

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリの創製
2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点)

研究代表者

小柳 光正 (東北大学大学院工学研究科 教授)

主たる共同研究者

名取 研二 (筑波大学大学院数理物質科学研究科 教授)

宮尾 正信 (九州大学大学院システム情報科学研究院 教授)

3. 研究内容及び成果

本研究は、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た。磁気ナノドットメモリ設計・試作グループは東北大学・小柳グループにおいて磁気ナノドットメモリの設計、試作、評価を担当した。モデリンググループでは筑波大学・名取グループにおいて回路シミュレータに搭載可能な磁気ナノドットメモリのモデルを構築することを目的とした。また、ナノドット評価グループは九州大学・宮尾グループにおいて磁気ナノドット形成方法や磁気ナノドット形成用材料の検討と結晶学的、磁気材料的性質の解明を行った。以下グループごとの研究内容と成果を述べる。

磁気ナノドットメモリ設計・試作グループ

磁気ナノドット不揮発性メモリの構造

提案する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なる固定磁性体層とによって構成される MTJ (Magnetic Tunnel Junction) を備え、この MTJ と増幅素子として働く SOI・MOS トランジスタとを融合させた構造をした素子である。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応じて MOS トランジスタのしきい値電圧を変化させ、これを信号として読み出す。

磁気ナノドットの形成と特性評価

磁気ナノドットメモリを実現するためには、良好な磁気特性を有する磁気ナノドットの形成が鍵となる。本研究では、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した。この方法を用いて形成した FePt 磁気ナノドットの熱処理(アニール)による磁化特性の変化を評価した。アニール方法として、In-situ アニールと、磁場中アニールを検討した。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た。形成した 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、ナノドットの磁化の強さとして 17~29 KOe という値を得た。磁場中アニールの効果については、X 線回折 (XRD) と電子線回折 (SAD) を用いて結晶構造の変化を調べた。その結果、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、磁場中アニールでは、磁場の強さを大きくするとともに磁化特性が改善し、700 (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た。FePt ナノドット膜断面の電子線ホログラフィ測定から、各ドットの磁化の方向が膜に平行な方向に揃う傾向にあることがわかった。

磁気トンネル効果の検証

磁気トンネル効果を明確に観察するために、浮遊ゲートである固定磁性体層として平板状の磁性電極を用いた。MOS キャパシタを作製して磁気トンネル効果による C-V 特性、I-V 特性の変化を測定した。C-V 特性には自由磁性体層(制御ゲート)からの電子の注入、放出によるヒステリシスが観測された。ヒステリシスの大きさ (V_{FB}

の変動幅)は、自由磁性体層(制御ゲート)と固定磁性体層(浮遊ゲート)の磁化の方向が平行の時に大きく、反平行の時に小さくなるという結果が得られた。また、自由磁性体層(制御ゲート)と固定磁性体層(浮遊ゲート)の磁化の方向が平行の時に大きなトンネル電流が流れ、反平行の時にトンネル電流が減少するという結果も得られた。以上の結果から、固定磁性体層(浮遊ゲート)と自由磁性体層(制御ゲート)の間で、スピンの依存した磁気トンネル効果が起きることを確認できた。

磁気ナノドットメモリ素子の試作

磁気ナノドット(MND)メモリトランジスタの作製プロセスを検討した。磁気ナノドット(MND)メモリトランジスタは、制御ゲートとして耐熱性の低い NiFe 電極を用いるため、通常の CMOS プロセスは使えない。そこで、本研究では、メモリトランジスタを作製するために、メモリトランジスタのソース・ドレイン形成後に、磁気ナノドット膜と NiFe 制御ゲートを形成するダマシゲートゲート・プロセスと非自己整合ゲート・プロセスを開発した。この作製プロセスを用いて NiFe 磁気ナノドットメモリトランジスタの作製に成功した。作製したメモリトランジスタの電流-電圧特性には大きなヒステリシスが現れており、不揮発性メモリとして良好に働くことを確認できた。しかし、メモリトランジスタで、明瞭な磁氣的ヒステリシスはまだ確認できていない。今後、トンネル絶縁膜材料や磁気ナノドット形状の制御も含めて更なる検討が必要である。

磁気ナノドットメモリのモデリングおよびシミュレーション(筑波大学 名取グループ)

磁気ナノドットメモリの書き込み動作と読み出し動作の両方に対してモデル化を検討した。しかし、読み出し動作に関しては、通常のナノドットメモリと同様に、ナノドットに蓄積された電子によるしきい値電圧の変化としてモデル化できるので、本研究では書き込み動作を重点的にモデル化した。磁気ナノドットメモリの書き込み動作は、磁気書き込み動作と電気書き込み動作から構成されるので、それぞれ分けてモデル化を行った。磁気書き込み動作に関しては、2次元有限要素法(2D-FEM)を用いて磁界分布の解析を行い、この磁界を用いて NiFe 制御ゲートの磁化回転を LLG(Landau-Lifshitz-Gilbert)方程式を解くことにより磁気書き込み動作のモデル化を行った。

開発したモデルはコンパクトモデルとして SPICE シミュレータに組み込まれており、磁気書き込み動作と電気書き込み動作から成る磁気ナノドットメモリの書き込み動作をシミュレーションできる。さらに、本モデルは、半導体素子と磁性素子を融合した新しい素子への応用も可能であり、電子の数とエネルギーに加えてスピンの状態をも利用した新しいスピントロニクス集積回路の研究を活性化することにも貢献すると期待される。

磁気ナノドット材料の評価・解析(九州大学 宮尾グループ)

磁気ナノドットメモリ設計・試作グループと連携を取りながら、磁気ナノドット形成方法や磁気ナノドットの結晶学的、磁気材料学的性質の解明を行った。磁気ナノドット材料として当初 Co、Fe、FeSi、NiFe などの製膜、熱処理(アニール)について検討をおこない、ある程度まで良好な磁化特性を得たが、再現性に問題があり、FePt に評価の主体を移した。FePt ナノドットとトンネル酸化膜の原子の結合状態やバンド構造の解析を XPS(X線光電子分光法)を用いて行った。この結果、堆積直後は Fe、Pt とも一部酸化されているが、高温の超高真空中 In-situ アニールによって Fe、Pt が還元され純粋な FePt ナノドットに変化することが明らかになった。XPS のエネルギー損失スペクトルから SiO₂ 膜のバンドキャップエネルギーを算出する手法によっても高温の熱処理によって熱酸化膜の膜質が改善していることが判明した。

4. 事後評価結果

4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

本研究は、スピン状態による選択的なトンネリング現象とドットによるキャリア蓄積効果の二つの現象を、増幅機能を持つトランジスタと組み合わせることにより、新しいタイプの不揮発性メモリ機能を備えた磁気ナノドットメモリを実現する目標のもとに進めた研究である。最終的なデバイスの完成には到らなかったが、研究の過程で下記のとおり多くのインパクトのある成果が出ている。

[1]従来より約2桁高いドット密度($2 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$)をもつ磁気ナドットの成膜方法を確立した。

[2]FePt ナドットについて、アニール法の検討およびアニールによる酸化状態の解明とその還元について詳細に検討した。その結果、密度が高く、保磁力が高く、膜質も良好で、耐熱性のあるナドット層を形成するプロセスが確立できた。

[3]電子線ホログラフィを用いてナドットの磁化特性を微視的に評価することに成功した。

[4]磁気薄膜では電子のスピン選択トンネリングとメモリ効果を確認し、メモリの基本動作の原理実証を行った。

これらの課題に関する発表論文数は、英文 81 件、和文 1 件、口頭発表は、国際会議 69 件、国内会議 77 件、ポスター発表は国際会議 34 件、国内会議 29 件である。この他、国際会議で 16 件、国内会議で 8 件の招待講演を行っている。また、特許は国内 2 件を出願している。

4 - 2 . 成果の戦略目標・科学技術への貢献

最終的なメモリデバイスの完成に到っていないので本研究の結果が直ちに戦略目標に貢献するものではないが、研究の過程で今後の情報処理の飛躍的向上に役立つ重要な知見を得ている。スピンを用いたデバイスは、将来の低消費電力デバイスとして期待され、発展が見込めるものである。従って、本研究で確立した高密度ナドットの形成技術、大きな保磁力を持つ磁性ナドットの実現は、今後の磁性ナノ素子など次世代技術への貢献が期待できる。また、電子線ホログラフィを用いた微視的な磁化状態の観測は、磁気デバイスの重要な評価法となる可能性があり、世界をリードするレベルにある。これらの技術蓄積の上に立ってメモリ素子を実現し、メモリ情報の保持特性をトランジスタレベルで確立できれば、技術的インパクトは大きいものとなる。

4 - 3 . その他の特記事項(受賞歴など)

本研究で開発した磁気ナドットの形成技術は、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の高集積・複合MEMS製造技術開発事業(委託事業)の「MEMS - 半導体横方向配線技術の研究開発」プロジェクト(平成 18 年度～平成 20 年度)においても取り上げられ、チップ上に高性能インダクタを形成する手法として検討が進んでいる。また、金属ナドット(Co ナドット)を用いた半導体不揮発性メモリの実用化へ向けて、旭硝子(株)電子部材事業本部と共同研究を行った。

受賞としては、(1) 小柳光正:第1回光・電子集積技術業績賞(林厳雄賞)2004/3/30 応用物理学会、(2) 寒川誠二 応用物理学会プラズマエレクトロニクス賞 “Highly crystalline 5H-polytype of sp³-bonded boron nitride prepared by plasma -packets-assisted pulsed-laser deposition” 2004/3/30 応用物理学会プラズマエレクトロニクス分科会、(3) 小柳 光正 IEEE Jun-ichi Nishizawa Medal 2006/6/24、が挙げられる。