

強誘電体 FET の MOS 界面における電荷分布の評価とデバイス動作の理解

Evaluation of Charge Distribution at MOS Interface Toward Deep Understanding of Device Operation of Ferroelectric FETs

東大工, °トープラサートポン カシディット, 竹中 充, 高木 信一

Univ. Tokyo, °Kasidit Toprasertpong, Mitsuru Takenaka, Shinichi Takagi

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

【背景】強誘電体 FET (FeFET) は MOSFET に強誘電体ゲート絶縁膜を用いることで状態記憶をはじめとする特性を持たせられる素子である。特に、 HfO_2 系強誘電体が Si CMOS との親和性があるため、発見[1]以来 FeFET の研究が盛んに行われている[2]。しかし、 $10 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ($\sim 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ の電荷密度に等価) 以上の自発分極をもつ強誘電絶縁膜が、どのように半導体の界面に電荷を誘起しているかを含めて、デバイス動作はまだ明らかになっていない。本研究では MOS 界面における電荷分布の新規の評価手法を提案し、FeFET のデバイス動作を検証する。

【実験手法】本研究は準静的 Split $C-V$ 測定とホール測定を用いて FeFET の MOS (MFIS) 界面の電荷を評価する[3]。提案した準静的 Split $C-V$ 測定 (Fig. 1) は各電圧において蓄積電荷と反転電荷の面密度を区別して評価できる。従来の小信号に基づく Split $C-V$ とは異なり、大信号に基づく測定のため、分極反転をもつ素子を正しく評価することができる。またホール測定により、誘起される反転電荷の中で自由電荷の割合を評価できる。本研究で評価する素子は $\text{TiN}/\text{強誘電性 } \text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2(10 \text{ nm})/\text{SiO}_x \text{ IL}(0.7 \text{ nm})/\text{p-Si}$ の構造を有する FeFET と $\text{TiN}/\text{常誘電性 } \text{HfO}_2(10 \text{ nm})/\text{SiO}_x \text{ IL}(0.7 \text{ nm})/\text{p-Si}$ のリファレンス MOSFET である。

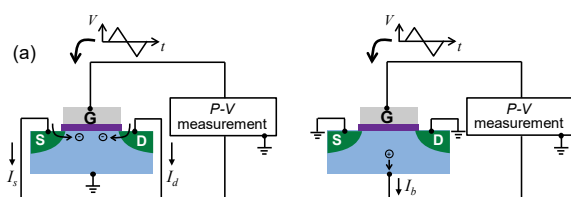


Fig. 1. Schematic of Quasi-static split $C-V$ measurement.

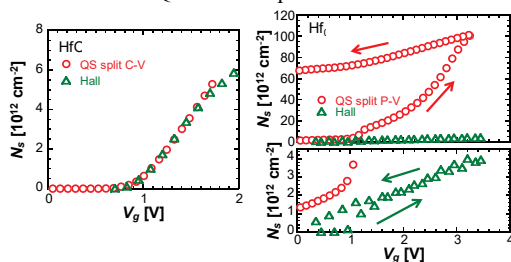


Fig. 2. Surface carrier density evaluated by quasi-static split $C-V$ and Hall measurements for (a) non-ferroelectric HfO_2 MOSFET (reference) and (b) ferroelectric $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ FeFET.

【結果と考察】Fig. 2 に準静的 Split $C-V$ 測定によって評価したゲート下の電子面密度を示す。リファレンス MOSFET では $10^{12} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ の電子密度が観測されたのに対し、FeFET では 10^{14} cm^{-2} オーダーの電子密度が観測された。この数値は通常の Si n-MOSFET では異例的に大きな面密度である。しかしホール測定で確認した結果、反転層の自由電子は、 $10^{12} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 程度の面密度になっており、誘起された 10^{14} cm^{-2} の電子のほとんどが自由電子にならずに捕獲されてチャネル伝導に寄与していないことが分かる。

上記の結果から、FeFET の MOS (MFIS) 界面の電荷分布は、Fig. 3 の様になっていることが示唆される。強誘電絶縁膜のもつ $10 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 程度の自発分極が、界面層 (IL) /強誘電絶縁膜の界面付近に 10^{14} cm^{-2} 程度の捕獲電子を誘起する。その結果、電気力線が捕獲電子に遮蔽され、半導体側の自由電子は期待されるほど誘起されない。このように捕獲電荷が FeFET のデバイス動作を決める重要な要素であることを実験的に明らかにした。

【まとめ】提案した準静的 Split $C-V$ 測定法は、FeFET の各分極状態における電子・正孔の面密度を評価できる手法である。結果として、分極反転に伴う大きな分極電荷は MOS 界面近傍の捕獲電荷によって引き起こされており、反転層電荷の増大には繋がっていないことが示された。

【謝辞】本研究は、科学研究費 19K15021 及び JST CREST JPMJCR1332 の支援により実施した。

【参考文献】 [1] T. S. Bösccke *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **99**, 102903 (2011). [2] J. Müller *et al.*, *VLSI Tech.* **2012**, 25 (2012). [3] K. Toprasertpong *et al.*, *IEDM2019*, 570 (2019).

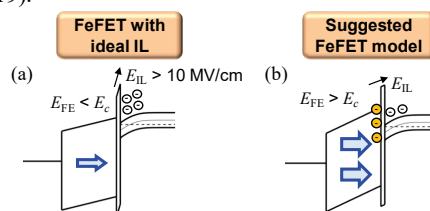


Fig. 3. Charge distribution at MFIS interface of (a) ideal FeFETs and (b) actual FeFETs.