

強誘電体 MFM キャパシタを用いたリザーバーコンピューティング

Reservoir computing using a ferroelectric MFM capacitor

東大工 〇名幸 瑛心, トプサートポン ガディット, 王 澤宇, 中根 了昌, 竹中 充, 高木 信一

〇E. Nako, K. Toprasertpong, Z. Wang, R. Nakane, M. Takenaka, S. Takagi

(Univ. Tokyo, School of Engineering)

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

【はじめに】我々は強誘電体ゲート FET (FeFET) の動的特性を用いたリザーバーコンピューティング(RC)[1]を提案し実験的に検証してきた[2]。強誘電体の記憶特性や非線形性により時系列データが高次元の情報に写像され、リザーバー計算が可能となる。一方、強誘電体を用いた他のデバイスとして MFM 強誘電体キャパシタが挙げられる。MFM 構造は、CMOS 回路上にバックエンドプロセスを用いて容易に 3 次元集積化でき、エリアペナルティも小さくできる。本研究では Fig.1 に示す MFM の動的特性を用いたリザーバーコンピューティングを提案し、入力パルスの動作電圧がリザーバー計算性能に与える影響を実験的に検証する。

【実験手法】P 型基板上に $\text{TiN}/\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2(10\text{ nm})/\text{TiN}$ を堆積した MFM キャパシタを実験に用いた。強誘電性に由来するリザーバー計算性能を確認するため、常誘電体 HfO_2 を絶縁膜としたキャパシタ(MIM)も作製し、両者の比較を行った。素子サイズは一辺 $80\text{ }\mu\text{m}$ の正方形である。入力は 0 と 1 をランダムに並べた時系列データを用い、これを正と負の極性を持つ時間幅 $200\text{ }\mu\text{s}$ の三角波パルスの電圧波形に変換して、素子への入力信号とした。動作電圧が計算性能に与える影響を検証するために、 $\pm 1\text{ V}$ から $\pm 3\text{ V}$ までの 5 種類のパルス高さをを用いた。時系列入力信号に応じて過渡応答する電流波形を 200 ns 間隔でサンプリングして、1 パルスにつき 1000 個の仮想ノードとしてリザーバー計算に用いた。この仮想ノードの値に重みを積算した総和を 0.5 で閾値処理してシステム出力とする。トレーニングにおいて、2000 個の入力に対する仮想ノード出力を用い、リッジ回帰によって最適な重みを得た。テストにおいて、500 個の未知入力に対する仮想ノード出力と最適な重みを用い、システム出力による入力の推定を行った。リザーバー性能は Short Term memory (STM) タスクと Parity Check (PC) タスクにより記憶容量 (MC) と PC 容量 (PCC) を見積もった。

【実験結果・考察】Fig.2 は MFM キャパシタの P-V ループである。三角波のピーク電圧が 1 V の時は分極が反転せず常誘電体と同様に動作し、 1.5 V から分極反転が起こりヒステリシス特性を示す。Fig.3 は縦軸を MC、横軸を動作電圧としたグラフである。比較のために入力波形そのものの記憶容量も示している。理想的な入力波形であれば $\text{MC} = 0$ となるが、RC 評価に用いた測定機器が有限の帯域を有するため、入力波形の歪が過去の入力に依存する可能性を検討するためである。Fig.3(a)に示す STM の結果を見ると MIM の MC が常にほぼ 1 で変わらないのに対して、MFM の MC は動作電圧が 1 V の時は 1 であるものの動作電圧が大きくなると向上し、 3 V では 1.77 になる。動作電圧が大きくなると入力波形の MC も増加しているが、MIM の成績には影響がなかったことから、MFM の MC の高動作電圧での向上は、主として強誘電性によるものと解釈できる。一方、Fig.3(b)に示す PC の結果では、動作電圧が変化しても入力波形と MIM の PCC は常にゼロであるのに対して、MFM の PCC は 1.5 V 以上で向上

し、動作電圧 3 V では 1.4 となる。これらの結果から、入力波形の歪みは PCC に全く影響を及ぼさず、MFM キャパシタの高い PCC は強誘電性に由来するものであると言える。STM と PC タスクにおいて得られたシステム出力とターゲット入力値との相関係数の 2 乗を計算し、遅延ステップ数 T_{delay} に対してプロットした (Fig. 4)。ここでは動作電圧 3 V を用いた FeFET と MFM キャパシタの結果を比較している。MFM キャパシタが FeFET とほぼ同等のリザーバー性能をもつ事が分かる。

【結論】MFM キャパシタは、FeFET と同様、その短期記憶特性と非線形性により、リザーバーコンピューティングが可能であることを示し、強誘電性を用いた物理リザーバーの実装手法の一つとして有望と考えられる。

【参考文献】[1] H. Jaeger, GMD Report 148 (2001).

[2] E. Nako et al., VLSI symposia, TN1.6 (2020).

【謝辞】本研究は、JST, CREST, JPMJCR20C3 の支援を受けたものである。

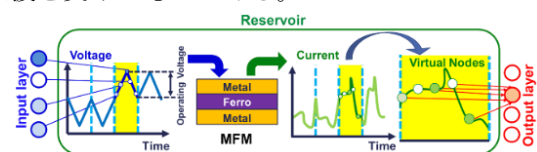


Fig.1: RC system with a ferroelectric capacitor (MFM).

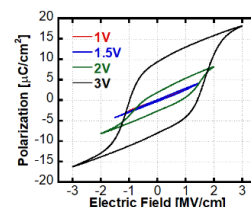


Fig. 2: P-V loops of a MFM.

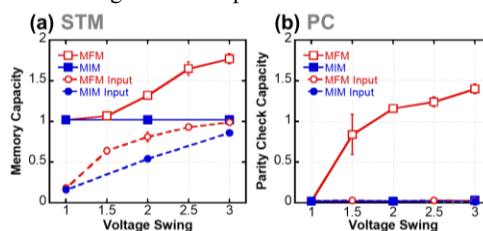


Fig.3: Estimated capacities by solving (a) short-term memory task and (b) parity check task.

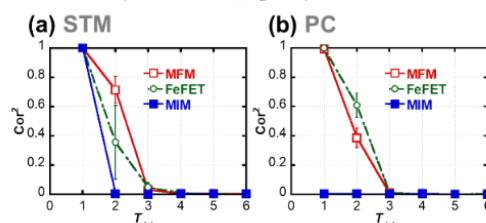


Fig.4: Squared correlation (Cor^2) between the target and system output as a function of T_{delay} , which were obtained by RC systems with MFM, MIM, and FeFETs.