

強誘電体ゲート FET を用いた物理リザーバー計算における 分極状態と学習性能の関係

Relationship between polarization states and computational performance in physical reservoir computing using ferroelectric-gate FETs

阪公大工¹, 兵庫県大工², 東大工³ ○請関 優¹, 山田洋人¹, 藤村 紀文¹
横松 得滋², 神田 健介², 前中 一介², Kasidit Toprasertpong³, 高木信一³, 吉村 武¹
Osaka Metropolitan Univ.¹, University of Hyogo², The univ. of Tokyo³,
°Y. Ukezeki¹, H. Yamada¹, N. Fujimura¹, T. Yokomatsu², K. Kanda², K. Maenaka²,
K. Toprasertpong³, S. Takagi³, T. Yoshimura¹

E-mail: yoshimura@omu.ac.jp

【はじめに】人工知能の発展に伴い、ノイマンボトルネックは顕著な課題となりつつあり、高速かつ低消費電力な機械学習を可能にする物理リザーバーコンピューティング(PRC)が、革新的な計算システムとして期待されている[1]。演算を司るリザーバー層には、短期記憶性と非線形な応答を示す物理現象が用いられ、我々は集積回路との高い親和性を持つ強誘電体ゲート電界効果トランジスタ(FeFET)に注目している。既に $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ 薄膜を用いた FeFET において PRC の動作は実証され[2]、動作電圧の最適化によって学習性能が向上することも報告されている[3]。本研究では強誘電体薄膜の分極挙動と学習性能との関係性を詳細に調べることを目的として、電極面積の異なる metal-ferroelectric-metal (MFM) キャパシタを MOSFET のゲートへ接続することで metal-ferroelectric-metal-insulator-semiconductor (MFMIS) 構造の FeFET を構成し、特性評価を行った。

【実験方法と結果】ゲート絶縁膜の膜厚が約 10nm、チャネル幅が約 50 μm の N チャネル型 MOSFET に、膜厚が約 10nm の $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ を製膜した MFM キャパシタ[4]を接続することで FeFET を構成した。MFM キャパシタには、直径が約 10, 20, 30 μm の 3 種類の円電極を用いた。それぞれの電極を用いて -7~7V のゲート電圧を印加して測定した $I_{\text{DS}}\text{-}V_{\text{GS}}$ 静特性を Fig. 1 に示す。電極面積が小さくなるにつれ、強誘電体薄膜に印加される電圧が大きくなり、メモリウィンドウ(MW)は順に、0.4, 2.2, 3.6V と大きくなっている。用いた $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ 薄膜の抗電圧の 2 倍($2V_c$)は約 2.7V であるため、10 μm の電極を用いた時の MW は $2V_c$ を超えていることになる。この原因については講演内にて考察する。PRC における学習性能の評価のため、“1”, “0”のランダムな二進数ビット列を三角波の正負に対応付けてゲート電圧(V_{GS})として変換、FeFET へ入力しドレイン電流(I_{DS})を得た。測定した I_{DS} から入力履歴を読み取り、1-3 個前のビット値をそれぞれ出力できるように線形回帰により学習させた。その出力と目標の誤差の評価には、相関係数の 2 乗和を表すメモリキャパシティ(MC)を用いた。学習の結果、MC は電極面積が小さい方から順に 1.26, 1.31, 1.10 となった。学習性能の違いは生じたものの、大きな変化にはなっていない。FeFET のゲート構造では、強誘電体薄膜と酸化膜のキャパシタが直列に接続されているとみなせるが、強誘電体膜の実効静電容量は印加電界に依存するため、各薄膜に印加される電圧の比は単純な静電容量の逆比にはならない。講演では、強誘電体膜薄膜に実際に印加されている電界の大きさについて詳細に解析し、学習性能との関係について議論する。

【謝辞】本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) 先端国際共同研究推進事業 (ASPIRE)、JPMJAP2312 の支援を受けたものである。

【参考文献】

- [1] G. Tanaka et al. Neural Networks 115, 100 (2019).
- [2] K. Toprasertpong et al. Commun. Eng. 1, 21 (2022).
- [3] S. Min et al. Jpn. J. Appl. Phys., 63, 03SP19 (2024).
- [4] K. Toprasertpong et al. Appl. Phys. Lett. 116, 242903 (2020).

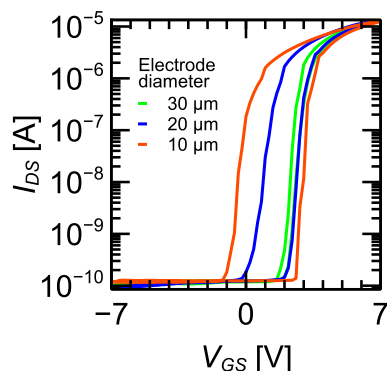


Fig. 1 $I_{\text{DS}}\text{-}V_{\text{GS}}$ static characteristics of FeFET with various electrode diameter