光装置の投影光学系のように現行の波長でさらに広視野で収差を抑える方向と、顕微鏡の結像光学系や、分光分析システムの集光光学系のように短波長化を求める方向がある。

前者については、鏡の非球面化や枚数を増やすことで実現が試みられている¹⁸⁾。後者については、薄膜の成膜技術の向上が進み、波長4 nm近辺でも直入射領域で数%の反射率が得られてきている¹⁹⁾。また、短波長化において高反射率を得るには多層膜の総数が数百層と多くなり、入射角度によって反射率が大きく変化する(図10)。Schwarzschild光学系において開口を十分に利用するためには球面上で図11に示すように半径方向に膜厚を変化させて成膜することが必要となる²⁰⁾。

また、基板やアライメント等の評価技術も一層の向上が必要とされこの分野の技術開発が進んでいくことが望まれている。

文 献

- 1) 常田佐久：“宇宙X線望遠鏡”，光学，28(1999)363-371.
- 2) 木下博雄：“X線縮小リソグラフィー”，光学，23(1994)614-619.
- 3) 木下勝之，杉山 優：“X線顕微鏡”，O plus E, No.6(1994)75-81.
- 4) Y. Horikawa: “Resolution of annular-pupil optical systems,” J. Opt. Soc. Am. A, 11 (1994) 1985-1992.
- 5) D. J. Stiglani, Jr., R. Mittra and R. G. Semonin: “Resolving power of a zone plate,” J. Opt. Soc. Am., 57 (1967) 610-613.
- 6) G. Schneider, T. Wilhein, B. Niemann, P. Guttman, T. Schliebe, J. Lehr, H. Aschoff, J. Thieme, D. M. Rudolph and G. A. Schmahl: “X-ray microscopy with high-resolution zone plates,” Proc. SPIE, 2516 (1995) 90-101.
- 7) P. Kirkpatrick and A. V. Baez: “Formation of optical images by X-rays,” J. Opt. Soc. Am., 38 (1948) 766-774.
- 8) E. F. Kaelble: *Handbook of X-rays*, (McGraw-Hill, New York, 1969) Chap. 48.
- 9) S. Aoki, T. Ogata, S. Sudo and T. Onuki: “Sub-100 nm-resolution grazing incidence soft X-ray microscope with a laser-produced plasma source,” Jpn. Appl. Phys., 31 (1992) 3477-3480.
- 10) D. S. Grey: “A new series of microscope objectives: II. Preliminary investigation of catadioptric Schwarzschild systems,” J. Opt. Soc. Am., 39 (1949) 723-728.
- 11) S. Rosin: “Inverse Cassegrainian systems,” Appl. Opt., 7 (1968) 1483-1497.
- 12) Y. Horikawa, S. Mochimaru, Y. Iketaki, K. Nagai, K. Okawa and S. Iura: “Design and fabrication of the Schwarzschild objective for soft X-ray microscope,” SPIE, 1720 (1992) 217-225.
- 13) P. Erdös: “Mirror anastigmat with two concentric spherical surface,” J. Opt. Soc. Am., 49 (1959) 877-886.
- 14) Y. Horikawa, K. Nagai and Y. Iketaki: “Soft x-ray reflectometry with a laser-produced plasma source,” Opt. Eng., 33 (1994) 1723-1725.
- 15) Y. Iketaki, Y. Horikawa, S. Mochimaru, K. Nagai, M. Atsumi, H. Kamijou and M. Shibuya: “Evaluation of the optical characteristics of the Schwarzschild x-ray objective,” Opt. Soc. Am., 19 (1994) 1804-1806.
- 16) 池滝慶記, 永井宏明, 持丸象一郎, 堀川嘉明：“光電子分光用軟X線集光レンズのスループットの評価”, 表面科学, 18 (1997) 411-416.
- 17) S. Masui, S. Mochimaru, N. Watanabe, Y. Horikawa, H. Yamada and H. Kihara: “Evaluation of the Schwarzschild objective for soft X-ray microscopes,” SPIE, 1720 (1992) 217-225.
- 18) Canon: European Patent No. 87306037.0 (1987).
- 19) M. Yamamoto, M. Yanagihara, H. Kimura and M. Watanabe: “Soft X-ray multilayer optics for use with synchrotron radiation,” J. Jpn. Soc. Syn. Rad. Res., 9 (1996) 106.
- 20) 永井宏明, 池滝慶記, 熊谷 寛：“Al₂O₃/TiO₂多層膜の直入射結像光学素子への適応(検討)”, 第59回応用物理学会学術講演会講演予稿集17a-B-4 (1998).

(1999年8月2日受理)