

## HfO<sub>x</sub>をゲート絶縁膜とした IGZO 薄膜トランジスタの HAXPES 分析 HAXPES Analysis of IGZO Thin Film Transistors with HfO<sub>x</sub> as Gate Insulator

宮澤 徹也, 林 和志, 越智 元隆  
Tetsuya Miyazawa, Kazushi Hayashi, Mototaka Ochi

株式会社神戸製鋼所  
Kobe Steel, Ltd.

HfO<sub>x</sub>をゲート絶縁膜とした IGZO 薄膜トランジスタは、作製条件によって閾値電圧が負側にシフトするといったデバイス特性上に不利な現象が起こることがある。この理由を明らかにするために薄膜トランジスタと同じ条件でサンプルを作製し、3次元空間分解 HAXPES の有効性を検証した。O 1s ピークに着目したところ、深さ方向において化学状態の異なる様子が確認された。3次元空間分解 HAXPES は本課題のような課題解決に有効であることがわかった。

キーワード：HAXPES、酸化物半導体、IGZO、薄膜トランジスタ、酸化ハフニウム

### 背景と研究目的：

フラットパネルディスプレイなどの表示画素を制御するためにアモルファス系の酸化物半導体薄膜トランジスタ (TFT) の開発が行われている。特に IGZO (In:Ga:Zn =1:1:1) と呼ばれる三元系組成の酸化物半導体が特性に優れている。高移動度などの特徴をもつ酸化物半導体 TFT は、ディスプレイ用途のみならず、超集積エレクトロニクス分野でも注目を集めてきており、今後メモリデバイス応用、三次元集積デバイス、などへの応用が期待されている。2021年に HfO<sub>x</sub>と IGZO を用いた半導体メモリ向け TFT を開発した報告がなされた[1]。

典型的な酸化物半導体 TFT は、保護膜 (SiO<sub>2</sub>)、酸化物半導体 (IGZO)、ゲート絶縁膜 (HfO<sub>x</sub>) から構成されている。これにソース・ドレイン電極 (Mo)、ゲート電極 (Mo) を付け加えることで電気的な制御を行う。メモリ向け TFT ではゲート絶縁膜の薄膜化が重要で、従来ディスプレイ用途で使用されてきた SiO<sub>2</sub> に代わって、高い比誘電率を持つ HfO<sub>x</sub> が使用されている。著者らはこれまで HfO<sub>x</sub> をゲート絶縁膜として使用した TFT の開発を行ってきた。ドレイン電流-ゲート電圧の特性を調査した結果、TFT 作製条件のうちの HfO<sub>x</sub> の酸化方法によって閾値電圧の負側へのシフトが確認された。この特性の変化は一般的にデバイスとして不利な要素である。そのため、材料開発へのフィードバックをするためにはこの原因を明らかにすることが必要である。これまで我々は、HfO<sub>x</sub> の単一膜の TDS 測定の結果から、HfO<sub>x</sub> を O<sub>3</sub> で酸化した場合と H<sub>2</sub>O で酸化した場合では後者の方が水素の放出量が多いことを確認した。

そこで本課題では、上記で述べた TFT と同じ構造において、各薄膜の化学状態の関係性を調べるために HAXPES を用いた。また、TFT は薄膜の積層構造となっているため、深さ方向の情報を区別することが可能な 3次元空間分解 HAXPES 装置を用いた。

### 実験：

試料は、表面側から SiO<sub>2</sub> 膜(4 nm) / IGZO 膜(8 nm) / HfO<sub>x</sub> 膜(10 nm)/Si 基板という構造になるように成膜した (In:Ga:Zn = 1:1:1)。この構造と膜厚は実際の TFT と同じである。HfO<sub>x</sub> 膜はオゾンで酸化したものを用いた。成膜後は窒素雰囲気中で 350℃の加熱を 30 分間行った。また帯電防止のために Au 膜を試料の半分ほどの面積に 100 nm の膜厚で成膜した。

入射 X 線のエネルギーは 8 keV、パスイエネギーは 200 eV とした。測定領域は、Si 1s、O 1s、In 3d、Ga 2p、Zn 2p、Hf 4d、価電子帯とした。Hf の内殻ピークは通常 4f 軌道が測定されることが多いが、他のピークとの重なりが生じることと 8 keV の入射 X 線に対して感度が小さいことから、4d 軌道のピークを測定することとした。結合エネルギー軸の較正は、Au のフェルミ準位が 0 eV となるように行った。TOA は 85 度とした。帯電は生じていなかったため、中和銃は使用しな

かった。角度を深さに変換するときは  $0.5 \text{ degree} = 1 \text{ nm}$  とした。

#### 結果および考察：

図1はオゾンで酸化した  $\text{HfO}_x$  を用いた試料の  $\text{O}1s$  の HAXPES スペクトルである。横軸は結合エネルギー、縦軸は深さである。光電子の強度は青から赤への遷移で示した。533.2 eV あたりのピークは Si と酸素の結合 ( $\text{SiO}_2$ ) である。二つの試料において  $\text{SiO}_2$  の膜厚は同じであるため、 $\text{SiO}_2$  のもっとも強度の高い点を 1 として規格化した。531.2 eV あたりのピークは金属元素 (In、Ga、Zn、Hf) と酸素の結合である[2]。4 nm 以降の深さにこのピークが出現するが、これは 0 - 4 nm は  $\text{SiO}_2$  層だからである。また、4 nm 以降の深さにおいても表面の光電子も検出されるので、 $\text{SiO}_2$  のピークは検出される。

以上のように、深さ方向において化学状態の違いを検証することができた。

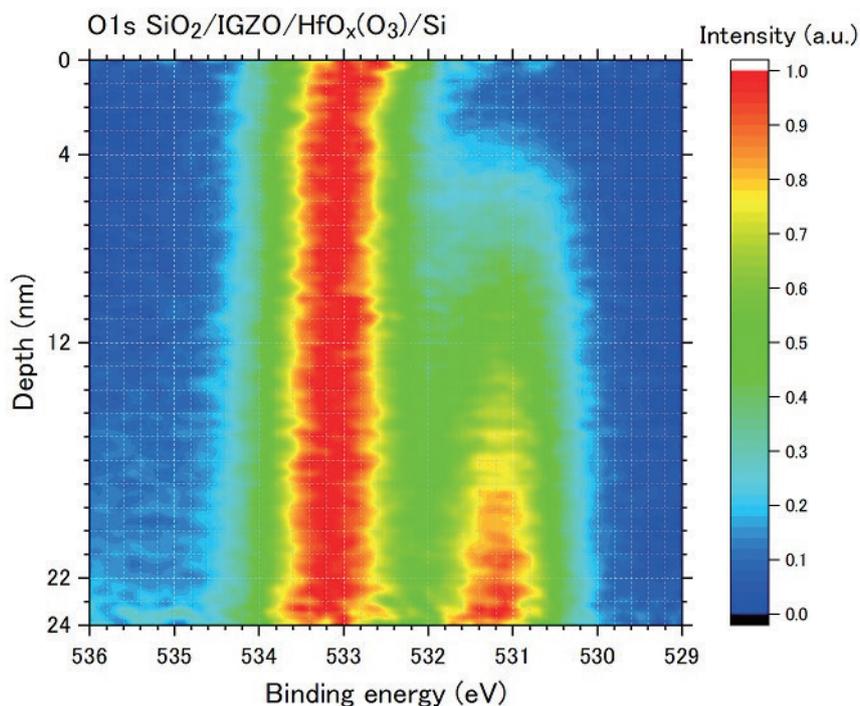


図1： $\text{O}_3$  で酸化した  $\text{HfO}_x$  を用いた試料の HAXPES スペクトル

#### 今後の課題：

他の条件のサンプルと比較し、詳しい化学状態の検証を行うことでデバイス特性の変化の原因を明らかにする。

#### 参考文献：

- [1] J. Wu, F. Mo, T. Saraya, T. Hiramoto, M. Ochi, H. Goto and M. Kobayashi, *IEEE Trans. Electron Devices* **68**, 6617 (2021).
- [2] J.-C. Dupin, D. Gonbeau, P. Vinatierb and Alain Levasseur, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2**, 1319 (2000).