

TCAD が明らかにする強誘電体負性容量トランジスタの課題と展望

Perspective and Challenges in Ferroelectric Negative Capacitance Transistors highlighted by TCAD Simulation

産総研¹, 東大 工² ○太田 裕之¹, 池上 努¹, 服部 淳一¹, 浅井 栄大¹,

福田 浩一¹, 遠藤 和彦¹, 右田 真司¹, 鳥海 明²

AIST¹, Univ. of Tokyo², ○H. Ota¹, T. Ikegami¹, J. Hattori¹, H. Asai¹,

K. Fukuda¹, K. Endo¹, S. Migita¹, and A. Toriumi²

E-mail: hi-ota@aist.go.jp

【はじめに】強誘電体をゲート絶縁膜として用いる強誘電体負性容量トランジスタ (NC-FET) [1]が最近注目されている。これは、近年の Internet-of-Things への期待の高まりとともに、微弱なエネルギーでも駆動可能な LSI が求められているからである。NC-FET は、強誘電体の負性容量(NC)効果を利用してトランジスタの subthreshold swing (SS)係数を、従来トランジスタの物理限界である 60 mV/decade よりも急峻化するものであり、このようなデバイスはスティープスロープトランジスタと呼ばれる。スティープスロープトランジスタを用いて、LSI を構成することで、電源電圧を下げ、演算エネルギーを低減できると期待されている[2]。

2011 年にトランジスタのゲート絶縁膜としても有名な HfO₂ が強誘電体を示すことが報告されて以来[3]、製造プロセスや回路構成上の親和性などから、HfO₂ 系強誘電体材料をゲート絶縁膜とする NC-FET は、スティープスロープトランジスタの有力候補として注目されている。現在、NC の直接観察や[4,5]、Si, Ge, MoS₂[6-8]などの各種半導体等での NC-FET の動作報告、さらには、14nm ノードの FinFET 量産プロセスを用いた実証等[9]がなされている。その一方、NC については、動作原理や実験データの解釈等に未解明の部分も多い[10]。このような状況においては、実験実証とは別に、technology computer aided design (TCAD)を用いた数値計算からのアプローチが NC-FET の動作を理解する上で有益である。

本講演では、新原理デバイス開発をターゲットに開発した産総研内製の TCAD ツール (Impulse TCAD)を NC-FET に適用し、本デバイスの特性予測等を行ったので報告する。

【計算方法】強誘電体の自発分極は Landau-Khalatnikov (LK) 方程式

$$\rho \frac{dP}{dt} = -\nabla_p G \quad (1)$$

$$G = \alpha P^2 + \beta P^4 + \gamma P^6 - EP \quad (2)$$

で与えられる[11]。ここに ρ , α , β , γ は強誘電体の材料パラメータ、 G は Gibb's free energy, P は分極、 E は強誘電体内部の電界である。特に DC の場合は、(1)において、 $d/dt = 0$ において

$$E = 2\alpha P + 4\beta P^3 + 6\gamma P^5 \quad (3)$$

とする場合もある。

我々の TCAD の特徴として、LK 方程式とその他ポアソン方程式など物理方程式が完全に自己無撞着 (self-consistent) であることが挙げられる[12]。もう一つは、我々の TCAD では基本的に電圧ではなく、時間を独立変数としたトランジエント解析に基づいて特性を計算している点である。これにより LK 方程式(1)の表現する物理を正確に考慮することができる[12]。

【結果と考察】我々は Impulse TCAD を用いて NC-FET の様々な特徴を明らかにしてきた[12,13]。例えば、(1)negative (reverse) drain induce barrier lowering 効果、(2) 強誘電体の分極と半導体の反転キャリア密度のマッチングの重要性[13]、などである。(1)については、NC-FET の transfer 曲線に現れる短チャネル効果は、通常のトランジスタとは全く逆の傾向を示すことである。output 特性では、負のドレインコンダクタンスとして現れる。これらの特性は NC-FET の実証実験において、NC 効果で動作していることの証左になる。(2)については、HfO₂ 系強誘電体の自発分極は 20 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 程度とチャネル反転層の 1 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 前後に比べて大きく、このミスマッチの解消が SS < 60 mV/decade 実現に不可欠であることが分かった[12]。

【まとめ】自己無撞着の TCAD は、NC-FET 特性の理解と性能向上を図る上で有益である。今後さらに詳細なモデル化を進め、NC-FET の可能性を検証することが重要である。

【謝辞】本研究は、JST、CREST(JPMJCR14F2)の支援を受けた。

【参考文献】 [1] S. Salahuddin and S. Datta, Nano Letters, **8** (2008) 405. [2] H. Fuketa *et al.*, IEDM Tech. Dig. 2011, p.559. [3] T. S. Böscke *et al.*, APL **99**, 102903 (2011). [4] A.I. Khan *et al.*, Nat. Mater. **14**, 182 (2014). [5] K. Jang *et al.*, IEEE J-EDS **6**, 346 (2018). [6] M.H. Lee *et al.*, IEDM Tech. Dig. 2015, p.616. [7] J. Zhou *et al.*, IEDM Tech. Dig. 2016, p. 310. [8] M. Si *et al.*, Nat. Nanotech. **13**, 24 (2018). [9] Z. Krivokapic *et al.*, IEDM Tech. Dig. 2017, p.357. [10] A. K. Saha *et al.*, J. Appl. Phys. **123**, 105102 (2018). [11] L. D. Landau and I. M. Khalatnikov, Dok. Akad. Nauk SSSR. **46**, 469 (1954). [12] H. Ota *et al.*, IEDM Tech. Dig. 2016, p.318. [13] H. Ota *et al.*, IEDM Tech. Dig. 2017, p.361.