強誘電体デバイスを用いたリザバーコンピューティング

Reservoir computing using ferroelectric-based devices 東大院工 °高木 信一, Kasidit Toprasertpong, 名幸 瑛心, Zeyu Wang, 竹中 充, 中根 了昌 Univ. of Tokyo, °Shinichi Takagi, Kasidit Toprasertpong, Eishin Nako, Zeyu Wang, Mitsuru Takenaka, Ryosho Nakane

E-mail: takagi@ee.t.u-tokyo.ac.jp

エッジでの AI 計算において、計算負荷の重い学習機能のリアルタイム処理(リアルタイム学習)を実現する手 法として、学習計算負荷が極めて軽いリザバーコンピューティングが注目されている[1]。リザバー計算では、固 定された結合係数を持つリカレントニューラルネットワークであるリザバー部の出力ノード状態とシステム出力 ノードとの結合係数(重み)のみを、線形回帰によって調整することで、高速の学習が可能である。更にリザバ ー部を、入力情報の履歴と非線形動特性を備えた物理的性質をもつハードウェア(物理リザバー)とする(図1) ことで、消費電力や計算負荷の点で大きな優位性が期待できる。我々は、この物理リザバーとして、一時記憶と 非線形性を有する HfO2系強誘電体ゲート絶縁膜 FET (FeFET)や MFM キャパシタを用いる手法を提案した[2-5]。 その理由と利点は以下の通りである。(1)強誘電体薄膜のもつメモリ効果、分極・ドメイン間相互作用、複雑な時 間応答と、これを非線形出力であるデバイスの過渡電流として読み出すことにより(図2)、物理リザバーに要求さ れる多様な内部状態、豊かな応答特性、リッチなダイナミクスが期待できる(2) Si CMOS プロセスに極めて親和 性が高く先端ロジック LSI にも導入実績のある HfO2系強誘電体デバイスを用いることで、Si 集積回路へ容易に導 入できる。AI 計算の標準的プラットフォームである既存の回路システムとの一体集積化も容易であり、Si CMOS 回路による入出力処理とのシームレスな結合によるシステム性能向上も期待できる。

我々が提案した FeFET によるリザバーシステムの概略図を図 3 に示す。一定時間ステップにより定義された時 系列信号をゲートに入力し、ステップ内でサンプリングした各時間でのドレイン電流を疑似出力ノード状態とし て、その重みづけの結果をシステム出力とする。特定のタスクに応じて、この重みの値を学習させることで、未 知の入力に対する推論が可能となる。リザバー計算における記憶保持と非線形特性の両方を検証するためのタス クとして、現在の入力から n ステップ時間を遡った (*T_{delay}=n*)時点までのディジタル入力のパリティを計算させる タスクを実行させた時の推論成績の実験結果を図 4 に示す。Si FeFET では、標準的な Si MOSFET と比較して十分 優れた成績が得られており、FeFET のもつ強誘電体の効果によって、リザバー計算が実現されていることが分か る。T-distributed Stochastic Neighbor Embedding (t-SNE) 法[6]により、4 ビットのディジタル入力に対するデータ識 別性能の評価を行った結果を図 5 に示す。単体の FeFET において、12-13 パターンの入力の違いが識別できること が分かる。

以上の結果から、FeFET などの強誘電体による物理リザバーは、Si プラットフォームに適合した新たなリザバ ーコンピューティングとして有望であり、エッジでの時系列データの実時間 AI 処理などへの応用が期待できる。 【謝辞】本研究は、JST-CREST (JPMJCR20C3)、JSPS 科研費 (21H01359)の支援を受けて実施された。

【文献】[1] G. Tanaka et al., Neural Networks 115, 100 (2019) [2] K. Toprasertpong et al., 秋季応物学会, 19p-F211-4 (2019) [3] E. Nako et al., Symp. VLSI Tech., TN1.6 (2020) [4] E. Nako et al., SSDM, p. 99 (2020) [5] Z. Wang et al., Si Nanoelectronics. Workshop, S3-3 (2021) [6] L. van der Maaten et al., J. Mach. Learn. Research 9, 2579 (2008)



Fig. 3 Proposed reservoir computing scheme utilizing time responses of drain current of FeFETs as virtual nodes of neural networks

