

HZO 強誘電体キャパシタにおける wake-up 特性の周波数・温度依存性と物理機構の考察

Frequency and temperature dependence of wake-up characteristics and physical mechanisms in HZO ferroelectric capacitors

東大院工 ○伊藤 広恭, 田原 建人, 川野 真琴, 竹中 充, 高木 信一, トプρασертpong がディット
K. Ito, K. Tahara, M. Kawano, M. Takenaka, S. Takagi, K. Toprasertpong

(The Univ. of Tokyo, School of Engineering)

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

【背景】HfO₂系強誘電体は、薄膜化が可能であり、CMOS との親和性もよいことから、近年非常に注目されている [1]。一方、主に薄膜において、強誘電性を発現させるには電界サイクリングが必要になるという wake-up 効果が課題となっている[2]。wake-up の原理として、相転移やドメインの de-pinning といった説が有力であるが[3]、実験的な検証はなされていない。本研究ではHf_{0.5}Zr_{0.5}O₂(HZO)を用いた強誘電キャパシタにおける wake-up 特性の周波数・温度依存性を測定し、その物理機構の考察を行った。

【実験手法】TiN/HZO(4.0 nm)/TiN の極薄膜 MFM キャパシタ[2]の wake-up 特性を評価した。ここで電界サイクリングは矩形波で行い、分極特性は 10 kHz 三角波で評価し、温度は両方の手順で統一した。周波数依存性の測定では、サイクリング周波数を 0.1 Hz から 100 kHz まで変化させて、温度条件は 100°Cで行った。温度依存性の測定は 0°C と 100°C において周波数 10 kHz と総時間 100 s でサイクリングを行った。電界の大きさは 4 MV/cm で統一した。

【結果・考察】Fig. 1 に周波数依存性の測定結果を示す。Fig. 1(a)はサイクル数に対する残留分極量 2P_r の変化を示している。サイクル数が増えると 2P_r も増加する傾向が確認できる。一方、各周波数で 2P_r-cycle 特性が異なることから、wake-up はサイクル数だけで決定されないといえる。そこで、ストレス時間というパラメータを導入する。これはサイクリングの総時間を表しており、例えば 1 kHz で 1 s のストレス時間では 10³ サイクルとなる。Fig. 1(b)は測定結果を、周波数と 2P_r の関係として各ストレス時間ごとにプロットした図である。同ストレス時間でみると、各周波数で 2P_r が異なっており、wake-up はストレス時間のみでも決定されないといえる。一方、特定の周波数において 2P_r がピークをとることが確認できる。先行研究では、強誘電体膜中のイオンの臨界周波数は約 1 kHz と述べられており[4]、100 s の結果でピークをとる周波数と一致する。次に温度依存性の測定結果を Fig. 2 に示す。wake-up は高温ほど促進されていることから、イオンのドリフト・拡散が wake-up に関与していると考えられる。以上の結果から、wake-up の物理機構を考察する。イオンのドリフト距離はサイクリングの半周期に比例すると考えられ、すなわち高周波数ではイオンの通過領域が限定されるため、膜の一部分しか wake-up されない。一方、低周波数で

はイオンは半周期で膜全体を移動するが、界面到達から電界の向きが切り替わるまでのタイムラグが大きくなると、時間当たりの wake-up 効率が悪くなってしまふと思われる。半周期でちょうど膜全体を移動する周波数が最も効率よく wake-up が行われ、これが 2P_r のピークとして表れたと考えられる。また、特に高温においてはイオンの動きが活発になり、ある領域を通過する確率が上がることで、wake-up が進みやすくなると考えられる。このような wake-up のモデル(Fig. 3)を考えると、周波数・温度依存性をよく説明できる。

【結論】HZO の wake-up 特性の周波数・温度依存性から、膜内を移動するイオンが wake-up に関与していることが示唆された。また、測定結果からイオンの挙動を考察し、wake-up のモデルを提案した。

【謝辞】本研究は、JST-CREST(JPMJCR20C3)、JSPS 科研費 (23K20951)の支援を受けて実施された。

【参考文献】[1] J. Müller et al., *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 4, N30 (2015) [2] K. Toprasertpong et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces* 14, 51137 (2022) [3] M. Pešić et al., *Adv. Funct. Mater.* 26, 4601 (2016) [4] 川野他、*春応物* 16p-B508-6 (2023)

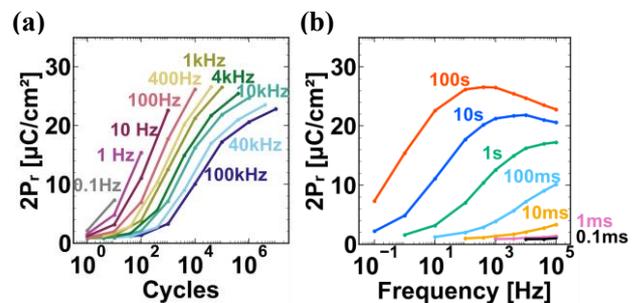


Fig. 1 Frequency dependence of wake-up.

(a) 2P_r-cycle plot at given frequency and
(b) 2P_r-frequency plot at given stress time.

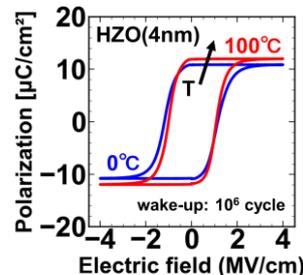


Fig. 2 Temperature dependence of wake-up characteristics.

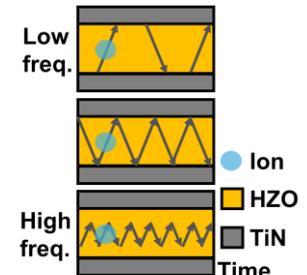


Fig. 3 Wake-up model.