

マイクロマシン技術を用いた次世代 X 線望遠鏡の開発

武内数馬¹, 江副祐一郎¹, 石川久美², 中村果澄¹, 沼澤正樹¹, 寺田優¹, 伊師大貴¹, 野田悠祐¹, 大橋隆哉¹, 満田和久²

Next generation X-ray telescope by MEMS

Kazuma Takeuchi¹, Yuichiro Ezoe¹, Kumi Ishikawa², Kasumi Nakamura¹, Masaki Numazawa¹, Masaru Terada¹, Daiki Ishi¹, Yusuke Noda¹, Maiko Fujitani¹ and Kazuhisa Mitsuda²

¹ 首都大学東京

Tokyo Metropolitan University, 1-1 Minami-Osawa, Hachioji, Tokyo, 192-0397 Japan

² 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

Department of High Energy Astrophysics, Institute of Space and Astronautical, Science (ISAS),

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210, Japan

^(a)E-mail: takeuchi-kazuma@ed.tmu.ac.jp

我々は、将来衛星計画に向けて、マイクロマシン技術による次世代 X 線光学系の開発を行っている。本講演ではその開発と現状、および今後の展望について報告する。

キーワード マイクロポアオプティクス, 半導体プロセス, 深彫り技術, 宇宙 X 線

1. はじめに

我々は、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術を用いた X 線光学系 (MEMS X 線光学系) を開発している。MEMS X 線光学系は、Si 基板に開けられた微細穴の側壁を反射鏡として、X 線を集光・結像する光学系である。深掘りエッチング(Deep Reactive Ion Etching, DRIE)での鏡の一括形成、in-house 製作により迅速かつ安価な製作が可能である。

我々はこれまで 4 inch および 12 inch Si 基板を用いた光学系の試作と実証に成功してきた(図 1)。今年度は、首都大が中心となって開発している超小型衛星に向けた $\phi 70$ mm 望遠鏡の設計開発とプロセス改良を行った。

2. $\phi 4$ inch 光学系の開発

本光学系の製作プロセスは主に 5 つからなる (図 2)。

- (1) DRIE で 300 μm 厚の Si 基板に幅 ~ 20 μm の貫通穴を形成し、無数の反射鏡を生成する。
- (2) ~ 1200 $^{\circ}\text{C}$ の Ar 雰囲気中で高温アニールを行い、微細穴側壁を μm スケールの表面粗さを ~ 1 nm rms に平滑化し、X 線反射鏡として使用できるようにする。
- (3) >1000 $^{\circ}\text{C}$ 以上の状況下で高温塑性変形し、平行 X 線を集光結像するようにする。
- (4) Atomic Layer Deposition により重元素を膜付けす

ることで、反射率を向上させる。

- (5) 異なる曲率で変形した 2 つの光学系を組み合わせることで、Wolter-I 型光学系が完成する。

これまでに、4 inch wolter-I 型望遠鏡の X 線結像実証に成功してきた^[2]。しかし、得られた角度分解能は FWHM で 4.1 分角、HPD で >30 分角であり、目標とする角度分解能 <5 分角に達していない。

我々はまず、角度分解能の劣化原因を配置精度と形状精度の切り分けを行った。前者は鏡一枚一枚の傾きがばらつくことにより、結像性能を劣化させる。これは、DRIE 時の垂直性により改善できると考えられる。後者は、鏡一枚中における反射面 (微細穴側壁) のうねりが主原因と考えられる。これも、DRIE の条件次第で改善できると考えた。そこで、性能向上に向けた DRIE の最適条件出しと X 線照射試験による性能評価を繰り返し行ってきた。

我々は変形前後での X 線ビームライン試験による比較を実施し、形状精度と配置精度の切り分けを行った[4]。その結果、形状精度は ~ 20 分角であった。配置精度は ~ 2 分角まで改善した。しかし、変形後に配置精度を再測定したところ、 $\sim 5-10$ 分角に悪化してしまった。すなわち、変形によって配置精度が悪化していることを示唆する。今後は DRIE の最適条件だしを継続するとともに、アニールおよび変形の最適条件出しも行い、性能向上に努める。

3・ ϕ 70 mm 光学系の開発

首都大では理工が一体となり、2020 年の打ち上げを目指す超小型衛星 ORBIS(Orbiting Binary black hole Satellite)の開発を進めている。科学目的は2つあり、1つ目が明るい活動銀河中心核の長期 X 線観測による Binary Black Hole 候補の探査、2つ目が地球磁気圏極域方向の長期観測による太陽風電荷交換 X 線モニターである。リソースの限られた超小型衛星で、全天モニターや中型衛星にも匹敵する、高い感度を目指し、MEMS X 線光学系を搭載する。

我々は光線追跡シミュレーションを用いた設計を行い、 $\Phi 70$ mm 光学系 (焦点距離 30 cm) の搭載を予定している。観測エネルギーバンドは 0.3–10 keV である。4 inch 光学系よりも径を小さくして、 >2 keV 以上で有効面積の寄与の小さな大角度反射部分を削り、コンパクトな光学系としている。我々は光学系の試作を進めており、振動試験、X 線評価試験を予定している。

4・ CMP 研磨の導入

CMP (chemical mechanical polishing)とは、IC 製造工程におけるウェーハ表面の平坦化技術の一種で、化学研磨剤、研磨パッドを使用し、化学作用と機械的研磨の複合作用で、ウェーハ表面の凹凸を削って平坦化する技術である。

我々は Dektak 触診計の測定から、微細穴側壁の端に突起物があることを発見した。この突起物が有効面積と角度分解能の劣化につながっていると考えられるので、反射面の両端、つまり基板の面の部分を CMP 研磨することにより突起物の除去を試みた。基板厚は削りしろを考慮し、400 μm と従来の 300 μm よりも厚くした。

結果、両側の突起を減らすことに成功した。今後、X 線反射と角度分解能評価を行う予定である。

5・ まとめ

我々はマイクロマシン技術を用いて、将来計画に向けた次世代軽量 MEMS X 線光学系を開発しており、製作条件の最適化、あるいは新プロセスへの挑戦など、望遠鏡性能の改善・向上に取り組んでいる。

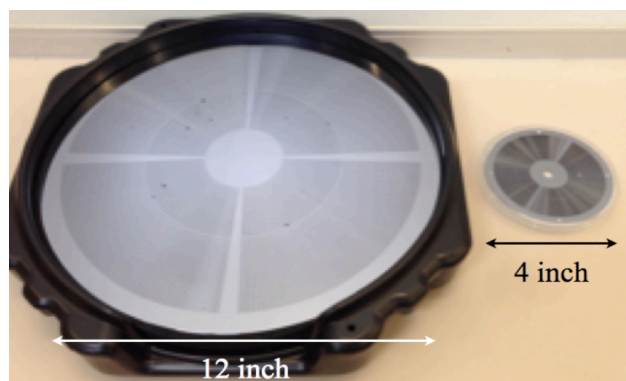


図1: ϕ 12 inch 光学系(左)と ϕ 4 inch 光学系(右)。

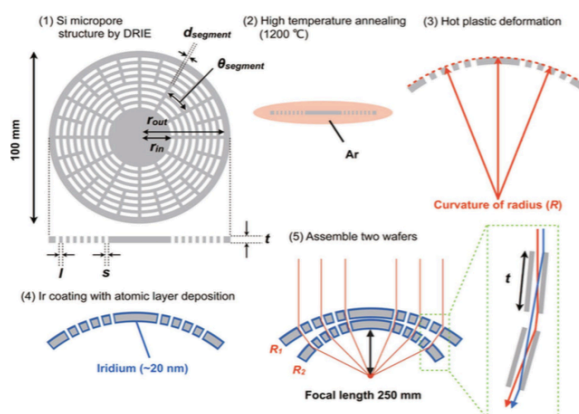


図2: プロセスフロー。

文 献

- [1] Y.Ezoe et al., “Ultra light-weight and high-resolution X-ray mirrors us- ing DRIE and X-ray LIGA techniques for space X-ray telescopes”, Microsys. Tech., 2010, 16, 1633.
- [2] T.Ogawa et al., “First X-ray imaging with a micromachined Wolter type-I telescope”, Microsys. Tech., 2016, doi:10.1007/s00542-016-2906-3.
- [3] K. Ishikawa et al., “12-inch X-ray optics based on MEMS process”, Microsys. Tech., 2016, doi:10.1007/s00542-016-2980-6.
- [4] K. Takeuchi et al., “X-ray evaluation of high verticality sidewalls fabricated with deep reactive ion etching”, JJAP, submitted.