

三次元集積型強誘電体デバイスへ向けた三元系非晶質酸化物半導体材料 Ternary amorphous oxide semiconductor material toward 3D-integrated ferroelectric devices

奈良先端大¹, 東京大学² ○高橋 崇典¹, 上沼 睦典¹, 小林 正治², 浦岡 行治¹

NAIST¹, Univ. of Tokyo², °Takanori Takahashi¹, Mutsunori Uenuma¹, Masaharu Kobayashi²,
Yukiharu Uraoka¹

E-mail: takahashi.takanori.tn7@ms.naist.jp, uenuma@ms.naist.jp

【はじめに】 次世代メモリデバイスの候補として、強誘電性 HfO_2 ^[1]を用いたトランジスタ型強誘電体メモリ (FeFET) への関心が高まり、三次元積層構造の FeFET (3D-FeFET) が提案されている^[2]。近年、チャンネル材料の候補として In-Ga-Zn-O (IGZO) 等の非晶質酸化物半導体 (AOS) が挙げられており、Si 系で問題となる界面層の形成に伴う特性劣化を抑制することが期待されている^[3]。AOS を 3D-FeFET へ適用するためには、高温熱処理耐性を高めること、原子層堆積法 (ALD) による成膜技術確立することが求められる。従来の AOS は IGZO のような四元系が主流であり、低温形成が要求されるディスプレイ用途に向けて設計されてきた。そのため、高温熱処理 ($\geq 500^\circ\text{C}$) が電気的特性や信頼性に及ぼす影響に関する知見の蓄積は十分ではなく、3D-FeFET 用途に AOS 組成を見直す必要がある。また、ALD 法による複合酸化物の成膜は技術的難易度が高く、四元系から構成元素を減らした三元系が有望であると推察される。本研究では、3D-FeFET に実装可能な AOS を実現することを目的として、三元系 In-X-O における添加元素 X が非晶質相や電気的特性の熱的安定性に及ぼす影響を評価した。また、In-X-O を半導体層に用いた HfO_2 系強誘電体デバイスを作製し、動作検証を行った。

【実験方法】 In-X-O の電気的特性を評価するために、 AlO_x 保護膜を有するトップコンタクト/ボトムゲート型電界効果トランジスタ (FET) を作製した。チャンネルとして 10 nm 厚の In-X-O を SiO_2 (85 nm) / $n^{++}\text{-Si}$ 基板上にスパッタ法によって成膜し、パターンニング後に熱処理を行った。本報告では、強誘電性 HfO_2 の結晶化プロセスを想定した窒素雰囲気中における 500°C の急速加熱処理 (RTA) を実施し、FET 特性の添加元素 X 依存性を評価した。

【実験結果】 図 1 に RTA 処理を行った三元系 AOS をチャンネルとする FET の伝達特性を示す。高温窒素雰囲気における熱処理は AOS 中からの酸素脱離を誘発するため、キャリア密度の上昇が懸念される。図 1 から In-Ga-O (IGO) 系を用いることでしきい値電圧を 0 V 近傍に制御可能であることが示された。また、IGO の非晶質相は 600°C まで維持されることが確認され、 $25 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ の電界効果移動度や 69 mV/decade の S 値に代表される優れた電子輸送特性が得られた^[4]。

また、AOS は HfO_2 の強誘電相を誘引するキャップ材として機能することが報告されている^[3]。本研究では IGO をキャップ材として $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ (HZO) の結晶化を行い、IGO/HZO/TiN 構造のキャパシタを作製した。図 2 に IGO と HZO を用いたキャパシタの分極特性を示す。明瞭な強誘電性が確認され、IGO がキャップ材として使用可能であることが示された。以上より、強誘電性 HfO_2 の作製プロセスと高い親和性を有する三元系 AOS として、IGO 系が有望であることを見出した。

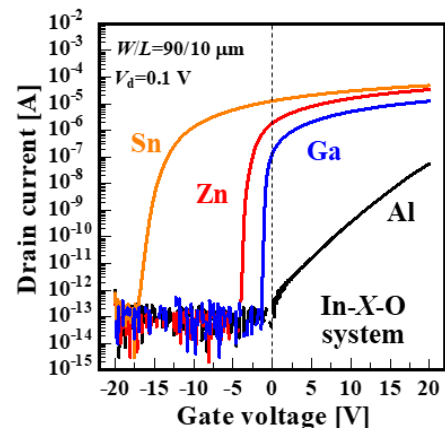


Fig. 1 Transfer characteristics of FET with various In-X-O channels after RTA at 500°C in N_2 .

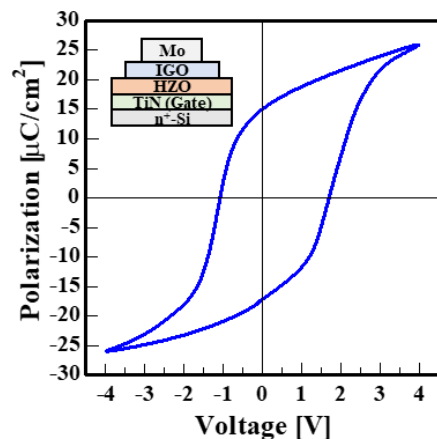


Fig. 2 Polarization-voltage characteristics of metal-ferroelectric-semiconductor capacitor based on IGO and HZO.

[1] T. S. Böske et al., *Appl. Phys. Lett.* **99**, 102903 (2011). [2] K. Florent et al., *Symposium on VLSI Technology*, T12-4 (2017). [3] F. Mo et al., *IEEE J. Electron Devices Soc.* **8**, 717 (2020). [4] T. Takahashi et al., 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 21p-B203-19 (2022).