

4 nm の薄膜 $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ 強誘電体キャパシタにおける 低動作電圧と高書換耐性の実証およびプロセス温度とウェークアップの課題

4 nm-thick $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ ferroelectric capacitor with low operating voltage and high endurance and its challenges of process temperature and wake-up

東大院工¹, RAMXEED² °トープラサートポン カシディット¹, 田原 建人¹, 彦坂 幸信²,
中村 亘², 齋藤 仁², 竹中 充¹, 高木 信一¹

Univ. Tokyo, RAMXEED, °K. Toprasertpong, K. Tahara, Y. Hikosaka, K. Nakamura,
H. Saito, M. Takenaka, S. Takagi

E-mail: toprasertpong@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

【背景】 $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ (HZO) 強誘電体は、PZT や BTO といった従来の強誘電体と比較して CMOS プロセスとの親和性が優れており^[1]、100 nm 以下の技術ノードで量産化できる大容量の強誘電体メモリとして注目を集めている。HZO 強誘電体メモリを実用化するためには、高い動作電圧と低い書換耐性が大きな課題であった。本発表では HZO の薄膜化技術が両課題の克服において鍵となる技術であることを実証した研究成果を紹介する^[2,3]。

【実験手法】 HZO 膜厚 4~10 nm の TiN/HZO/TiN 強誘電体キャパシタを、異なるアニール温度で結晶化し、電気特性を系統的に調べた。

【実験結果】 Fig. 1 は HZO 膜厚・アニール温度を振って強誘電特性をマッピングした結果である。薄膜化すると必要な結晶化温度が高くなることを実験的に明らかにした。このマップで得られた知見を基に 500°C で結晶化した 4

nm の HZO 強誘電体キャパシタの作製に成功した (Fig. 2)。抗電圧および動作電圧は膜厚にほぼ比例することが確認でき、Fig. 3 に示しように 4-nm HZO は 0.6 V で動作できることが確認できた。ただし信頼性を考慮すると 1.2 V の動作電圧が望ましい。書換特性 (Endurance) を Fig. 4 に示し、薄膜であるほど書換耐性が改善することが見出され、薄膜化によって絶縁破壊電界が向上したことに起因したことが明らかになった。加速試験の結果、動作電圧 1.2 V、動作周波数 20 MHz では 10^{14} の書換回数を達成できることが見積もられた。10 年のリテンション特性も確認できた。一方、薄膜化することによって Fig. 1 に示した結晶化温度の上昇に加えて、Fig. 5 に示したウェークアップ特性の顕在化といった解決すべき課題も明らかになった。

【まとめ】 1 V 前後の動作電圧、 10^{14} 回以上の書換回数をもつ膜厚 4 nm の HZO を実証したとともに、極薄膜 HZO の新たな課題を明らかにした。

【謝辞】 本研究は科学研究費(23K20951)と JST-CREST (JPMJCR20C3)の支援により実施した。

【参考文献】

- [1] J. Müller *et al.*, *Nano Lett.* **12**, 4318-4323 (2012).
[2] K. Tahara *et al.*, *VLSI Tech.*, T7-3 (2021).
[3] K. Toprasertpong *et al.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **14**, 51137-51148 (2022).

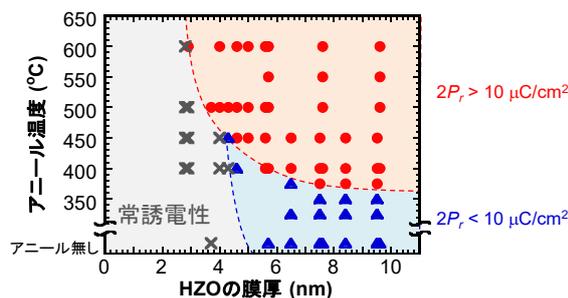


Fig. 1 Ferroelectricity map of HZO with different thicknesses and annealing temperatures

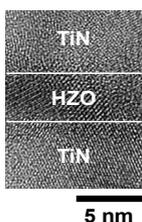


Fig. 2 Ferroelectric capacitor with 4-nm HZO

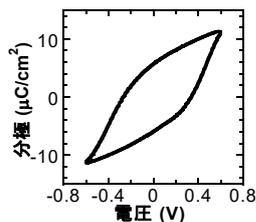


Fig. 3 P - V characteristics at ± 0.6 V write voltage

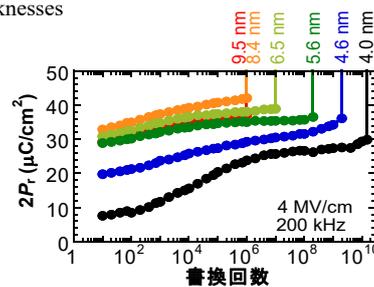


Fig. 4 Endurance characteristics of HZO with different HZO thicknesses

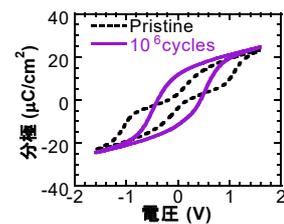


Fig. 5 P - V characteristics of 4-nm HZO before and after wake-up