

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007 ～ 2009

課題番号：19360140

研究課題名（和文） プレーナ型磁性ナノ構造の作製と磁化反転の制御

研究課題名（英文） Fabrication of planar magnetic nanostructures and control of their magnetization

研究代表者

竹村 泰司 (TAKEMURA YASUSHI)

国立大学法人横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30251763

研究成果の概要（和文）：プレーナ型磁性ナノ構造の作製方法の確立、ナノ磁性構造における磁気特性の制御方法の確立、及びプレーナ型磁性ナノ構造における通電電流による磁化反転制御の検証を実施した。その結果、磁性ナノ構造の作製に、原子間力顕微鏡（AFM）を用いたナノリソグラフィが有効であることを明らかにした。また、作製した磁性ナノ構造において、通電電流による磁化反転や狭窄化による磁気抵抗効果の観測に成功した。

研究成果の概要（英文）：Fabrication of planar magnetic nanostructures, control of their magnetization properties and magnetization switching control by current through samples were carried out. It was found that nano-lithography technique using atomic force microscope (AFM) was useful for fabricating magnetic nanostructures. The magnetization switching by current and magnetoresistance due to constriction were also achieved.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2008年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総計	10,300,000	3,090,000	13,390,000

研究分野：電子工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子・電気材料工学

キーワード：磁性ナノ構造、磁性体、磁化反転、原子間力顕微鏡（AFM）

1. 研究開始当初の背景

磁気ランダムアクセスメモリ（MRAM）は高集積・低消費電力を実現する不揮発性メモリであり、国内外において活発に研究開発されている。MRAMの基本構造は2つの強磁性金属層を絶縁体で挟んだ積層型強磁性トンネル接合である。その一方である磁化自由層の磁

化方向を左右に反転・保持させることにより1ビットの情報、“0”と“1”を記憶する。書込電流線がつくる外部磁界を印加することにより磁化反転させる。しかしながらこの方法はメモリセルサイズを縮小するに従い、反転に必要な印加磁界が増大するという欠点がある。即ち、メモリの高集積化は消費電力

の増大を伴う。

この問題を解決する方法としてスピン移行効果が注目されている。この効果により磁性体に流れるスピン偏極した電流で直接、その磁化を反転させることが可能である。反転に必要なしきい電流密度（臨界電流密度）を一定と仮定すると、セルサイズ縮小に伴い通電電流を低減できることは MRAM の高集積化に有利である。

2. 研究の目的

プレーナ型磁性ナノ構造を作製し、その電氣的・磁氣的特性の評価と、磁化反転制御を行うことを研究目的とした。研究期間内において、

- ・プレーナ型磁性ナノ構造の作製方法の確立
 - ・関連して原子間力顕微鏡 (AFM) を用いた新しいナノリソグラフィ技術の確立とナノ磁性構造における磁気特性の制御方法の確立
 - ・プレーナ型磁性ナノ構造における通電電流による磁化反転の検証
- 以上の研究項目を立案した。

3. 研究の方法

(1) NiFe 系微小プレーナ型 2 重強磁性トンネル接合の作製

電流電圧特性測定のための電極パッドに囲まれた領域にパターンニング加工した NiFe 薄膜を形成し、微小トンネル接合を作製する。

(2) AFM 局所酸化加工のサイズ制御性向上

AFM 局所酸化においてカンチレバーに流れる酸化反応電流を測定することにより、ナノ加工の制御性を向上させる。

(3) プレーナ型磁性ナノ構造の作製

巨大磁気抵抗効果 (GMR 効果) を示す積層薄膜に AFM 局所酸化加工を施し、通電電流による磁化反転を試みる。

4. 研究成果

(1) NiFe 系微小プレーナ型 2 重強磁性トンネル接合の作製

電子線蒸着法により成膜した NiFe 薄膜を、フォトリソグラフィとドライエッチングを組み合わせて、細線状に加工した試料を作製した。基板には SiO₂/Si を用いて、NiFe の膜厚は 2、4、8、10、20nm とした。原子間力顕微鏡 (AFM) を用いた陽極酸化法により、NiFe 細線を横切るように NiFe 酸化物ナノワイヤを作製し、NiFe の孤立部を形成することに成功した。この孤立部の磁区構造を磁気力顕微鏡 (MFM) で観察し、その通電電流による磁化反転を観測するための試料構造を作製できる状況に到達した。また、NiFe 酸化物ワイヤが NiFe 薄膜の底面まで到達した際には微小プレーナ型 2 重強磁性トンネル接合が作製できるが、電流電圧特性の測定から、ダイ

オード特性を観測するに至った。

さらに、作製したプレーナ型強磁性トンネル接合の電流電圧特性の評価から、トンネル障壁が形成されていることを確認するとともに、プレーナ型ナノ構造素子の磁気抵抗効果の測定から、磁性ナノ構造の作製を反映した磁気抵抗効果を観測した。

磁化方向に影響を与える要因は外部からの印加磁界の他に磁気異方性がある。応用上、磁化方向となり易い磁化容易軸を設定することが多い。磁性ナノ構造における磁化容易軸の方向を AFM 局所酸化加工により制御することを試み、磁気力顕微鏡 (MFM) により観測した磁区構造から磁化方向を制御できることを検証した。

(2) AFM 局所酸化における反応電流の測定

AFM 局所酸化加工において、その酸化反応電流を測定して、反応量から生成されるナノ酸化物の体積を見積もることは、サイズ制御やの観点から意義がある。本研究においては、pA (ピコアンペア) オーダー以下の微弱反応電流を高精度に測定することに成功し、以下の知見を得た。

自然酸化膜をもつ p 型 Si、膜厚 10 nm の NiFe 薄膜、その上に膜厚 1 nm の Al₂O₃ を積層させた NiFe において探針の走査速度を変えて酸化物ワイヤを、電圧の印加時間を変えて酸化物ドットを作製し、考察を行った。その結果、走査速度を増加すると酸化物サイズ、試料に流れる電荷量は減少した。また電流効率の点から、Si では測定電流の約半分が酸化に関与し、NiFe では走査速度が小さいほど酸化に関与しない電流が流れることが考えられる。

電圧印加時間を増加すると、Si では測定電流、酸化物の成長率は減少したが、NiFe では、測定電流、酸化物高さの成長率は印加時間に関係なく一定となった。さらに以上の結果と酸化物の導電率、空間電荷の影響を考慮することで、Si、NiFe での酸化物の成長過程の違いを検討した。その結果、NiFe 酸化物のほうが Si 酸化物よりも導電率が大きいことから、イオンが酸化物中を移動しやすいため、より長く酸化反応できることが明らかとなった。

Si では Si/酸化物界面でしか酸化できないため、界面に蓄積した空間電荷により酸化物の成長は抑制される。NiFe では NiFe/酸化物界面だけでなく酸化物中でも酸化できるため、Si よりもより長い時間酸化ができ、酸化物サイズも大きくなる。

(3) GMR 効果を示す NiFe/CoFe 系積層薄膜をパターンニングして、細線化した部分に AFM 局所酸化加工を施して作成した領域の通電電流による磁化反転を試みた。臨界電流 (密度) の抑制に課題は残るが、メモリ書き込みの基本動作である電流による磁化反転に成功し、再現性と正負電流による可逆性を確認した。

(4) AFM を利用した新しいナノ加工技術とし

て、レジスト・スクラッチ法とダイレクト・スクラッチ法を試みた。局所酸化加工とスクラッチ加工を併用して、NiFe 細線の狭窄化によるナノ接合部の作製と電氣的及び磁氣的特性の測定、評価を行った結果、以下のような知見が得られた。

局所酸化加工は、膜厚方向への酸化物成長により、ナノ接合部の断面積縮小に応用できることが確認された。スクラッチ加工は、膜厚 20 nm 程度の NiFe であれば確実に基板まで削ることが可能であり、狭窄化に適用すると、接合幅 300 nm 以下、断面積 1,000 nm² 程度のナノ接合部の作製に成功した (図 1)。作製されたナノ接合部において、狭窄化に起因した磁氣抵抗効果を観測した。

以上より、磁性ナノ構造・デバイスの作製に、AFM ナノリソグラフィが有効であることを明らかにした。また、作製したプレーナ型強磁性デバイス構造において、通電電流による磁化反転に成功するとともに、狭窄化による磁氣抵抗効果を観測し、プレーナ型強磁性ナノ構造のデバイス応用への有用性を示した。

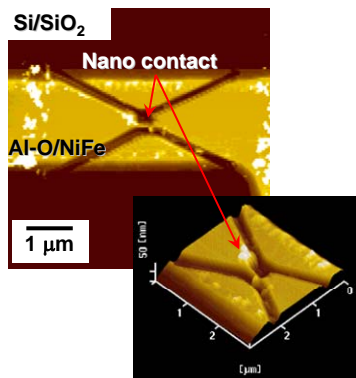


図 1

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- (1) Yasushi Takemura, Scanning probe microscopes local oxidation for fabricating magnetic nanostructures, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 10, No. 8, pp. 4528-4532, 2010. 査読有.
- (2) Noriyuki Ishii, Tatsuhiko Yokoyama, Hiroki Shibata, Tsutomu Yamada, Jun-ichi Shirakashi, Yasushi Takemura, Magnetization Switching of Magnetic Submicron Structure Fabricated by Atomic Force Microscope, IEEJ Transactions on Electrical and

Electronic Engineering, Vol. 3, Issue 4, p 386-389, 2008. 査読有.

- (3) Shunsuke Hasegawa, Shogo Yamada, Tsutomu Yamada, Jun-ichi Shirakashi and Yasushi Takemura, AFM nano-oxidation of NiFe thin films capped with Al-oxide layers for planar-type tunnel junction, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 3, Issue 4, p 382-385, 2008. 査読有.
- (4) Yasuyuki Shimada, Tsutomu Yamada, Jun-ichi Shirakashi and Yasushi Takemura, Measurement of Reaction Current during Atomic Force Microscope Local Oxidation of Conductive Surfaces Capped with Insulating Layers, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 47, No. 1, pp. 768-770, 2008. 査読有.

[学会発表] (計 20 件)

- (1) Kyungmin Jang, Yoshifumi Ishibashi, Daisuke Iwata, Hidenori Suganuma, Tsutomu Yamada and Yasushi Takemura, Constriction of ferromagnetic patterned thin film by AFM scratch lithography, The 3rd IEEE International NanoElectronics Conference (INEC) 2010, Hong Kong, Jan. 5, 2010.
- (2) 菅沼秀教、チャン キョンミン、岩田大輔、山田 努、竹村泰司、AFM リソグラフィによるナノコンタクトの作製、2009 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-6-16、新潟、2009 年 9 月 16 日.
- (3) 岩田大輔、チャン・キョンミン、菅沼秀教、山田 努、竹村泰司、AFM スクラッチ・リソグラフィによる磁性デバイスの作製、電気学会 マグネティクス研究会、MAG-09-73、宇都宮、2009 年 8 月 4 日.
- (4) Yasushi Takemura and Jun-ich Shirakashi, Constriction of Ferromagnetic Patterned Thin Film by Scratch Process Using Atomic Force Microscope, Seventeenth Annual International Conference On Composites/Nano Engineering (ICCE-17), Honolulu, USA, July 29, 2009.
- (5) 菅沼秀教、チャン キョンミン、山田努、竹村泰司、AFM 探針スクラッチナノ加工による強磁性パターン薄膜の狭窄化、電子情報通信学会 電子部品・材料研究会 (CPM) 材料・デバイスサマーミーティング、CPM2009-27、東京、2009 年 6 月 27 日.
- (6) Kyungmin Jang, Kazuhiro Takahashi, Tsutomu Yamada, Jun-ich Shirakashi, and Yasushi Takemura, Constriction of Ferromagnetic Patterned Thin Film by Using AFM Nano Scratch Process, Asian

- Magnetic Conference (AMC) 2008, AS-04, pp. 40, Busan, Korea, Dec. 10, 2008.
- (7) Yasushi Takemura, SPM Local Oxidation for Fabricating Magnetic Nanostructures, 1st International Workshop on Tip-Based Nanofabrication, Taipei, Taiwan, Oct. 20, 2008.
- (8) Daisuke Iwata, Yasuyuki Shimada, Tsutomu Yamada, Jun-ichi Shirakashi and Yasushi Takemura, Dependence on Scan-speed of Cantilever in Measurement of Reaction Current of AFM Local Oxidation, 1st International Workshop on Tip-Based Nanofabrication, Taipei, Taiwan, Oct. 21, 2008.
- (9) Hidenori Suganuma, Shunsuke Hasegawa, Tsutomu Yamada, Jun-ichi Shirakashi and Yasushi Takemura, Nano-oxidation of NiFe Thin Films with Al-Oxide Capped Layers by Atomic Force Microscope, 1st International Workshop on Tip-Based Nanofabrication, Taipei, Taiwan, Oct. 21, 2008.
- (10) チャン キョンミン、高橋和大、山田努、白樫淳一、竹村泰司、SPM スクラッチナノ加工による強磁性細線の狭窄化、平成 20 年 電気学会 基礎・材料・共通部門大会、千葉、2008 年 8 月 21 日。
- (11) 菅沼秀教、進藤僚平、山田努、白樫淳一、竹村泰司、SPM 局所酸化における反応電流の探針-試料間距離依存、平成 20 年 電気学会 基礎・材料・共通部門大会、千葉、2008 年 8 月 21 日。
- (12) 竹村泰司、白樫淳一、SPM リソグラフィにより作製した磁性ナノ構造の評価、電気学会マグネティックス研究会、MAG-08-03、仙台、2008 年 8 月 4 日。
- (13) Y. Shimada, D. Iwata, T. Yamada, J. Shirakashi, Y. Takemura, Measurement of Reaction Current during Local Oxidation of Si and NiFe using Atomic Force Microscope, The 2008 International Conference on Nanoscience + Technology (ICN+T2008), NO-TuP8, Denver, USA, July 22, 2008.
- (14) Yasushi Takemura and Jun-ichi Shirakashi, Magnetic and electrical properties of magnetic nano-devices fabricated by atomic force microscope, Moscow International Symposium on Magnetism (MISM2008), 1RP-B-9, Moscow, Russia, June 21, 2008.
- (15) 進藤僚平、寫田泰之、山田努、白樫淳一、竹村泰司、AFM 局所酸化における反応電流のカンチレバーたわみ量依存、2008 年春季 第 54 回応用物理学会関連連合講演会、27a-ZS-6、東京、2008 年 3 月 27 日。
- (16) Noriyuki Ishii, Tatsuhiko Yokoyama, Hiroki Shibata, Tsutomu Yamada, Jun-ichi Shirakashi, Yasushi Takemura, Magnetization Switching of Magnetic Submicron Structure Fabricated by Atomic Force Microscope, The International Workshop on Nano-structured Materials and Magnetism (NMM2008), P-7, Abstract Book p.27, Okinawa, Feb. 11, 2008.
- (17) Ryo-hei Shindo, Yasuyuki Shimada, Tsutomu Yamada, Jun-ichi Shirakashi and Yasushi Takemura, Dependence of cantilever deflection in AFM nano-oxidation, The International Workshop on Nano-structured Materials and Magnetism (NMM2008), P-16, Abstract Book, p.36, Okinawa, Feb. 11, 2008.
- (18) Shunsuke Hasegawa, Shogo Yamada, Tsutomu Yamada, Jun-ichi Shirakashi and Yasushi Takemura, AFM nano-oxidation of NiFe thin films capped with Al-oxide layers for planar-type tunnel junction, The International Workshop on Nano-structured Materials and Magnetism (NMM2008), P-15, Abstract Book, p.35, Okinawa, Feb. 11, 2008.
- (19) Yasuyuki Shimada, Shunsuke Hasegawa Tsutomu Yamada, Jun-ichi Shirakashi and Yasushi Takemura, Control of reaction current during AFM nano-oxidation of ferromagnetic thin films capped with insulating layers, The 52nd Magnetism and Magnetic Materials Conference, FT-09, Tampa, FL, USA, Nov. 3, 2007.
- (20) 長谷川俊祐、山田彰悟、石橋禎史、山田努、白樫淳一、竹村泰司、Al 酸化層をコートしたプレーナ型強磁性トンネル接合の作製、第 31 回 日本応用磁気学会 (MSJ) 学術講演会、11aC-10、東京、2007 年 9 月 11 日。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹村 泰司 (TAKEMURA YASUSHI)
 国立大学法人横浜国立大学・大学院工学研究
 院・教授
 研究者番号：30251763

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし