

2023 年度年次報告書

情報担体を活用した集積デバイス・システム

2021 年度採択研究代表者

小野 輝男

京都大学 化学研究所
教授

3 次元磁気メモリの開発

主たる共同研究者:

岡本 好弘 (愛媛大学 大学院理工学研究科 教授)

葛西 伸哉 (物質・材料研究機構 磁性・スピントロニクス材料研究センター グループリーダー)

加藤 剛志 (名古屋大学 未来材料・システム研究所 教授)

高村 陽太 (東京工業大学 工学院 助教)

本多 周太 (関西大学 システム理工学部 准教授)

本間 敬之 (早稲田大学 先進理工学部 教授)

山田 啓介 (岐阜大学 工学部 准教授)

§ 1. 研究成果の概要

提案する 3 次元磁気メモリは、3 次元フラッシュメモリである 3D-NAND 同様に、ビットラインとワードラインの交点に柱が存在する構造を持つ^{1,2)}。3D-NAND では、1 本の柱に多数のゲートが付属することでセルを構成し、各セルに電氣的に情報を蓄える。これに対し、提案メモリでは、1 本の柱が磁気異方性の大きい記録層(緑)と磁気異方性の小さい磁壁層(黄)の多層構造の人工強磁性体で構成され、記録層の磁化方向がビット情報に対応する。したがって、提案メモリは 1 本の柱につき記録層の数だけビット数を持つ 3 次元メモリである。

提案する 3 次元磁気メモリ実現の鍵となるのは、情報書き込み、情報シフト、情報読み出し、および製造プロセスである。この中で、MTJ による情報読み出しは MRAM 技術を利用できる。SOT による情報書き込みも 3 端子 MRAM で実証されているが、記録層/磁壁層からなる人工強磁性体への適用は開発課題となる。人工強磁性体中の電流駆動磁壁移動は、研究代表者らがシミュレーションで確認しているが^{1,2)}、実デバイスでの実証が必要となる。製造プロセスでは、柱構造の作製が鍵となるが、本研究では、スパッタ製膜した薄膜からの微細加工による製造プロセスと高アスペクト比ホールへのめっき製造プロセスを検討する。さらに、本研究では、シミュレーションによる最適化および信号処理技術開発も行う。

今年度の研究成果概要は以下の通りである。スパッタ膜からドライプロセスで作製した記録層/磁壁層/記録層からなるデバイスにおけるスピン軌道トルク書き込みと電流駆動磁壁移動の実験的確認を行ない、さらに多ビットデバイス作製のための検討を行った^{3,4)}。Pt/CoPt の 2 層構造 (Pt はスパッタ法、CoPt はめっき法で形成⁵⁾) において、Pt 層に電流を流すことで生成したスピン流により、めっき方で形成した CoPt の磁化が傾くことを実証した^{6,7)}。これはスピン注入によるめっき膜の磁化反転の実現可能性を強く示すものである。めっき技術により細孔テンプレート内に単層磁性柱と二種の異なる金属からなる磁性柱を作製し、物性評価と磁気特性評価を実施した^{8,9,10)}。3 次元磁気メモリシミュレーションによる情報の書き込み、記録再生における信号処理方式の考案を行った。Pt 薄膜から磁性柱へ注入されるスピン流からのスピン軌道トルクと磁性柱を流れるスピン偏極電流からのスピン移行トルクを取り入れたマイクロマグネティクスにより磁壁の書き込みを検討した。電流値の増加で、磁壁移動速度よりも磁壁書き込み速度が増加し、書き込まれる磁壁間隔を短くできる、つまり、柱長さあたりの記憶密度を増加できることが明らかになった。また、磁壁層の垂直磁気異方性がゼロではなく小さい値を持っていたとしても磁壁層として機能することがシミュレーションで示された。512 ビット/ピラーの 3 次元磁気メモリに対する誤り訂正方式として、1 ピラー分のデータを N_d 分割し、分割データごとに単一反転／挿入／削除誤りの訂正が可能な Levenshtein 符号を採用し、磁壁シフト誤差が正規分布に従う確率モデルを用いてピラーごとに性能を評価した結果、磁壁のシフト誤差の標準偏差がビット長に対して 0.3 以下であれば N_d を 8 とすることで誤り無く再生できることが明らかとなった。

§ 2. 研究実施体制

(1) 小野グループ

- ① 研究代表者: 小野 輝男 (京都大学化学研究科 教授)
- ② 研究項目
 - ・薄膜作製・デバイス加工、シフト動作、集積化

(2) 加藤グループ

- ① 主たる共同研究者: 加藤 剛志 (名古屋大学未来材料システム研究所 教授)
- ② 研究項目
 - ・薄膜作製・デバイス加工、SOT 書込み、集積化

(3) 本間グループ

- ① 主たる共同研究者: 本間 敬之 (早稲田大学 先進理工学部 教授)
- ② 研究項目
 - ・メッキによる人工強磁性柱作製

(4) 山田グループ

- ① 主たる共同研究者: 山田 啓介 (岐阜大学工学研究科 准教授)
- ② 研究項目
 - ・磁性柱作製、磁気特性&柱構造評価、伝導特性評価

(5) 葛西グループ

- ① 主たる共同研究者: 葛西 伸哉 (物質材料研究機構磁性スピントロニクス材料研究拠点スピ
ン物性グループ グループリーダー)
- ② 研究項目
 - ・ナノ構造素子構築のためのテンプレート形成、ナノ構造素子の構造・物性評価および磁壁
生成駆動の直接検出

(6) 高村グループ

- ① 主たる共同研究者: 高村 陽太 (東京工業大学工学院 助教)
- ② 研究項目
 - ・人工強磁性メッキ膜の加工・評価及び磁壁移動の観測

(7) 本多グループ

- ① 主たる共同研究者: 本多 周太 (関西大学システム理工学部 准教授)
- ② 研究項目
 - ・書込み・磁壁シフト・干渉効果シミュレーション, 記録再生信号処理シミュレータの構築

(8)岡本グループ

① 主たる共同研究者:岡本 好弘 (愛媛大学理工学研究科 教授)

② 研究項目

・信号処理の開発に必要な記録再生系モデルの構築および符号化・復号化方式の開発

【引用した原著論文情報】

- 1) “Low Current Driven Vertical Domain Wall Motion Memory with an Artificial Ferromagnet”, J. Magn. Soc. Jpn. Vol. 45, 6, 2021
- 2) “High thermal stability and low driven current achieved by vertical domain wall motion memory with artificial ferromagnet”, Appl. Phys. Express vol. 14, 023001, 2021
- 3) D. Pan, Z. Cao, D. Oshima, T. Kato, “Field-Free Spin-Orbit Torque Switching of Co/Pd Memory Layer in CPP-GMR with Perpendicularly Magnetized SAF Pinned Layer”, IEEE Trans. Magn., 59, 4100505 (2023).
- 4) T. Kato, D. Pan, D. Oshima, “Current Induced Magnetization Switching for Ultra-high Density Magnetic Random Access Memory Cells (Invited)”, International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials, Vienna, Austria, (2023).
- 5) “Development of Ultra-Thin CoPt Films With Electrodeposition for 3-D Domain Wall Motion Memory,” T. Huang, Y. Takamura, M. Saito, Md M. Hasan, D. Araki, T. Homma, S. Kasai, K. Yamada, Y. Sonobe, T. Ono, S. Nakagawa, IEEE Trans. Magn., vol. 59, no. 11, pp. 1-5, Art No. 1301005, Nov. 2023, doi: 10.1109/TMAG.2023.3298911.
- 6) “Second harmonic Hall measurement for CoPt thin film formed on highly oriented Pt layer with electrochemical deposition,” T. Huang, Y. Takamura, S Isogami, Y. Saito, M. M. Hasan, M. Saito, S. Kasai, S. Nakagawa, 第 84 回応用物理学会春秋学術講演会, 2023 年 9 月.
- 7) “Precise analysis of angle-dependent spin-orbit torque for electrodeposited CoPt thin film by integrating the low and high field second harmonic Hall measurements,” T. Huang, Y. Takamura, S. Isogami, T. Shirokura, Y. Saito, Md. M. Hasan, M. Saito, S. Kasai, S. Nakagawa, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会, 23a-12D-4, 2024 年 3 月.
- 8) “Preparation and Characterization of High Aspect Ratio Electrodeposited CoPt Multilayered Magnetic Nanowires,” M. M. Hasan, T. Huang, M. Saito, Y. Takamura, D. Oshima, T. Kato, T. Homma, 2023 IEEE International Magnetic Conference (INTERMAG), Sendai, Japan, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/INTERMAG50591.2023.10265078.
- 9) “3D CoPt Multilayered nanowires: Preparation, Characterization and Application,” Md. M. Hasan, T. Huang, M. Saito, Y. Takamura, T. Ono, T. Homma, MML, Soul, South Korea, poster, 0327, Seoul, Korea, July 2023.
- 10) “Optimized structure and magnetic properties of $\text{Co}_x\text{Pt}_{1-x}$ alloy cylindrical nanowires fabricated by electrodeposition into nanoporous polycarbonate membranes,” N. Oguchi, R. Kawana, M. Saito, T. Homma, T. Kato, T. Ono, M. Shima, K. Yamada, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会, 22p-12K-8, 2024 年 3 月.