

「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（磁気ナノドットメモリ）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。このような磁気ナノドットメモリの浮遊ゲート電極として働く固定磁性体磁気ナノドットには、 $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 以上のドット密度と 1 K0e 以上の高い保磁力、400℃以上の耐熱性が要求される。これまで、従来より約 2 桁高いドット密度 ($2 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$) をもつ磁気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明らかにした。具体的には、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 600℃以上で RTA (Rapid Thermal Anneal) を行くと、22 K0e 以上の大きな保磁力を持つ FePt 磁気ナノドットが得られることを明らかにした。また、In-situ アニールでは、800℃という高温のアニールを行っても、FePt ナノドットが良好な磁化特性を示すことがわかった。In-situ アニールでは単層のナノドット膜を形成することもできた。このような FePt 磁気ナノドット膜の磁化の状態を電子線ホログラフィーによって確認する実験も行った。更に、磁場中アニールの効果についても検討した。その結果、アニール中の磁場の強さを大きくすると FePt ナノドットの結晶構造が fcc 構造から強磁性を発現する fct (L_{10}) 構造へと相変換を起こすことがわかった。また、磁場中アニール中の磁場の強さを大きくするとともに磁化特性も改善され、700℃ (1 時間)、20 K0e の磁場中アニールで、20 K0e 以上という大きな保磁力が得られた。このような FePt 磁気ナノドットを浮遊ゲートに用いた MOS キャパシタを作製して、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も確認した。また、ダマシングートプロセスを確立して、ゲート長 $0.18 \mu\text{m}$ という微細制御ゲート電極の形成も可能となったことから、今後はこの技術を用いて実際にメモリトランジスタの試作を行う。

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メモリ構造の一例を図 1 に示す。図からわかるように、この磁気ナノドット

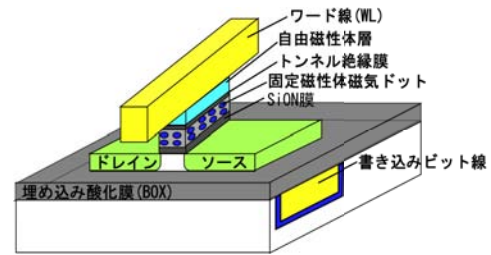


図1 共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリの構造

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。

このような磁気ナノドットメモリ実現の鍵を握っているのが、固定磁性体層として働く磁気ドットの磁化特性とトンネル酸化膜の特性である。前年度は磁気ナノドット材料として FePt を中心に、磁気ナノドットの磁化特性を評価した。磁気ナノドットには 1 KOe 以上の高い保磁力と 400℃以上の耐熱性が要求される。そこで、熱処理(アニール)による FePt ナノドットの磁化特性の変化を重点的に評価した。その結果、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 600℃以上で RTA (Rapid Thermal Anneal) を行うと、22 KOe 以上の大きな保磁力を持つ FePt 磁気ナノドットが得られることがわかった。今年度は、磁気ナノドットの熱処理による効果について更に詳細に評価した。熱処理方法として、RTA 以外に、ナノドット膜形成後そのまま超高真空中で熱処理する In-situ アニールと、真空中で磁場を印加しながら熱処理する磁場中アニールも検討した。その結果、In-situ アニールでは、800℃という高温のアニールを行っても、FePt ナノドットが良好な磁化特性を示すことがわかった。また、このような高温のアニールを行っても、FePt がナノドット膜下のブロック酸化膜（熱酸化膜）中に拡散したり、ナノドットが凝集して巨大化するような現象は見られなかった。In-situ アニールでは、600℃以上のアニールで、10 KOe 以上という大きな保磁力が得られている。なお、In-situ アニールではナノドットの粒径や密度の制御も容易で、条件を最適化すれば、図 2 に示すように、単層のナノドット膜を形成することも可能である。このような FePt 磁気ナノドット膜の磁化の状態を電子線ホログラフィーによって観察することを試みた。800℃で、In-situ アニールした FePt ナノドット膜（平均粒径 6～8 nm）の観察結果を図 3 に示す。図 3 (a) は FePt ナノドットの TEM 観察写真、図 3 (b) は電子線ホログラフィーの位相写真である。図 3 (c) はその合成写真である。図 3 (b) の位相写真の白線パターンの間隔からナノドッ

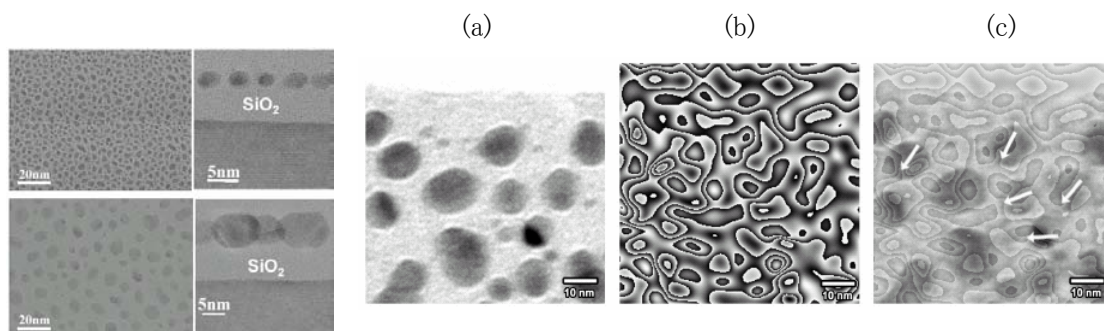


図2 In-situ アニールにより形成した単層 FePt ナノドットの表面観察写真および SEM 断面観察写真

図3 In-situ アニールした FePt ナノドットの電子線ホログラフィー観察結果

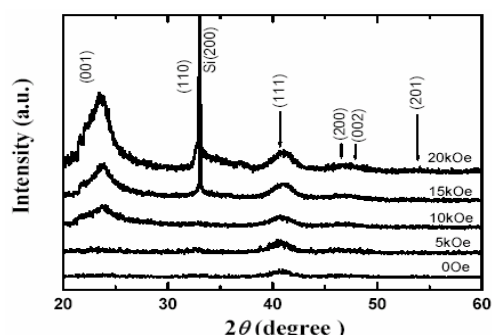


図4 磁場中アニールした FePt ナノドットの X 線回折 (XRD) 結果

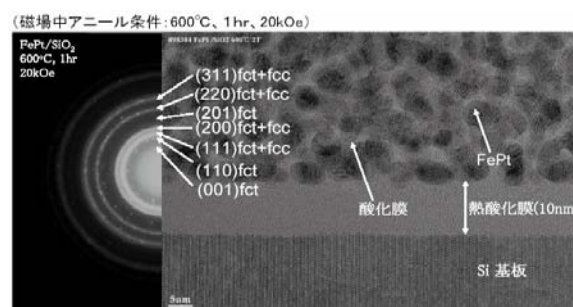


図5 磁場中アニールした FePt ナノドットの電子線回折 (SAD) 結果

トの磁化の強さを算出でき、17～29 kOe という値が得られた。この値は VSM や SQUID による磁化特性の測定結果ともよく一致している。また、図3 (c) には磁化の方向を白い矢印で示しているが、磁化の方向がある方向に揃う傾向が見られる。この理由は明らかではないが、磁気ナノドットメモリの実現と言う点では好ましい方向である。但し、このような小さな粒径の磁気ナノドットで電子線ホログラフィー・パターンを観察した例は少ないので、結果の信憑性については更なる検討が必要である。次に、磁場中アニールの結果について示す。図4は磁場中アニールした FePt ナノドットの X 線回折 (XRD) 結果である。図からわかるように、アニール中の磁場の強さを大きくするとともに FePt ナノドットの結晶構造は fcc 構造から強磁性を発現する fct (L_{10}) 構造へと相変換を起こしている。磁場中アニールによって fct (L_{10}) 構造が現れることは、図5の電子線回折 (SAD) 測定結果からも明らかである。図6に、磁場中アニールした FePt ナノドットの磁化特性を示す。図からわかるように、磁場中アニール中の磁場の強さを大きくするとともに磁化特性が改善されている。700°C (1 時間)、20 kOe の磁場中アニールで、20 kOe 以上という大きな保磁力が得られている。

良好な磁化特性を有する FePt 磁気ナノドットが形成できるようになったので、MOS キャパシタを作

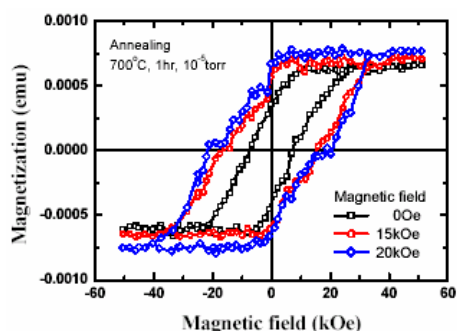


図6 磁場中アニールした FePt ナノドットの磁化特性

製してC-V特性を測定することにより磁気トンネル効果の評価を行った。作製した MOS キャパシタの構造を図7に示す。この MOS キャパシタは小さなゲート面積をもつ MOS キャパシタの集まりから成っている。このような小さなゲート面積をもつ MOS キャパシタを作製するためには、NiFe 制御ゲート電極のドライエッチが重要となるが、通常よく用いられる

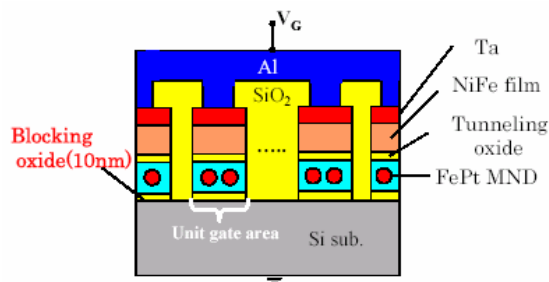


図7 磁気ナノドット MOS キャパシタの構造

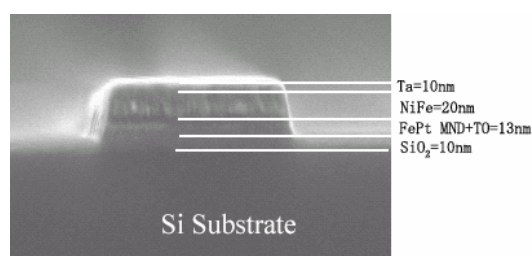


図8 微細 NiFe 制御ゲート電極の SEM 断面観察写真

反応性イオンエッチ (RIE) では良好な加工形状が得られなかった。そこで、イオンミリングにより微細 NiFe 制御ゲート電極の形成を試みた。その結果、図8に示すように、良好な形状をもつ微細 NiFe 制御ゲート電極の形成が可能となった。作製した MOS キャパシタの C-V 特性測定結果を図9に示す。この MOS キャパシタではトンネル酸化膜としてスパッタ SiO₂ 膜を用いている。図からわかるように、C-V 特性には NiFe 制御ゲート電極から FePt ナノドットへの電子のトンネリングによるヒステリシスが観測されていること、また、ヒステリシス特性が印加磁場の方向を変えることによって変わっていることから、磁気トンネル効果が観測されていると考えられる。しかし、印加磁場の効果がまだ小さいことや、C-V 特性にハンプ (瘤) が見られることから今後更に改善を要する。

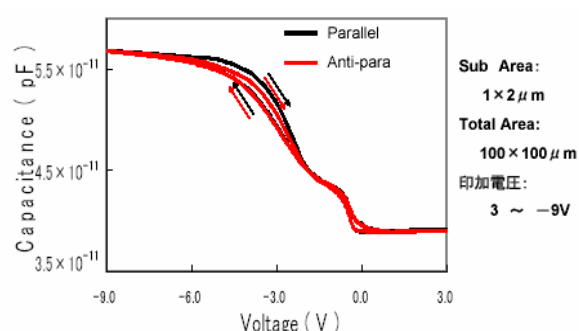


図9 FePt 磁気ナノドット MOS キャパシタの C-V 特性

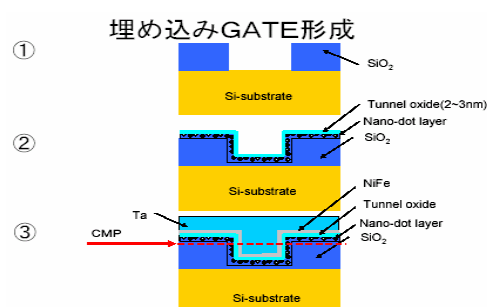


図10 ダマシゲートプロセスによる NiFe 制御ゲート電極形成工程

今年度は、磁気ナノドットメモリ試作のための技術の検討も始めた。磁気ナノドットメモリ試作のためには、NiFe 制御ゲート電極を CMP (Chemical Mechanical Polishing) を用いて形成するダマシゲートプロセスの確立が重要となる。これは、制御ゲート電極となる NiFe の耐熱性が低いために、メモリトランジスタのソース、ドレイン形成後に制御ゲー

ト電極を形成しなければならないからである。ダマシングートプロセスによるNiFe制御ゲート電極形成工程を図10に示す。図11は、NiFe制御ゲート電極が形成される領域となるシリコン酸化膜溝（トレンチ）を形成した後に、ブロック酸化膜（10 nm）、FePt ナノドット膜（10 nm）、トンネル酸化膜（3 nm）、NiFe 電極（10 nm）、Ta 電極（100 nm）を形成した後のSEM断面写真である。0.25 μm という微細な溝にNiFe/Ta 電極が比較的良好に埋め込まれている様子がわかる。この状態から、CMPにより不要部分のNiFe/Ta 電極を除去した後のSEM断面写真を図12に示す。図から、ゲート長 0.18 μm という微細制御ゲート電極がシリコン酸化膜溝に埋め込まれた状態で良好に形成されている様子がわかる。今後はこの技術を用いて実際にメモリトランジスタの試作を開始する。

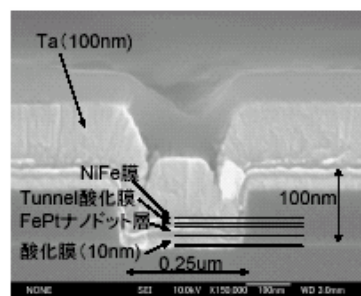


図11 NiFe/Ta膜形成後のSEM断面観察写真

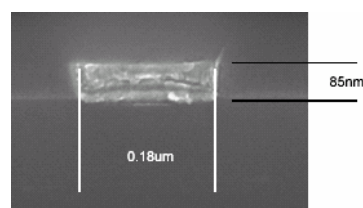


図12 ダマシングートプロセスにより形成したNiFe/Taゲート電極のSEM断面観察写真

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 物理工学系、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（原著論文）発表

- Fundamental Properties of Organic Low-k Dielectrics Usable in the Cu Damascene Process. [Japanese Journal of Applied Physics, 44 (11), (2005), 7876-7882]
Yutaka NOMURA, Fumihiko OTA, Hiroyuki KURINO and Mitsumasa KOYANAGI
- Study of neutral-beam etching conditions for the fabrication of 7-nm-diameter nanocolumn

- structures using ferritin iron-core masks
 [Journal of Vacuum Science and Technology, B23 (2005) pp. 534-539]
 Tomohiro Kubota, Tomohiro Baba, Hiroyuki Kawashima, Yukiharu Uraoka, Takashi Fuyuki, Ichiro Yamashita and Seiji Samukawa
- Reduction of plasma-induced damage in SiO₂ films during pulse-time-modulated plasma irradiation
 [Journal of Vacuum Science and Technology B23 (2005) pp.389-394]
 Yasushi Ishikawa, Mitsuru Okigawa, and Seiji Samukawa
 - In Vacuo Measurements of Dangling Bonds Created During Ar-Diluted Fluorocarbon Plasma Etching of Si Dioxide Films
 [Applied Physics Letters, 86(2005) pp.264104-1-264104-3]
 Kenji Ishikawa, Mitsuru Okigawa, Yashusi Ishikawa, and Seiji Samukawa
 - Highly Anisotropic Gate Electrode Patterning in Neutral Beam Etching Using F₂ Gas Chemistry
 [Journal of Vacuum Science and Technology B23 (2005) pp.2063-2068]
 Shuichi Noda, Yasuyuki Hoshino, Takuya Ozaki and Seiji Samukawa
 - Prediction of ultraviolet-induced damage during plasma processes in dielectric films using on-wafer monitoring techniques
 [Journal of Vacuum Science and Technology, A23 (6) (2005), pp. 1509-1512]
 Yasushi Ishikawa, Yuji Katoh, Mitsuru Okigawa, and Seiji Samukawa
 - An electron-spectroscopic view of CVD diamond surface conductivity
 [Diamond & Related Materials 14 (2005) pp.459-465]
 S.Kono, M.Shiraishi, T.Goto, T.Abukawa, M.Tachiki, H. Kawarada
 - Formation of one-dimensional molecular chains on a solid surface: Pyrazine/Si (001)
 [PHYSICAL REVIEW B72, 033303 (2005) pp.033303-1-03303-4]
 M. Shimomura, D. Ichikawa, and Y. Fukuda, T.Abukawa, T.Aoyama, and S.Kono
 - X-ray Photoelectron Diffraction Study of the Initial Stages of CVD Diamond Heteroepitaxy on Ir(001)/SrTiO₃
 [New Diamond and Frontier Carbon Technology Vol.15, No.6 (2005)363-371.]
 S. Kono, M. Shiraishi, N.I. Plusnin, T. Goto, Y. Ikejima, T. Abukawa, M. Shimomura, Z. Dai, C. Bednarski-Meinke and B. Golding
 - Simulation of Band Diagram for CVD Diamond Surface Conductivity
 [Japanese Journal of Applied Physics Vol.44, No.12, 2005, pp.8378-8382.]
 Shozo KONO and Yasuo KOIDE
 - Structural investigation of the Ca/Si(111)-(3x2) surface using photoelectron diffraction
 [e-Journal of Surface Science and Nanotechnology vol. 4 (2006) pp.166-169]

- Toshihiro Suzuki, Kazuyuki Sakamoto, Tadashi Abukawa and Shozo Kono
- Mass sensing with resonating ultra-thin silicon beams detected by a double-beam laser Doppler vibrometer
[MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY 15(2004) pp.1977-1981]
Takahito Ono and Masayoshi Esashi
 - Si multiprobes integrated with lateral actuators for independent scanning probe applications
[JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING 15(2005) pp.1224-1229]
Yoomin Ahn, Takahito Ono and Masayoshi Esashi
 - Micro instrumentation for characterizing thermoelectric properties of nanomaterials
[JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING 15(2005) Pp.1-5]
Takahito Ono, Chia-cheng Fan and Masayoshi Esashi

(2) 特許出願

H17 年度出願件数：0 件（CREST 研究期間累積件数：2 件）