

「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、この方法を用いてナノドットメモリを試作し、不揮発性メモリとして良好に動作することを確認した。さらに、磁性材料を用いて作製した磁気ナノドットの書き込み、保持特性を評価するために、磁気ナノドットを浮遊ゲートに用いたMOS構造を試作して評価を行った。その結果、電流-電圧特性、容量-電圧特性ともに磁化方向によって変化することを確認した。これらのことから、本研究プロジェクトで提案する「共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリ」が提案どおりに動作するとの確証を得た。

#### 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いる。磁気ナノドットのTMR効果を利用して書き込み、

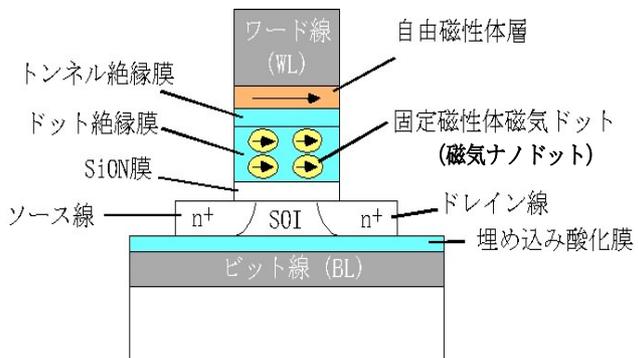


図1. 共鳴磁気トンネル不揮発性メモリの構造

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。このように、磁気ナノドットを用いることでフラッシュメモリで問題となっているトンネル酸化膜のスケーリングを可能とし、ドレイン・ターンオン効果、信頼性、歩留まり等を改善できる。そのため、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。

本研究においては磁気ナノドットの形成が最も重要なプロセスである。図2に、本研究で採用した新しい手法を用いて形成した磁気ナノドットの透過型電子顕微鏡写真を示す。写真からわかるように、直径2~3nmのCo磁気ナノドットが良好に形成されている。図3に、本研究の手法を用いて形成した磁気ナノドットの直径および密度を従来手法で形成したものと比較して示す。この図から、本研究の手法を用いると、従来に比べて著しく小さいナノドットを形成できることがわかる。また、ドット密度も $2 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ と従来のSiナノドットなどに比べて約2桁高くなっており、本研究で採用した手法が高密度のナノドット形成に適していることがわかる。なお、図中の太線はナノドットで占められる表面の割合を表すが、本研究で形成したナノドットの表面占有率は50%を超えており、限界値に近い値である。本研究ではCo以外の材料でも同様なナノドットの形成に成功している。

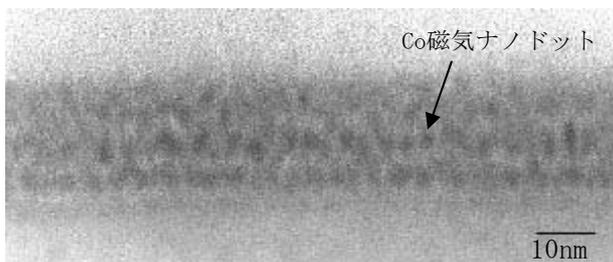


図2. Co磁気ナノドットのTEM断面観察写真  
ドット径：2~3nm ドット密度  $2 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$

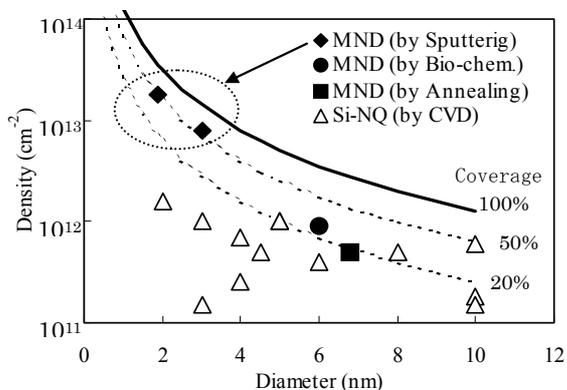


図3. ナノドット密度とドット径の関係  
黒抜きマーク：本研究  
白抜きマーク：従来研究

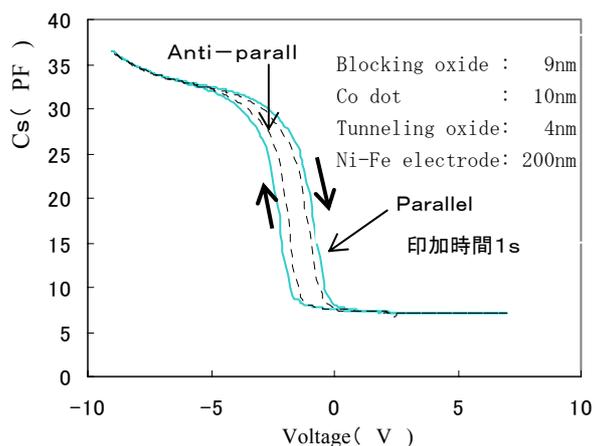


図4. Ni-Fe電極の磁化方向による磁気ナノドットMOS構造のC-V特性の変化

次に、磁気ナノドット不揮発性メモリの基本動作の確認のために、磁気ナノドットを有するMOS構造を作製し、電流-電圧特性、容量-電圧特性を評価した。試作した構造では9nmのブロック酸化膜の上に浮遊ゲートとしてCo磁気ナノドット、4nmのトンネル酸化膜を成膜した後、制御ゲートとして軟磁性パーマロイ電極を形成した。また制御ゲートの磁化方向は外部より印加した磁場で変化させた。その結果、電流-電圧特性、容量-電圧特性ともに磁化方向により変化することを確認できた。容量-電圧特性(C-V特性)の測定結果を図4に示す。このC-V特性のヒステリシスの向き(太い矢印)から、制御ゲート電極、磁気ナノドット間で電荷の授受が行われていることがわかる。また制御ゲート電極の磁化方向を反平行から平行に変えることでフラットバンド電圧、しきい値電圧ともに大きく変化することが確認できた。平行の場合は電子のトンネル確率が増加し、それによって多くの電子が磁気ナノドットへと移動して大きなフラットバンド電圧の変化となったと考えられる。現在、特性をさらに改善するために、磁性材料、成膜プロセスの検討ならびに動作特性の理論的解析を進めている。

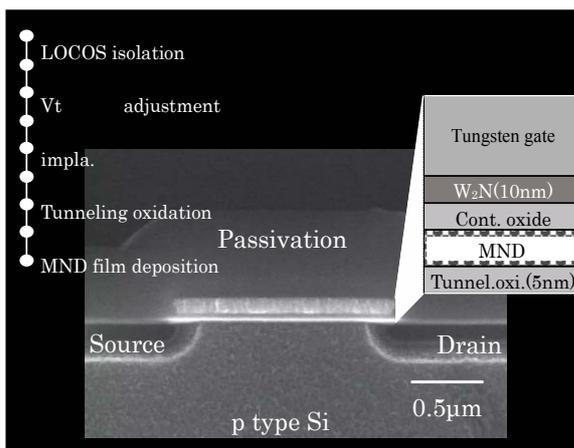


図5. 磁気ナノドットメモリのSEM断面観察写真

これらの実験を進める一方で読み出し特性を評価するために、磁気ナノドットを有する不揮発性メモリを試作した。但し、今回は磁気ナノドットの電荷保持特性と読み出し特性を評価することを主な目的としたため、制御ゲート電極はパーマロイではなくタングステンにより形成した。そのため、磁気ナノドットへの書き込みも電氣的に行った。図5に、試作した不揮発性メモリのSEM断面観察写真を示す。タングステンゲート電極とSi基板の間にトンネル酸化膜、磁気ナノドット層、制御ゲート酸化膜が形成されている。この

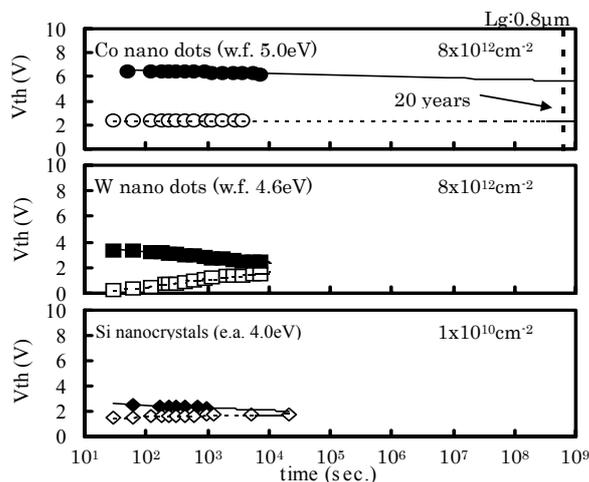


図6. 磁気ナノドットメモリの電荷保持特性

ような構成の磁気ナノドットメモリを用いて電氣的特性を評価したところ、5Vの書き込み電圧で2Vのしきい値電圧の変化を観測した。図6に、この磁気ナノドットメモリの電荷保持特性を示す。この図から、Coを用いた磁気ナノドットメモリで、20年以上の電荷保持

時間を保証できることが確認された。

### 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

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）

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

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）

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

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）

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

- Takeshi Sakaguchi, Youn-Gi Hong, Motoki Kobayashi, Masaaki Takata, Hoon Choi, JeoungChill Shim, Hiroyuki Kurino and Mitsusamsa Koyanagi, “Proposal of New Non-volatile Memory with Magnetic Nano-Dots”, JJAP(Japanese Journal of Applied Physics) Vol.43 No.4B(2004) pp2203-2206.
- Hyuckjae Oh, Hoon Choi, Takeshi Sakaguchi, JeoungChill Shim, Hiroyuki Kurino and Mitsumasa Koyanagi, “Novel SOI MOSFETs with Buried Back Gate”, JJAP(Japanese Journal of Applied Physics) Vol.43, No.4B(2004) pp.2140-2144.
- T.Sadoh, M.Owatari, Y.Murakami, A.Kenjo, T.Yoshitake, M.Itakura and M.Miyao, “Formation of b-FeSi<sub>2</sub>-xGe<sub>x</sub> by Ge-Segregation-Controlled Solid-Phase Growth of [a-Si/a-FeSiGe]<sub>n</sub> Multilayered Structure”, JJAP(Japanese Journal of Applied Physics), Vol.43 No.4B, (2004) pp.1879-1881
- JeoungChill Shim, Hyuckjae Oh, Hoon Choi, Takeshi Sakaguchi, Hiroyuki Kurino, Mitsumasa Koyanagi, “SiGe elevated source/drain structure and nickel silicide contact layer for sub 0.1 μm MOSFET fabrication”, Applied Surface Science Vol.224 (2004) pp.260-264.
- Tadashi Shimmura, Shinnosuke Soda, Mitumasa Koyanagi, Kazuhiro Hane and Seiji Samukawa, “Effects of fluorocarbon gas species on electrical conductivity and chemical structure of deposited polymer in SiO<sub>2</sub> etchings processes”, Journal of Vacuum Science and Technology, B22(2) (2004), pp.533-538
- Tomohiro Kubota, Tomohiro Baba, Hiroyuki Kawashima, Yukiharu Uraoka, Takashi Fuyuki, Ichiro Yamashita and Seiji Samukawa, “A 7nm-Nanocolum

Structure Fabricated by Using a Ferritin Iron-Core Mask and Low Energy Cl Neutral Beams”, Applied Physics Letters, 84, 9 (2004), pp.1555-1557

- Tadashi Shimmura, Shinnosuke Soda, Mitumasa Koyanagi, Kazuhiro Hane and Seiji Samukawa, “Mitigation of accumulated electric charge by deposited fluorocarbon film during SiO<sub>2</sub> etching”, Journal of Vacuum Science and Technology, A22(2) (2004), pp.433-436
- Mitsuru Okigawa, Yasushi Ishikawa and Seiji Samukawa, “Reduction of UV Radiation Damage in SiO<sub>2</sub> using Pulse-Time-Modulated Plasma and Its Application to CCD Image Sensor Processes”, Journal of Vacuum Science and Technology, B21(2003) pp.2448-2454.
- Seiji Samukawa, Yoichi Minemura and Seiichi Fukuda, “Control of nitrogen depth profile in ultrathin oxynitride films formed by pulse-time-modulated nitrogen beams”, Journal of Vacuum Science and Technology, A22(2) (2004), pp.245-249
- Seiji Samukawa, Shinya Kumagai and Toshiaki Shiroya, “Highly Anisotropic and Corrosionless PtMn Etching using Pulse-Time-Modulated Chlorine Plasma”, Japanese Journal of Applied Physics, 42 (2003) pp.L1272-L1274.
- 「光電子回折によるAu(111)上メチルチオレートの吸着構造解析」近藤 寛、岩崎正興、島田 透、雨宮健太、横山利彦、太田俊明、下村 勝、河野省三, 表面科学, 24巻8号 (2003) pp.448-454.
- Hiroto Ohtake, Hiroyuki Ishikawa, Takashi Fuse, Akira Koshiishi, Seiji Samukawa, “Highly Selective and High Rate SiO<sub>2</sub> Etching Using Argon-added C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>/CF<sub>3</sub>I Plasma”, Journal of Vacuum Science and Technology B21 (2003) pp2142-pp2146.
- Seiji Samukawa, Yoichi Minemura, and Seiichi Fukuda, “Ultrathin Oxynitride Films Formed by using Pulse-Time-Modulated Nitrogen Beams”, Japanese Journal of Applied Physics, 42 (2003) pp.L795-L797.
- S. Kono, T. Takano, M. Shimomura, T. Goto, K. Sato, T. Abukawa, M. Tachiki, and H. Kawarada, “Electron spectroscopy and diffraction study of the origin of CVD diamond surface conductivity”, New Diamond and Frontier Carbon Technology Vol.13, No.5, (2003) pp.247-255.
- H. Kondoh, M. Iwasaki, T. Shimada, K. Amemiya, T. Yokoyama, T. Ohta, M. Shimomura, and S. Kono, “Adsorption of thiolates to singly coordinated sites on Au(111) evidenced by photoelectron diffraction” Phys. Rev. Lett.90(2003) 066102-1~4.
- Electron-Spectroscopy and -Diffraction Study of the Conductivity of CVD Diamond (001)2x1 Surface”, S. Kono, T. Takano, M. Shimomura, T. Goto, K. Sato,

- T. Abukawa, M. Tachiki, and H. Kwarada, Surf. Sci. 529(2003) pp.180-188.
- T. Abukawa and S. Kono, "Semi-direct method for surface structure analysis using correlated thermal diffuse scattering", Progress in Surface Science 72(2003) pp.19-51.
  - M. Shimomura, M. Munakata, K. Honma, S.M. Widstrand, L. Johansson, T. Abukawa and S. Kono, "Structural Study of Benzene Adsorption on Si(001) Surface by Photoelectron Diffraction", Surf. Rev. Lett. 10(2003) pp.499-503.
  - M. Okigawa, Y. Ishikawa and S. Samukawa, "Plasma-Radiation-Induced Interface States in Metal-Nitride-Oxide-Silicon Structure of CCD Image Sensor and Their Reduction using Pulse-Time-Modulated Plasma", Japanese Journal of Applied Physics, 42 (2003) pp.2444-2450.
  - Mason NJ, Limao Vieira P, Eden S, Kendall P, Pathak S, Dawes A, Tennyson J, Tegeder P, Kitajima M, Okamoto M, Sunohara K, Tanaka H, Cho H, Samukawa S, Hoffmann SV, Newnham D, Spyrou SM "VUV and low energy electron impact study of electronic state spectroscopy of CF<sub>3</sub>I", International Journal of Mass Spectrometry, 223 (1-3) (2003) pp.647-660.

(2) 特許出願

なし