

超ギガビット磁気メモリの基盤技術の開発 (032202009)

Development of fundamental technologies for the super Giga-bit magnetic memory

研究代表者

宮崎照宣 東北大学大学院工学研究科

T. Miyazaki Graduate School of Engineering, Tohoku University

研究分担者

安藤康夫[†] 劉智亨[†] 大兼幹彦[†] アニスアリダ[†] ムハメド・ノール[†] 山崎晋[†] 鈴木義茂^{††} アシュウィン トゥラフ^{††}

福島章雄^{††} 久保田均^{††} 小風豊^{†††} 山本直志^{†††} 今北健一^{†††}

Y. Ando[†] J. Yu[†] M. Oogane[†] A. Md Nor[†] S. Yamazaki[†] Y. Suzuki^{††} A. Tulapurkar^{††}

A. Fukushima^{††} H. Kubota^{††} Y. Kokaza^{†††} T. Yamamoto^{†††} K. Imakita^{†††}

[†]東北大学大学院工学研究科 ^{††}産業技術総合研究所 ^{†††}株式会社アルバック

[†]Tohoku University ^{††}AIST ^{†††}ULVAC

研究期間 平成 15 年度～平成 19 年度

本研究開発の概要

スピン注入磁化反転と磁性体の微細加工の二つの技術開発が本研究の主骨子である。スピン注入磁化反転に関しては強磁性体/非磁性体/強磁性体構造の GMR 素子と強磁性体/絶縁体/強磁性体構造の TMR 素子の両構造についてアプローチを行った。前者に関しては、微小接合の形状と反転挙動に関する基礎的知見を得ることを、後者に関しては、反転電流を下げて安定に磁化反転を観測することが最大の目標であり、その後に反転のダイナミクスの観測と制御に関する検討を行った。これらについては東北大と産総研が共同で研究を進めた。一方、微細加工技術については物理的、化学的手法により 0.1 μm 程度の理想的加工技術を確立することを目標とした。この開発はアルバックが中心となり、東北大がこれをサポートした。これらの技術は、ギガビット級の磁気メモリを実現するために必要不可欠な基盤技術である。

Abstract

Fundamental technologies for the super Giga-bit magnetic random access memory (MRAM) have been developed. Spin transfer magnetization switching in high-quality magnetic tunnel junctions has been successfully observed. Moreover, both evaluation methods of critical current J_{c0} at spin transfer switching and of thermal stability coefficient Δ in magnetic tunnel junction have been established. The J_{c0} formula proposed theoretically has been confirmed experimentally. Also, micro-fabrication process of magnetic tunnel junction down to 0.1 μm size has been developed. The usefulness of this technology for 300 mm ϕ wafer was experimentally verified.

1. まえがき

グリーン IT という言葉がしばしば用いられている昨今、不揮発性メモリである MRAM またはスピン RAM に対する期待は非常に大きい。大容量でしかも低消費電力である MRAM またはスピン RAM の開発に大きなトンネル磁気抵抗比を有する接合素子の開発と低電流密度のスピン注入磁化反転技術ならびに素子の微細加工技術の開発が不可欠である。

2. 研究内容及び成果

ギガビット級の磁気メモリの実現にむけて、提案時に掲げた目標は、①TMR 素子におけるスピン注入磁化反転技術の開発および②0.1 μm サイズの TMR 素子微細加工技術の開発であった。

①に関しては、GMR 素子において、世界に先駆けて 100 ピコ秒オーダーの超短パルスによるスピン注入磁化反転の観測に成功した。これによりスピン注入磁化反転素子が超高速磁気メモリとして高いポテンシャルを持つことが実証できた。また、スピン注入磁化反転において重要な熱擾乱の影響を明らかにした。これにより、スピン注入磁化反転の物理的メカニズムの理解およびスイッチング電流制御のための熱の影響の評価技術が格段に進展した。さらに、ホイスラー合金を電極とした GMR 素子において、GMR 素子では最少の電流密度によるスピン注入磁化反転

の観測に成功した。このことは、高いスピン偏極率を有する材料を用いることが、低消費電力磁気メモリの実現に有効であることを示した初めての実験結果である。TMR 素子については、CoFeB 電極および MgO 絶縁層を用いることで、高 TMR 比($\sim 150\%$)かつ低抵抗($\sim 10 \Omega\mu\text{m}^2$)の高性能 TMR 素子の開発に成功した。さらに、CoFeB 電極の組成を系統的に変化させた試料についてスピン注入磁化反転の観測に成功した。図 1 に $\alpha M_s^2/g$ という TMR 素子の強磁性層の磁気パラメータを横軸に、磁化反転電流密度を縦軸にまとめたものを示す。ここで、 α : 磁気緩和定数、 M_s : 飽和磁化、 g : スピン注入効率である。この結果から、磁化反転電流が磁化反転層の磁気的性質に対して理論予測と良い一致を示すことが明らかになった。

②に関しては、高温・低圧の高密度プラズマ反応性イオンエッチングプロセスの開発を行なった。種々の反応ガスの検討を行なった結果、Cl 系の混合ガスを用いた場合に、従来の Ar エッチングに比べて、エッジのシャープな素子加工形状を得ることに成功した。また、TMR 素子を構成する多層膜に対して、メタルマスクとして用いる TiN が十分な選択比を有することも明らかにした。さらに、RIE プロセスに加えて、コロージョンフリー、ダメージフリーの処理プロセスを検討することで、0.1 μm サイズの素子加工プロセスを確立した。また、上記プロセスを 300mm ϕ ウェハ上で実証するために、ドライエッチング装置の設計、開発を行なった。図 2 に製作したエッチング装置の概観写

真を示す。製作した装置で、エッチングを行なった結果、300mmφのウェハ内で±4.7%のエッチング速度面内均一性を実現した。さらに、CoFeB/MgO/CoFeB-TMR 素子を作製した結果、300mmφウェハ内で TMR 比が 200%以上で均一であることを確認した。この結果、磁気メモリの量産プロセスへの展開が開けた。

①、②に関する研究を通して、予想外の成果も得られた。一つは、金属ナノコンタクトにおける巨大なペルチェ効果である。この結果は、スピン注入素子を構成する金属の電子状態により、同じ大きさの電流下でも熱擾乱の影響が異なることを示唆しており、磁気メモリ設計時の重要なポイントとなる発見である。二つ目は、薄い膜厚においても、高い方向磁気異方性およびブロッキング温度を有する反強磁性膜の開発に成功したことである。この結果、磁気メモリの加工時に問題となる、エッチング時の側壁付着のリスクが低減可能となり、大面積ウェハ上でも均一に磁気メモリ素子の作製が可能となった。

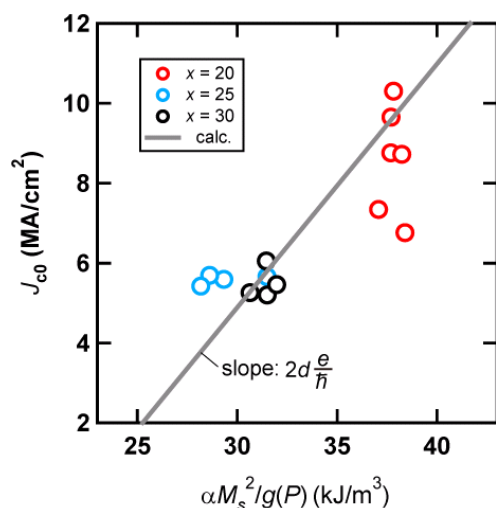


図1 スピン注入磁化反転電流の実験値と CoFeB_x (x = 20~30%) 強磁性体電極の磁気パラメータとの関係。直線は理論から予測される関係。



図2 製作した 300mmφウェハ対応反応性イオンエッチング装置。

3. むすび

本研究では、まず、将来的に TMR 素子の電極材料として有望であるホイスラー合金電極を用いた GMR 素子において、比較的小さい反転電流密度による磁化反転を観測した。その後、CoFeB を電極とし、MgO をトンネル障壁とした TMR 素子で系統的な実験を行った。その際重要なのはセル(電極の磁性体)の熱安定性を維持したまま、反転電流密度を低減することである。本研究では①熱安定性を示す指数Δと反転電流密度(J_{c0})を同時に評価する手法の確立、ならびに② J_{c0} に関する理論の実験的検証をはじめて行った。TMR 素子の微細加工技術の開発に関しては、目標とする 0.1μm サイズの加工技術の開発を達成した。更に、この技術が生産ライン対応の 300mmφウェハにおいても有用であることを実証した。

これらスピン注入磁化反転技術ならびに素子の微細加工技術は今後引き続き行われるスピン注入磁化反転を利用した磁気メモリ(スピン RAM)の開発にあたり要素技術としておおいに役立つと期待される。

【誌上発表リスト】

- [1]宮崎照宣、大兼幹彦、桜庭裕弥、渡邊大輔、R. Yilgin、佐久間昭正、安藤康夫、久保田均、“スピントロニクス形成と発展”、粉体および粉末冶金 Vol.55 pp109-115 (2008 年)
- [2]H. Kubota, Y. Ando, T. Miyazaki, “CO+NH₃ plasma etching for magnetic thin films”, J. Magn. Magn. Mater. Vol.272-276 pp1421-1422 (2004 年)
- [3]Y. Otani, H. Kubota, A. Fukushima, H. Maehara, S. Yuasa, Y. Suzuki, “Thermal stability of spin-transfer switching in CPP-GMR devices”, J. Magn. Magn. Mater. Vol.310 pp2026-2028 (2007 年)

【申請特許リスト】

- [1]山本直志、トンネル接合素子のエッチング方法、日本、2005 年 3 月 28 日
- [2]安藤康夫、大兼幹彦、宮崎照宣、渡邊大輔、低磁気緩和定数トンネル磁気抵抗素子、日本、2007 年 2 月 26 日
- [3]今北健一、磁気デバイスの製造方法、磁気デバイスの製造装置、及び磁気デバイス、日本、2007 年 6 月 11 日

【受賞リスト】

- [1]新関智彦、応用物理学会講演奨励賞、“電子線リソグラフィを用いたナノメーターサイズ TMR 素子の作製”、2003 年 9 月
- [2]宮崎照宣、第 5 回山崎貞一賞、“トンネル磁気抵抗素子の応用に関する研究”、2005 年 11 月 18 日
- [3]宮崎照宣、2007 年度朝日賞、“トンネル磁気抵抗効果(TMR)の発展と応用に関する研究”、2008 年 1 月 1 日

【報道発表リスト】

- [1]“8 インチ基板上に均一薄膜 大容量 HDD 向け磁気ヘッド製造技術 アルバックが開発”、日刊工業新聞、2007 年 8 月 22 日
- [2]“次世代 HDD 磁気ヘッド小型化 アルバック Ir 系材料を均一成膜”、化学工業日報、2007 年 8 月 22 日
- [3]“次世代 HDD ヘッド向け アルバック 金属薄膜”、日経産業新聞、2008 年 8 月 27 日

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

- [1]<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20070821/137994/>
- [2]<http://www.ulvac.co.jp/information/news/2007/index.html/>
- [3]<http://www.apph.tohoku.ac.jp/miyazaki-lab/>