

マイクロマシン技術を用いた超軽量 X 線望遠鏡の開発現状

佐藤 真柚 (首都大学東京大学院 理工学研究科)

Abstract

私たちはマイクロマシン (MEMS, Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いて超軽量な X 線望遠鏡の開発を行っている。厚さ 300 μm のシリコンウェハに微細穴構造体を製作し、その壁面を X 線光学系の反射鏡として使用する。昨年度、本光学系 2 段組の X 線測定試験を行い、性能を評価した。角度分解能においては FWHM(Full Width at Half Maximum) で 4.1 分角となり本光学系搭載予定の衛星の目標値 5 分角以下を達成したが、有効面積と焦点距離に関してはそれぞれ 32 mm^2 、403 mm となり、更なる改善が必要ということが分かった。そこで本年度は、シリコンドライエッチング装置の見直し、新アニール条件の導入、新治具を用いた高温塑性変形等を試みている。

1 はじめに

X 線天文学において天体からの X 線を集光・結像する光学系は必要不可欠である。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を用いる。また X 線は大気中で吸収されるため、宇宙空間にて観測する必要があり、そのため X 線光学系としてはより軽量かつ高角度分解能のものが要求されている。そこで私たちはマイクロマシン技術を用いた独自の超軽量かつ高分解能な X 線望遠鏡の開発を行っており、MEMS X 線光学系と呼んでいる。

MEMS X 線光学系の製作フローを図 1 に示す。(1) 4 インチのシリコンウェハ上に、シリコンドライエッチング (DRIE, Deep Reactive Ion Etching) 技術を用いて穴幅 20 μm 厚さ 300 μm の曲面穴構造体を製作する。(2) 反射面の平滑化のためにアニール加工、磁気流体研磨を行い、(3) 高温プレスによる球面変形を行う。(4) エネルギーバンドの拡大や反射率向上のために原子層体積法にて重金属を膜付けし、(5) 最終的に異なる曲率半径で変形した 2 枚の基板のアライメントを行い、図 2 の通り Wolter I 型の X 線光学系が完成する。X 線は微細穴の側壁を反射することで集光される。

本光学系は厚さ 300 μm のシリコン基板を使用しているため、非常に軽量であり安価である。また、角度分解能は回折限界によりのみ決まるので、原理的に従来の X 線望遠鏡より高分解能を実現することが

出来る。

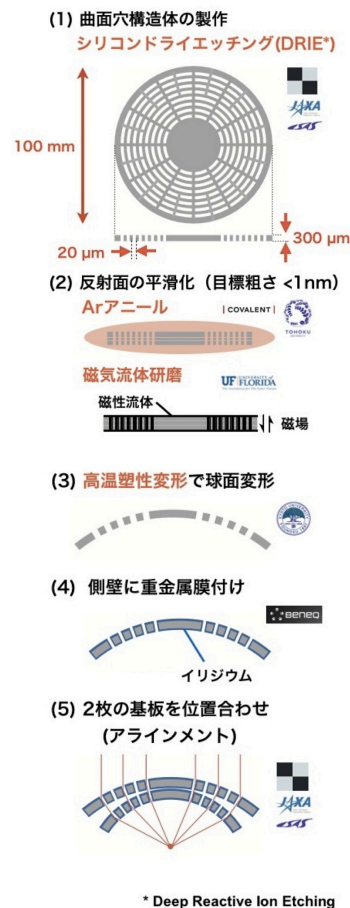


図 1: MEMS X 線光学系製作フロー。

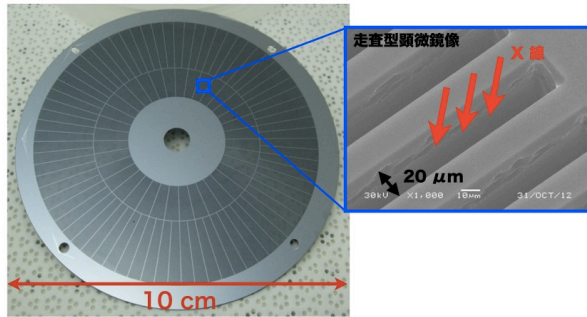


図 2: MEMS X 線光学系 (左) と微細穴の様子 (右)。

2 これまでの成果

私たちは 7 年前より MEMS X 線光学系の開発を開始し、これまで世界で初めて X 線結像、また同じく世界で初めて WolterI 型の本望遠鏡の X 線結像に成功した。しかし角度分解能 (FWHM) は 15 分角と目標にはほど遠く、反射面の形状精度や望遠鏡の変形精度、また 2 段の位置合わせ精度がこの角度分解能の劣化の原因だと見積もることが出来た。その後その結果を受けて更なる開発を進めてきた。

昨年度には再度、本光学系を用いた 2 段型の望遠鏡を JAXA 宇宙科学研究所 30 m ビームラインにて X 線照射実験を行い 2 段型の X 線結像に成功した。本実験で用いた 2 段望遠鏡は、2013 年 7 月から 8 月に製作した図 2 と同じデザインのもので 1 段目 2 段目ともに直径 10 cm、穴幅は 20 μm であり、2 段組にした際の焦点距離は 250 mm である。X 線は Al K α 1.49 keV を用いた。

その結果、角度分解能 (FWHM)、有効面積、焦点距離はそれぞれ 4.1 分角 (図 3 下図)、32 mm²、403 mm と求まった。図 3 の上図は本実験での X 線結像イメージで、中心部分に X 線が集光していることが分かる。また角度分解能は以前の 15 分角より遥かに向上し、将来ミッションの要求値である 5 分角以下を満たす

結果となった。しかし、有効面積は設計値である 162 mm² より 1/5 程度となっており、焦点距離も設計値の 250 mm に対して 1.6 倍長かった。

今回の試験結果、設計値と目標値を表 2 にまとめる。本光学系は 2020 年代打ち上げを目標とした地球磁気圏可視化衛星 GEO-X への搭載を目指している。表 1 の目標値は GEO-X からの要求値である。

有効面積低下の原因を調べた結果、バリと呼ばれる突起物によって入射光の一部が遮蔽されたり、アンダーカットと呼ばれる過剰にエッチングされている部分によって反射面の一部が平らになっていないことが原因だと考えられた。これより、今後はシリコンドライエッチングやアニール加工の見直しが必要であることが分かった。また焦点距離については、高温プレスにより球面変形を行う際に、微細穴が表面に追従してうまく変形されていないことが原因だと考えられる。

	測定結果	設計値	目標値
角度分解能	4.1 分角		< 5 分角
有効面積	32 mm ²	162 mm ²	> 3 cm ² @ 0.6 keV
焦点距離	403 mm	250 mm	250 mm

表 1: X 線評価実験の結果と設計値、目標値。

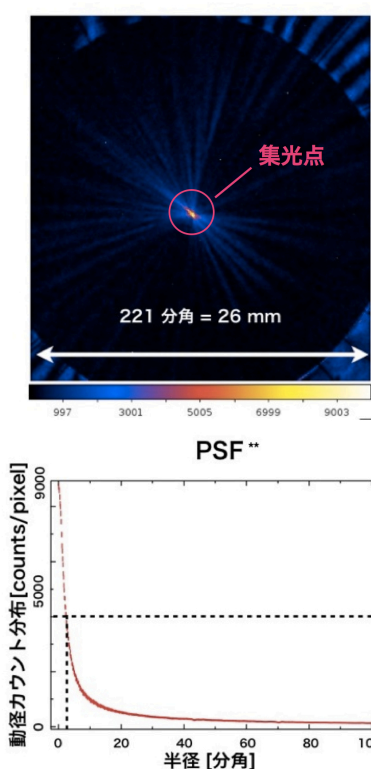


図 3: MEMS X 線光学系結像イメージ (上) と半径-PSF(Point Spread Function) グラフ (下)。

3 現在の開発

昨年度の X 線評価試験を受けて、本年度は現在以下の項目の改良を行っている。

(1) シリコンドライエッチング装置の見直し：昨年度の X 線実験結果より、反射面にバリと呼ばれる突起

物やアンダーカットと呼ばれるくぼみ部分、反射面の全体的なうねりが X 線反射を阻害していることが分かった。そこで、パワーの大きいドライエッチングのマシンを使用しエッチング時間を短くすることで本項目を解決することができるのではないかと考え、現在は産業技術総合研究所にあるドライエッチング用のマシンを使った製作を試みている。このマシンは現在世界最高性能の「PEGASUS」で、これによる反射面の改善が期待されている。

(2) 新アニール条件の導入：現在は反射面の平滑化としてアニール加工を 2 時間行っているが、昨年度の X 線実験結果よりさらにラージスケールでのうねりを取り払う必要があることが分かった。他の研究成果より原子の拡散係数は物質・温度・圧力に依存するので、温度や圧力、時間を大きくすることで拡散長を伸ばすことができ、より表面を滑らかにすることが出来ることが分かっている (式 1)。

$$\text{拡散長 (cm)} = \sqrt{\text{拡散係数 (cm}^2/\text{s)} \times \text{時間 (s)}} \quad (1)$$

そこで、私たちは長時間アニール加工を導入することを検討しており、東北大の装置を用いてすでにテスト実験を行うところまで進んだ。今後今年度中に効果があるかを実証する予定である。

(3) 新治具を用いた高温塑性変形：昨年度の X 線実験結果において、焦点距離が設計値である 250 mm に対して 1.6 倍長い 403 mm となり、高温塑性変形の際に反射面が表面形状に追従してうまくプレスできなかったことが原因と考えられた。今年度から変形装置を首都大に導入し、現在は変形治具の設計曲率を 1.6 倍小さくしたものを製作、本治具で再度プレス変形を行う準備を進めているところである。

4 まとめと今後

このように私たちは MEMS X 線光学系の開発を進めており、昨年度は再び 2 段型望遠鏡の X 線結像に成功し、1 年前より望遠鏡の角度分解能は向上し

た。しかし目標の有効面積と焦点距離を達成するためには更なる改良が必要と分かったので現在はシリコンドライエッチング装置の見直しやアニール加工条件、変形曲率などの変更や改良を進めているところである。今年度も昨年度と同様改良した望遠鏡の X 線測定を行う予定であり、搭載予定衛星 GEO-X の目標値達成を引き続き目指す。

Reference

Y. Ezoe, et al., *Microsys. Tech.*, 2010, 16, 1633

Y. Ezoe, et al., *Adv. Space Res.*, 2013, 51, 1605

T.Ogawa, et al., *Applied Optics.*, 2013, 52, 5949