

R006-67

Zoom meeting B : 11/4 PM2 (15:45-17:30)

15:45-16:00

地球磁気圏 X 線撮像計画 GEO-X に向けた超軽量 X 線望遠鏡のプラズマ原子層堆積法による Pt 膜付加工

#伊師 大貴¹⁾, 江副 祐一郎¹⁾, 石川 久美²⁾, 沼澤 正樹³⁾, 福島 碧都¹⁾, 鈴木 光¹⁾, 湯浅 辰哉¹⁾, 内野 友樹¹⁾, 作田 紗恵¹⁾, 稲垣 綾太¹⁾, 上田 陽功¹⁾, 廣本 悠透¹⁾, 満田 和久⁴⁾

¹⁾東京都立大, ²⁾JAXA 宇宙研, ³⁾理研, ⁴⁾国立天文台

Pt-coated light-weight X-ray optics prepared by plasma atomic layer deposition on-board GEOspace X-ray imager (GEO-X)

#Daiki Ishi¹⁾, Yuichiro Ezoe¹⁾, Kumi Ishikawa²⁾, Masaki Numazawa³⁾, Aoto Fukushima¹⁾, Hikaru Suzuki¹⁾, Tatsuya Yuasa¹⁾, Tomoki Uchino¹⁾, Sae Sakuda¹⁾, Ayata Inagaki¹⁾, Yoko Ueda¹⁾, Haruyuki Hiromoto¹⁾, Kazuhisa Mitsuda⁴⁾

¹⁾Tokyo Metropolitan Univ., ²⁾ISAS/JAXA, ³⁾RIKEN, ⁴⁾NAOJ

We have been developing light-weight X-ray optics for future astronomical and planetary exploration missions (Ezoe et al. 2010 MST). Microscopic pores with a width of 20 μm and a depth of 300 μm are formed by deep reactive ion etching on silicon substrates. The sidewalls of micropores are utilized as X-ray reflectors. The substrates are annealed at high temperatures to obtain sub-nm rms surface roughness and deformed into a spherical shape to focus X-rays from celestial objects. We have demonstrated X-ray reflection and imaging with micropore sample optics (Ogawa et al. 2017 MST). Our micropore optics will be on-board GEOspace X-ray imager (GEO-X; Ezoe et al. 2018 JATIS), which aims at X-ray imaging of the Earth's magnetosphere. Silicon is relatively easy to process with micro-machining technologies, while heavier materials such as Au and Pt can obtain higher reflectivity. Therefore, we focused on atomic layer deposition (ALD) as a means to coat micropore sidewalls with such a heavy metal. This thin-film deposition technique is based on self-limiting surface reactions alternately, providing high uniformity and good conformality on high-aspect-ratio micropore structures.

We previously verified X-ray reflection from Ir- and Pt-coated micropore sample optics prepared by thermal ALD (Ogawa et al. 2013 Appl. Opt., Takeuchi et al. 2018 Appl. Opt.). However, in the case of Pt, its surface roughness was estimated to be 2.2 ± 0.2 nm rms which did not meet a required micro-roughness of GEO-X (<2 nm rms). To achieve better surface roughness, we newly tested plasma ALD. The higher reactivity of plasma species can promote more active surface reactions. Using Pt(Cp^{Me})Me₃ as metal precursors and O₂ plasma instead of O₂ gas as reactants for oxidization decomposition of precursor ligands, we coated Pt films with a thickness of 20 nm following our previous protocol. The estimated surface roughness was 1.6 ± 0.1 nm rms and significantly better than our previous results (Ishi et al. 2020 Appl. Phys. Express). This result is acceptable for the requirement of GEO-X. Furthermore, we found that a maximum achievable surface roughness was 1.0 ± 0.1 nm rms from Pt films on a silicon substrate surface. The similar surface roughness is expected to be achieved in our micropore optics. Here we report on characterization of Pt-coated light-weight X-ray optics and other coating results of currently considered materials such as Co, Ni, and light-elements, e.g., SiC and BN.

我々は微細加工技術を用いた独自の超軽量 X 線望遠鏡を開発している (Ezoe et al. 2010 MST)。半導体加工技術の一つであるドライエッチングで厚み 300 μm の Si 基板に幅 20 μm の微細穴を多数開け、側壁を X 線反射鏡として利用する。X 線反射に必要な数 nm rms の滑らかな側壁を高温アニールで実現した後、基板を球面に塑性変形することで天体からの平行 X 線を集光する。基板が薄いため、世界最軽量であり、我々は本手法で世界初の X 線反射・結像を実証してきた (Ogawa et al. 2017 MST)。本望遠鏡は世界初の地球磁気圏 X 線撮像を目指す超小型衛星 GEOspace X-ray imager (GEO-X; Ezoe et al. 2018 JATIS) に搭載が予定されている他、JAXA 宇宙科学技術ロードマップにて「獲得すべきキー技術」にも選出され、重量・サイズ制限の厳しい将来惑星探査に対する多彩な応用可能性を秘めている。Si は加工が容易な反面、X 線反射率は Au や Pt などの重金属と比べて低いため、高アスペクト微細穴の金属成膜技術が欠かせない。そこで我々は原子層堆積法 (Atomic Layer Deposition: ALD) に着目した。重金属を含むガスと酸化ガスを交互に流し、表面化学反応の自己制御性を利用して 3 次元構造体に純金属を一層ずつ成膜できる。

我々は 200-300 度の高温下における熱的反応性を利用するサーマル ALD 方式で微細穴側壁の Ir および Pt 成膜に成功してきた (Ogawa et al. 2013 Appl. Opt., Takeuchi et al. 2018 Appl. Opt.)。ALD 成膜による X 線反射率の向上は実証したが、成膜初期の核形成遅延が無視できず、表面粗さは Pt の場合 2.2 ± 0.2 nm rms と GEO-X 衛星の要求値 (<2.0 nm rms) に対して更なる改善が求められていた。そこで酸化ガスに O₂ プラズマを用いるプラズマ ALD 方式を新たに試した。サーマル ALD 方式で使用していた O₂ ガスに比べてラジカルの高い反応性を利用でき、成膜初期の核形成を促進できる。我々は原料ガスに Pt(Cp^{Me})Me₃ を用いてサーマル ALD 方式と同様に Pt を 20 nm 成膜することに成功した。X 線反射率から求めた表面粗さは 1.6 ± 0.1 nm rms とサーマル ALD 方式に比べて有意に改善しており (Ishi et al. 2020 Appl. Phys. Express)、なおかつ GEO-X 衛星の要求値も十分に満たしている。下地となる Si 側壁を滑らかにすれば、表面粗さは 1.0 ± 0.1 nm まで達成可能であることも突き止めた。本講演では、GEO-X 衛星に搭載予定の超軽量 X 線望遠鏡のプラズマ ALD 方式を用いた Pt 膜付結果を報告すると

ともに、その他の反射材として現在検討している Co や Ni 成膜および SiC や BN などの軽元素オーバーコーティングの結果についても紹介する。