

HfO₂系強誘電体 FeRAM の低電圧動作の可能性と課題 Potential and challenges of HfO₂ FeRAM for low-voltage operation

産総研 °右田 真司, 太田 裕之, 森田 行則

AIST, °S. Migita, H. Ota, and Y. Morita

E-mail: s-migita@aist.go.jp

【HfO₂系強誘電体】 HfO₂系強誘電体は様々なメモリデバイスとして将来性が期待されている材料であるが、未解決の課題がいくつかある。一つが書き換え回数耐久性 (Endurance) で、研究開発レベルの報告例が最高で 10¹⁰ 台である [1]。これは FeRAM 製品として使用されている PZT が 10¹² 回以上を保証していること [2] に比べるとまだまだ小さく、Wake-up/Fatigue や Imprint 現象の解消と合わせて、改善が必要である。もう一つの重要な課題が低電圧動作である。FeRAM 製品は動作電圧 V_{max} が 1.5-1.8 V であり、このとき抗電圧 V_C は 0.5 V である。これに対して研究開発中の HfO₂ 系強誘電体は 10 nm という非常に薄いキャパシタにおいても V_C が 1 V と大きく、V_{max} は 3 V を要する。すなわち 70 nm 厚さの PZT 膜よりも、10 nm 厚さの HfO₂ 膜の動作電圧の方が大きくなってしまふ。このままでは、従来の FeRAM の強誘電体材料を HfO₂ 系強誘電体に置き換える魅力がない。

【低電圧動作の課題】 HfO₂ 系強誘電体の動作電圧 V_{max} を低減しなければならない。そのためには膜厚を薄くする必要がある。単純に計算すれば膜厚を半分にすれば V_{max} も半分になるが、実際には複雑な問題がいくつか存在する。抗電界の膜厚依存性、結晶相の制御、そしてトンネル電流の増加である。

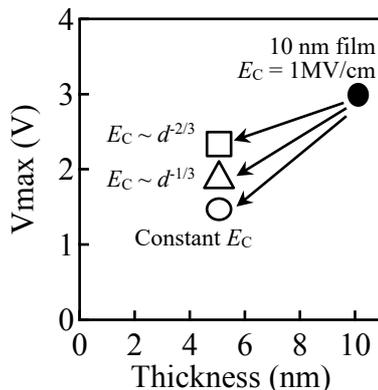


Fig. 1. Relationship between the ferroelectric HfO₂ thickness (d) and the V_{max} ($=3 \times E_C \times d$). When the E_C depends on the thickness, the V_{max} does not reduce so much.

PZT や SBT といったペロブスカイト酸化物の強誘電体では抗電界 E_C が膜厚 (d) に対して大きく変化することは知られており、一般に $d^{2/3}$ の関係にある。薄膜になるほど、抗電界が大きくなるのである。抗電圧 V_C で見ると、薄膜化した時の抗電圧の低減は非常に緩やかになる。PZT の膜厚を半分にしても、抗電圧は 20 % しか小さくならず、動作電圧も 20 % しか下げられない。これに対して HfO₂ 系強誘電体は、異なる膜厚依存性を示すように、抗電界の膜厚依存性がほとんどないか、あるいはあるとしてもわずかである [1, 3]。動作電圧の低減効果を見積もった結果を Fig. 1 に示す。抗電界が膜厚に依存せず一定ならば、薄膜化と比例して動作電圧を低減できる (図中の○)。わずかでも膜厚依存性が存在する場合には動作電圧の低減にも影響が現れる (△)。そして PZT と同様の膜厚依存性がある場合は、膜厚を半分にしても V_{max} は 2 V 以上に留まる (□)。

HfO₂ 系強誘電体は 3 nm という非常に薄い膜でも強誘電性が現れることが報告されているが、10 nm 以下の膜厚では自発分極量が著しく減少してしまう [4]。これは薄膜中の強誘電結晶相の体積分率が減少しているためである。準安定な強誘電結晶相の生成にはアニール温度や時間が強く作用するので [5]、極薄膜で最適なプロセス条件とドーパント濃度を調整する必要がある。

HfO₂ 系強誘電体の膜が薄くなると、High- k 材料の探索 [6] と同様に直接トンネル電流が急増し深刻な問題となる。動作電圧を下げるために膜を薄くしても漏れ電流が増大すると消費電力が増えてしまう恐れがある。

HfO₂ 系強誘電体の可能性は、これらの課題をどう解決できるかにかかっている。

【参考文献】

- [1] S. Migita, Ext. Abstract SSDM 2019, pp. 579-580.
- [2] John A. Rodriguez *et al.*, *IEEE Trans. Dev. Mater. Reliability* **4**, 436 (2004).
- [3] Akira Toriumi, Tech. Dig. IEDM 2019, pp. 338-341.
- [4] Xuan Tian *et al.*, *APL* **112**, 102902 (2018).
- [5] Shinji Migita *et al.*, *JJAP* **58**, SBBA07 (2019).
- [6] Akira Toriumi, *ECS Trans.* **80**, 29 (2017).