講演番号 マイクロマシン技術を用いた P7-000 超軽量・高角度分解能X線光学系の開発 ○森山 鉄平1、江副 祐一郎1、三石 郁之2、石津 健佑1、小川 智弘1、満田 和久2、山崎 典子2、大橋 隆哉1、 洞出光洋³、杉山進³、 Raul Riveros⁴、山口ひとみ⁴、金森義明⁵、森下浩平⁶、中嶋一雄⁶、前田龍太郎⁷ ¹首都大学東京、²ISAS/JAXA、³立命館大学、⁴フロリダ大学、⁵東北大学、⁶京都大学、⁷産業技術総合研究所

X線天文学において、微弱な天体からのX線を集光し結像する光学系は不可欠となった。天体からのX線は地球大気に吸収されてしまい地上に届かないため人工衛星などの飛翔体を使って、観測する必要がある。 そのため軽量で、有効面積が大きく、角度分解能の良い光学系が求められる。我々はマイクロマシン(MEMS)技術を用いた、独自の世界最軽量かつ高角度分解能のX線光学系の開発を行っている。

I. 宇宙X線光学系

X線(0.1-10 keV)に対する物質の屈折率は1よりもわずかに小さい。 そのため可視光のような直入射の光学系は難しく、全反射を利用した斜入射光学系が広く用いられる。



IV. 開発現状 (2): X線結像の実証

X線反射を実証したため、我々は次なる段階として、X線結像の実証へと進んだ。我々は新たに 4 inch の Si 光学系をデザインし、DRIE の条件出しを行った。そしてアニール、高温変形によって 1段型光学系の試作に成功した (Mitsuishi et al. IEEE JQE 2010、首都大 高木修論 2010)。







現状(1),(2)で示したように、我々は本手法で超軽量X線光学系が原理的に実現可能であることを 実験的に示してきた。しかしながら、角度分解能(形状精度)や表面粗さ(マイクロラフネス)には改 善の余地がある。そこで、これらについて現在、改善を進めている最中である。形状精度について は、DRIE およびアニールの条件の最適化を行っている。以下にX線結像実証時の典型的な DRIE お よび アニール後の形状精度を示す。DRIE後の凹凸が分解能を10分角程度に制限している。我々は DRIE の条件等を見直し、これを factor 2 以上改善の見込みである(首都大 石津修論 2011)。



我々は半導体微細加工技術であるマイクロマシン技術に着目した。100 μm オーダーの薄い基板 に、シリコンドライエッチングや X線LIGA といった手法で多数の微細な穴の開いた曲面穴構造体 を作る。側壁をアニールや研磨で平滑化し、X線反射鏡とする。そして平行X線を集光するように 球面変形を行い、多段に重ねれば超軽量な Wolter type-I 光学系が完成する (特許出願3件、Ezoe et al. AXRO 2008 2009 2010)。

III. 開発現状 (1) : X線反射の実証

マイクロラフネス (X線可干渉距離<10 µm 以下の粗さ)については、アニール処理と磁気流体研磨 (MAF)を組み合わせることで Si 光学系のさらなる改善を行った。下図は反射面の原子間力顕微鏡画 像である。これらのプロセスにより目標値(RMS<1 nm)を達成した(Riveros et al. ASME) 2010)。MCPやMEMSなどの超軽量マイクロポアオプティクスにおいて、1 nm 以下のマイクロラフ ネスを達成したのは世界で初めてである。



我々は開発の第一段階として、まずミニチュア光学系である鏡チップ(変形なし)を作成し、X線 反射の実証を行った。 Si 光学系については、宇宙研の DRIE 装置を用いて条件出しを行い、最適

な形状と粗さを達成するレシピを求め、東 北大でアニールを行って側壁を平滑化した。 Ni 光学系については、立命館大のシンクロ トロン露光施設で作成し、側壁を磁気流体 研磨で平滑化した。そして首都大ビームラ インにて世界で初めてこの手法でのX線反 射を実証した (Ezoe et al. MST 2010、 東大 三石 修論 2009、フロリダ大 Riveros 修論 2009、立命館大 洞出D論 🔬 2009、 Riveros et al. Applied Optics 2010、Yamaguchi et al. CIRP 2010)。 ミニ ノチップ

X線

反射成分

コリメート成分



			0.1		-
RMS = 35 nm	RMS = 1.7 nm	RMS = 0.18 nm	(i)	(ii) (iii	i)
11 開祭明史	(1) • \\/_l+	~ 一刑半学文	の理教	K	
VI. 卅] ナモップエ1八	$(4) \cdot \mathbf{v} \mathbf{v} \mathbf{u}$	「主儿子不	マノリガノ	5	
光学系の性能改善と平行して、我々は Wolter I型光学系の製作に進んでいる。目指す光学系は将来					
の小型衛星や探査衛星をにらみ直径 4 inch、厚さ 500 µm、目標とする有効面積 > 10 cm ² @1 keV、					
角度分解能 < 5 arcmin である。我々はシミュレーションに基づき、光学系のデザインを行い、そして					
アラインメントシステムを試作した。					
シミュレーションによるワ	<u>や幅の最適化</u>	<u>アラインメントシステム</u>		CCD 👞	
Si 光学系	i 光学系	CCD			
	RMS				
0.5 nm 1.0 nm / 二部 0. 提 1.	.5 nm .0 nm				

有効面積 3.0 nm 有效面 3.0 nm 20 µm 20 µm 。 ポア幅 [µm] ポア幅 [µm] 以上の開発により、我々は5分角以下の分解能と <1 nm のマイクロラフネス



2011年1月5-7日 第11回 宇宙科学シンポジウム

検出器