

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25600140

研究課題名(和文)高精度X線ミラー作製のための新規形状創生プロセスの開発

研究課題名(英文)Development of novel fabrication process for ultraprecise X-ray mirrors

研究代表者

松山 智至(Matsuyama, Satoshi)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10423196

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：X線分析やX線顕微鏡の性能向上のためには、高精度なX線集光ミラーの開発は必要不可欠である。しかし、開口数の大きなX線集光ミラーは、その形状ゆえに高精度に作製することは困難を極める。本研究では、そのようなX線集光ミラーを高精度に作製できるコンピュータ制御イオンビーム加工装置を開発した。楕円ミラーを作製したところ、形状誤差1 nmで作製することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Development of ultraprecise X-ray focusing mirrors is essential for improving micro-X-ray analysis and X-ray microscopy. However, it is quite difficult to fabricate such focusing mirrors, which has relatively large numerical aperture, due to its steeply curved shape. In this research, we developed a computer-controlled ion beam figuring system that can fabricate such focusing mirrors precisely. An elliptical mirror with a figure accuracy of 1 nm was successfully fabricated using the developed system.

研究分野：X線光学，超精密加工

キーワード：X線集光ミラー 放射光 イオンビーム加工

1. 研究開始当初の背景

X線分析やX線顕微鏡の性能は日々進歩している。これを強力に後押ししている要因の一つは、X線光学素子開発の着実な進展である。X線光学素子の中でも特に集光素子の開発は重要なテーマである。X線分析の感度・空間分解能の向上やX線顕微鏡の空間分解能や画質の向上に直接的に影響を及ぼすためであり、その開発は世界各国で行われている。しかし、急峻なX線集光ミラー(集光ミラーの開口数を大きくするためには曲率半径を小さくしなければならない)は、その形状ゆえに高精度に作製することは困難を極める。

2. 研究の目的

本研究では、そのようなX線集光ミラーを高精度に作製できる新規形状創生プロセスの確立を目指すものである。高精度なコンピュータ制御イオンビーム加工装置を開発することで、曲率半径の小さいX線集光ミラーを形状誤差(理想形状からのズレ)1 nmで作製することを目指す。本研究によってX線分析やX線顕微鏡の飛躍的な性能向上が期待される。

3. 研究の方法

以下の研究・開発項目を積み重ねながら、目的達成に向けて研究を進めた。

- (1) コンピュータ制御イオンビーム加工装置の開発
- (2) イオンビーム照射後表面の観察
- (3) イオンビーム加工装置の基礎加工特性の評価
- (4) 等速送り加工
- (5) 楕円ミラーの試作

4. 研究成果

- (1) コンピュータ制御イオンビーム加工装置の開発

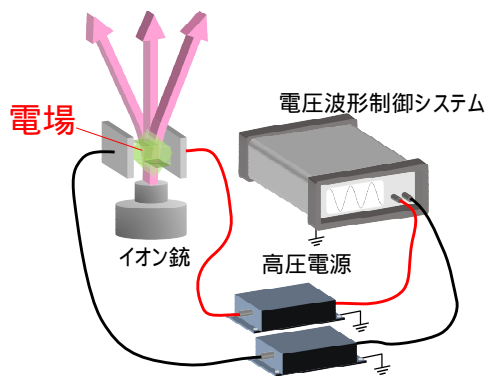


図1 開発した静電偏向システム

静電偏向システム(図1)を備えたイオンビーム加工装置を開発した。当初計画では、機械駆動の走査ステージの高度化を掲げたが、これでは加減速の不完全さに起因する誤差の発生を完全には排除できないと考え、物理

的にイオンビーム以外は静止している加工装置開発を進めた。本システムは、任意の電圧($\pm 6\text{kV}$)を印可できる2枚の平行平板を2組、口の字型に配置した2次元偏向器から成る。これによって、電場制御のみによってイオンビームを2次的に任意に操作できるようになった。

(2) イオンビーム照射後表面の観察

イオンビーム照射後表面を走査型白色干渉計(Zygo NewView)とAFM(原子間力顕微鏡)で観察し評価した。加速電圧5 keVのビームを照射したところ、照射前後で干渉計の観察結果には違いが見られなかったが、一方で、AFMでの観察ではやや悪化する傾向が見られた。シリコン単結晶(Cz-Si(001))では、0.144 nm rms / 0.360 nm rms (1000 nm領域)であった。次に加速電圧2kVのイオンビームを照射した。照射前後で、0.360 nm rms / 0.22 nm rmsと改善することを見出した。この結果より、5 kVで加工を行い、最終的に2 kVで表面粗さの改善を行うプロセスが最適であることが分かった。

(3) イオンビーム加工装置の基礎加工特性の評価

開発した静電偏向器の基礎加工特性を評価した。偏向器に印可した電圧によってイオンビームの照射位置を正しく制御できたかを調べるために、印可した電圧と静止加工痕の位置(つまりビーム偏向量)の関係を調べた。図2のように精度よく制御することができることを確認した。

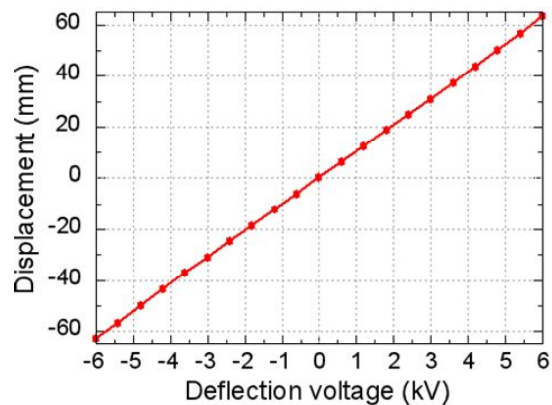


図2 印可した電圧と静止加工痕の位置の関係

(4) 等速送り加工

シリコン単結晶(Cz-Si(001))に対してイオンビームを等速に走査する実験を行った。等速に走査した場合、加工後形状は加工前形状と同一であるはずであるが、装置に不具合がある場合(イオンビーム走査の不均一さ、ビーム強度の不安定さ等)、加工前と加工後形状の差に誤差が生じる。イオンビームを等速に走査するために、偏向器にはノコギリ波を印可した。図3に加工前と加工後形状の差

を示す．誤差は 3 nm PV (0.72 nm rms)であって、これはほとんど計測精度に起因すると考えられた．

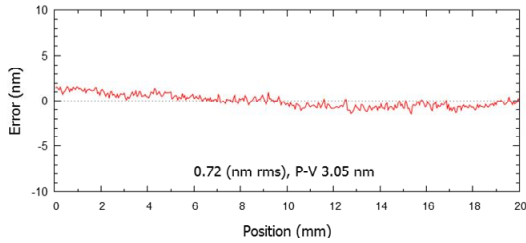


図3 等速送り加工後形状と加工前形状の差

(5)楕円ミラーの試作

さらに、開発した装置の性能を評価するために、シリコン単結晶基板(Cz-Si(001))上に楕円形状を作製した．基板に対してイオンビームの照射滞在時間を任意に制御することで、決定論的に加工を進めた．また、滞在時間分布を高精度に計算するためには、静止加工痕形状を高精度に取得することも重要であって、本実験では 1 nm の精度を実現した．図 4 に 1 度目の加工後に得られた形状誤差(楕円形状からのずれ量)を示した．約 4 nm PV (1.4 nm rms) (基板の初期高周波うねりの影響を排除して)が得られた．4 次関数状の形状誤差はシステムエラーと考えられ、今後これを完全に排除することで更なる高精度が可能であると考えられる．その後、これを修正するために 2 度目の加工を行った．形状誤差として 1 nm PV (0.48 nm rms)(基板の初期高周波うねりの影響を排除して)が得られた(図 5)．形状作製の後、上述したように 2kV のイオンビームを用いた表面粗さ改善処理を行った．この結果、表面粗さとして 0.117 nm rms を得ることができた．得られた表面粗さを用いて反射率を見積もったところ、反射率ロスがほぼゼロであることを確認した．

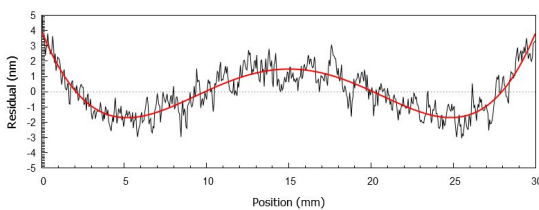


図4 1回目の加工後の形状誤差

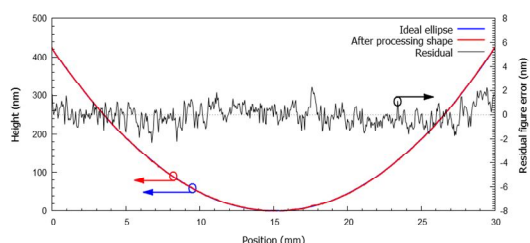


図5 2回目の加工後のミラー形状と形状誤差

作製した集光ミラーが X 線を意図通り集光することが可能か、波動光学シミュレータを用いて計算機実験を行った．本シミュレータは我々のグループで開発されたものであって、これまでの研究で現実の X 線集光実験を精度よく模擬できることが示されている．この計算の結果、ほとんど完全な集光が実現できることが分かった．これらの結果は、開発したコンピュータ制御イオンビーム加工装置を用いて形状誤差 1 nm PV を持つ X 線集光ミラーを作製できることを意味する．

本研究では予想以上に高い加工精度を実現することができた．これは将来的に、形状計測法に頼らない超高精度集光ミラーの作製プロセスにつながると考える．例えば、平面や球面の基板上から、加工装置に精度のみで目的形状へと削り出すことを意味する．

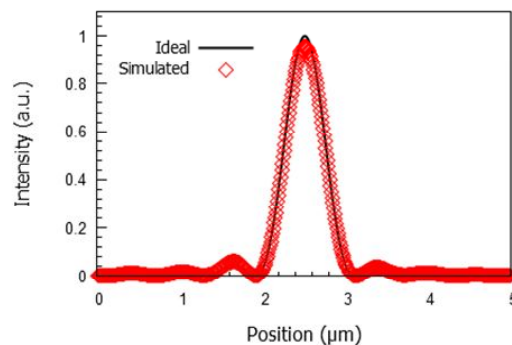


図6 計算した集光強度プロファイル．フレネル・キルヒホッフ回折積分に基づく波動光学シミュレータを用いて、10 keV の X 線を使った場合を計算した．

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) S. Matsuyama, Y. Emi, H. Kino, Y. Kohmura, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, "Achromatic and high-resolution full-field X-ray microscopy based on total-reflection mirrors," *Opt. Express*, vol. 23, no. 8, pp. 9746-9752, 2015 査読有 (DOI: 10.1364/OE.23.009746).
- 2) S. Matsuyama, Y. Emi, H. Kino, Y. Sano, Y. Kohmura, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, "Development of achromatic full-field x-ray microscopy with compact imaging mirror system," *Proc. SPIE*, vol. 8851, pp. 885107-885107-8, 2013 査読無 (DOI: 10.1117/12.2023152).

[学会発表](計 23 件)

- 1) S. Matsuyama, Y. Emi, H. Kino, Y. Kohmura, K. Tamasaku, M. Yabashi, T.

- Ishikawa, and K. Yamauchi, "Achromatic full-field X-ray microscopy using four total-reflection mirror", International Conference on X-ray Microscopy (XRM2014), 26-31 October 2014, Melbourne Convention and Exhibition Center, Melbourne, Australia.
- 2) S. Matsuyama, Y. Emi, H. Kino, Y. Kohmura, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, "Development of achromatic full-field hard X-ray microscopy and its application to X-ray absorption near edge structure spectromicroscopy", SPIE Optics+Photonics, 17-21 August 2014, San Diego, CA, US.
 - 3) S. Matsuyama (invited), "Development of Achromatic Full-field X-ray Microscopy Based on Total Reflection Mirrors", Collaborative Conference on 3D & Materials Research (CC3DMR 2014), 23-27 June 2014, Incheon/Soul, South Korea.
 - 4) 山田純平, 松山智至, 佐野泰久, 山内和人, "X線ミラー作製のためのビーム偏向制御を用いた数値制御イオンビーム加工装置の開発", 第28回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 2015 1/10-12, 滋賀, 立命館大学 BKC.
 - 5) 山田純平, 松山智至, 佐野泰久, 山内和人, "Ion Beam Figuring を用いた高精度 X線ミラーの作製(第7報) 静電偏向制御による非球面形状の作製と評価", 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2015 3/17-19, 東京, 東洋大学白山キャンパス.
 - 6) 松山智至, 恵美陽治, 木野英俊, 佐野泰久, 香村芳樹, 石川哲也, 山内和人, "Advanced Kirkpatrick-Baez ミラー光学系を用いた高分解能かつ色収差のない硬 X線顕微鏡の開発", 2014 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2014/03/18-20, 東京, 東京大学.
 - 7) 松山智至, 恵美陽治, 木野英俊, 佐野泰久, 香村芳樹, 玉作賢治, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人, "Advanced Kirkpatrick-Baez ミラー光学系を用いた結像型硬 X線顕微鏡の開発", 第27回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 2014 1/11-13, 広島, 広島国際会議場.
 - 8) S. Matsuyama (invited), "Development of achromatic full-field hard X-ray microscopy using four total-reflection mirrors", The 12th symposium on X-ray Imaging Optics, 18-20 Nov 2013, Osaka, Japan.
 - 9) S. Matsuyama (invited), Y. Emi, Y.

Kohmura, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, K. Yamauchi, "Development of full-field hard x-ray microscopy with four aspherical mirrors", SPIE Optics+Photonics, 26-29 Aug 2013, San Diego, USA.

〔その他〕
ホームページ等
<http://www-up.prec.eng.osaka-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松山 智至 (MATSUYAMA SATOSHI)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：10423196