

軸外物点を考慮した極紫外多層膜対物ミラーの光学設計

相澤 駿介*¹ 脇 俊太郎*² 豊田 光紀*³

Optical Design Method for Wide-Field Imaging Objective Made of Reflective Multilayer Mirrors for Extreme Ultraviolet Microscopy

Shunsuke Aizawa*¹ Syuntaro Waki*² Mitsunori Toyoda*³

The optical design of multilayer mirrors for imaging applications in extreme ultraviolet region is discussed. Firstly, the conditions of the Bragg reflection required for a multilayer coating, in the case of imaging an on-axis object with a concave mirror, are derived by introducing paraxial approximation. The validity of the approximation is evaluated by numerical calculations with ray tracing method, where the approximation does not hold in a wide-field optical system such as a microscopic objective or projection optics for a lithography exposure in EUV region. Next, we propose a novel design method applicable to wide-field optical system. The proposed method is demonstrated with a three-mirror microscope objective, and we show that, practical high reflectivity can be obtained over the entire surface of the mirror. We also discuss an effect of wave aberrations arising from multi-beam interference on the multilayer mirrors.

1. はじめに

波長 2 nm から 20 nm 程度の極紫外線(extreme ultraviolet: EUV)は可視光より短波長であり、回折限界では原理的に数 10 nm の空間分解能が期待できる。また、イメージング応用では、酸素、炭素や窒素など軽元素の内殻吸収端で生じる元素コントラストを利用でき、特に、波長 2.2 nm から 4.4 nm の水の窓領域¹⁾では厚さ数 μm の生体試料を染色・脱水処理せずに観察できる。このため、EUV 顕微鏡は生体、高分子や磁性材料等のナノスケール構造の動的変化をビデオ観察できる究極の光学顕微鏡として注目され、我々は多層膜ミラーを用いる直入射型顕微鏡²⁾の開発研究を展開している。

EUV 顕微鏡の実現には、その心臓部となる対物ミラーで生じる幾何収差の補正が、まず重要となる。我々は、独自に開発した全幅探索設計法^{3,4)}を用い、低収差と高倍率を両立した 2 段拡大構成による対物ミラーの新規解⁵⁾を考案した。光学系は 3 面の Mo/Si 多層膜ミラーからなる簡便な構成で、以下の高い実用性を持つ。

- 大きな開口数($\text{NA}=0.25$)により、回折ゾーンプレート方式の 100 倍明るい像が得られる。
- 軸外収差の補正により直径 160 μm の広視野を 30 nm の回折限界分解能でマルチスケール観察できる。
- 1500 倍の高倍率により CCD カメラと組み合わせれば試料をリアルタイム動画観察できる。

我々は、これまで、高倍率対物鏡の結像特性を明らかにするため放射光を光源とする EUV 顕微鏡⁶⁻¹⁰⁾の開発を行った。照明と結像用を合わせ 7 枚の多層膜ミラーから

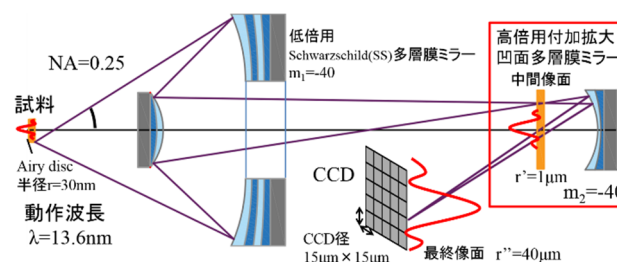


Fig. 1. EUV 顕微鏡用の 3 面対物ミラーの概略図。

なる光学系は、EUV リソグラフィ用反射マスクの観察に特化した構成で、その心臓部には、上述の顕微対物ミラーを用いた。高倍率観測では、市販 CCD 検出器のサイズが不足し、観察領域が対物ミラー全視野の 5% に制限されるものの、線幅 30 nm のテストパターンの明瞭な解像を確認できた。筆者らの知る限り、これは多層膜ミラーによる EUV 顕微鏡として世界最高の空間分解能である。

上述したように、光学材料の吸収が大きくレンズを使用できない EUV 域では、多層膜ミラーにより反射型の結像光学系を構成する必要がある。可視域で使用される Al や Ag 等のバルクミラーでは、反射は単一の界面(最表面)のみで生じるため、通常、幾何収差の補正のみの考慮で十分である。一方で、EUV 多層膜ミラーでは、界面で生じる微弱的な反射を強め合い干渉(Bragg 反射)することで 50% を超える実用的な反射率を実現する。多光束干渉の結果生じる反射波は、波長や入射角の関数として、その振幅や位相が複雑に変化する。このため、EUV 域で回折限界結像を実現するには、幾何収差に加えて、多層膜ミラーでの反射位相により生じる物理光学的な収差も考慮して光学系を設計する必要がある。本稿では、現在開発中の広視野 EUV 顕微

*¹ 東京工芸大学大学院工学研究科特別委任研究生 東北大学多元物質科学研究所 *² 東京工芸大学大学院工学研究科 修士 2 年*³ 東京工芸大学工学部電気電子コース准教授

2021 年 2 月 4 日 受理

鏡を例に、この物理光学的な収差を考慮した結像用多層膜ミラーの光学設計手法について報告する。

2. 結像用多層膜ミラーの近軸設計

現在開発中の EUV 顕微鏡用の対物ミラーの概略図を Fig. 1 に示す。対物ミラーは3面の球面ミラーによる2段拡大構成で、初段である Schwarzschild ミラー(倍率 m_1 : -40)の下流に凹面ミラーによる付加拡大系(倍率 m_2 : -40)を配置することで、1600 倍の高倍率を実現できる。また、2段拡大構成は収差補正を行う上でも利点がある。球面ミラーを同心状に配置した Schwarzschild ミラーでは、ザイデルの5収差のうち、球面、コマ、非点、および歪曲収差が補正できる一方で、像面湾曲が残留する¹⁾。付加拡大系を凹面で構成し、正の屈折力を持つフィールドフラットナーとして作用させることで、全系のペッツパール和を制御し像面湾曲を補正できる²⁾。付加拡大系の開口数は 10^{-3} のオーダーと小さく、球面、コマ、非点収差の発生は僅かなため、Fig. 1 に示す2段拡大構成の最終像面では、結局、ザイデル収差のうち、歪曲収差を除く全ての収差を良好に補正できる。典型的な設計例(開口数 0.25、動作波長 13.5 nm、焦点距離 0.5 mm、レーリー分解能 30 nm)では、試料上で直径 $160 \mu\text{m}$ の視野内で Maréchal 基準を満足した回折限界結像が実現する。放射光などで広く用いられる従来型の回折ゾンプレートでは原理的にコマ収差が残留し、実現できる視野径は数 $10 \mu\text{m}$ に制限される。これと比較すれば、上述の対物ミラーでは、従来光学系の 100 倍を超える面積を一括で観測できる。

対物ミラーの実現には、幾何収差の低減に加えて、多層膜コーティングの光学設計も重要となる。Fig. 2 に凹面多層膜ミラーで軸上物体を結像する様子を示す。光軸上の物点 P は凹面ミラーにより点 Q に像を結ぶ。以下では、物体が光軸近傍に限定される場合の多層膜ミラーの光学設計について考える。このとき、光線の開口数によりミラー上の交点座標 ρ 及び入射角 ϕ が変化する、実効的な光学定数 \tilde{n} 、周期長 d の多層膜コーティングが、設計波長 λ において高い反射率を得るには、次式の Bragg 条件を満たす必要がある。

$$2\tilde{n}d \cos \phi = \lambda \quad (1)$$

または、上式を周期長 d について解くと、

$$d = \frac{\lambda}{2\tilde{n} \cos \phi} \quad (2)$$

を得る。ミラー全面で Bragg 条件を満たすには、式(2)に従い、入射角 ϕ の変化にあわせて周期長 d を設定すればよい。近軸領域では、入射角 ϕ には以下の簡単な関係が成り立つ。

$$\phi = \frac{\rho}{2} \left(\frac{1}{q} - \frac{1}{p} \right) \quad (3)$$

ここで、 p および q は、それぞれ、物体距離および像距離である。近軸領域のガウスの式($1/p + 1/q = 1/f$)、および、

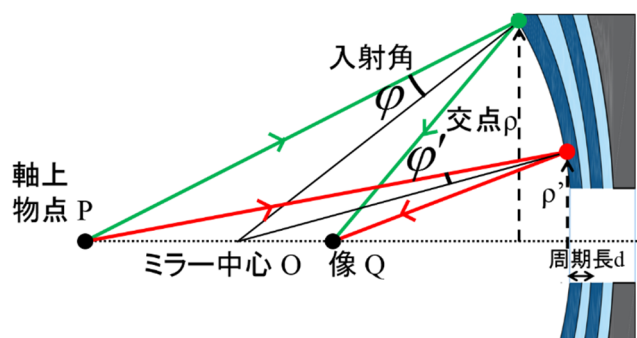


Fig. 2. 凹面多層膜ミラーによる軸上物体結像の概略図。

倍率の式 ($m = -q/p$) を代入すると、

$$\phi = \frac{f(1+m)}{2(1-m)} \rho \equiv b_1 \rho \quad (4)$$

を得る。式(4)から明らかのように、入射角 ϕ と交点座標 ρ は比例し、定数 b_1 はミラーの焦点距離 f 及び倍率 m で決まる近軸量である。同様に、近軸近似以下では式(2)にも入射角 ϕ を微小量として次式が成り立つ。

$$d \cong \frac{\lambda}{2\tilde{n}} \left(1 + \frac{\phi^2}{2} \right) \equiv d_0 \left(1 + \frac{\phi^2}{2} \right) \quad (5)$$

上式に式(4)の関係を代入すると、結局、周期長の面内分布が次式を満たすとき、ミラー全面で Bragg 条件が満足されることが分かる。

$$d \cong d_0 \left(1 + \frac{b_1^2}{2} \rho^2 \right) \quad (6)$$

式(6)から、結像用の多層膜ミラーにおいてミラー全面で高い反射率を得るには、近軸定数 b_1 を用いて、Fig. 1 に図示したように外周部で周期長を二次関数的に増大させる必要がある。

3. 軸外物点を考慮した光学設計法

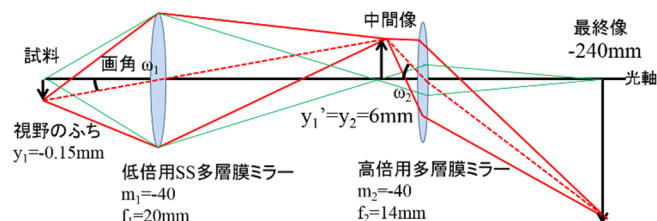


Fig. 3. 3面对物ミラーの等価光路図。

2章で取り扱った多層膜コーティングの光学設計は、近軸近似、つまり、ミラーの開口数が小さく、かつ、物体が光軸近傍に限定されることを仮定している。近似がよく成り立つ Schwarzschild ミラーなど従来光学系では、式(6)に基づいた光学設計による応用研究²⁾が報告されている。一方で、Fig. 1 に示した新考案の3面对物ミラーでは、軸外収差の補正により広視野結像が期待でき、また、次世代 EUV リソグラフィ用の投影光学系でも、従来の対物光学系と比べ著しい広視野化が進むものと考えられる。このた

め、近軸近似が成り立たない広視野光学系では、新たな設計手法が必要となる。以下では、新考案の3面対物ミラーを例に、軸外物点を考慮した広視野光学系に好適な多層膜コーティングの光学設計法について報告する。

Fig. 3 に3面対物ミラーの等価光路図を示す。2段拡大構成の Schwarzschild ミラー(低倍用 SS 多層膜ミラー)および付加拡大ミラー(高倍用多層膜ミラー)を、それぞれ等価レンズとして示した。軸外物点の影響を見積もるため、これらの光学系の最大画角 ω を考える。最大画角は、物体高 y_i と焦点距離 f_i を用い $\tan \omega_i \cong y_i/f_i$ の関係から見積もること

ができる。Fig. 3 の設計例では、低倍用ミラーの最大画角 ω_1 は約 0.5° で、多層膜ミラーへの入射角 ϕ (Fig. 2: 最大で 15°)と比べ十分に小さく、前章の近似が成り立つ。一方で、高倍用ミラーでの最大画角は約 23° となり、ミラー入射角への影響が著しく増大することが予測される。

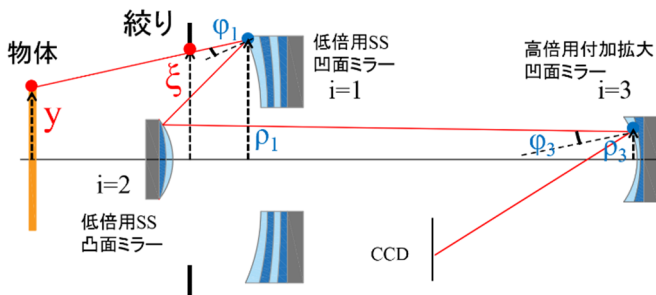
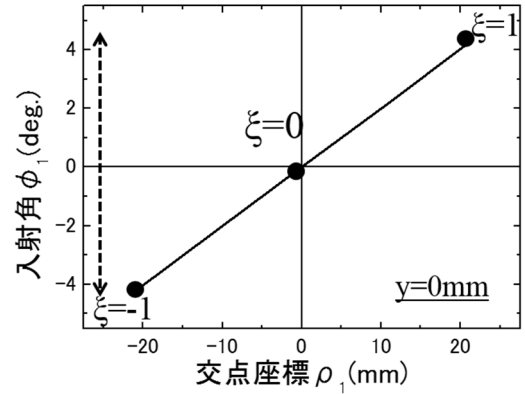


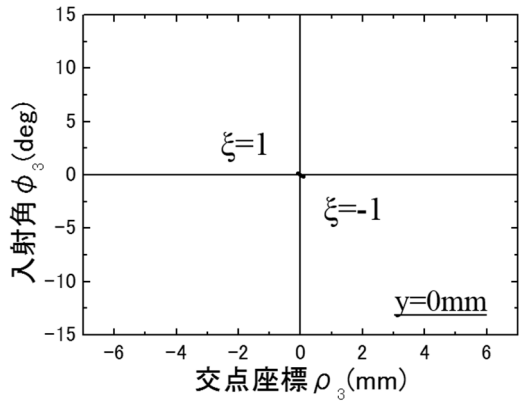
Fig. 4. 光線追跡法によるミラーへの光線入射角の数値計算..

軸外物点での物体高の影響は、厳密な光線追跡法により評価した。計算に用いたパラメータを Fig. 4 に示す。物体高 y と絞り面上の座標 ξ を用い光線を定義し、光線追跡法により各ミラー($i=1, 2, 3$)上での交点座標 ρ_i と入射角 ϕ_i を数値計算した。計算には、光学 CAD ソフト Optalix を用いた。初めに、計算の概要を説明するため、軸上物点($y=0$)に対する、低倍用 SS 凹面多層膜ミラー、および、高倍用凹面多層膜ミラーの計算結果を示す。図内の座標 ξ は絞りの最大径で規格化し ($-1 \leq \xi \leq 1$)、簡単のため、メリジオナル面内の光線のみを考慮した。Fig. 5(a) に示す低倍用ミラーでは、交点座標 ρ_1 に対して入射角 ϕ_1 は線形に約 $\pm 4^\circ$ 変化し、近軸近似に基づく式(4)がよく成り立つ事がわかる。一方、高倍用ミラーでは、絞り面座標 ξ に対する交点座標 ρ_i および入射角 ϕ_i の変化は僅かである。これは、高倍用ミラー上の開口数が小さく、絞り内の光線がミラー中心に、ほぼ垂直入射していることを表している。次に、軸外物体の影響を見積もるため、物体高を変化させて同様の数値計算を行った。結果を Fig. 6 に示した。Fig. 6(a) の低倍用ミラーでは、入射角 ϕ_1 は交点座標 ρ_1 に対して線形に変化すると同時に、物体高 y の変化に伴い、軌跡が垂直方向に平行移動することが分かる。この入射角のオフセットは、対物ミラー視野内で $\pm 0.1^\circ$ 程度であった。絞り座標 ξ に対し、入射角 ϕ が $\pm 4^\circ$ 変化することと比較すると、オフセットの大きさは十分に小さく、低倍用ミラーでは物体高 y の影響は無視

できることが、数値計算からも明らかとなった。



(a)



(b)

Fig. 5. ミラー上の交点座標と入射角との関係. (a)低倍用ミラー, (b)高倍用ミラー. 直線は絞り座標 ξ による軌跡を示す。(b)では、交点座標および入射角の変化は著しく小さくなる。

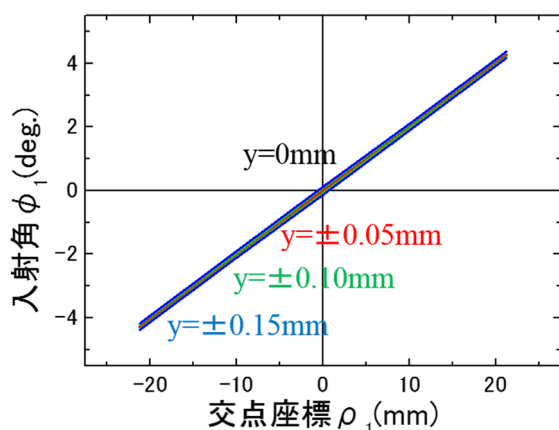
Fig. 6(b)に高倍用ミラーでの計算結果を示す。高倍用ミラーでは Fig. 5(b)と同様に絞り座標 ξ の影響は小さい一方で、物体高 y に対して、入射角 ϕ_3 が大きく($\pm 12^\circ$)変化した。これは、Fig. 5(a)に示した低倍用ミラーでの計算結果と大きく異なっている。定性的には、低倍用ミラーにより顕微鏡の物体が 40 倍に拡大された結果、高倍用ミラー上では、交点座標 ρ_3 が物体高 y に対して大きく変化する一方で、Lagrange の不変量から倍率に反比例し開口数が減少し、交点座標 ρ_3 および入射角 ϕ_3 に対して絞り座標 ξ の影響が減少するためと理解できる。以上の数値計算から、結局、低倍用ミラーでの入射角は、絞り座標(または開口数)が主要因として変化し、従来の近軸理論に基づく多層膜コーティングの設計手法が有効である一方で、高倍用ミラーでは、物体高の変数として入射角が変化し、これに基づいて多層膜コーティングの周期長分布を制御する必要があることが明らかとなった。

4. 多層膜ミラーで生じる波面収差

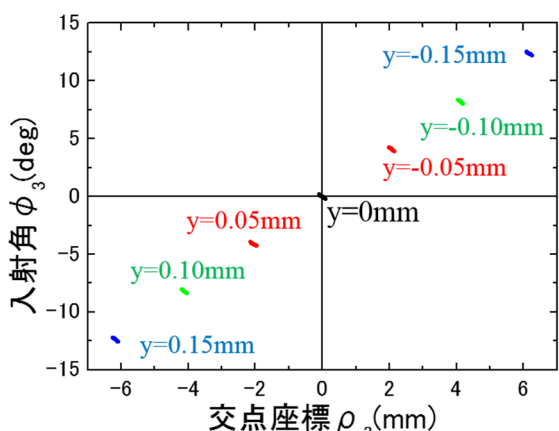
Fig. 6(b)に示すように、高倍率用多層膜ミラーでは、光線の入射角は物体高 y に対してほぼ線形に変化する。このため、絞り中心($\xi=0$)を通る主光線に対して、交点座標 ρ_2 と入射角 ϕ_2 の関係を数値計算で求め、これを式(5)に代入する

ことで多層膜コーティングの周期長分布を求めることが考えられる。

体高は有効視野の最外周に設定し、Mo/Si 多層膜ミラーは、



(a)



(b)

Fig. 6. 軸外物点による入射角 $\phi(\rho)$ の変化. (a)低倍率ミラー, (b)高倍率ミラー. 直線は絞り座標 ξ による軌跡を示す。

一方で、Fig. 6(b)からは、高倍率ミラーでは絞り座標 ξ (または開口数)により僅かに入射角が変化することがわかる。つまり、ミラー上では、光線の入射角 ϕ は一意には決まらず僅かな幅を持つ。Fig. 6(b)の計算例では、入射角 ϕ の幅 $\delta\phi$ は $\pm 0.35^\circ$ であった。この様子を Fig. 7 に模式的に示した。

入射角幅 $\delta\phi$ の存在は、たとえ主光線に対して式(5)を満足するように多層膜コーティングを成膜しても、絞りの中心を通らない光線に対しては厳密には Bragg 条件を満たせないことを示唆している。多層膜ミラーが Bragg 条件を満たせなくなると、反射率低下に加えて、反射位相が変化し、結像光学系では波面収差が発生する恐れがある。多層膜コーティングの光学設計についての議論の最後として、本章では、入射角幅に起因して生じる波面収差の数値計算例と、回折限界結像へのインパクトについて議論する。Fig. 3 に示した光学仕様の高倍率用 Mo/Si 多層膜ミラー(動作波長 13.6 nm)の、反射率および反射位相用の数値計算例を Fig. 8 に示した。米国 LBL, CXRO による光学定数データを多層膜ミラー設計ソフトウェア IMD¹²⁾に入力し数値計算を行った。ここで、物

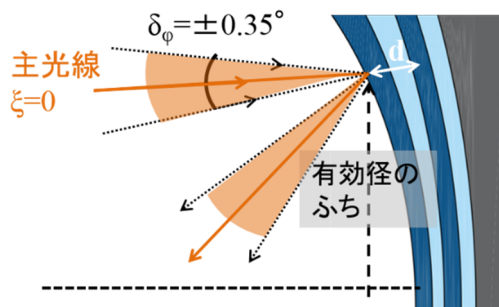


Fig. 7. 高倍率ミラーでの入射角幅 $\delta\phi$ を示す模式図。

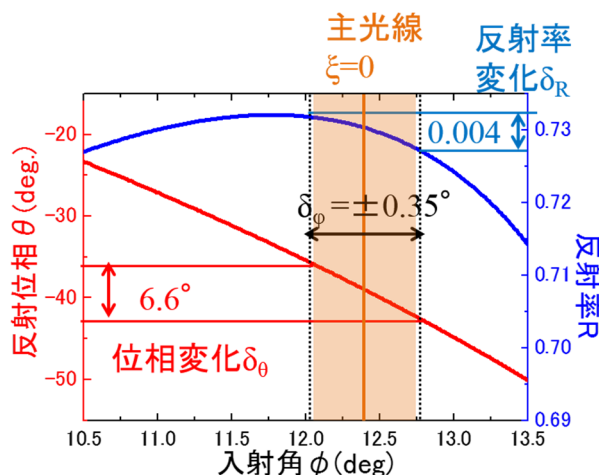


Fig. 8. 高倍率ミラーで生じる反射率および反射位相変化..

橙太線で表した主光線に対して式(2)の Bragg 条件を満足するように設計した。主光線まわりの入射角の変化幅 ($-0.35^\circ < \delta\phi < +0.35^\circ$) の範囲で、青色カーブで示した反射率の変化は 0.4% であり、反射率の絶対値 ($R = 0.73$) と比較し無視できる程度に小さいことが分かる。一方で、赤色カーブで示した反射位相 θ は 6.6° (または、 $1/55$ 波長) 変化した。反射位相の変化の大きさは、回折限界結像に求められる Maréchal 基準の四分の一程度であり、収差低減による像コントラストの向上が重要となる通常の顕微鏡応用では、その影響は許容できるものと考えられる。

一方で、EUV リソグラフィ用の投影光学系では、像コントラスト向上に加え、投影像に著しく高い寸法精度が要求され、許容される波面収差は $1/100$ 波長以下に達する。これらの光学系では、上述する多層膜ミラーで生じる反射位相の影響が無視できない可能性が高い。多層膜ミラーで生じる波面収差の低減には、Fig. 7 で示した主光線周りの入射角変化を制限する光学配置を新たに検討する必要があると考えられる。

5. まとめ

本論文では、極紫外(EUV)領域で開発が進む、多層膜ミラーによる広視野結像系の光学設計について議論した。多層膜ミラーは、複数の界面からの微弱な反射光をコヒーレントに強め合い干渉させることで、50%を超える高い反射

率を実現できる。一方で、可視域で広く用いられる AI 等のバルクミラーとは異なり、多層膜ミラーでは、波長や入射角の関数として反射率や反射位相が複雑に変化する。本稿では、開発中の EUV 顕微対物ミラーを例に、多層膜コーティングの光学設計法と波面収差の解析法について、近軸理論と数値シミュレーションの両面から議論した。さらに、広視野光学系に好適な設計手法を提案し、多層膜コーティングにより生じる物理光学的な波面収差を良好に補正できることを示した。一方で、リソグラフィ光学系など、さらなる広視野と高開口数を両立する光学系で回折限界結像を実現するには、波面収差の一層の低減が求められる。このためには、本手法を発展させ、ミラーの幾何配置により生じる幾何光学的収差と、多層膜ミラーで生じる物理光学的収差を有機的に結びつけ制御する新たな光学設計理論が必要となると思われる。これは、今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) J. Kirz, C. Jacobsen and M. Howells: *Q. Rev. Biophys.* **28** [1](1995)33.
- 2) T. Ejima, F. Ishida, H. Murata, M. Toyoda, T. Harada, T. Tsuru, T. Hatano, M. Yanagihara, M. Yamamoto and H. Mizutani: *Opt. Express.* **18** [7](2010)7203.
- 3) M. Toyoda and M. Yamamoto: *Opt. Rev.* **13** [3](2006)149.
- 4) M. Toyoda: *Opt. Rev.* **18** [6](2011)441.
- 5) M. Toyoda: *Adv. Opt. Techn.* **4** [4](2015)339.
- 6) M. Toyoda, K. Yamasoe, T. Hatano, M. Yanagihara, A. Tokimasa, T. Harada, T. Watanabe and H. Kinoshita: *Appl. Phys. Express.* **5** [11](2012)112501.
- 7) T. Amano, S. Iida, R. Hirano, T. Terasawa, H. Watanabe, K. Yamasoe, M. Toyoda, A. Tokimasa, T. Harada, T. Watanabe and H. Kinoshita: *Appl. Phys. Express.* **6** [4](2013).
- 8) T. Terasawa, Y. Arisawa, T. Amano, T. Yamane, H. Watanabe, M. Toyoda, T. Harada and H. Kinoshita: *Jpn. J. Appl. Phys.* **52** [9](2013).
- 9) T. Amano, T. Terasawa, H. Watanabe, M. Toyoda, T. Harada, T. Watanabe and H. Kinoshita: *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS.* **13** [2](2014).
- 10) M. Toyoda, K. Yamasoe, A. Tokimasa, K. Uchida, T. Harada, T. Terasawa, T. Amano, T. Watanabe, M. Yanagihara and H. Kinoshita: *Appl. Phys. Express.* **7** [10](2014)102502.
- 11) P. Erdős: *J. Opt. Soc. Am.* **49** [9](1959)877.
- 12) D.L. Windt: *Comput. Phys.* **12** [4](1998)360.