

# 先端半導体バイナリニューラルネットワーク応用に向けた Co<sub>2</sub>MnSi/MgO/Co<sub>2</sub>MnSi 強磁性トンネル接合の評価

## Characterizations of Co<sub>2</sub>MnSi/MgO/Co<sub>2</sub>MnSi Magnetic Tunnel Junctions towards Binary Neural Network Applications in Advanced LSIs

北大院情報, °丸亀 孝生, (M1)楠瀬 黎, 植村 哲也

Hokkaido Univ.

°Takao Marukame, Rei Kusunose, Tetsuya Uemura

E-mail: takao.marukame@ist.hokudai.ac.jp

**【背景と目的】** 近年, 生成 AI が大きく注目されており, 演算器のアーキテクチャ進化および新たなコンピューティングの進展が求められている [1]. AI アクセラレータとして, ニューラルネットワーク (NN) を専用ハードウェア化するためのインメモリーコンピューティングおよびニューロモフィック技術が知られている[1]. これまでに強誘電体トンネル接合 (FTJ) で構成されたクロスバー型のベクトル行列演算 (Vector Matrix Multiplication; VMM) では 100TOPS/W オーダーの高い VMM 演算効率が示されている [2]. しかしながら FTJ は抵抗変化に寄与するトンネル材料が強誘電体のため, 繰り返し書き込みによる劣化と, 電流ノイズやばらつきに抗う多値の信頼性が確保しにくいという課題がある. 一方, 重みをバイナリ (2 値) にしたバイナリニューラルネット (BNN) が生成 AI 向けに再び注目されている[3]. 最近, ナノ抵抗変化メモリ素子のバイナリ型の抵抗変化に着目した BNN 向けの新しい学習手法と解析結果が報告されている[4]. 本研究では先端半導体の配線層 (BEOL) への応用も視野に入れ, 高信頼な 2 値メモリ素子の一つである強磁性トンネル接合 (MTJ) に注目し, BNN ハード化の有望性を明らかにすることを目的として素子を評価し, その回路方式を検討したので報告する.

**【MTJ の評価】** MTJ の性能としてトンネル磁気抵抗の変化率 (TMR 比) が高いほど重み値の差分が明確になるため BNN 応用にとって望ましい. これまで MgO トンネル絶縁膜と Co 基ホイスラー合金を電極に用いた MTJ にて非常に高い TMR 比が報告されてきた[5]. 今回 Co<sub>2</sub>MnSi/MgO/Co<sub>2</sub>MnSi からなる MTJ の TMR 比と *I-V* 特性を評価したところ, 図 1 のように室温で 362% の高い TMR 比が得られた. また *I-V* 特性では磁化平行と反平行の電流値が明瞭に分かれ, トンネル接合由来の非線形性が確認できた. この非線形性を踏まえた電圧変換をクロスバー回路に用いればバイナリ型の VMM 動作が期待できる. 今回, さらに先端半導体デジタル回路との親和性を意識し, クロスバーに抛らない別方式を以下のように検討した.

**【回路方式の検討】** 高速かつ低消費電力の BNN 向け回路として, デジタル信号伝達の時間差を用いたもの, 電流を与えてアナログ電圧の差分を検出するものなどが知られている [6, 7]. 後者は電源電圧を分割するために重み素子ごとの分解能に限界がある. 一方, スパイキングニューラルネットワーク (SNN) に用いられるような電荷積分型のニューロン回路を採用すれば, 分解能は重み素子により生じる電圧信号の大きさと電荷を受けるキャパシタンスとの相対関係で決まるため, 計算原理はデジタル型 SNN と同様であり低消費電力動作が期待できる. また先端 CMOS により分散ネットワークを構築することにより, スケールアウト可能な BNN 回路としても有望である. 講演では本研究で得られたデバイス特性に基づいた回路方式を例示し, 計算機システム構築の方向性を議論する.

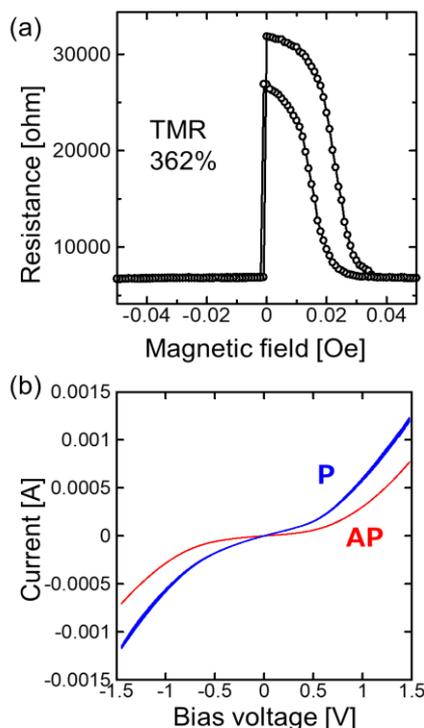


Fig. 1 Characteristics of Co<sub>2</sub>MnSi/MgO/Co<sub>2</sub>MnSi MTJs. (a) MR curves applied with 5 mV bias at room temperature. (b) *I-V* curves for P (parallel) and AP (antiparallel) magnetization configurations.

- [1] A. Mehonic and A. J. Kenyon, *Nature* **604** (2022) 255.
- [2] R. Berdan, T. Marukame, *et al.*, *Nature Electronics* **3** (2020) 259.
- [3] H. Wang, *et al.*, arXiv:2310.11453 (2023). S. Ma, *et al.*, arXiv:2402.17764 (2024).
- [4] R. Kusunose, T. Marukame, R. Kawai, Y. Mitani, K. Ando and T. Asai, MNC2024.
- [5] H-x, Liu, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **101**(13) (2012) 132418.
- [6] D. Miyashita, *et al.*, *IEEE JSSC* **52** (2017) 2679.
- [7] T. Marukame, *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **59** (2020) 040606.