

負性容量によるトンネル FET の性能向上

Negative Capacitance as a Performance Booster for Tunnel FET

○小林 正治、蔣 京珉、上山 望、平本 俊郎 (東京大学生産技術研究所)

○Masaharu Kobayashi, Kyungmin Jang, Nozomu Ueyama, and Toshiro Hiramoto

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

E-mail: masa-kobayashi@nano.iis.u-tokyo.ac.jp

目的: 将来の IoT デバイスをバッテリーレスかつ環境発電で動作させるためには $1\mu\text{W}$ 級の超低消費電力が要求される。急峻スロープトランジスタは高エネルギー効率化に優れるため IoT のための新しい CMOS プラットフォーム技術として期待されている。その中で、これまで独立に研究が進められてきた急峻スロープトランジスタであるトンネル FET[1]と負性容量 FET[2]の特徴を組み合わせることで超急峻スロープトランジスタを実現できる可能性がある。本研究では負性容量によるチャネルポテンシャル増幅の効果により、トンネル FET のバンド間トンネルを増大させることをねらった新しいトランジスタ、負性容量トンネルトランジスタ(NCFET)を提案し、そのシミュレーション方法と設計手法を構築、エネルギー効率についてのベンチマークを行う。

実験: 図 1 に提案する NCFET のデバイス構造を示す。基本構造は垂直トンネル型 TFET[3]であり、そのチャネルの上に強誘電性ゲート絶縁膜とメタルゲートを形成する。この構造では薄いシリコン層を介して強誘電分極電荷密度がゲートオーバーラップしたソースの空間電荷密度と釣り合うことで負性容量によりトンネル接合部のポテンシャル変調が増幅される。このデバイスをシミュレーションするために、TFET のチャネルの部分は実験データで校正された TCAD を用いて表面ポテンシャル・電荷密度・ドレイン電流を計算し、その電荷密度に釣り合う分極電荷密度をもたらす絶縁膜電圧を Landau 方程式を用いて解析的に求め、最後に全体のゲート電圧を求める。

結果・議論: まず TFET のチャネル構造を決めるために TFET のオンオフ特性の、薄いシリコン層膜厚・ソースドーピング濃度・ゲート絶縁膜を調べた。その結果、シリコン層膜厚を薄くし、ソースドーピング濃度を上げることで高いオンオフ比が得られた。またゲート絶縁膜を薄くするほど高いオンオフ比が得られることから、ゲートによるポテンシャル変調のバンド間トンネル電流に与える影響が大きく、負性容量の効果が見込めることが確認された。次に強誘電性 HfO_2 薄膜の材料パラメータ[4]を用いて NCFET の $I_d\text{-}V_g$ 特性を計算したのが図 2 である。TFET に比べて 4 桁以上にわたってサブスレシールド係数が小さくなっていることがわかった。これは深いサブスレシールド領域でもソースの空間電荷が分極密度の変化に対応できることが理由となる。これまでに報告した NCFET の設計指針[4]をもとに、強誘電体ゲート絶縁膜の材料パラメータを調整して NCFET のオンオフ特性の最適化を行った。トランジスタのエネルギー効率のベンチマーク結果を図 3 に示す。従来の MOSFET にあたる SOTB[5]と TFET[1]と比較して NCFET は、より低電圧で最小エネルギーをもち、10 倍以上のエネルギー効率を実現し得ることを示した。

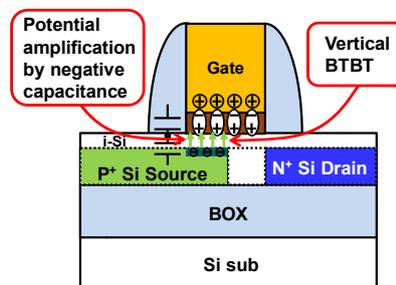


図 1 垂直トンネル型 TFET 上に強誘電性ゲート絶縁膜を形成した負性容量トンネル FET(NCFET)

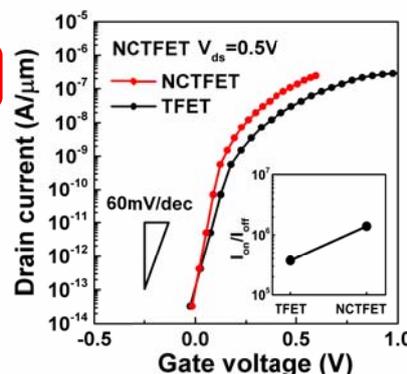


図 2 NCFET と TFET の $I_d\text{-}V_g$ 特性

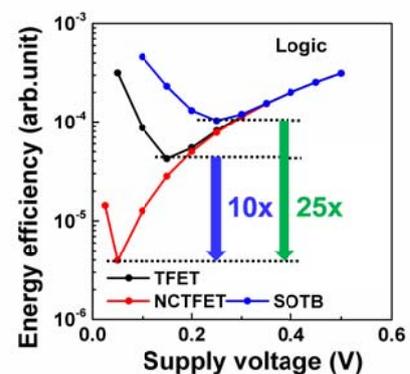


図 3 エネルギー効率のベンチマーク

- [1] A. M. Ionescu, et al., Nature **479** 329 (2011) [2] S. Sallahuddin, et al., Nano Lett., **8** 2 405-410 [3] Y. Morita et al., IEDM2014, p.243 [4] M. Kobayashi, et al., VLSI Symp. 2015 p.212 [5] Y. Yamamoto, et al., VLSI Symp. 2015, p.170

*本研究は JST さきがけ、NEDO の支援を受けて実施した。