X線光学素子用超精密加工技術の現状と展望

安藤 学, 根岸 真人, 福田 恵明*

キヤノン(株) 生産技術研究所 (〒146-8501 東京都大田区下丸子 3-30-2)

*キヤノン(株) ナノテク研究所 (〒321-3292 栃木県宇都宮市清原工業団地 20-2)

Next-Generation Ultra-Precise Aspherical Manufacturing Technology for X-Ray Optics

Manabu ANDO, Mahito NEGISHI, and Yasuaki FUKUDA

Canon Inc., Micro-Mechanics Research Div., Production Engineering Research Laboratory

3-30-2 Shimomaruko, Ohta-ku, Tokyo 146-8501

*Canon Inc., Nanotechnology Research Center, 20-2 Kiyohara-Kogyo-Danchi, Utsunomiya, Tochigi 321-3292

(Received October 14, 1998)

This paper describes an overview of the manufacture and measurement of aspherical mirrors for X-ray optics. In X-ray lithography and astronomical observation, to which X-ray optics are typically applied, especially in EUV lithography that uses extra ultraviolet light, it is necessary to achieve a degree accuracy of 0.25 nm RMS, which is higher than that in the past. The manufacture of this kind of mirror requires a high level of technology for three domains: figuring (low spatial frequency), smoothing ripples (mid-spatial frequency) and surface roughness (high spatial frequency). Polishing is the most reliable technique for these three domains. Therefore, stabilization of the polishing process is the most important factor in improving the accuracy of the mirrors. The measurement accuracy for roughness and ripple is now approaching the target value for the manufacture of EUV optics. A new interferometer that utilizes point diffraction has been developed, providing an accuracy of 0.5 nm RMS. Increasing the aspherical surface volume remains a goal for the future.

Key Words: X-Ray optics, Aspherical optics, Super smooth polishing, Figure measuring, Surface roughness

1. はじめに

結像光学に代表される光学技術は今世紀に可視領域近傍で著しい発展を遂げた。そして現在、X線領域へとその応用範囲を広げようとしている。

ここではX線リソグラフィ、X線天文学、X線顕微鏡などの分野で開発、評価が進められているX線光学素子のうち、特に重要な構成要素と考えられる非球面ミラーの加工技術について概観する。

2. X線光学素子の現状

リソグラフィ技術では超1.5 μ mの設計ルールを微細化に伴い使用波長の短波長化が進んでいる。1nm近傍の波長を用いた斜入射系のX線等倍露光技術はデバイス作製のプロセス検討が進んでおり、遠紫外リソグラフィ(ArF = 193nm)の次の露光技術として期待されている¹⁾。斜入射系で用いられる非球面ミラーはシリンドリカル、トロイダル形状が用いられることが多い。規格としては特にスロープエラーが厳しく0.5 μ radが必要な場合もある²⁾。材料としては

高エネルギー放射光に直接さらされる部分ではCu, Beと同等な熱伝導率を持ち高剛性なCVD-SiCを用いることが多いが、大きな熱負荷に対して冷却上有利な金属鏡の開発も進められている^{2,3)}。そのほかの斜入射系の用途には単結晶シリコン、石英ガラス、ショット社のゼロデュアなどが用いられる。

さらにその次の世代の候補として、縮小投影光学系を用いたEUVリソグラフィは13nmの波長の光を中心にフィジビリティの確認を済ませ、露光実験装置作製のフェーズに入っている。米国で設立されたEUVリソグラフィの開発会社EUV-LLC社で開発が進められている投影系のレイアウトをFig.1に示す⁴⁾。EUVリソグラフィでは直入射系構成となりミラーは高次の軸対称非球面として設計されている。ここではM3が球面ミラーでありそれ以外の3枚が非球面ミラーである。これらの素子はすべて非球面量(球面、平面などの基本形状からの最大変位量)が20 μ m以下である⁵⁾。要求される精度をTable 1に示す⁴⁾。これらの値はPSD(Power Spectral Density)の積分値から定義されている。形状(空間波長1mm以上)では0.25nm RMSと従来にない高い精度が要求されている。ミラー材には特に熱による変形が問題と

Fig.1 Projection optics layout for ETS design showing the full parent optics.⁴⁾

なると考えられ低熱膨張材(ゼロデュア, コーニング社のULEなど)が用いられる. なお, 木下らによりNTTで開発が進められた装置の2枚の非球面ミラーは楕円面であり, 非球面量はそれぞれ0.6, 2.0 μm であった⁶⁾.

X線領域の光学の応用としてX線天文学用の観測機器が最近大きな発展をしている. 一つは太陽の同時多波長観測計画MSSTA (Multi Spectral Solar Telescope Array)で多くの成果を上げている直入射系である⁷⁾. MSSTAの観測波長領域は主として14nmから280nmである. 素子構成にはRitchey-Chretien, Herschelien系が主に採用され, 表面粗さ0.2nm RMS以下の超平滑な主鏡(球面, 回転双曲面)が供給されている. また, 斜入射系を用いたX線観測望遠鏡を専用の人工衛星に搭載した観測も行われている. こちらの波長領域も0.1nm から 30nm 程度と広いため, 多層膜の周期を変化させて広帯域化を図ったスーパーミラーの研究が行われており, その界面の粗さは0.5nm RMS以下が実現されている^{3,8,9)}. 斜入射系のX線望遠鏡においては基本的にWolterの設計に沿った2つの回転2次曲面からなる複合面が必要となる.

まだ研究のレベルではあるが, X線顕微鏡においても地道な研究が進められている. 現在はフレネルゾーンプレートを用いた結像系が主であるが, 多層膜ミラーを用いた対物光学系も検討され始めている. 対象はレーザー核融合によるプラズマの診断から始まったが, 現在は生体観察への応用が試みられている¹⁰⁾.

3. 非球面の加工

非球面加工は物理化学的な方法と, 機械的な研磨加工による方法に分けられる. 物理化学的な方法はドライプロセスによる除去加工と付着加工に分けられ, さらに除去加工はイオンビームスパッタ加工とプラズマを用いたケミカルエッチング加工が代表的である. イオンビーム加工は石英ガラス, 低熱膨張ガラスについて検討が進んでおり, 大型の光学天体望遠鏡の主鏡など, 既に実用化されている領域もある¹¹⁾. ケミカルエッチング加工は雰囲気が13hPa以下で電源周波数1MHz程度の条件による方法と¹²⁾, 大気圧以上の雰囲気中で150MHz程度の電源周波数を用いる方法

が開発されている¹³⁾. ケミカルエッチング加工は材料が石英ガラス, 低熱膨張ガラス, SiC, Siなどに限定されるが表面のダメージなしに高能率に材料を除去できることが特徴である. また, 付着加工は軸対称で微小な非球面量を持つ素子を形成するのに適している^{14,15)}. 付着加工は装置に干渉計などを組み込みインプロセスで形成中の形状を観察できることが特徴である. これらの機械加工によらない方法は形状(低空間周波数)領域を加工, 成形する能力は高いが, リップル(中間空間周波数), 表面粗さ(高空間周波数)領域では加工能力(平滑化能力)は低い. このため前加工で被加工面を研磨し, リップルと表面粗さを仕上げておく必要がある. なお, 後述するように前加工は高精度な形状が容易にできる平面, 球面に仕上げるべきである.

機械的な非球面形状の創成研磨法は前述の物理化学的な方法と同様に低空間周波数領域の加工である^{16,17)}. このアルゴリズムはプレストンの経験則に従うコンボリューションモデル

$$h(x, y) = \iint_A g(u, v) \cdot f(u - x, v - y) du \cdot dv + e(x, y) \quad (1)$$

に基づく¹⁸⁾. $h(x, y)$ は目標除去形状, $f(x, y)$ は研磨工具の単位時間当たりの運動により得られる単位除去形状, $e(x, y)$ は残差形状, そして $g(u, v)$ は領域Aにわたる研磨工具の滞留時間分布であり, 単位除去形状 $f(x, y)$ が決まると $e(x, y)$ を最適にするような目標除去形状 $h(x, y)$ に対するデコンボリューションで求められる. この $g(u, v)$ を実現するように研磨工具を被加工面上で変速走査する. なお, ここで $f(x, y)$ は

$$f(x, y) = \int kp(x, y)v(x, y)dt \quad (2)$$

から, 除去能率 k の研磨条件と研磨工具と被加工面間の圧力 $p(x, y)$ および速度 $v(x, y)$ の時間積分によって求められる. ここで研磨工具を駆動する研磨ヘッドの加圧力 $p_A(x, y)$ と運動速度 $v_A(x, y)$ は機械的に高い精度で制御可能であるが, 研磨除去プロセスの除去能率 k の安定性は不確定な要因である. すなわち, 研磨時間が長時間に及ぶとデコンボリューション時に使用した $f(x_0, y_0)$ と実加工中の $f_A(x, y)$ にかい離が生じるおそれがあり, これが非球面研磨の誤差形状になると考えられる.

3.1 非球面量が加工精度に及ぼす影響

非球面の加工は要求される非球面量によって加工の難易度は異なる. 非球面を設計する場合にはこの点を十分に留意する必要がある. たとえば, 球面からの非球面量が10 μm 以下と微量であれば, まず前加工で被加工面を球面へと研磨する. 球面の研磨加工は通常被加工面とほぼ同

Table 1 Specification for EUVL aspherical mirror substrates.⁴⁾

Component	Specification	Definition
Surface figure	< 0.25 nm RMS	Integration of PSD for frequencies between (clear aperture) ⁻¹ and 1 mm ⁻¹
Mid-spatial frequency roughness	< 0.20 nm RMS	Integration of PSD for frequencies between 1 mm and 1 μm
High-spatial frequency roughness	< 0.10 nm RMS	Integration of PSD frequencies < 1 μm

サイズの研磨工具を用いるのでリップルの平滑化能力が高く、研磨剤の選択、研磨工具材料を適切に設定することで超平滑な表面粗さも得られやすい¹⁹⁾。このような平面、球面の超平滑研磨ではリップル、表面粗さともに0.1nm RMSレベルが可能との報告もある²⁰⁾。従って、この前加工で得られるリップルがない表面粗さも良好な状態を維持して非球面形状を創成すればよい。すなわち、空間波長領域ごとの加工戦略を合理的に設定できるので高精度な非球面形状が加工可能である。この手法はBajukら⁵⁾によって研磨法で製作されたEUVリソグラフィ用ミラーで採用されている。彼らの目標精度と現状をFig.2に示す。リップル帯域で目標値からの差は大きいが今までに例のない高精度な加工がなされている。

3.2 これからの非球面加工

筆者らにより開発された非球面研磨装置CCSP(Canon Super Smooth Polisher)の例をFig.3に示す。これは高精度な形状計測とその結果に基づく形状修正研磨を繰り返す装置である^{21,30)}。

この装置に搭載された研磨技術は小径の研磨工具であっても良好な表面粗さが得られるものであり、石英ガラス、CVD-SiCといった材料に対して0.2nm RMS以下の表面粗さを得ている²¹⁾。このように表面粗さはEUVリソグラフィ用ミラーレベルでも実現できる可能性は高い。

そしてEUVリソグラフィ用ミラーでは要求されるリップルはTable 1に示すように0.2nm RMSと非常に厳しい。リップルは前述の形状創成アルゴリズムでは不感帯となるので前加工時に平滑化しておく必要がある。さらに研磨工具そのものに平滑化能力を持たせることも重要である。平滑化能力は工具の硬度、リップル周期に対する工具径の比、リップルを横断する速度に依存する。通常の研磨と同様にリップルの平滑化にはアスファルトピッチが効果的であるが、アスファルトピッチは粘性、弾性ともに高く非球面形状に容易に追従しない。このため、単に研磨工具を柔構造として非球面に形状追従させるのではなく、微小なリップルをも選択して平滑化する硬度と大きさが必要となる。これは相反する要求であり新しい考えが必要である。

形状の創成は前述したようにアルゴリズムは精密な解

Fig.2 Current status relative to EUVL surfacing requirements.⁵⁾

Fig.3 Schematic of CCSP (Canon Super-Smooth Polisher).²⁹⁾

析が進んでいるので、一段の高精度を実現するためには研磨除去プロセスの除去能率 k をどこまで安定化できるかにかかっている。しかし、研磨除去プロセスは現象の精密な分析が十分行われていないのが現状であり、プロセスの管理も経験的な部分が多い。従って、研磨除去プロセスの精度の高いモデルを一刻も早く確立し、プロセス変動要因を原理的に排除する戦略的な検討がぜひ必要である。

4. EUV素子の計測

前述したようにEUV光学素子の製作においては、研磨戦略をたてる上で、表面粗さ、リップル、形状誤差と、3種類の空間周期に応じた形状評価手法が確立されていることが重要である。また、形状創成時、多層膜コート時、組立調整時の各工程で測定装置の特徴を活かして使い分ける必要がある。

4.1 表面粗さの測定

表面粗さの測定については、光を用いたものとして、Zygo社のヘテロダイン干渉計5500 Profilerや、0.01nmの分解能をもつMaxim GP²²⁾などがあり、接触式のものとして、Rank Taylor Hobson社のNanostep、あるいはAFM(Atomic Force Microscopy)が使用されている。これら測定装置はそれぞれ異なる原理に基づいたものであり、縦、横の測定分解能も異なる。このため同じ面を測定しても異なる測定結果となる。Ringel²³⁾らは約100個の研磨サンプルを用い、これら3種類の測定装置を共通に評価できる空間周期(約2.5~250μm)について比較している。Fig.4にその結果の一部を示す。縦軸は前述のバンド幅でフィルタリングした表面粗さである。図中OHP(Optical Heterodyne Profiler)は5500 Profiler, MP1.1およびMP1.2は先端Rが0.5μm, 0.1μmのNanostepである。同文献によると、測定再現性はOHPで0.002nmRqが得られる。また、AFMが他の方法に対して0.1nmRq程度大きな値を出しうると報告している。この点は留意すべきであるが、表面粗さの領域では、EUV光学素子に求められている計測精度がほぼ得られつつある。

Fig.4 RMS roughness, R_q , measured by four instruments.²²⁾

4.2 リップルの測定

横分解能を考えるとリップルの測定は、表面粗さと形状誤差の中間領域(例えば周期0.1~10mm)である¹⁹⁾。通常、測定時間の問題から、表面粗さとリップルは有効領域全面の測定ではなく、部分的な測定で代表する。次に紹介する方法はリップルの領域から形状誤差の領域までの断面を測定するのに適している。

Fig.5はContinental Optical CorporationのLTP II (Long Trace Profilometer)の測定原理である²⁴⁾。平行な2本のレーザービームを干渉させ、角度に応じて変化する干渉パターンの位置をリニア検出器アレイで測定する。この角度測定を固定した参照ミラーに対しても行い、差をとることによって、キャリッジの移動誤差を補償する。角度変化の小さい斜入射光学系に適し、傾斜測定精度は $0.5\mu\text{rad}$ 、傾斜を積分して得られる高さの測定精度に関しては50nmである²⁵⁾。高さ測定は2次成分の誤差が大きいが、これを除いた測定再現性は500mmの被測定物に対し、14.6nm RMS、200mmだと3.45nm RMSが得られる。

Paul Glenn²⁶⁾ (Bauer Associates Inc.)は近接した2点の傾斜変化、すなわち曲率を測定し、積分する事によって形状を測定する装置を考案した(Fig.6)。レーザー光を方解石で2本の平行ビームにして被測定物にあて、反射光の角度をコリメータで測定する構成である。本方式を用いたBauer社

Fig.5 Schematic diagram of LTP (Long Trace Profilometer).²³⁾

Fig.6 Schematic diagram of the curvature profiling instruments.²⁵⁾

のMODEL100は100mmの測定において再現性0.6nm RMSが得られる²⁷⁾。

4.3 形状の測定

光学素子の最終形状は形状測定結果によって保証されるので、光学素子を実際に使用する環境と、形状測定時の環境とをできるだけ一致させておくことが好ましい。それが守られない場合はFEM解析などを用いた補償を講じておかなければならない。例えば $\phi 500\text{mm}$ 、厚さ90mmの石英ガラスの場合で考えてみると、水平に置いて、周辺を支持した場合、中央部の重力によるたわみは120nmとなる。また、表裏の温度差が 0.1°C 生じると約18nmのたわみが生じる²⁸⁾。

従来、非球面量の大きい形状に対しては接触式形状測定装置が使用されてきた²⁹⁾。例えばオンマシン形状測定装置を搭載したCSSP(Fig.3)はプローブを被測定物に一定の力で接触させながらスキャンし、形状を測定する一種の3次元測定装置である³⁰⁾。長さの基準であるレーザー測長器の波長誤差を 10^{-7} 以下とするために、室内の温度変動 0.05°C 、湿度変動10%に制御し、絶対気圧を0.1mbarの精度で測定する。また、形状測定中の $700 \times 700 \times 250\text{mm}$ 内の温度分布は90時間で 0.15°C に押さえている。Fig.7に測定例を示す。540mm断面測定 of 繰り返し性は2nm RMSであるが、レーザー測長器の空気ゆらぎの問題があり、面測定では約3~9nm RMSである。

現在、EUV光学素子の形状測定は干渉計による方法が主流である。非球面量が $20\mu\text{m}$ 以下の光学素子についてはCGH (Computer Generated Hologram)を用いたツイマン

Fig.7 540 mm line measurement results measured by CSSP.²⁹⁾

Fig.8 Schematic diagram of PS/PDI.³⁰⁾

リーマン干渉計によって繰り返し性0.3nm RMSが得られ、形状誤差0.6nm RMSの加工が可能である⁵⁾。その精度はLawrence Livermore National Laboratoryにおいて、PDI(Point Diffraction Interferometer) (Sommargren Interferometer)を用いて確認された。この干渉計はピンホールで形成される収差の少ない球面波を用いるため、従来の干渉計のように参照面を必要とせず、0.5nm RMSと高い測定精度を得ることができる。

また、組立精度も含めた光学系の性能評価方法として、実際に使用するEUV光を用いた干渉計測法の研究が進んでいる³¹⁾。Fig.8はPS/PDI(Phase Shifting Point Diffraction Interferometer)と呼ばれるEUV光を用いた干渉計である。測定した波面には小さな欠陥が多数あるため36項のZernike多項式にフィットし(すなわち平滑化し)、評価する。その結果、測定再現性0.11nmRMSが得られている³²⁾。

5. まとめ

X線の応用は学術研究から工業利用まで広い範囲に渡っており、今後もますますその利用が盛んになると考えられる。それに伴い、X線光学素子に対する要望や商品としての完成度が要求されるようになろう。

このため、素子の加工では研磨加工、物理化学的な加工ともに除去プロセスの高精度なモデルを確立し、原理的にロバストな超精密加工技術の確立を急ぐべきである。プロセスの高精度なモデルは形状創成だけではなく、リップルと表面粗さ帯域でも高精度化に貢献する。

また、計測では形状とリップル帯域で原理的に参照面によらない高精度な測定を、加工現場で手軽に行える手法を早期に整えることが課題である。両者の一層の進展が期待される。

参考文献

- 1) C. Wasik, G. P. Murphy, A. C. Chen, A. A. Krasnoperova, A. L. Flamholz, D. D. DeMay, J. A. Leavey, S. Loh, S. Chaloux, A. C. Thomas, S. Lee, K. Giewont, and P. Agnello: *Proc. SPIE* **3331** (1998) 150.
- 2) J. Y. Huang and I. S. Ko: *J. Synchrotron Radiation* **5** (1998) 642.
- 3) 山下 広順, 国枝 秀世, 田原 謙: レーザー研究 **25** (1997) 362.
- 4) D. W. Sweeney, R. Hudyma, H. N. Chapman, and D. Shafer: *Proc. SPIE* **3331** (1998) 2.
- 5) D. Bajuk and R. Kestner: *JSPE Proc. on Soft X-ray Optics* (1997) 325.
- 6) T. Namioka, T. Haga, and H. Kinoshita: *JSPE Proc. on Soft X-ray Optics* (1997) 185.
- 7) A. B. C. Walker, Jr., R. B. Hoover, and T. W. Barbee, Jr.: *Proc. SPIE* **2011** (1994) 489.
- 8) K. Yamashita, K. Akiyama, K. Haga, H. Kunieda, G. S. Lodha, N. Nakajo, N. Nakamura, T. Okajima, K. Tamura, and Y. Tawara: *J. Synchrotron Radiation* **5** (1998) 711.
- 9) G. S. Lodha, K. Yamashita, H. Kunieda, Y. Tawara, J. Yu, Y. Namba, and J. M. Bennett: *Applied Optics* **11** (1998) 5239.
- 10) T. Warwick, S. Anders, Z. Hussain, G. M. Lamble, G. F. Lorusso, A. A. MacDowell, M. C. Martin, S. A. McHugo, W. R. McKinney, and H. A. Padmore: *Synchrotron Radiation News* **11** (1998) No. 4, 5.
- 11) L. N. Allen and H. W. Romig: *Proc. SPIE* **1333** (1990) 22.
- 12) D. Bollinger, G. Gallatin, J. Samuels, G. Steinberg, and C. Zarowin: *Proc. SPIE* **1333** (1990) 44.
- 13) H. Takino, N. Shibata, T. Kobayashi, H. Tanaka, M. Ebi, K. Yamamura, Y. Sano, and Y. Mori: *Appl. Opt.* **37** (1998) 5198.
- 14) T. Oshino, N. Katakura, and K. Murakami: *JSPE Proc. on Soft X-ray Optics* (1997) 528.
- 15) M. Niibe, T. Watanabe, and H. Kinoshita: *JSPE Proc. on Soft X-ray Optics* (1997) 541.
- 16) 山本 碩徳: 光学技術コンタクト **32** (1994) 22.
- 17) 湯岡 泉: 精密工学会誌 **64** (1998) p.983.
- 18) 根岸 真人, 安藤 学, 瀧本 雅文, 出口 明信, 中村 宣夫: 精密工学会誌 **62** (1996) 408.
- 19) M. Ando, M. Negishi, M. Takimoto, A. Deguchi, N. Nakamura, M. Higomura, and H. Yamamoto: *Proc. SPIE* **1720** (1992) 22.
- 20) J. S. Taylor, G. E. Sommargren, D. W. Sweeney, and R. M. Hudyma: *OSA Proc. on Optical Fabrication and Testing* (1998) 110.
- 21) M. Ando, M. Negishi, M. Takimoto, A. Deguchi, N. Nakamura, M. Higomura, and H. Yamamoto: *Proc. SPIE* **2576** (1995) 348.
- 22) Zygo Maxim GP, キヤノン販売.
- 23) G. Ringel, F. Kratz, D. R. Schmitt, J. Mangelsdorf, F. Creuzet, and J. Garatt: *Proc. SPIE* **2536**, 317.
- 24) P. Z. Takacs and E. L. Church: Brookhaven National Laboratory Report 64209.
- 25) LTP II, Continental Optical Corporation.
- 26) Paul Glenn: *Proc. SPIE* **1333** (1990) 175.
- 27) Bauer MODEL100, Bauer Associates Inc.
- 28) H. パークス: 熱弾性, 培風館(1973) 46.
- 29) K. Becker and E. Heynacher: *Proc. SPIE* **733** (1986) 149.
- 30) 根岸 真人, 出口 明信, 安藤 学, 瀧本 雅文, 中村 宣夫: 精密工学会誌 **61** (1995) 1725.
- 31) J. Bokor, H. Medeck, E. Tejn, K. Goldberg, S. H. Lee, and D. T. Attwood: *JSPE Proc. on Soft X-ray Optics* (1997) 221.
- 32) E. Tejn, K. Goldberg, S. H. Lee, H. Medeck, P. Batson, P. Denham, A. MacDowell, J. Bokor, and D. T. Attwood: *J. Vac. Sci. Technol.* **B15** (1997) 2455.

レーザーワード

超平滑研磨(super-smooth polishing)

短波長光用などの高精度な光学素子の超平滑な光学面を創成する研磨法。たとえば、EUVリソグラフィ用のミラーでは空間波長1μm以下において0.1nm RMSという表面粗さが必要とされる。このような超平滑面が得られる研磨法としては、フロート研磨、EEM、そしてピッチ研磨工を用いたボールフィード研磨などが知られている。平面

や球面など、従来のピッチ研磨工で対応可能な形状は超平滑研磨しやすく、石英ガラスの平面では空間波長1~330μmにおいて0.06nm RMSが得られている。今後はこのような超平滑面を高精度な自由曲面上で実現することが課題である。

(安藤 学)