

「超高速・超省電力高性能ナノデバイス・システムの創製」

平成14年度採択研究代表者

小柳 光正

(東北大学大学院工学研究科 教授)

「共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリの創製」

1. 研究実施の概要

我々はトンネルするエネルギーバンドの状態、トンネル電子のスピン状態、電荷状態を考慮した非対称トンネル効果に基づく新しい「共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリ」を提案している。本研究プロジェクトでは、この「共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリ」の動作確認と、それを用いたメモリベースの新しい超高速、低電力回路の可能性を示すことを目的としている。これまで、従来より約2桁高いドット密度 ($2 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$) をもつ金属ナノドットの成膜方法を確立するとともに、この方法を用いて形成したFePtナノドットが室温で良好な磁化特性を示すことを確認した。しかし、600°C以上でRTA(Rapid Thermal Anneal)を行うと、ナノドットの粒径の急速な増大とシリコン基板近傍へのナノドットの拡散が顕著となって、良好なメモリ特性を示さなくなることが判明した。また、ナノドット膜とブロック酸化膜の間にシリコン窒化膜を挿入することによってナノドット粒径の急速な増大と拡散をある程度防げることも明らかになった。更に、微細FePt浮遊ゲートをもつMOS構造を用いて磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリの基本的な動作が可能であることを確認した。

2. 研究実施内容

本研究では磁気ナノドットによる磁気現象をMOSトランジスタに取り込んだ新しい不揮発性メモリを提案し、その動作確認とそれを用いたメモリベースの新しい超高速、低電力回路の可能性を示すことを目的としている。この磁気ナノドットメモリの断面構造の一例を図1に示す。図からわかるように、この磁気ナノドットメモリは、磁界によってスピンの方向を変えられる自由磁性体層と磁気ドットから成る固定磁性体層から構成されるMTJ (Magnetic Tunnel Junction) と、増幅素子として働くSOI・MOSトランジスタが融合したような構造をして

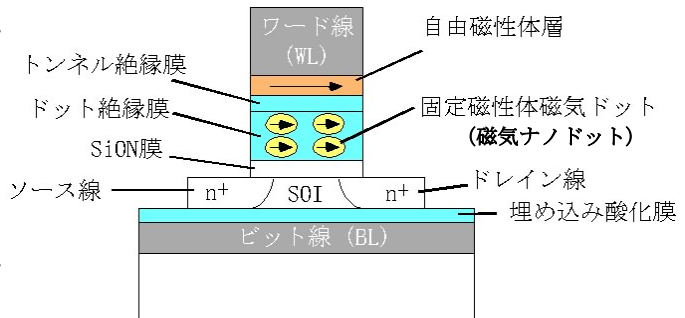


図1. 共鳴磁気トンネル不揮発性メモリの構造

いる。磁気ナノドットのTMR効果を利用して書き込み、保持特性の改善を行うとともに、磁気ナノドットの保持する電荷によるMOSトランジスタのしきい値電圧の変化を信号として読み出す。磁気ナノドットを用いることによって、従来の微細化限界を越えた高性能の不揮発性メモリが実現できるものと期待される。

前年度は磁気ナノドット材料としてCoを採用し、磁気ナノドットを有するMOS構造を作製して、電流-電圧特性、容量-電圧特性を評価することにより、磁気ナノドット不揮発性メモリの動作の可能性を確認できた。しかし、電流-電圧特性、容量-電圧特性とも不揮発性メモリの基本となるヒステリシス特性を示すものの、磁気書き込み特性を含めて必ずしも十分な再現性が得られていなかった。

そこで、今年度は、磁気ナノドット材料としてCoよりも良好な磁気特性を示すFePtを採用して、その磁化特性を詳細に調べた。

図2に、FePtナノドット膜を有するMOS構造のTEM断面観察写真を示す。FePtナノドットが 10^{13} cm^{-3} 以上の高密度で多層に形成されている。ナノドットの平均粒径も1.2nmと極めて小さい。このようなFePtナノドット膜の磁化特性をSQUIDにより測定した結果を図3

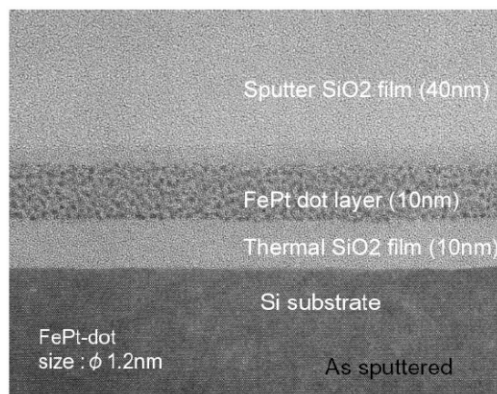


図2. FePt磁気ナノドットのTEM断面観察写真

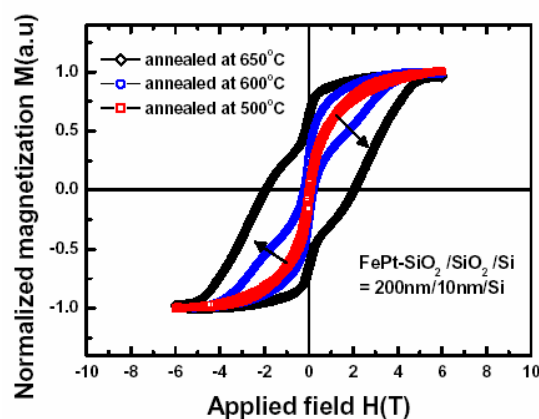


図3. FePt磁気ナノドットの磁化特性

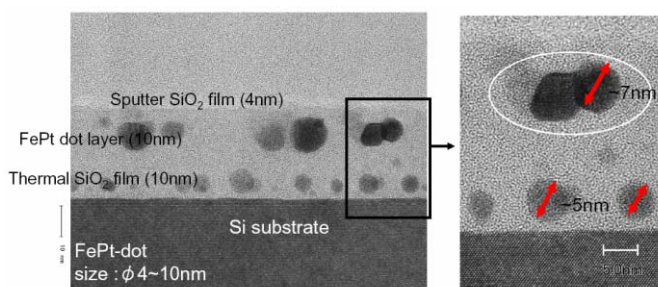


図4. RTA後のFePtナノドットのTEM断面観察写真

に示す。図からわかるように、as-depo 状態のFePtナノドット膜ではヒステリシスが見られないが、600°C以上でアニールした膜では顕著なヒステリシスが観測され、FePtナノドットが良好な磁性を示すことが確認された。しかし、このようなFePtナノドット膜をもつMOS構造(NiFeゲート)の容量-電圧特性は印加する磁場の方向を変えても変わらなかった。また、650°CでアニールしたMOS構造では、シリコン基板側からナノドットへ向けて電子が注入されることによって生じるヒステリシスが観測された。本研究で提案する磁気ナノドット不揮発性メモリでは、NiFeゲート側からナノドットへ向けて電子が注入されなければならないため、このままでは磁気ナノドット不揮発性メモリとして動作しないことになる。

この原因を探るため、アニールによるFePtナノドットの形状と構造の変化をTEMにより観察した。図4に、650°C、10分 RTA 後のTEM断面観察写真を示す。図から、650°C、10分のRTA を行うと、ナノドットの粒径が急激に大きくなるとともに、FePt ナノドットがブロック酸化膜—シリコン基板界面近傍にまで拡散してくることがわかる。ブロック酸化膜—シリコン基板界面近傍にまで拡散してきたFePt ナノドットはシリコン基板側からの電子の注入を促進すると考えられるので、アニールによるナノドット粒径の急増とシリコン基板表面近傍へのナノドットの拡散を極力抑制する必要がある。処で、図4に示したようなRTA によるナノドットの粒径の急激な増加と拡散は RTA 特有のアニール特性にあると考えられる。RTAは赤外線ランプを用いた急速アニールであるが、シリコン酸化膜中にFePt ナノドットが分散されたFePtナノドット膜を赤外線ランプを用いて急速アニールすると、FePtナノドットに集中的に赤外線のエネルギーが吸収されることになる。そのため、FePt ナノドットの温度が局部的に異常に高くなり、FePtナノドットの熱的分解や拡散、凝集が起こると考えられる。実際、RTA でなく通常の電気炉アニール(窒素ガス雰囲気)を行うと、

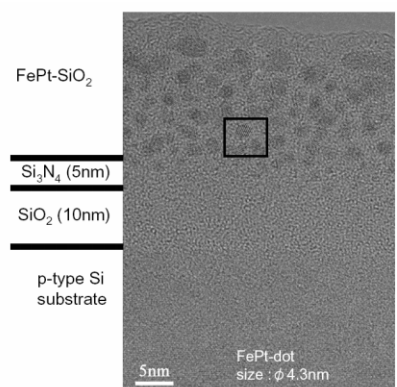


図5. シリコン窒化膜挿入後のFePtナノドットのTEM断面観察写真

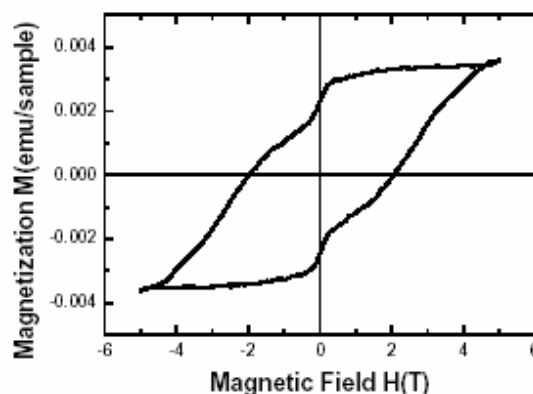


図6. シリコン窒化膜挿入後のFePtナノドットの磁化特性

FePtナノドットのみが局部的に熱せられるということが避けられることから、900°C、30分のアニールでも粒径の急激な増加と拡散はある程度抑えられことがわかった。以上のことから、良好な特性をもつ磁気ナノドット不揮発性メモリを実現するためには、粒径の増大と拡散を抑えながら良好な磁気特性をもつFePtナノドットを形成することが重要となる。そこで、FePtナノドット膜形成条件の最適化や、真空中での磁場中アニール、FePtナノドット拡散抑止膜の挿入などによるFePtナノドット膜の特性改善効果について検討した。図5はFePtナノドット膜とブロック酸化膜の間に拡散抑止膜としてシリコン窒化膜を挿入してRTA を行った場合の TEM 断面観察写真である。図からわかるように、RTA 後にFePtナノドットがシリコン窒化膜中に若干入り込んでいることから、完全にはナノドットの拡散を防止できないが、ブロック酸化膜中にはFePtナノドットが観測されないことからある程度の拡散抑止はあると考えられる。また、その結果として、ナノドット粒径の急激な増加も抑制されている。XRD 分析の結果から、600°C以上のRTAで形成したFePtナノドット膜は磁気特性に優れたFePt-L10 構造であることもわかった。このようなFePt-L10 構造を有

するナノドット膜のSQUIDにて測定した磁気特性を図6に示す。図から、このようなFePtナノドットは22kOe以上の大きな保磁力を持つ強磁性体となっていることがわかる。

なお、磁気トンネル不揮発性メモリの動作の可能性を検討するために、電子注入・蓄積部をナノドットではなくFePtの微細浮遊ゲート(0.5 μ m x 1.0 μ m)にて形成したMOS構造(NiFeゲート)を作製し、容量-電圧特性の評価も行った。その結果、図7に示すように、容量-電圧特性のヒステリシスの大きさが印加する磁場の方向により異なることから、磁気トンネル不揮発性メモリ動作の基本となる磁気トンネル効果の確認にも成功した。今後は、この微細FePt浮遊ゲートを良好な磁気特性をもつFePtナノドットに置き換えて、磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリの試作を行う。

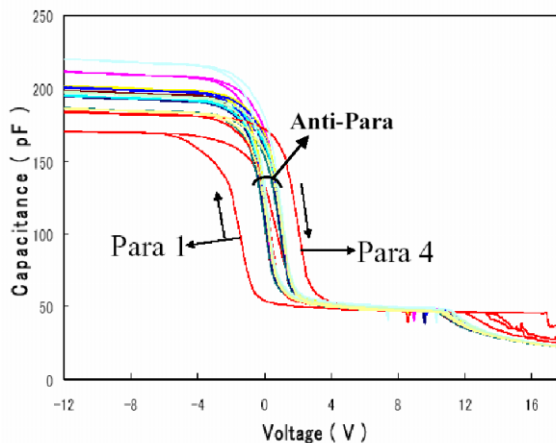


図7. 微細FePt浮遊ゲートをもつMOS構造の容量-電圧特性

3. 研究実施体制

磁気ナノドットメモリ設計・試作グループ

- ① 研究分担グループ長：小柳 光正（東北大学大学院工学研究科、教授）
- ② 研究項目：共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリの試作・評価

モデリンググループ

- ① 研究分担グループ長：名取 研二（筑波大学大学院物理工学科、教授）
- ② 研究項目：共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリの理論解析

ナノドット評価グループ

- ① 研究分担グループ長：宮尾 正信（九州大学大学院システム情報科学研究院、教授）
- ② 研究項目：共鳴磁気トンネル・ナノドットの形成・および評価

4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

(1) 論文発表

- Novel Silicon On Insulator Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors with Buried Back Gate
[Japanese Journal of Applied Physics(JJAP), Vol. 43(No. 4B), (2004)2140-2144]
Hyuckjae Oh, Hoon Choi, Takeshi Sakaguchi, Jeoung-Chill Shim, Hiroyuki

Kurino and Mitsumasa Koyanagi

- Proposal of New Nonvolatile Memory with Magnetic Nano-Dots
[Japanese Journal of Applied Physics(JJAP), Vol.43(No.4B), (2004)2203-2206]
Takeshi Sakaguchi, Youn-Gi Hong, Motoki Kobayashi, Masaaki Takata, Hoon Choi, Jeoung-Chill Shim, Hiroyuki Kurino and Mitsumasa Koyanagi
- Solid-Phase Crystallization of β -FeSi₂ Thin Film in Fe/Si Structure
[Thin Solid Films(2004), Vol.461, 68-71]
Y. Murakami, A.Kenjo, T. Sadoh, T. Yoshitake, and M. Miyao ,
- Fomation of SiGe/ β -FeSi₂ Superstructures from Amorphous Si/FeSiGe Layers
[Thin Solid Films(2004), Vol.461, 77-80]
T. Sadoh, M. Owatari, Y. Murakami, A. Kenjo, T. Yoshitake, M. Itakura, T. Enokida, and M. Miyao
- Impurity Conduction in Ion Beam Synthesized β -FeSi₂/Si
[Thin Solid Films(2004) Vol.461, 198-201]
Y. Murakami, Y. Tsukahara, A. Kenjo, T. Sadoh, Y. Maeda and M. Miyao
- Effect of Bias-treatment in the CVD Diamond Growth on Ir(001)
[Diamond & Related Materials13(2004), 2081-2087]
S. Kono, T. Takano, T. Goto, Y. Ikejima, M. Shiraishi, T. Abukawa, T. Yamada, and A. Sawabe
- Adsorption of thiophene on a Si(001)-2x1 surface studied by photoelectron spectroscopy and diffraction
[Applied Surface Science237(2004), 75-79]
M. Shimomura, Y. Iejima, K. Yajima, T. Yagi, T. Goto, R. Gunnella, T. Abukawa, Y. Fukuda, and S. Kono
- Structural study of 1,4-cyclohexadiene adsorption on Si(001) surface by low energy photoelectron diffraction
[Surface Science 566-568(2004), 618-623]
R. Gunnella, M. Shimomura, M. Munakata, T. Takano, T. Yamazaki, T. Abukawa and S. Kono
- Reactive Platinum-Manganese Etching using Pulse-Time-Modulate Chlorine Plasma and Post-Corrosion Treatment
[Journal of Vacuum Science and Technology, A22(4) (2004),1093-1100]
Shinnya Kumagai, Toshiaki Shiroiwa and Seiji Samukawa
- 50nm Gate Electrode Electrode Patterning Using A Neutral-Beam Etching System
[Journal of Vacuun Science and Technology, A22(4) (2004),1506-1512]
Shuichi Noda, Hiromoto Nishimori, Tohru Iida, Tsunetoshi Arikado,

- Katsunori Ichiki, Takuya Ozaki and Seiji Samukawa,
- Ultraviolet-induced Damage in Fluorocarbon Plasma and Its Reduction by Pulse-time-modulated Plasma in CCD Image Sensor Wafer Processes
[Journal of Vacuum Science and Technology, B22(6) (2004), 2818-2822]
Mitsuru Okigawa, Yasushi Ishikawa, Yoshinori Ichihashi and Seiji Samukawa
 - On-wafer Monitoring of Plasma-induced Electrical Current in Silicon Dioxide to Predict Plasma Radiation Damage
[Journal of Vacuum Science and Technology, B23(1) (2005), 173-177]
Mitsuru Okigawa, Yasushi Ishikawa and Seiji Samukawa,
 - Highly Selective Low-damage Processes using Advanced Neutral Beams for Low-k Films
[Journal of Vacuum Science and Technology, B23(1) (2005), 210-216]
Hiroto Ohtake, Nobuhiko Inoue, Takuya Ozaki and Seiji Samukawa
 - Magnetic force and optical force sensing with ultrathin silicon resonator
[Review of Scientific Instruments, 74 (2003), 5141-5146]
Takahito Ono, Masayoshi Esashi
 - Time dependence of energy dissipation in resonating silicon cantilevers in ultrahigh vacuum
[Applied Physics Letters, 83 (2003), 1950-1952]
Takahito Ono, Dong F. Wang, Masayoshi Esashi
 - Crystallographic influence on nanomechanics of (100)-oriented silicon resonators
[Applied Physics Letters, 83, 15 (2003), 3189-3191]
D.F. Wang, Takahito Ono, Masayoshi Esashi
 - Ultrathin single-crystalline-silicon cantilever resonators: Fabrication technology and significant specimen size effect on Young's modulus
[Applied Physics Letters, 83 (2003), 3081-3083]
Xinxin Li, Takahito Ono, Yuelin Wang, Masayoshi Esashi

(2) 特許出願

H16年度特許出願件数：2件（CREST研究期間累積件数：2件）