

マイクロマシン技術を用いた次世代宇宙 X 線望遠鏡の開発

生田 昌寛 (首都大学東京大学院 理工学研究科)

概要

我々はマイクロマシン技術を用いて、厚さ 300 μm の薄いシリコン基板に微細な穴を開け、その穴の側面を X 線の反射鏡として利用する、独自の超軽量かつ高性能な宇宙 X 線望遠鏡の開発を行っている。これまで我々のグループでは光学系を自作して、軟 X 線 (Al K_{α} 1.49 keV) を照射し、世界で初めて X 線結像に成功してきた。しかし、衛星搭載のためには、さらに結像性能の良い光学系を製作する必要がある。本講演では光学系の性能向上へ向けた取り組みについて紹介する。

1 はじめに

X 線は物質に対する屈折率が 1 よりもわずかに小さいため、全反射を用いた斜入射光学系、いわゆる Wolter I 型望遠鏡が広く用いられる。臨界角は数度程度と非常に小さいため、有効面積を大きくするには、数十～数千枚ほどの反射鏡が必要となる。一方で X 線は大気で吸収されるため、衛星で観測する必要がある。そのため、有効面積を大きくすると打ち上げコストが大きくなるという問題があった。そこで次世代の X 線望遠鏡には大きな有効面積や広い視野を、できるだけ軽量かつ安価に実現させることが求められている。

2 MEMS X 線光学系

我々はマイクロマシン (MEMS, Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いた、独自の軽量かつ高角度分解能が達成可能な X 線光学系の開発を行っている [1-3]。本光学系の製作プロセスを図 4 に示す。まず反応性ガスによりシリコンの微細加工を行う DRIE (Deep Reactive Ion Etching) によって、穴幅 20 μm 深さ 300 μm の曲面穴を製作する。次に側壁の平滑化させるために Ar アニール、磁気流体研磨を行い、さらに平行光を点に集光結像させるため高温塑性変形で変形する。反射率を向上させるため、側壁をイリジウムの膜付けを行い、最後に異なる曲率で変形した光学系を 2 枚重ねることで Wolter I 型望遠鏡として完成する。

本光学系は薄いシリコン基板を使うことで原理的に世界最軽量となる。また従来 1 枚 1 枚製作していた鏡をエッチングして大量生産できる。角度分解能を制限するのは穴が細かいことによる X 線回折であり、我々は X 線回折で角度分解能が決まる究極の軽量 X 線望遠鏡を目指している。

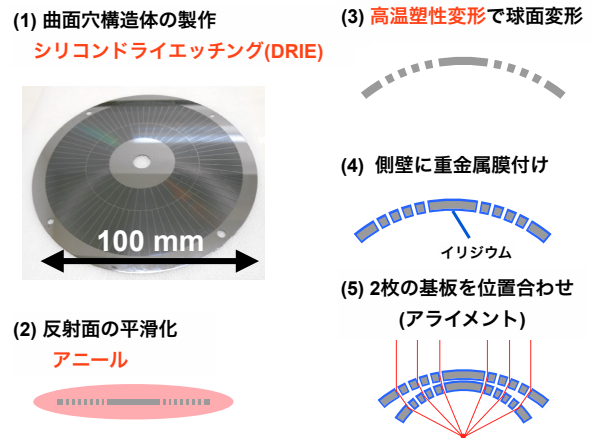


図 1: MEMS X 線望遠鏡の製作プロセス。

3 側壁粗さの改善

我々グループでは 4 インチの X 線望遠鏡の 1 段分の X 線照射試験を行って、14 分角 (FWHM) の結像性能を得た [3]。しかしこれは我々が一つの目標とする、衛星探査ミッションの要求 (5 分角)[4] にはまだ及ばない。この改善には変形と側壁の粗さの低減が

必要となる。私はその中で側壁粗さの改善を担当しており、DRIE プロセスを工夫している。

図 2 に DRIE プロセスのフローを示す。最初にエッチングマスクとして使用する、厚さ 300 nm の Al が成膜されたシリコン基板にフォトリソグラフィを行う。次に露光された部分のレジストを除去するため、アルカリ溶液を使用し現像を行う。その後、Al を混酸によりエッチングすることで、DRIE の保護材が完成する。DRIE 後、レジストと Al の残りを除去し、微細穴構造が完成する。

ここで従来の製作では、DRIE での保護材を Al のみで行っていた。しかし、DRIE でエッチングする際に、反応性イオンが Si だけでなく表面の保護材の Al もスパッタし、Al が側壁に付着することでエッチングを阻害していることが分かった。そこで私は、Al マスクの上にレジストを残す方法で製作を行った。図 3 に新旧手法での側壁すなわち鏡面の表面プロファイルを示す。新条件ではより平坦な構造が実現できていることが分かる。具体的には 200 μm のスケールでの表面粗さが $\sim 100\text{ nm rms}$ から、 $\sim 30\text{ nm rms}$ と、約 3 倍改善した。この側壁粗さから、角度分解能は 5 分角が達成可能と見積られる。同時に、側壁の両端に発生していたバリが改善され、望遠鏡の有効面積の改善も行うことができた。

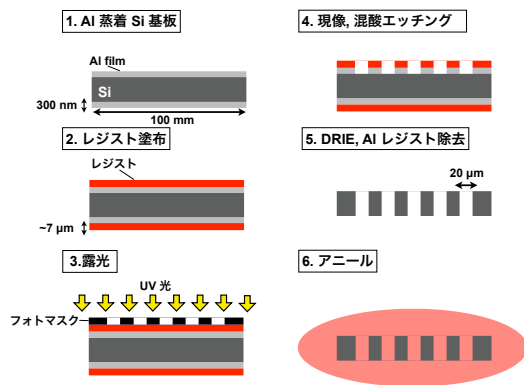


図 2: 微細穴製作プロセスフロー。各工程での基板の断面図を示す。

4 まとめと今後

私は、DRIE での保護材を工夫することで、反射面での粗さを約 3 倍改善し、角度分解能を実質的に向上させることに成功した。この結果については、光学系 MEMS の国際会議で発表予定である [5]。今後の課題は更なる側壁粗さの平坦化と突起の解消を行っていききたい。前者は DRIE プロセスの見直しによって行い、後者は片面をシリコンの基板を研磨することで解消させることを検討している。また、完成した望遠鏡は X 線で評価する予定である。

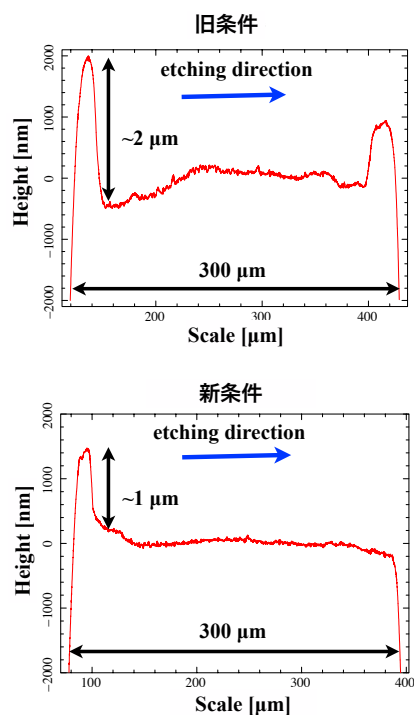


図 3: 新旧性能プロファイルの比較。

Reference

- [1] Y. Ezoe, et al., *Microsys. Tech.*, 2010, 16, 1633.
- [2] I. Mitsuishi, et al., *Sens. & Act. A.*, 2012, 188, 411.
- [3] Y. Ezoe, et al., *Opt. Lett.*, 2012, 37, 779.
- [4] Y. Ezoe, et al., *Adv. Space Res.*, 2013, 51, 1605.
- [5] M. Ikuta, et al., *Optical MEMS 2013 申し込み済み*