

マイクロマシン技術を用いた超軽量 X 線望遠鏡の開発の現状

中村 果澄, 江副 祐一郎, 小川 智弘, 佐藤 真柚, 沼澤 正樹,
武内 数馬, 寺田 優 (首都大学東京大学院 理工学研究科), 石川 久美 (理化学研究所)

Abstract

将来衛星に向けて開発を行っている独自の超軽量 X 線光学系について発表する。2015 年打ち上げの ASTRO-H を始め、近年多くの将来衛星ミッションが計画されており、世界中の研究機関で X 線光学系の開発が行われてきた。それに際し、さらに軽量かつ大有効面積、良角度分解能といった高性能な光学系が求められている。そこで我々のチームではシリコンドライエッチングを用いて独自の超軽量 X 線光学系の開発を行っている。反応性イオンによるエッチングと側壁保護を繰り返す Bosch Process を用いて Si 基板に深さ 300 μm 、穴幅 20 μm の微細穴を製作し、その側壁を X 線反射鏡として利用する。我々は 4 インチ Wolter I 型光学系を製作し、Al $K\alpha$ 1.49 keV の X 線結像に成功した。本講演では、これまでの X 線照射試験による性能評価の結果と目標に向けた光学系の改善状況を報告する。

1 Introduction

X 線天文学において、天体からの微弱な X 線を集光・結像させる光学系は必要不可欠である。しかし、X 線の物質に対する屈折率は 1 よりわずかに小さいため、全反射を用いた斜入射光学系が主に用いられる。X 線は地球大気で吸収されるため、人工衛星への搭載が必要であり、より軽量で角度分解能の良い光学系が求められている。

今まで打ち上げられた光学系の例として、角度分解能を重視した直接研磨型 (Chandra など) や、集光力を重視した多重薄膜型 (「あすか」など) が挙げられる。しかし、図 1 に示す通り、有効面積あたりの重量と角度分解能はトレードオフの関係にある。

そこで私たちはシリコンドライエッチングを用いて、独自の超軽量 X 線光学系の開発を行っている。反応性イオンによるエッチングと側壁保護を繰り返す Bosch Process をベースとし、4 インチ Si 基板に微細穴を製作しその側壁を X 線反射鏡として利用する。厚み 300 μm の薄い Si 基板を使用するため、原理上世界最軽量 (アライメントリングを含め ~ 20 g) であり、また一度のプロセスで多数の反射鏡を製作するため、低コスト、低労力である。また、プロセスのほとんどがインハウス製作であるため、製作のサイクルが早いことも利点である。

2 Methods

MEMS X 線光学系の製作は次のように行う。シリコンドライエッチングにより 4 インチ Si 基板に穴幅 20 μm 、深さ 300 μm の微細穴を製作する。この手法では X 線反射鏡として利用する側壁は粗い (< 10 nm rms) ため、高温アニールにより側壁を平滑化 (~ 1 nm rms) する。さらに平行光を一点に集光させるため、基板を球面状に高温塑性変形し、反射鏡の反射率を上げるため、原子堆積法を用いて Ir などの重金属を膜付けする。最後に、異なる曲率半径をつけた光学系を 2 段に重ねて Wolter I 型光学系が完成する。

3 Result

本光学系の性能評価は 2013 年 10 月 JAXA 宇宙科学研究所が所有する 30 m ビームラインで行った。特性 X 線 Al- $K\alpha$ 1.49 keV のビームを光学系に照射し、その反射光子を CCD でを検出することにより、焦点距離、有効面積、角度分解能の見積もりを行った。CCD の結像イメージを図 2 に示す。上記の測定方法で求めた結果はそれぞれ、2 段光学系の焦点距離 403 mm, 有効面積 32 mm², 角度分解能 HPD > 30 分角 であり (2013 年 10 月)、焦点距離の設計値

250 mm, レイトレーシングで求めた有効面積の設計値 152 mm^2 , 目標とする角度分解能 5 分角 と比べると非常に悪かった。2014 年 12 月にも同様の X 線照射試験を行ったが、これより良い結果は得られなかった。

4 Improvements

本光学系の性能悪化には反射鏡となる側壁の垂直性精度と形状精度が大きく寄与していると考えられる。そこで現在我々は JAXA 宇宙研や産総研の装置を用いてドライエッチングの条件の見直しをしている。目標は 4 インチ基板内全体において、形状、垂直性の両方を 1 分角 rms 以内にするのである。図 3 に本光学系と側壁を示す。現在、垂直性として $0.2 \mu\text{m rms}$ 程度、すなわち 2 分角 rms を達成しており、従来約 5 倍の改善に成功した。また、形状精度の改善も同時に進めている。これらの要因が改善すれば、1 段目光学系から 2 段目光学系への入射光子やエッチングの過程で生じるバリと呼ばれる突起物による入射光子の損失が抑えられ、目標を達成できると期待している。

5 Reference

江副 祐一郎 et al. (2015) 「X 線天文・探査衛星に向けた超軽量 X 線望遠鏡の開発」(2015 年 東海大 招待講演)

小川 智弘 et al. (2014) 「マイクロマシン技術を用いた Wolter I 型 X 線望遠鏡の開発」(2014 年 応用物理学会 春期講演 p.8-9)

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

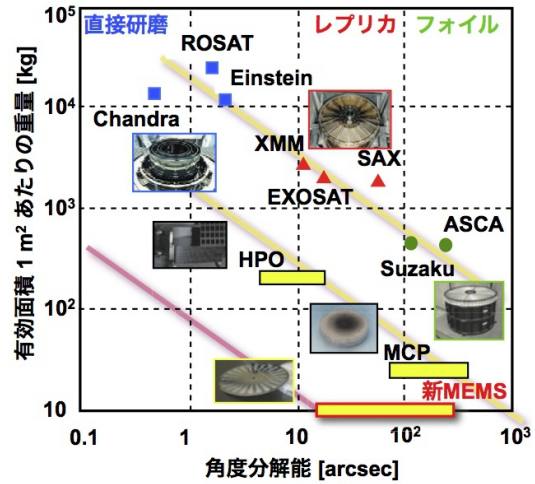


図 1: 実際に衛星に搭載された X 線望遠鏡の性能の比較。横軸は角度分解能、縦軸は有効面積 1 m^2 あたりの重量。

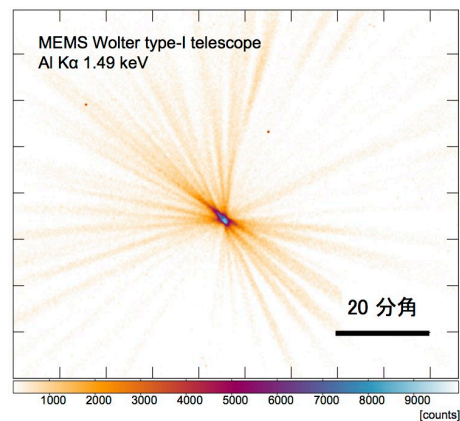


図 2: MEMS X 光学系の X 線照射イメージ。

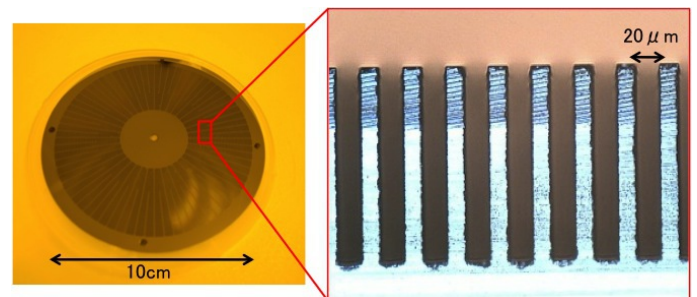


図 3: 条件出し中の MEMS X 線光学系と側壁の拡大図。