

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800143

研究課題名(和文) GCIBを利用した独自の超軽量X線望遠鏡の角度分解能の改善

研究課題名(英文) Angular resolution improvement of ultra-lightweight X-ray optics with GCIB

研究代表者

三石 郁之(Mitsuishi, Ikuyuki)

名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90725863

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は新規技術として GCIB (Gas Cluster Ion Beam) を導入することで、マイクロマシン技術を利用した独自の超軽量 X 線光学系の反射面の平滑化を目指し、角度分解能の向上を図るものである。GCIB プロセス後、光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡および反射面の一次元プロファイルを取得し評価した結果、照射側となる光学系表側の表面の一部がえぐれ、エッチング効果が確認できた。しかしながら光学系裏側では大きな変化が見られなかったため、ビームが 20 μm 間隔で並ぶ反射鏡間にはほとんど侵入することができない、もしくはエッチングパワー不足であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：We aim at improving the angular resolution of ultra-lightweight MEMS-processed X-ray optics by introducing GCIB (Gas Cluster Ion Beam) techniques. After GCIB processes, we confirmed that the process worked well at least on the front side of the optics. On the other hand, a significant change was not found on the back side, suggesting that the beam could not penetrate 20 μm line and space Si pores or more power in the etching process is needed.

研究分野：X 線天文学

キーワード：GCIB X 線 光学系 MEMS

1. 研究開始当初の背景

我々のグループでは、マイクロマシン技術として知られる MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を宇宙 X 線望遠鏡に応用し、世界最小 10 μm スケールの反射鏡を実現している [e.g., ①, ②]。これにより従来型より 2 桁以上軽い世界最軽量性、かつ 10 秒角程度の角度分解能を原理的に併せ持つ、現存する唯一のマイクロボア光学系となる。本望遠鏡の製作工程を図 1 に示す。

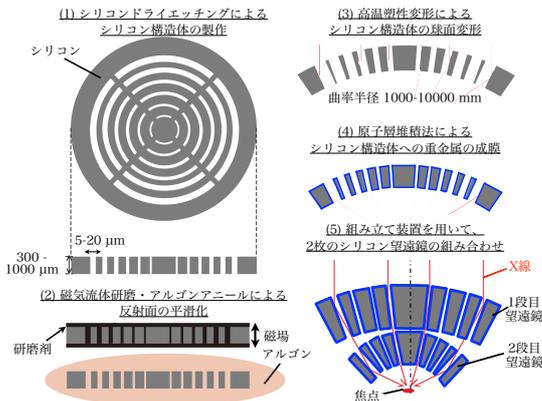


図 1: 超軽量 MEMS シリコン望遠鏡の製作フロー

本望遠鏡は、まず MEMS 技術の 1 つ、シリコンドライエッチングを用いてシリコン構造体を製作する。次に X 線の反射率の改善を目指し、磁気流体研磨およびアルゴンアニール (熱処理) により反射面の平滑化を行う。その後角度分解能の改善を狙い、高温塑性変形により望遠鏡を球面に变形する。さらに原子層堆積法により重金属を成膜することで、 $> 2 \text{ keV}$ 帯域でも高い反射率を実現する [③]。最後に、光軸以外から入射してきた光子を結像するため、2 枚の望遠鏡を専用の組み立て装置を用いて組み合わせる。

現時点で X 線照射試験による本望遠鏡の角度分解能は FWHM ~ 4 分角であるが、HPD (全光量の半分が入る直径で定義) では > 92 分角となり、中心から大きく離れたところまで散乱が効いており、これが角度分解能の劣化を引き起こしていると考えられる。この主要因の 1 つがドライエッチングプロセス中に発生する 100 μm スケールのシリコン基板反射面上のうねり構造である [雑誌論文 ② 参照]。この改善にはドライエッチングプロセス中のガス圧力やエッチングおよび保護膜堆積ステップ時間等の条件出し、もしくは後工程として新たに平滑化工程を加えることなどが考えられる。

2. 研究の目的

①そこで私は、マイクロマシン技術に対する表面加工技術で知られる、ガスクラスタージェットイオンビーム (以下、GCIB, [④]) に着目した。GCIB は、シリコンドライエッチングによる

加工表面に、アルゴンなどのガス原子 (分子) 数千個から形成されるイオンビームを、表面に平行に近い角度で照射し、オングストロームレベルに滑らかにする技術である (図 2 参照)。GCIB は現行の平滑化工程と比較し、マイクロマシン技術に対する高い実績があり、本望遠鏡にも適していると考えられる。そこでこの GCIB を新たな平滑化工程として加えることで角度分解能の改善を目指す。

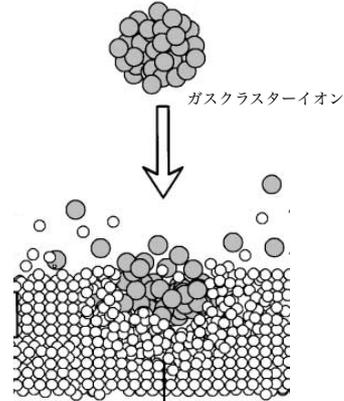


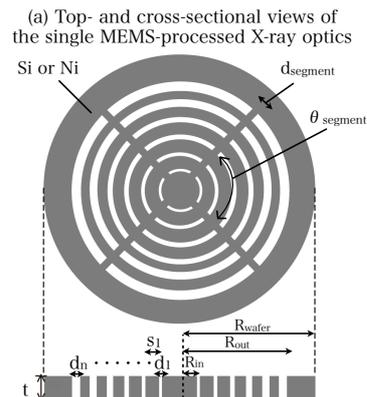
図 2: GCIB プロセスの概念図

②また、この新たな平滑化工程の導入と並行し、本望遠鏡の性能劣化を引き起こす要因を定量的に見積もり、設計及び製作にフィードバックをかけるため、本望遠鏡用光線追跡シミュレータの構築を目指した。

3. 研究の方法

①まずは本望遠鏡に対する GCIB の効果の有無を調べるため、4 inch シリコン基板に対し、照射量に着目し条件出しを行い、光学顕微鏡や走査型電子顕微鏡を用いて反射鏡表面および裏面を調べた。また、その効果を定量的に調べるため、反射鏡の孔の幅および反射鏡断面プロファイルも調べた。尚、本研究ではその効果を調べるため、Ar などの不活性ガスクラスタージェットでなく、化学反応性の高い SF6 ガスクラスタージェット (~ 1000 個程度) を 20 kV の加速電圧下で照射した。また、ビーム照射角度としては、側壁への平滑化を目指しているため、基板に対して垂直に入射させている。

②シミュレータ構築のため、基板厚・反射鏡パターン・反射鏡表面粗さ及び反射材等の主要パラメータの設定 (図 3 参照) を行い、



(b) A cross-sectional view of the two-stage MEMS-processed X-ray optics

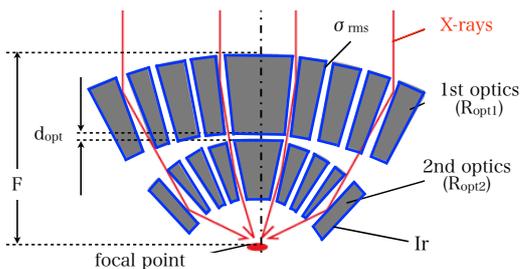


図 3: 本望遠鏡用光線追跡シミュレータ内で設定された主要パラメータ

まずは理想状態での角度分解能をはじめとする性能を評価した。その後、反射鏡面上にうねりを仮定し、角度分解能及び有効面積への影響を調べた。尚、本シミュレーションでは、焦点距離として 250 mm (図 3 中の F)、反射鏡間の距離は理想的な場合である 0 (図 3 中の d_{opt}) を仮定し、回折は考慮していない。

4. 研究成果

①照射量として $(1, 2, 3, 4) \times 10^{16}\text{ ions/cm}^2$ を試した結果、表側の反射鏡の孔の幅は照射量に対してほぼ線形的に広がっていた。また、目視でもシリコン基板表面に照射痕および反射鏡表側付近にバリ構造ができていることも確認できた (図 4 参照)。しかしながら裏側の孔の幅は照射量を変えても変化さず、ガスクラスターがシリコン基板の裏側まで届いていないことが予想される。次に基板断面、つまりは反射鏡面の光軸方向の 1 次元プロファイル調べた結果、照射前後で大きな ($>1\text{ }\mu\text{m}$) 違いは見られなかった。以上より、本条件下では、シリコン基板表面および反射鏡表側には照射前後での有意な差が見えたが、裏側では確認することができず、パワー不足であったことが分かった。よって今後はより長いプロセス時間 (>3 時間)、および基板を傾けての照射を試してみたい。ただし、後者については側壁のうねりを助長させてしまう可能性があるため、常にプロセス前後で反射鏡面の形状を確認する必要がある。

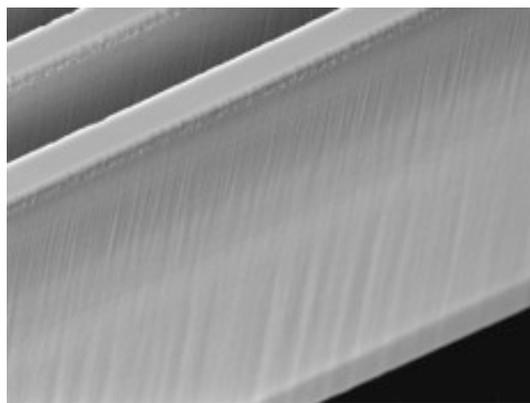
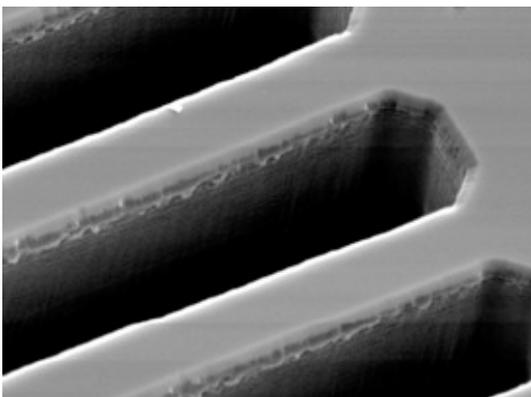


図 4: GCIB 照射後の反射鏡表側の走査型顕微鏡図 (反射鏡表側: 上, 反射鏡側壁: 下)

②まずは理想状態 (表面粗さ 0 nm) での on-axis 入射光子に対する角度分解能と有効面積を調べたところ、各々 ~ 10 秒角 (図 5 参照) 及び $\sim 410\text{ mm}^2 @ 0.6\text{ keV}$ となった。この時、実際製作されている望遠鏡を反映し、基板厚さ $300\text{ }\mu\text{m}$ 、直径 100 mm 、反射鏡には重金属としてイリジウムが成膜されていることを仮定している。この有効面積は基板厚さを $\sim 600\text{ }\mu\text{m}$ とすることで、最大 $\sim 700\text{ mm}^2$ 程度まで増やすことができる。

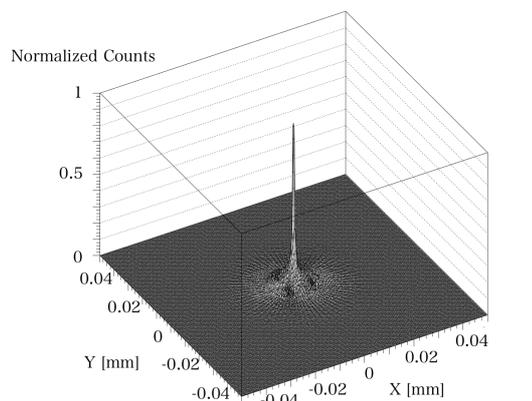


図 5: 予想される on-axis 入射光子に対するイメージ。ここでは表面粗さとして 0 nm 、入射光子エネルギーとして 0.6 keV が仮定されている

次に反射鏡面上のうねりによる散乱効果を取り入れる。このうねりによる正規入射角に対するずれとしてガウス分布を仮定し、on-axis 入射光子に対し、角度分解能の劣化及び有効面積の減少を見積もった。尚、ここでは母線方向のうねりを仮定している。ずれの程度はガウス分布の標準偏差に対応している。結果、角度分解能は $\sigma = 3$ 分角で $\text{HPD} > 10$ 分角となることが分かった。これは $100\text{ }\mu\text{m}$ スケールではおよそ高さ 15 nm 程度のうねりに対応するものである。また、角度分解能はうねりの大きさにほぼ比例し劣化していくことも分かった。有効面積については $\sigma = 6$ 分角でおよそ 40% 程度減少することが

予想される。以上の結果は主著者として投稿論文にまとめた (図 6 & 雑誌論文 ② 参照)。

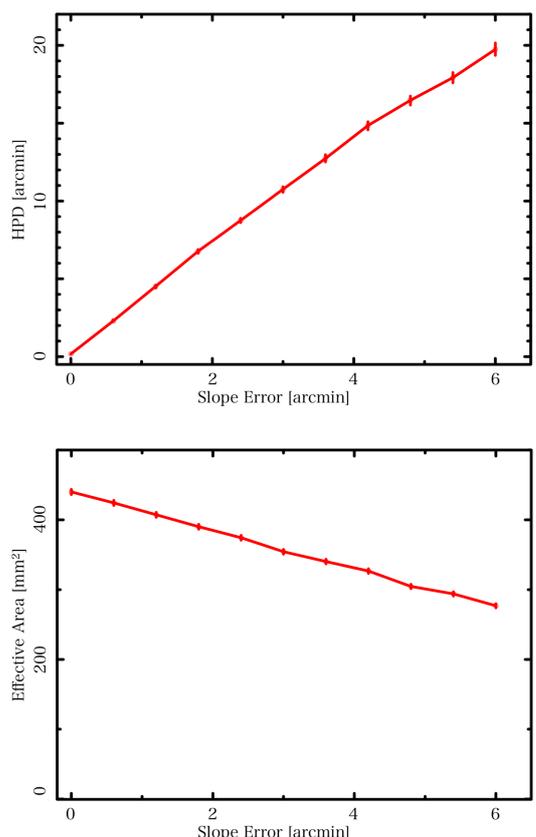


図 6: 光線追跡シミュレータ内に、反射鏡表面母線方向の形状誤差としてうねりを加えた場合の角度分解能 (上) の劣化および有効面積 (下) の減少分

<引用文献>

- ① Y. Ezoe et al., Large aperture focusing of x-rays with micro pore optics using dry etching silicon wafers, *Optics Letters*, Vol. 37, pp. 779-781 (2012).
- ② I. Mitsuishi et al., Novel ultra-lightweight and high-resolution MEMS X-ray optics for space astronomy, *Sensors and Actuators*, Vol. 188, pp. 411-416 (2012).
- ③ T. Ogawa et al., Iridium-coated micropore x-ray optics using dry etching of a silicon wafer and atomic layer deposition, *Applied Optics*, Vol. 52, pp. 5949-5956 (2013).
- ④ I. Yamada et al., *Materials Science and Engineering: R*, Vol. 34, pp. 231-295 (2001).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① T. Ogawa, Y. Ezoe, T. Kakiuchi, M. Ikuta, M. Sato, K. Nakamura, M. Numazawa, K. Takeuchi, M. Terada, T. Ohashi, I. Mitsuishi, K. Ishikawa, K. Mitsuda, K. Morishita, K. Nakajima, First X-ray imaging with a micromachined Wolter type-I telescope, *Microsystem Technologies*, 査読有り, Vol. 23, pp. 1-16 (2016).

② I. Mitsuishi, Y. Ezoe, T. Ogawa, M. Sato, K. Nakamura, M. Numazawa, K. Takeuchi, T. Ohashi, K. Ishikawa, K. Mitsuda, Ray-tracing simulations for the ultra-lightweight X-ray optics toward a future Jupiter exploration, *Advances in Space Research*, 査読有り, Vol. 57, pp. 320-328 (2015).

[学会発表] (計 2 件)

① 三石郁之, ハードウェア検討現状 (光学系), 地球磁気圏 X 線可視化に関する研究会, 招待講演, 首都大学東京 (2014/11/15).

② T. Ogawa, Y. Ezoe, T. Kakiuchi, M. Ikuta, M. Sato, T. Ohashi, I. Mitsuishi, K. Mitsuda, K. Morishita, K. Nakajima, X-ray Irradiation test of a MEMS-based X-ray optic, 2014 International conference on Optical MEMS and Nanophotonics, Glasgow, Scotland (2014/08/17-21).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: X 線光学系基材、及びその製造方法
発明者: 江副祐一郎, 三石郁之, 満田和久
権利者: 江副祐一郎, 三石郁之, 満田和久
種類: 特許権
番号: 2014-155088
出願年月日: 2014 年 7 月 30 日
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三石 郁之 (MITSUISHI, Ikuyuki)

名古屋大学・理学研究科・助教

研究者番号：90725863

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：