

強誘電性 HfO₂ の分極反転時間からみた分極反転機構の考察

A view of polarization switching kinetics from polarization switching time in ferroelectric HfO₂

自由業¹, 産総研² ◯鳥海 明¹, 右田 真司²

Free Engineer¹, AIST², ◯Akira Toriumi¹, Shinji Migita²

e-mail: atoriumi3@gmail.com

強誘電性 HfO₂ に関する報告は山のようにあるが、その分極反転機構に関して論じているものは意外と少ない。いわゆる nucleation-limited model (NLS) に基づく解析から当然のようにスタートする。その場合も JKD 則[1]に基づき Tagantsev model [2]による解析を行うという矛盾を内包していることも多い。KAI model と NLS model が従来の強誘電体にあまりにもうまく適用されてきたことから HfO₂ の場合もこの線で考えるのも当然である。しかし Tagantsev model では分極反転の素過程は何でも可能であり (NLS という呼び方はともかくとして)、もう少し個々の特徴を捉える必要がある。

HfO₂ の分極反転実験は自分たちで行ってこなかったもので例によって文献からデータ抽出した。測定はすべてダブルパルス法で行われており、分極反転時間として分極が 50% 反転した時間を t_{sw} と定義した。文献は多くはないが電界依存性を含む実験結果から t_{sw}^{-1} と E_{ox} の関係を Fig. 1 に示す。電界を強くすれば t_{sw} は当然短くなるが多くの場合において 10^{-7} 秒くらいに収束しており、これは測定系からの外部回路の寄生効果としての RC が効いているとされる。RC の中の C には強誘電性膜の C も考えなくてはいけないのでナノ秒スイッチングを狙うような時にはサンプルの容量は軽くする必要がある。最近の高速スイッチングを示した結果はサイズを工夫して非常に高電界下で 10^{-9} 秒という結果も報告されている [3]。

ここで考え方を変えて、本講演では電界が低いところで分極がどのように反転するのかに注目する。Fig. 2 のように t_{sw}^{-1} と E_{ox} の関係をリニアスケールでプロットしてみた。電界が弱いときには当然 t_{sw} は長くなり t_{sw}^{-1} はゼロに近づく。 t_{sw}^{-1} が 0 から立ち上がっていくところでは寄生効果はほとんど関係なくなり分極反転機構のみを反映するはずである。ここで注目したいのは、 $t_{sw}^{-1}=0$ と交差する E_{ox} が $1\sim 2$ MV/cm という E_c 近辺にくるという点である。この結果は Landau Switching (LS) の場合には当然であり[4]、少なくとも E_c 付近の低電界領域における分極反転は LS によって支配されていることを示唆するのではないだろうか (もちろんサンプル様の LS ではなく微小 LS セグメントの複合体と考える) [5]。電界が高くなると domain growth mode に変化していく (あるいはミックスしていく) 可能性の議論も興味深い。

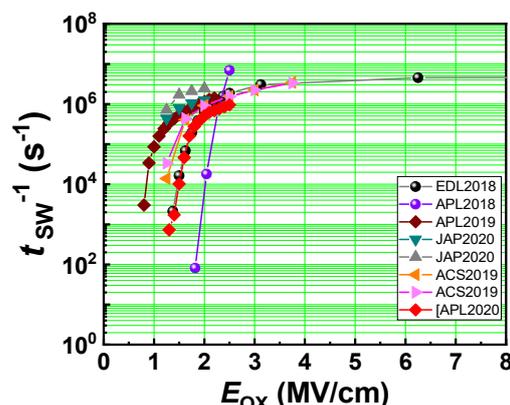


Fig. 1. 分極反転時間と印加電界の関係

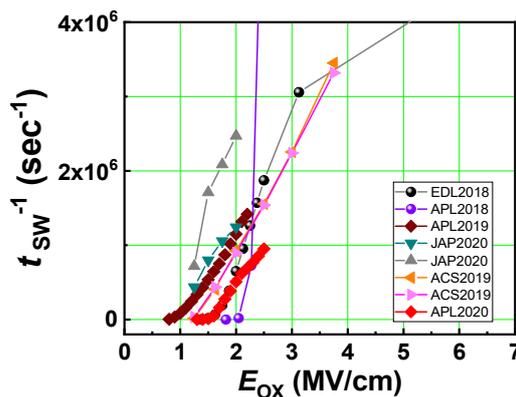


Fig. 2. 分極反転時間と印加電界の関係 (Fig. 1 と同じデータであるがプロットの仕方を変更)

[1] Kay&Dunn, Philos. Mag. 7, 2027 (1962). [2] Tagantsev, PRB 66, 214109 (2002). [3] Lyu, IEDM, 342 (2019). [4] 本講演会 (2022 春, 青学). [5] 本講演会 (2024 春, 都市大).