

XPS時間依存測定による二次元MoS₂膜の放射線損傷に関する研究

Study on Radiation Damage of 2D MoS₂ Film by XPS Time-Dependent Measurement

東大院工¹, JAXA宇宙研², 東工大・工学院³

°松沢 理宏^{1,2}, 五十嵐 智³, 小林 大輔², 若林 整³, 廣瀬 和之^{1,2}

Univ. Tokyo¹, ISAS/JAXA², Tokyo Tech³,

°Masahiro Matsuzawa^{1,2}, Satoshi Igarashi³, Daisuke Kobayashi²,

Hitoshi Wakabayashi³, Kazuyuki Hirose^{1,2}

E-mail: matsuzawa-masahiro583@g.ecc.u-tokyo.ac.jp, hirose@isas.jaxa.jp

【背景と目的】

二次元MoS₂ FETがポストMOSFETの候補として研究されている。MoS₂層は数ナノメートルという極薄膜であることから、MoS₂ FETで構成されるメモリーは優れたソフトエラー耐性を持つ宇宙用メモリーとして期待されている[1]。宇宙応用にあたっては、高エネルギー放射線が当たったときにだけ起きる一過性のソフトエラーだけでなく、当たった数の履歴で決まる持続的な「トータルドーズ効果」への耐性も重要であるが、先行研究は少ない。例えば、放射線照射により、結晶が相転移し[2]不純物MoO₃の酸素空孔に正孔トラップが生成した「結晶相転移モデル」[3]、あるいは硫黄空孔に電子トラップが発生した「電荷捕獲モデル」[4]についてシミュレーション計算での報告があるが、これらについて実験的に知見は得られていない。

本研究では、薄膜の結晶相転移や電荷捕獲の評価が可能なXPS時間依存測定[5]を用いて、電荷捕獲モデルと結晶転移モデルの実験的な検証を試みた。

【実験方法】

XPS装置(ESCALAB220i_XL)を用い、単色化したAl-K α X線(1486.6 eV)を照射し続け、Si2p, O1s, Mo3d, S2pピーク結合エネルギーE_bを40時間にわたり測定した。試料には世界初ノーマリーオフ動作に成功した[6]MoS₂純度99.9%(3N MoS₂)と、更なる性能向上が期待されるMoS₂純度99.99%(4N MoS₂)のMoS₂(3nm)/SiO₂(400nm)/n型Si(100)の2種類を使用した。MoS₂膜はRFマグネトロンスパッタリング法で成膜した。スパッタリング後、硫黄欠損を補填するため700°Cで硫化アニーリング処理(3N MoS₂: 40分, 4N MoS₂: 60分)を施した。なお、過去のラマン評価[7]により、こうして得られた2種類の試料のピーク形状がほぼ一致することが分かっている。

【実験結果と考察】

Fig. 1にMo3dピークの結合エネルギーシフト量 $\Delta E_b(\text{Mo3d})$ からSi2pピークの結合エネルギーシフト量 $\Delta E_b(\text{Si2p})$ を引いた差分 $\delta \Delta E_b$ のX線照射時間依存性を、それぞれの試料について示す。Fig. 2にX線照射40h後のMo3dスペクトルを、それぞれの試料について示す。

3N MoS₂については、Fig. 1よりX線照射時間とともに $\delta \Delta E_b$ がおおむね単調減少し負に転じることからMoS₂膜中に電子が捕獲されていることがわかった。また、Fig. 2よりX線照射後MoS₂の結晶相は半導体相のみであることがわかった。電子が捕獲されていることと結晶の相転移が認められないことから3N MoS₂に対する放射線の影響は「電子捕獲モデル」で説明できると考えられる。一方、4N MoS₂

については、Fig. 1よりX線照射後3hあたりから時間とともに $\delta \Delta E_b$ が大きくなることからMoS₂膜中に正孔が捕獲されていることがわかった。Fig. 2より X線照射後40hにMo3dスペクトルに金属相[2]と考えられるピークが出現していることがわかった。正孔が捕獲されていることと相転移が求められたことから4N MoS₂に対する放射線の影響は「結晶相転移モデル」で説明できると考えられる。

以上の通り、実際のMoS₂薄膜のX線照射効果(トータルドーズ効果)は、電荷捕獲モデルと結晶相転移モデルで説明できそうなことがわかった。どちらのモデルで説明できるかは、一意的に決まるものではなく、成膜条件に依存することが分かった。それは、ラマンのピーク比較では判定できないことが示唆される。また、4N MoS₂は正孔トラップ起因のMoO₃が多いため、結晶転移が起きやすいことが推測される。

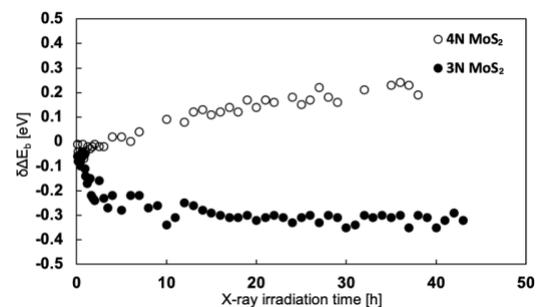


Fig. 1 Difference in binding energy shift between Mo3d and Si2p depending on X-ray irradiation time.

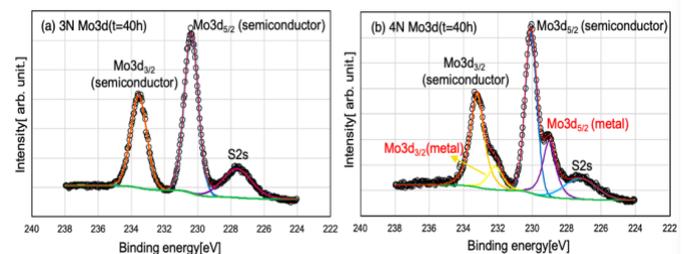


Fig. 2 Mo3d spectra after 40 hours of X-ray irradiation on (a) 3N MoS₂ and (b) 4N MoS₂.

- [1] S. Zheng, *et al.*, IEEE Access 7, 79989-79996 (2019).
- [2] Y. Lin, *et al.*, Nat. Nanotechnol. 9, 391-396 (2014).
- [3] J.-I. Park, *et al.*, J. Alloys Compd. 814, 152134 (2020).
- [4] C. Zhang, *et al.*, IEEE TNS 61, 2862-2867 (2014).
- [5] K. Hirose, *et al.*, J. Prog. Surf. Sci. 82, 3-54 (2007).
- [6] K. Matsuura, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 59, 080906 (2020).
- [7] K. Matsuura, *et al.*, J. Electron. Mater. 47, 3497-3501 (2018).