

平成 16 年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書

ふりがな		やまもと まさひこ		所属研究機関・部局・職		大阪大学・大学院工学研究科・教授	
研究代表者氏名		山本 雅彦					
研究課題名	和文	超高集積化した相互非干渉型磁性メモリセル					
	英文	Ultra-High Density Magnetic Memory Cells					
研究経費		平成14年度	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	総合計
16年度以降は内約額 金額単位：千円		34,400	18,600	13,000	6,600	6,600	79,200
研究組織（研究代表者及び研究分担者）							
氏名	所属研究機関・部局・職	現在の専門	役割分担（研究実施計画に対する分担事項）				
山本 雅彦	大阪大学・大学院工学研究科・教授	材料物性学	研究全体の遂行と総括、微細加工プロセスの検討、メモリセル構造の検討 磁化状態の検討、磁化環流構造の観察 メモリセル材料構造の観察、電気抵抗測定による情報読み出しの検討				
中谷 亮一	大阪大学・大学院工学研究科・教授	磁性材料学					
遠藤 恭	大阪大学・大学院工学研究科・助手	材料物性学					
当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。）							
<p>新世代のメモリとして薄膜磁性材料からなるメモリセルを有する MRAM（Magnetic Random Access Memory）の研究が盛んに行われており、既に、人工衛星などの特殊用途の一部では MRAM は実用化されている。また、国内外メーカーでの研究も進展しており、MRAM は民生用としても近い将来に実用化されるものと予測される。MRAM ではメモリセル中の磁性層を所定の向きに磁化することにより情報を記録する。このような磁性体を使うシステムであるため、MRAM は不揮発、衝撃に強いなどの特徴を持つ。このようなメモリにおける不揮発性とは、メモリへの電力の供給を止めても、記憶している情報を消失しない性質を指し、メモリを運用する際に非常に重要な特性である。MRAM の上述のような特性に対して、現在、一般に広く用いられている半導体メモリの DRAM（Dynamic Random Access Memory）は、衝撃には強いが情報の不揮発性の特性を有さない。このような不揮発性の有無のため、将来、MRAM の利用領域は DRAM のそれを凌駕する可能性が高い。現状では、平成 16 年～17 年には、256 Mbit の容量を有する MRAM が実用化され、将来は、さらに MRAM の記憶容量が増加していくものと予想されている。このような将来の大容量の MRAM では、メモリセル小さくするとともに、メモリセルを超高密度で集積する必要がある。しかし、メモリセルを超高集積化すると、メモリセル自体が磁性体であるために、各メモリセルは隣接するメモリセルからの漏洩磁界の影響を受け、保持している情報を消失したり、情報反転磁界がメモリセルにより異なるなどの問題が生じる。このような漏洩磁界の引き起こす問題を本質的に解消するためには、メモリセル自体を漏洩磁界を生じない構造に変えなくてはならない。本研究の目的は、漏洩磁界を生じない新規なメモリセル構造の検討を行い、平成 18 年までに、4 Gbit 級の MRAM に用いられるメモリセルの基本構造を構築することにある。</p>							

これまでの研究経過（研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。）

新世代の情報記憶メモリである MRAM(Magnetic Random Access Memory)の記憶容量を飛躍的に大きくするための基礎科学技術確立することを目的として、サブマイクロオーダー以下の大きさの閉磁路構造を有する磁性メモリセルの構造、磁化過程および磁化状態について検討を行った。

- (1) 図 1 に示すような円形、四角形、三角形の閉磁路構造を有するメモリセル材料および閉磁路構造を有さないメモリセル材料の磁化過程および磁化状態を比較検討した結果、滑らかな閉磁路構造を有するリング状のメモリセル（円形の閉磁路構造）は、印加磁界のない状態では、磁化が外周に沿って回り、磁界を漏洩しない構造であることがわかった（例えば、図 2 のように、円形のメモリセルでは、その中央に白いスポットが見られ、磁化が外周に沿って回っているが、中央部で磁界が漏洩していることがわかる。これに対し、リング状のメモリセルでは、そのようなスポットが見られず、漏洩磁界のないことがわかる。また、その他の構造では、漏洩磁界が観測された。）
- (2) リング状のメモリセルに対する情報の記録方法について、マイクロマグネティクス・シミュレーションを用いた理論的検討を行った。従来のリング構造のメモリセルでは、膜面垂直方向に電流を流すことにより、時計回りあるいは反時計回りの磁界を発生しなければ、記録を行うことができなかった。これに対し、Ni-20at%Fe からなる直径 500-1000 nm の円形のリング状のメモリセルの一部を削り、若干の漏洩磁束を生じる構造にすることにより、面内の電流による面内磁界により記録可能であることを見出した。
- (3) “(2)”の構造の厚さ 20 nm の Ni-20at%Fe からなる直径 450 nm および 850 nm のリングメモリセル要素素子を電子線リソグラフィにより形成し、種々の方向に磁界を印加し、その磁化過程および磁化状態について詳細な実験検討を行った。その結果、上記の構造のメモリセルでは、面内の磁界により記録を行い、磁界の向きにより「0」、「1」の 2 値の記録が可能であることを明らかにした（結果については、次ページの「特記事項」に記載）
- (4) 上記のリング状のメモリセルに記録された情報を再生する（読み出す）ためには、どのような外部磁界を印加しても、磁化の回る向きが変わらないリング状の磁性体も必要である。このため、“(3)”と同様の 2 次元構造を有する Ni-Fe(10 nm)/Mn-Ir(10 nm)積層リングを作製し、その磁化過程および磁化状態についての検討を行った。その結果、上記積層リングは、印加磁界の向きにかかわらず、一定の磁化の向きを有することを明らかにした。
- (5) リング状のメモリセルに対する記録磁界を低減する新構造を実験およびマイクロマグネティクス・シミュレーションの両面より探索した。これらの検討により、リング部の下に円形磁性層を形成したカップ型メモリセル構造は、非常に低い磁界により記録可能であることを見出した。
- (6) “(5)”の構造のカップ型メモリセル材料の構成材料についての検討を行い、高保磁力の Co-Pt 系合金は一方の磁化状態を維持するためにメモリセルには適さず、低保磁力の Ni-Fe 系合金は、時計回り・反時計回りの記録状態を容易に実現できるため、メモリセルに適していることを見出した。

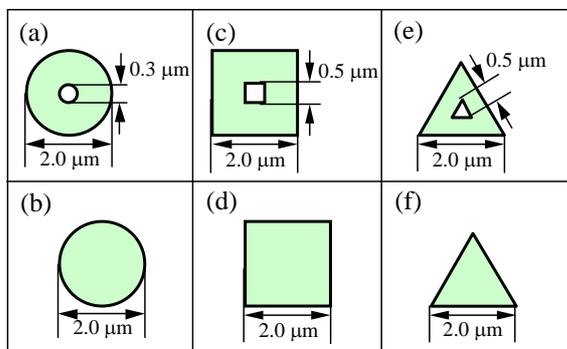


図 1 検討を行ったメモリセル形状

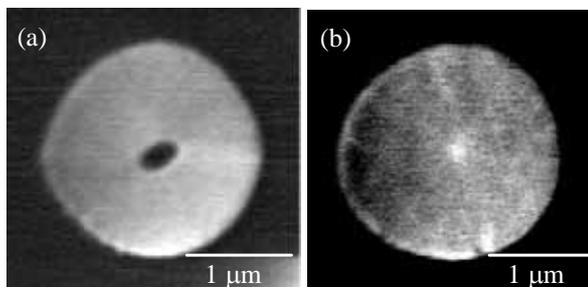
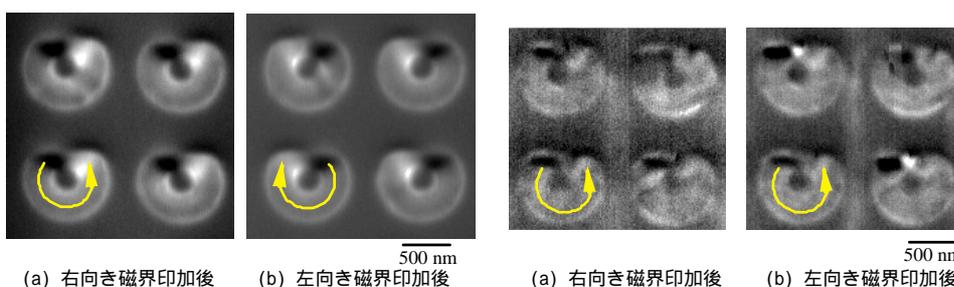


図 2 磁気力顕微鏡像

特記事項（これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。）

- (1) 「これまでの研究経過」でも述べたように、従来のリング構造のメモリセルでは、膜面垂直方向に電流を流すことにより、時計回りあるいは反時計回りの磁界を発生しなければ、記録を行うことができない。しかし、情報を再生する際の S/N の高い磁気トンネリング効果を生ずる積層膜をメモリセル材料として適用すると、上記積層膜は、絶縁層を有するため、メモリセルの垂直方向に大きな電流を流すことができず、上述の従来方法での記録は行えない。この理由のため、リング状のメモリセルの実用化は非常に困難であるものと考えられていた。そこで本研究では、この問題を解決することを目的として、膜面内に配置した金属線に流す電流によって生じる膜面内の磁界により記録可能なメモリセル構造についての検討を、理論および実験の両面から行った。その結果、円形のリング状のメモリセルの一部を削り、若干の漏洩磁束を生じる構造にすることにより、下の図 3 に示すように、磁界を右に印加した場合と左に印加した場合とは、磁化の向きが異なることがわかった。この結果は、本研究で開発した上記の新規な構造のメモリセルでは、面内の電流による面内磁界により記録可能であることを示す。また、同時に、上記の構造は、リング構造のメモリセルを実用化の際のブレークスルーとなる要素技術であることが明らかになった。
- (2) メモリセルに記録された情報を再生する（読み出す）時には、磁気トンネリング効果あるいは巨大磁気抵抗効果を利用する。このため、「これまでの研究経過」でも述べたように、どのような外部磁界を印加しても、磁化の回る向きが変わらないリング状の磁性体も必要である。本研究では、磁化の向きを保持する磁性体を開発することを目的として、種々の「磁性層 / 反強磁性層」の積層構造を有するリング積層体についての検討を行った。その結果、図 4 に示すように、Ni-Fe(10 nm)/Mn-Ir(10 nm)の積層構造を有するリング積層体は、印加磁界の向きにかかわらず、一定の磁化の向きを保持することを明らかにした。この積層体における磁性層を参照電極とすることにより、メモリセルの電気抵抗の高さを測定すれば、記録された情報を再生することができるようになる。
- (3) リング状のメモリセルに対する情報の記録磁界を低減する新構造の探索を行った結果、上記のリング状の磁性層の下に円形の磁性層を形成したカップ型メモリセル構造（図 5）は、非常に低い磁界により記録可能であることを見出した（図 6）。この構造は、世界でも類を見ない新規な構造であり、本研究の独自性を大幅に向上している。



(a) 右向き磁界印加後 (b) 左向き磁界印加後

図 3 零磁場でのメモリセルの磁化状態

(a) 右向き磁界印加後 (b) 左向き磁界印加後

図 4 零磁場での磁化固定層の磁化状態

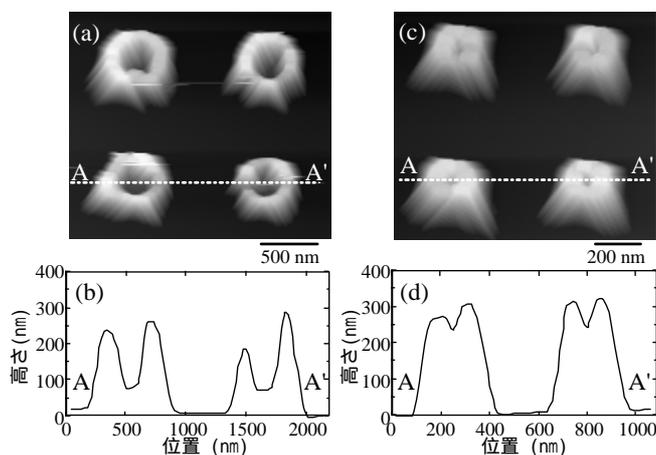


図 5 カップ型メモリセルの形状（原子間力顕微鏡像）

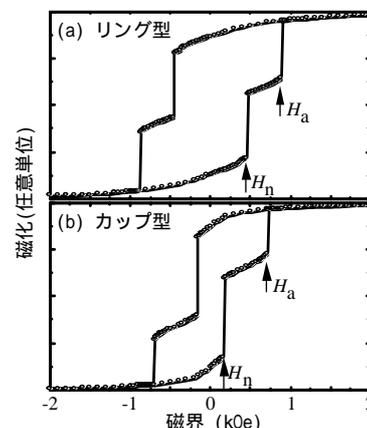


図 6 メモリセル形状による磁化過程の違い（計算機シミュレーション）

研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(発表予定のものを記入することも可能。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。)

- (1) Gyu Bong Cho, Masahiko Yamamoto and Yasuhiro Kamada, "Morphology of Fe Film Grown on Self-Organized SrTiO₃ (001) Substrate with Inclined Angle", Jpn. J. Appl. Phys., 41, No. 9 (2002) 5713-5718.
- (2) Yu Shiratsuchi, Masahiko Yamamoto and Yasuhiro Kamada, "Surface Structure of Self-Organised Sapphire (0001) Substrates with Various Inclined Angle", Jpn. J. Appl. Phys., 41, No. 9 (2002) 5719-5725.
- (3) Ryoichi Nakatani, Takayuki Kusano, Hirotaka Yakame and Masahiko Yamamoto, "Magnetic and Electric Properties in C/Mn/C/Si Multilayers", Jpn. J. Appl. Phys., 41, No. 10 (2002) 5978-5981.
- (4) Ryoichi Nakatani, Noritsugu Takahashi, Tetsuo Yoshida and Masahiko Yamamoto, "Magnetic States and Magnetization processes of Ni-Fe/Hf Annular Dots as Candidates of Non-Volatile Memory Cells", Jpn. J. Appl. Phys., 41, No. 12 (2002) 7359-7366.
- (5) Yasuhiro Kamada, Akihiro Itoh, Daisuke Takama and Masahiko Yamamoto, "Effects of Hydrogenation on Structure, Transport and Magnetic Properties of the Multilayers Composed of Transition Metals and Rare-Earth Metals", Trans. Mag. Soc. Jpn., 2, No. 2 (2002) 69-75.
- (6) Toshiki Kingetsu and Masahiko Yamamoto, "Growth of Short-Period Epitaxial Superlattices X-Ray Multilayer Mirrors", Surface Science Rep., 45 (2002) 79-116.
- (7) Ryoichi Nakatani, Noritsugu Takahashi, Hana Asoh, Yoshio Kawamura and Masahiko Yamamoto, "Fabrication of Ring Dot Arrays as a Candidate of Memory Cells", 17th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces, Kyoto (2002) 178-179.
- (8) Ryoichi Nakatani, Takayuki Kusano, Hirotaka Yakame, Hideo Hoshiyama and Masahiko Yamamoto, "Ferromagnetism in Multilayers Including Mn Layers", 17th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces., Kyoto (2002) 290-291.
- (9) Gyu Bong Cho, Masahiko Yamamoto and Yasuhiro Kamada, "Shape-Induced Anisotropy in Fe Films Grown on Inclined SrTiO₃ (001) Substrate Made by the Self-Organization Phenomena", 17th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces., Kyoto (2002) 36-37.
- (10) Yasuhiro Kamada, Akihiro Itoh, Daisuke Takama and Masahiko Yamamoto, "Effects of Hydrogenation on Structure, Transport and Magnetic Properties of Multilayers Composed of Transition Metals and Rare-Earth Metals", 17th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces., Kyoto (2002) 386-387.
- (11) Ryoichi Nakatani and Masahiko Yamamoto, "Magnetization Reversal with In-Plane Magnetic Field in Asymmetric Ring Dots", Jpn. J. Appl. Phys., 42, No. 1 (2003) 100-101.
- (12) Yasushi Endo, Daisuke Takama and Masahiko Yamamoto, "Interlayer Exchange Coupling of Fe/Y Multilayers", Jpn. J. Appl. Phys. 42, No.3B, (2003) L291-L293.
- (13) Ryoichi Nakatani, Hirotaka Yakame, Yasushi Endo and Masahiko Yamamoto, "Magnetic Properties in Mn/Si-O/Si(100)-Substrate Systems and Mn/Si-O/Si Trilayers", Jpn. J. Appl. Phys. 42, No.6A (2003) 3392-3393.
- (14) Ryoichi Nakatani, Hana Asoh, Noritsugu Takahashi, Yoshio Kawamura and Masahiko Yamamoto, "Magnetic States and Magnetization Process in Ni-Fe Sub-micron Cup-Shaped Dots", Jpn. J. Appl. Phys. 42, No.8 (2003) 5024-5029.
- (15) Gyu Bong Cho, Masahiko Yamamoto, Yasushi Endo, Yu Shiratsuchi, Yasuhiro Kamada and Katsuaki Sato, "Magnetic Property and Morphology of Fe Film Grown on Self-Organized SrTiO₃ (001) Substrate with Inclined Angle", Jpn. J. Appl. Phys. 42, No.10 (2003) 6543-6550.
- (16) Yu Shiratsuchi, Masahiko Yamamoto and Yasushi Endo, "Superparamagnetic Behavior of Fe Ultrathin Films Grown on Al₂O₃ (0001) Substrates", J. Appl. Phys. 94, No.12 (2003) 7675-7679.
- (17) Masahiko Yamamoto, "Magnetic Properties and Structures of Nanofabricated Thin Films and Multilayers", Proc of the Inter. Symp. On Future-Oriented Interdisciplinary Materials Science (2003).
- (18) S. A. Haque, Masahiko Yamamoto, Ryoichi Nakatani and Yasushi Endo, "Permalloy Nanodots for Binary Logic Operation", ACSIN-7, Nara, (2003) 234.
- (19) Yu Shiratsuchi, Masahiko Yamamoto and Yasushi Endo, "Transition from Superparamagnetic to Ferromagnetic State of Ultrathin Fe Films Grown on Al₂O₃ (0001) Inclined Substrates", ACSIN-7, Nara, (2003) 267.
- (20) Ryoichi Nakatani, Hideo Hoshiyama, Hirotaka Yakame, Yasushi Endo and Masahiko Yamamoto, "Ferromagnetism in Mn/X/Si (X=B, BN, B₄C, SiC) trilayers", Science and Technology of Advanced Materials, 5, 1-2 (2004) 69-72.
- (21) Ryoichi Nakatani, Tetsuo Yoshida, Yasushi Endo, Yoshio Kawamura, Masahiko Yamamoto, Takashi Takenaga, Sunao Aya, Takeharu Kuroiwa, Sadeh Beysen and Hiroshi Kobayashi, "Magnetization chirality due to asymmetrical structure in Ni-Fe annular dots for high-density memory cells", J. Appl. Phys. (2004) in press.
- (22) Ryoichi Nakatani, Tetsuo Yoshida, Yasushi Endo, Yoshio Kawamura, Masahiko Yamamoto, Takashi Takenaga, Sunao Aya, Takeharu Kuroiwa, Sadeh Beysen and Hiroshi Kobayashi, "Magnetically pinned ring dots for spin-valve or magnetic tunnel junction memory-cells", submitted in J. Magn. & Magn. Mater.
- (23) Ryoichi Nakatani, Hisashi Nakayama, Yasushi Endo and Masahiko Yamamoto, "Magnetic properties of Mn/Si-O multilayers", submitted in J. Magn. & Magn. Mater.

他、13件