



軟 X 線顕微鏡用精密多層膜ミラーの開発

津留俊英¹, 羽多野忠¹, 原田哲男², 山本正樹¹

¹東北大学 多元物質科学研究所 〒980-8577 仙台市青葉区片平二丁目1番1号

²兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 〒678-1205 兵庫県赤穂郡上郡町光都3丁目1番2号

要旨 周期膜厚の絶対値とその分布を0.1%精度で制御する軟 X 線多層膜曲面ミラーの高精度波長マッチング技術を開発した。また、多層膜表面の部分ミリング除去によって物理光学的に反射位相を操作したミラーを軟 X 線干渉計測し、多層膜ミリングによる位相変化量がミラー基板ミリングの変化量より1桁小さいことを実証した。多層膜の表面1周期毎のミリングで sub-nm のデジタル波面補正が軟 X 線実波長で可能であることが示された。本稿では、反射光学系のシーズ技術に発展させ得る波面制御技術について述べる。

1. はじめに

波長 1 nm から 50 nm 程度の軟 X 線波長域では、光はほとんど屈折せず、また、垂直入射反射率も非常に低いので、可視光域で使われる透過型レンズや金属ミラーなどが使用できないなど光学素子の制約が大きい。このため、一般に光学系には全反射を利用した斜入射配置が用いられている¹⁾。斜入射光学系には大面積のミラーが必要であり、また、収差が大きいため集光や結像するには高精度な非球面ミラー形状が要求される。最近、硬 X 線領域では、その場計測した反射波面誤差を補償光学系で補正²⁾した斜入射ミラーで sub-nm 集光が実現された³⁾。一方、我々は、高開口数 (NA) 化が比較的容易で結像特性も良い直入射の反射型光学系に着目し、軟 X 線多層膜ミラーの高精度化に取り組んでいる。

軟 X 線波長域には生体を構成する各種軽元素の吸収端があり、特に、酸素と炭素の吸収端の間の波長 2.3 nm から 4.4 nm の「水の窓」¹⁾や炭素の吸収端の長波長側の「炭素の窓」⁴⁾は染色することなく厚さ数 μm の生きたままの生体試料を観察できる領域として着目されている。X 線顕微鏡を含む光学顕微鏡の空間分解能は NA と使用波長で決まる回折限界で制限されるから、波長の短い軟 X 線を用いれば原理的に可視光による顕微鏡より高い分解能が実現する。特に、対物ミラーとして多層膜を用いた軟 X 線顕微鏡は、広い視野の高精細画像を一括撮像できると期待されている。軟 X 線による明るい回折限界結像光学系を多層膜ミラーで構成するためには、①曲面基板上で周期膜厚と膜厚分布を精密制御した多層膜ミラー作製技術、②多層膜ミラーの周期膜厚分布と反射率の計測評価技術、③多層膜ミラーの反射波面の計測評価技術、④多層膜ミラーの反射波面誤差補正技術、の全てが要求され、我々はこれ

らの要素技術開発を並行して行っている。これまでに、多層膜の反射波長マッチング精度 $\pm 1\%$ を実現する多層膜周期膜厚の絶対値と基板面内の周期膜厚分布を制御した精密多層膜結像ミラー作製技術を開発し、レーザー生成プラズマ (LPP) 光源による波長 13.4 nm の軟 X 線顕微鏡用多層膜結像ミラーを製作した。照明系 2 枚と結像系 2 枚の Mo/Si 多層膜ミラーを周期長誤差 PV1.2% に抑える精密波長マッチングを達成した。4 枚のミラー光学系を通過した光のトータルの反射率 (スルーput) は 4 枚のミラーの反射波長が完全に一致する場合の 86% と高い値を示し⁵⁾、LPP 光源の 1 ショット撮像に成功した^{6,7)}。現状では検出器の軟 X 線 CCD カメラのピクセルサイズと結像ミラー用基板の形状誤差によって分解能が制限されているものの実用的な明るい光学系が構成できた。本稿では、多層膜ミラー光学系の波長マッチング精度を 1 桁向上させた精密多層膜ミラー作製技術について述べた後、作製した光学系で回折限界結像を達成するための多層膜のミリング除去による sub-nm 精度デジタル波面補正技術⁸⁾について紹介する。また、イオンミリング法で Mo/Si 多層膜を部分除去して反射位相を操作したミラーの軟 X 線による反射波面計測技術について紹介する。

2. 軟 X 線精密多層膜結像ミラー作製技術

2.1 軟 X 線多層膜ミラー

多層膜ミラーは、軟 X 線のみならず硬 X 線⁹⁾や中性子用¹⁰⁾のミラーとしても広く利用されている一種の人工結晶で、強め合いの干渉効果で高い反射率を得る反射増加膜である。Barbee Jr. らによる高反射率 Mo/Si 多層膜の開発¹¹⁾を契機として精力的に研究が進められ、その後、次世代半導体露光技術 (EUVL) への導入が提言¹²⁾され日本

を始め欧米各国で開発が一気に加速した。軟 X 線多層膜ミラーの構造は、可視光に用いる誘電体多層膜ミラーと同様で使用する波長と入射角で反射率が最大となるように 2 種類の物質の膜厚を選択し、それらを交互に周期的に積層したものである¹⁾。高反射率を得るには、吸収による光の減衰を極力減らすため消衰係数がともに小さく、屈折率の差が大きな物質の組み合わせを選び多層膜を構成する。ローレンスバークレー国立研究所 X 線光学センターのウェブサイトでデータベースで様々な多層膜ミラーの実測反射率が随時更新されている¹³⁾。周期数を制限した構造で最大反射率を示す多層膜の膜厚は非等周期¹⁴⁾となるが、適切な膜厚で等周期構造を十分積層すれば最大反射率が得られる。ただし、膜に吸収があるため最大反射率は 100%には達しない。入射角を ϕ 、反射ピーク波長を λ とすると、物質の軟 X 線に対する屈折率はほぼ 1 であるから、周期膜厚 D とこれらには近似的にブラッグの式と同等な $2D \cos \phi = \lambda$ が成り立つ。従って、高い反射率を得るためには、使用波長の 1/2 程度のナノメートル周期膜厚で、数 10 から数 100 周期の多層膜構造が必要となる。多層膜ミラーの物質対選択と設計法については文献 1, 15, 16 をご参照頂きたい。多層膜を基本構造とした機能的な X 線用光学素子として、本稿で紹介する結像用精密ミラー、反射・透過型偏光子及び位相子¹⁷⁾、非等周期構造による広帯域ミラー^{18,19)}、高次ブラッグ反射による狭帯域ミラー²⁰⁾、多層膜の膜厚を一方向に傾斜分布させた多波長同時分散ミラー^{5,21)}などが開発されている。

2.2 軟 X 線顕微鏡用多層膜結像ミラーの 0.1% 精度波長マッチング

複数枚のミラーを用いる軟 X 線多層膜ミラー顕微鏡でスループットを確保するには多層膜の反射波長のマッチングが重要となる。多層膜曲面ミラーは光線の入射角が中心部と周辺部で異なり外周部ほど厚い周期長が必要で、多層膜成膜時に Fig. 1(a) に示すようにミラー全面で反射波長が一致するように周期長分布を制御する。また、使用する全ミラーの周期長の絶対値を制御し反射波長を一致させる。これらを大小様々な直径と曲率が異なる基板上で行わなければならない。この要求に応えるために、2 台のイオンガンを備えたイオンビームスパッタリング成膜装置を開発した。三角柱状ホルダーの各面に板状の成膜材料を取り付け、ホルダーを回転制御し成膜物質の切り替えを行う。Fig. 1(b) に示すように基板の前面に配置した扇型の端面形状を持つシャッター板の移動速度をコンピューター制御し、自転する基板上のシャッター開口率を制御することで所定の周期長分布を形成する¹⁶⁾。物質によって成膜分布と速度が異なるが、シャッターを換えることなく速度関数を変更するだけで対応でき、また、形状が異なる基板へ所望の周期長分布で成膜することが可能である。

成膜装置には成膜モニターとしてピコメートル感度の自

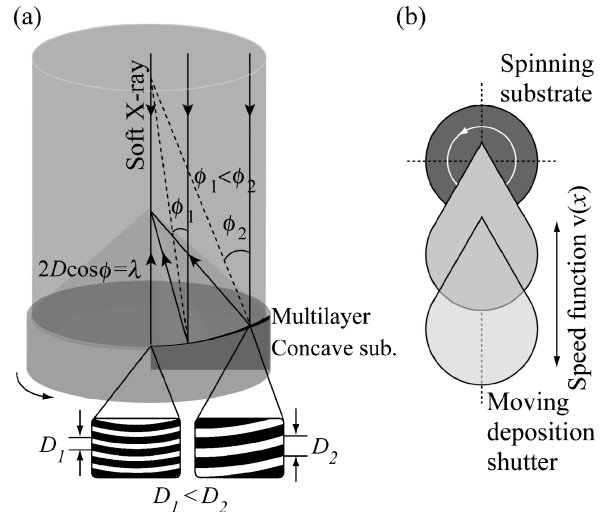


Fig. 1 (a) Soft X-ray focusing by a laterally graded multilayer mirror. (b) Schematic drawing of a programmable deposition shutter for figured multilayer fabrication.

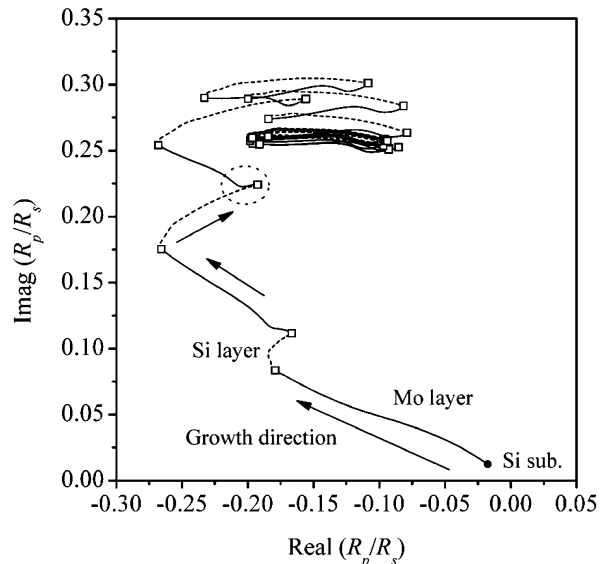


Fig. 2 The growth curve of a Mo/Si multilayer composed of 30 periods obtained by in-situ ellipsometric measurement. Squares indicate the target switching points.

動消光エリプソメーター²²⁾が設置され、反射率の p 成分 (R_p) と s 成分 (R_s) の比で定義される複素振幅反射率比 (R_p/R_s) を 200 ミリ秒間隔で計測できる。計測した試料の複素振幅反射率比はリアルタイムで複素平面上の成長曲線として描画でき、屈折率と膜厚変化を直感的に捉えることが可能である。その場計測値を layer-by-layer 法で解析すれば、層毎の屈折率、消衰係数、膜厚が決定できる²³⁾。Fig. 2 に 30 周期 Mo/Si 多層膜の成長曲線を示す²⁴⁾。Si 基板から成膜が開始され、□記号の位置で物質を切り替え、順次 Mo と Si の物質毎に方向と長さが異なる線分が描かれる。図中の丸で囲んだ Si 層上の Mo 層には成長初期の

島状成長特有な下方への膨らみ²⁵⁾が見られる。軟X線多層膜は界面の相互拡散や粗さを抑制することが必須で、周期膜厚の変動を同等の精度で計測できる手法が他に無いことから、軟X線反射率計測法や小角X線回折法、多層膜断面TEM観察などの成膜後の解析手法を総合した評価が有用である。

前述のように多層膜ミラー光学系の構築には各ミラーの周期長の絶対値を精密に一致させなければならず、成膜速度の時間安定性と再現性が要求される。波長13 nmを使用波長とすると、Mo/Si多層膜の反射バンド幅から±1%以内の周期長制御精度が求められる。そこで、イオンガンの成膜パラメーターのリアルタイムモニターシステムを構築してパラメーターを最適化し、イオンビーム強度の安定性±0.5%と、再現性±0.4%を実現した。曲面上の多層膜の周期膜厚分布計測は、簡便かつ高精度なX線回折法を利用する。所定の曲率の球面を多角形近似した擬似球面ホルダーに配置したSiウエハー小片上に多層膜を成膜し、小片毎に計測した周期膜厚から成膜分布を得る。曲率が小さい場合にはSiウエハー小片を球面に並べる設置誤差の影響が大きいいため、同じ曲率半径のシリンダー形状基板を用

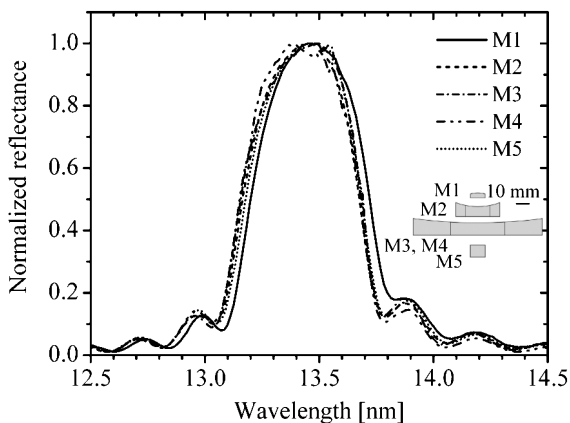


Fig. 3 Normalized reflection spectra of Mo/Si multilayer mirrors.

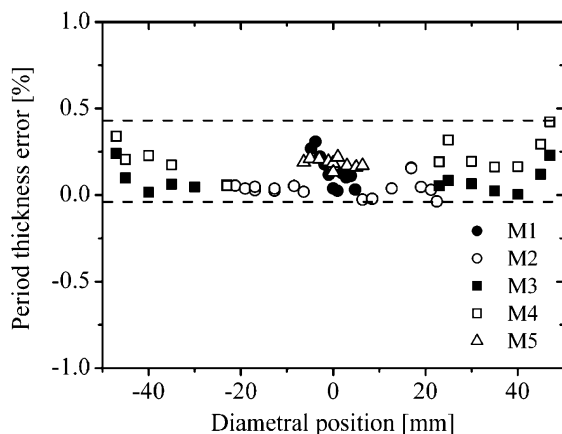


Fig. 4 Period thickness distributions of Mo/Si multilayer mirrors.

いて十分な精度で球面と同等の膜厚分布を形成する。成膜速度の再現性は、基板とターゲット板の距離に極めて敏感で、基板位置が0.1 mm 近づくと成膜速度が0.1%程度上がる。そこで、基板ホルダーとターゲット板の位置合わせステージにスケールを装着するとともに、基板ホルダーに対する球面基板の中央位置を干渉計を利用して合わせ、基板とターゲット板の距離を0.02 mmの精度で再現する方法を開発した。開発した技術を用いて照明系2枚と結像系3枚の球面ミラーから成る顕微鏡用Mo/Si多層膜ミラーの作製を行った。Photon Factory (PF) BL-12Aで計測した軟X線反射スペクトルをFig. 3に、周期長分布をFig. 4に示す。曲率と直径が異なる多層膜球面ミラーで波長マッチング精度PV0.4%を達成し、精密膜厚制御技術が炭素の窓用多層膜ミラー顕微鏡に適用できる精度に達したことが示された。これらの成膜技術によって高NAの顕微光学系の個々のミラー全面で反射波長を揃え、高いスループットを確保できる。

3. 軟X線 sub-nm ミリング波面補正技術

3.1 ミリング波面補正原理

顕微鏡による回折限界結像の要件として高NA・高スループットな光学系に加え、光学系全体の波面収差を $\lambda/14$ 以下(Marechal条件)に抑えなければならない。従って、ミラーによる光路の折り返しから1枚の軟X線多層膜ミラーに許される波面誤差は $\lambda/28$ 以下であるから、1 nm以下の基板形状精度が要求される。基板の精密研磨加工でこの値を確実に達成するのは困難であるため、我々は、多層膜ミラー表面の周期毎のミリング除去によって反射波面をsub-nm精度で物理光学的に補正する技術⁹⁾の開発を行っている。

ミラー表面の平均屈折率 n 、周期膜厚 D の多層膜1周期を部分的に除去した場合を考える。反射位相の基準を最表面とすると、多層膜除去による光路長変化は $2(1-n)D$ である。軟X線域の物質の屈折率は1に近く、 $(1-n)$ は $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 程度であるから光路差は微量となる。すなわち、 $(1-n)$ の分だけ除去膜厚による位相の制御精度の向上が期待できる。多層膜反射は各界面からの僅かな反射の総計であるから表面多層膜を透過膜と見なし、シュミット望遠鏡の補正板²⁶⁾に相当する補正膜として機能させる。

Fig. 5に周期長7.40 nmの40周期Mo/Si多層膜ミラーミリングと多層膜を付加しない基板をミリングした時の反射位相変化の計算値を示す。基板ミリングでは除去量とともに反射位相が減少するが、多層膜ミリングは周期長の周期で階段状に減少する。多層膜1周期のミリング除去は基板を0.27 nm除去したことに相当し約 14° 位相が遅れる。また、Siの屈折率は1に極めて近いいため、大きな反射位相変化はMo層のミリングで生じ、Si層のミリングでは反射位相はほとんど変化しない。つまり、ミリング深さを精

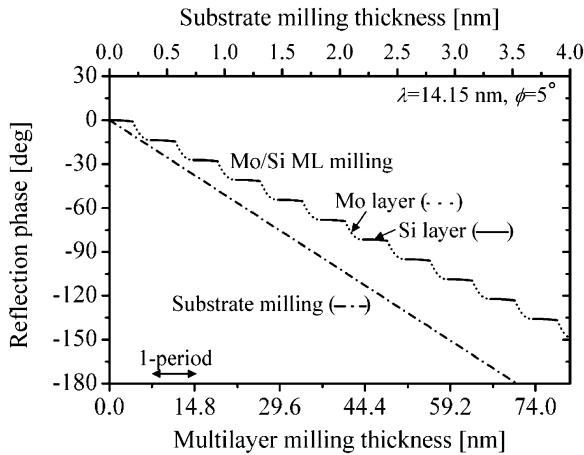


Fig. 5 Theoretical reflection phases at a wavelength of 14.2 nm by surface milling of a 40-periods Mo/Si multilayer mirror and a substrate.

密に制御することなく、4 nm の Si 層が最表面層となる条件を検知すれば sub-nm 精度で波面を補正できる。従来技術で作製した形状精度が数 nm の基板上に成膜した多層膜を10周期程度ミリングすれば1 nm を切る高精度な波面が期待できる。

3.2 イオンミリングによる全面一括波面補正技術

多層膜の反射波面誤差を表面多層膜ミリング除去で補正するために、イオンミリング波面補正装置を開発した。当初は、取東イオンビームの滞在時間をコンピューター制御しながら多層膜表面を走査し所定の周期数分ミリングを行う方法を試みたが、ビーム強度の均一性が不十分であることと、直径数10 mm の多層膜全面をミリング加工するには数10時間必要であることが分かった。そこで、大口径イオンビームを用いて多層膜ミラー全面を一括でミリングできる波面補正装置を開発した^{27,28)}。

装置は、ECR 型イオン源で生成した直径150 mm の Ar イオンビームを直径100 mm の多層膜全面に照射しミリング加工する。200 rpm で回転する多層膜ミラーの全面を実質的に一定速度でミリングするために、イオンビームの空間密度分布と加工時間の積を一定にするイオンビーム強度均一化マスクを設置する。軟 X 線干渉計で波面誤差を計測し、得られた波面マップに従い加工領域を指定するためのミリング領域指定テンプレートを作製する。テンプレートの開口部を通過したイオンビームで補正位置のミリング加工を行う。ミリング深さ分布を X 線回折法で高精度に計測し、直径100 mm の平面ミラー全面でイオンビーム強度を±1.7%以内に均一化した。この時の Mo と Si のミリング速度はそれぞれ3.9 nm/min, 5.1 nm/min であり、ミラー全面の多層膜1周期を2分で一括補正できる実用的な装置である²⁹⁾。

ミリング領域の指定は、ミラーから3 mm 前面の位置に

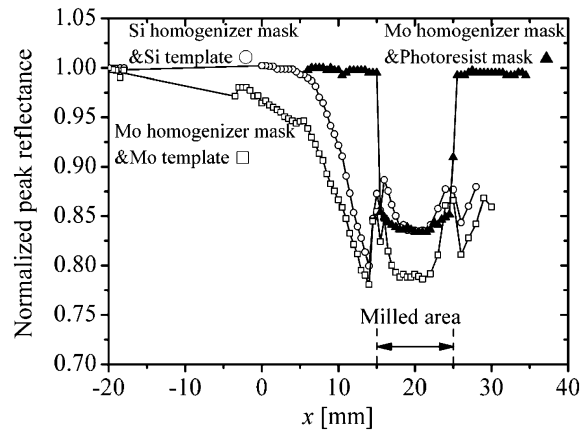


Fig. 6 Normalized soft X-ray peak reflectance after local ion millings with 10×10 mm² opening template made of Mo, Si and photoresist.

精度良く固定した Si または Mo 製のテンプレート、または、多層膜表面に塗布したフォトレジストを用いる。テンプレートによるミリングでは、イオンビームが開口部を通過するとき外周部に僅かに逸れるためミリング領域と非ミリング領域の境界部に約500 μm のなだらかな傾斜領域が形成される。この傾斜領域には Mo と Si の可視分光反射率の違いによってミリング除去層数分の縞模様が見える²⁹⁾。一方、フォトレジストによるミリングは急峻なミリングエッジが観察される。10 mm 角開口のテンプレートとフォトレジストでそれぞれ40周期と50周期の平面 Mo/Si 多層膜ミラーを10周期部分ミリングし、場所ごとに軟 X 線反射ピーク波長の反射強度を計測した結果を Fig. 6 に示す。テンプレートとフォトレジストの両者でミリング領域に反射率の低下が見られる。これは、反射率が十分飽和する積層数に達していないことと、イオンビーム照射による厚さ数 nm 化合物層の形成が原因と考えている。開口部外側の非ミリング領域は、フォトレジストで生じない反射率低下が Mo と Si の材質によらずテンプレートによるミリングで生じたことから、多層膜やイオンビームの加速電極板などのスパッタ物質が付着したものと思われる。ミリング領域内の反射率低下の原因が反射波面に与える影響が懸念されるが、軟 X 線領域の屈折率には大きな差が無く、次に述べる干渉計測からも実質的に波面補正に影響しないことが示された。

3.3 部分ミリングによる反射位相操作軟 X 線多層膜ミラーの干渉計測

軟 X 線多層膜ミラーの表面1周期を部分ミリングすると表面が7.4 nm 凹むため、ミラー全体を周期長分変位させたと考えれば非ミリング領域と比べて約360°位相が遅れると考えることができるが、物理光学的な効果によって僅か14°しか遅れないことを3.1に述べた。このことを示すため軟 X 線実使用波長による干渉計測を行った。最小限

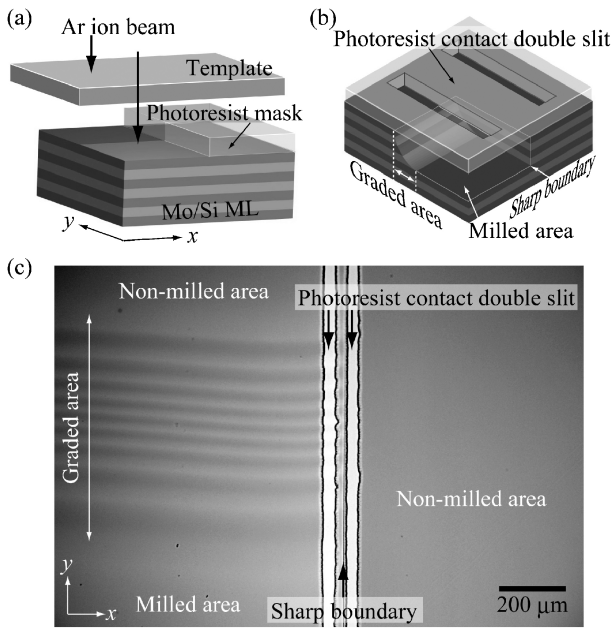


Fig. 7 (a) Local ion milling with photoresist contact mask and a template. (b) Schematic drawing of a Mo/Si multilayer mirror with photoresist contact double slit. (c) Micrograph of a Mo/Si multilayer mirror with photoresist contact double slit.

の光学素子でかつ精密な光学素子アライメントが不要なヤングのダブルスリットの干渉計を応用し、部分ミリングによって反射位相を操作した多層膜ミラーの反射波面を計測した。2つのスリットを通る光の位相が相対的に変化すると干渉縞に横ずれが生じる。多層膜ミラーとダブルスリットを近接させて配置し、ダブルスリットを透過した2つの光が互いに重ならないうちにミラーの異なる場所で反射し、再びダブルスリットを透過させ干渉縞を生成する。ミラーの反射位相変化を干渉縞の変位として直接観測できる構成である。Mo/Si多層膜平面ミラーを部分ミリングし、1つのスリットは非ミリング領域のみを、もう一方はミリング領域と非ミリング領域の両者を含むようにダブルスリットを配置する。非ミリング領域同士の干渉縞を基準とすれば、ミリング領域と非ミリング領域の位相変化を干渉縞の変位量として計測できる。ミリング領域と非ミリング領域の間には、ミリング深さがなだらかに変化する領域を設け、干渉縞の飛びを防ぐ。**Fig. 7(a)**に部分ミリング多層膜ミラーの作製模式図を示す。フォトレジストをマスクとして、スリット間にスリットに平行なミリングと非ミリング領域のシャープな境界を形成し、ミラーから数mm浮かせたテンプレートで一方のスリット内になだらかな傾斜領域を作る。フォトレジストの軟X線反射率が十分低いことを利用して、部分ミリングしたMo/Si多層膜ミラー表面に幅30 μm、間隔80 μmのフォトレジスト密着ダブルスリットを作製した。**Fig. 7(b)**にその模式図を示す。**Fig. 7(c)**は作製したダブルスリット付多層膜の顕微鏡写真で、右半分とダブルスリットを挟んだ左上部に非ミリング領域

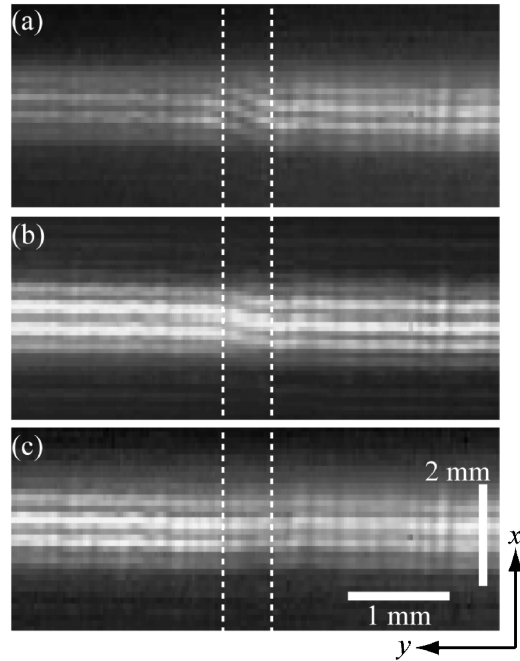


Fig. 8 Fringe patterns observed by a Young type interferometer in the reflection configuration at wavelengths of (a) 13.20 nm, (b) 14.15 nm and (c) 15.00 nm.

が、左下部にミリング領域があり、左中央部の縞模様がミリング深さがなだらかに変化する領域に対応する。

直入射角5°の反射ピーク波長が14.15 nmである40周期Mo/Si多層膜を10周期74 nmを部分ミリングし、PF BL-12Aの光学素子評価装置内にヤングの干渉計を構成した。**Fig. 9(a), (b), (c)**に波長13.20 nm, 14.15 nm, 15.00 nmで計測した干渉縞を示す。左側が非ミリング領域同士の干渉縞、中央の点線部が非ミリング領域とミリング傾斜領域による折れ曲がった干渉縞、右側がミリング領域と非ミリング領域による干渉縞である。ミリング深さは縞10本分のずれ量に相当するが、多層膜の効果によって位相を操作した部分ミリング多層膜の縞は1本分もずれないことが明らかとなった。また、波長を変えたときの位相変化量も我々の予測と一致する振る舞いを見せた。

4. 終わりに

軟X線領域で回折限界結像を目指した多層膜ミラー作製技術として、0.1%精度波長マッチング技術とミリング波面補正技術について述べた。これらの技術によって波長マッチングした高NA光学系で所定の波面精度を満たした回折限界結像ミラーの実現が期待できる。多層膜ミラーによって光学設計の自由度も増し様々な実用的な計測装置が開発されている。また、最近では、放射光や実験室光源に加え自由電子レーザーなど優れた軟X線光源の出現により、この領域の応用分野が広がりつつある。これまで軟

X線を含む光工学は、光の“波長”と“振幅”を制御し計測する技術の進展とともに研究が進められてきた。これらの変化は色や強度として直感的にも捉え易い。一方、光の波動性から生じる“位相”や“偏光”は実用技術の観点から今後大きな発展の余地がある。電磁波として光が備える波長・振幅に加えて位相や偏光を制御し計測する技術開発は今後の創造的・独創的な研究開発に寄与するものと期待される。軟X線光工学のさらなる進展のためには、光を自由自在かつ正確に操ることが不可欠であり、高精度な光学素子作製技術とその計測評価技術なくして発展はありえない。本稿が軟X線光工学の進展の一助になれば幸いである。

謝辞

本研究の一部はJST先端計測分析技術・機器開発事業要素技術プログラム「軟X線多層膜鏡の1Å精度波面補正技術の開発」の助成を受けて実施した。また、多元研表面プロセス解析研究分野の柳原美廣教授、江島丈雄准教授、豊田光紀助教には顕微鏡実用化の観点から多大な助言を頂いたことを付記し、感謝致します。

参考文献

- 1) 例えば、波岡武，山下広順 共編：X線結像光学（培風館，1999）。
- 2) T. Kimura, S. Handa, H. Mimura, H. Yumoto, D. Yamakawa, S. Matsuyama, K. Inagaki, Y. Sano, K. Tamasaku, Y. Nishino, M. Yabashi, T. Ishikawa and K. Yamauchi: *J. Jpn. Appl. Phys.* **48**, 072503-4 (2009).
- 3) H. Mimura, S. Handa, T. Kimura, H. Yumoto, D. Yamakawa, H. Yokoyama, S. Matsuyama, K. Inagaki, K. Yamamura, Y. Sano, K. Tamasaku, Y. Nishino, M. Yabashi, T. Ishikawa and K. Yamauchi: *Nature Phys.* **6**, 122-125 (2010).
- 4) I. A. Artyukov, A. V. Vinogradov, Y. S. Kas'yanov and S. V. Savel'ev: *Quantum Electronics* **34**, 691-692 (2004).
- 5) T. Hatano, T. Harada and M. Yamamoto: *PF Activity Report 2007 #25, PART A*, 64-65 (2009).
- 6) T. Ejima, F. Ishida, H. Murata, M. Toyoda, T. Harada, T. Tsuru, T. Hatano, M. Yanagihara, M. Yamamoto and H. Mizutani: *Opt. Express* **18**, 7203-7209 (2010).
- 7) 山本正樹： *Isotope News* **659**, 2-6 (2009).
- 8) M. Yamamoto: *Nucl. Instrum. Methods A* **467-468**, 1282-1285 (2001).
- 9) K. Yamashita, K. Akiyama, K. Haga, H. Kunieda, G. S. Lodha, N. Nakajo, N. Nakamura, T. Okajima, K. Tamura and Y. Tawara: *J. Synchrotron Rad.* **5**, 711-713 (1998).
- 10) R. Maruyama, D. Yamazaki, T. Ebisawa, M. Hino and K. Soyama: *Physica B* **385-386**, 1256-1258 (2006).
- 11) T. W. Barbee, Jr., S. Mrowka and M. C. Hettrick: *Appl. Opt.* **24**, 883-886 (1985).
- 12) H. Kinoshita, K. Kurihara, Y. Ishii and Y. Torii: *J. Vac. Sci. Technol.* **B7**, 1648-1651 (1989).
- 13) <http://henke.lbl.gov/multilayer/survey.html>
- 14) M. Yamamoto and T. Namioka: *Appl. Opt.* **31**, 1622-1630 (1992).
- 15) 山本正樹： *応用物理* **62**, 676-682 (1993).
- 16) 羽多野忠： *光学* **31**, 532-537 (2002).
- 17) M. Watanabe, T. Hatano, K. Saito, W. Hu, T. Ejima, T. Tsuru, M. Takahashi, H. Kimura, T. Hirono, Z. Wang, M. Cui, M. Yamamoto and M. Yanagihara: *Nuclear Science and Techniques* **19**, 193-203 (2008).
- 18) A. G. Michette and Z. Wang: *Opt. Commun.* **177**, 47-55 (2000).
- 19) T. Tsuru: *AIP Conf. Proc.* **879**, 1524-1527 (2007).
- 20) T. Harada, T. Hatano and M. Yamamoto: *IPAP Conf. Series* **7**, 195-197 (2006).
- 21) T. Matsushita, E. Arakawa, Y. Niwa, Y. Inada, T. Hatano, T. Harada, Y. Higashi, K. Sakurai, M. Ishii, M. Nomura and K. Hirano: *Eur. J. Special Topics (Proc. SXNS10)* **167**, 113-119 (2009).
- 22) M. Yamamoto, Y. Hotta and M. Sato: *Thin Solid Films* **433**, 224-229 (2003).
- 23) T. Tsuru, T. Tsutou and M. Yamamoto: *Thin Solid Films* **455-456**, 705-709 (2004).
- 24) T. Tsuru and M. Yamamoto: *Thin Solid Films* **515**, 947-951 (2006).
- 25) M. Yamamoto and T. Namioka: *Appl. Opt.* **31**, 1612-1621 (1992).
- 26) E. Hecht: *Optics* (Addison Wesley, 2001) p. 226.
- 27) A. Tosaka, Y. Sakai, T. Tsuru and M. Yamamoto: *J. Vac. Soc. Jpn.* **51**, 115-117 (2008).
- 28) T. Tsuru, A. Tosaka, Y. Sakai and M. Yamamoto: *J. Phys.: Conf. Ser.* **186**, 012077-3 (2009).
- 29) T. Tsuru, Y. Sakai, T. Hatano and M. Yamamoto: accepted to *AIP Conf. Proc.*

● 著者紹介 ●

**津留俊英**

東北大学 多元物質科学研究所 助教

E-mail: tsuru@tagen.tohoku.ac.jp

専門：光計測

【略歴】

1997年学習院大学大学院自然科学研究科物理学専攻博士前期課程修了。1998年学習院大学理学部助手。2001年学習院大学博士（理学）。2002年3月より現職。

**羽多野忠**

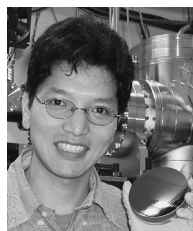
東北大学 多元物質科学研究所 助教

E-mail: hatano@tagen.tohoku.ac.jp

専門：軟X線光学

【略歴】

1993年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。1994年PF非常勤研究員。1996年東北大学科学計測研究所非常勤研究員。1998年東北大学科学計測研究所助手。2001年改組により東北大学多元物質科学研究所助手、現在に至る。

**原田哲男**

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 助教

E-mail: harada@lasti.u-hyogo.ac.jp

専門：軟X線光学

【略歴】

2007年東北大学工学研究科博士課程修了。2007年東北大学多元物質科学研究所研究支援者。2008年10月より現職。

**山本正樹**

東北大学 多元物質科学研究所 教授

E-mail: yamamoto@tagen.tohoku.ac.jp

専門：応用光学

【略歴】

1974年学習院大学大学院自然科学研究所博士課程単位取得退学，理学博士（学習院大学）。1974年学習院大学理学部助手。1975年英国ヨーク大学理学部リサーチフェロー。1979年学習院大学理学部助手。1981年東北大学科学計測研究所助手。1991年同助教授。1998年同教授。2001年改組により東北大学多元物質科学研究所教授，現在に至る。

Development of high throughput and wavefront error corrected soft X-ray multilayer imaging optics

Toshihide TSURU¹, Tadashi HATANO¹,
Tetsuo HARADA² and Masaki YAMAMOTO¹

¹Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University,
2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577

²Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo,
3-1-2 Koto, Kamigori, Ako, Hyogo 678-1205

Abstract In the soft X-ray wavelength region, peak wavelength matching was achieved by controlling the nm-period thickness and its distribution of Mo/Si multilayer imaging optics. Soft X-ray interferometry on multilayer reflection phase manipulation by surface milling showed a good feasibility of sub-nm digital wavefront error correction of multilayer mirrors for the diffraction limited imaging.