

知的人工物創成のための新構造磁性ドットメモリーの研究

大阪大学・工・材料科学専攻 中谷亮一、山本雅彦、遠藤 恭

1. はじめに

ヒューマノイドロボット、マイクロマシンなどを含むあらゆる知的人工物は、それ自身が自立的に制御されなくてはならず、そのためには大量の情報を処理し、格納しなければならない。この情報は、電源の一時的な遮断が生じても失われなくてはならず、また、知的人工物は宇宙空間などの特種環境で行動する状況も考えられることから、耐放射線特性、耐衝撃性などに優れた情報記憶メモリ素子を開発する必要がある。さらには、低消費電力、高速機能などの特性も重要な要素である。従来、幅広く用いられている半導体メモリ素子は、電源の一時的な遮断により情報が失われ、また、耐放射線特性に問題がある。これは、半導体メモリ素子が、情報の記憶方法として、電荷（電子）をキャパシタに格納するという方式を用いているためである。本研究では、上述の知的人工物用の超高集積メモリ素子における情報の格納方式として、微小磁性体のスピン（磁化）の向きを利用することに着目する。磁性体は、電源の供給が止まっても、その磁化状態を失わず、また、宇宙線をはじめとする放射線の影響も受けない。また、磁性体は耐衝撃性に優れ、高速で磁化反転することから、素子材料とした時の高速機能性にも問題がない。現在、磁性メモリ素子を実用化の際の問題としては、超高密度実装および低消費電力の特性が考えられる。本研究では、超高密度実装化および低消費電力化を実現する最も有力な方法として、磁化環流型メモリ構造を考案し、その実用化への課題を抽出、実用化への要素技術を確立することを目的としている。

2. 磁性メモリにおける従来の問題点及び本研究の方向

上述のように、磁性材料の磁化の向きを情報媒体とした磁性メモリは、情報の不揮発性、高速書き込み・読み出し、耐衝撃性などの特徴を有するため、将来の情報メモリ素子として有望である⁽¹⁾。しかし、従来から磁性メモリ素子への適用が考えられている長方形メモリセル⁽²⁾を高密度配列すると隣接するメモリセルからの漏洩磁界により、メモリセルに格納した情報が書き換わってしまう（図1参照）。また、情報のエラーが生じなくても、メモリセルの情報を書き換える時の磁界にばらつきが生じ、素子を機能させることが困難になる（図2参照）。そこで、本研究では、(1)隣接するメモリセルに磁気的な影響を与えないメモリセル形状、(2)容易に情報を書き込むことのできるメモリセル形状、(3)低い磁界で書き込み可能（低消費電力）なメモリセル形状について検討を行った。

3. 実験方法

電子線リソグラフィおよびイオンビームスパッタリング装置により試料を作製した。磁性ドットアレイの形状はSEMおよび原子間力顕微鏡(AFM)で評価した。また、磁化過程を磁気光学効果、磁化状態を磁気力顕微鏡(MFM)により評価した。磁化過程の解析には、マイクロマグネティクス・シミュレーションを用いた。

4. 実験結果

4-1 種々のメモリセル形状における磁化状態

本研究では、隣接するメモリセルへの磁気的影響を抑止するためには、磁束がメモリセルから漏洩しないことが本質的に求められるとの考えに基づき、図3(a)-(c)に示す種々の磁化環流構造を有するメモリセル形状（アニュラー型構造）を検討した⁽³⁾。これらの構造では、磁化の時計回りと反時計回りの状態に対して、「0」および「1」の2つの値を与える。本検討では、磁性膜の材料を Ni-20at%(10 nm)/Hf(5 nm)とした。また、比較例として、図3(d)-(f)に示す穴のないメモリセルについても検討を行った。

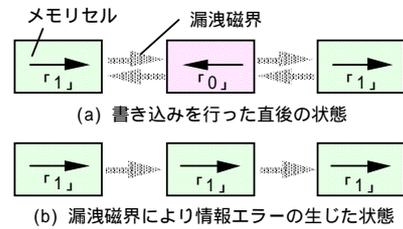


図1 従来型長方形メモリセルが近接した時の漏洩磁界の影響

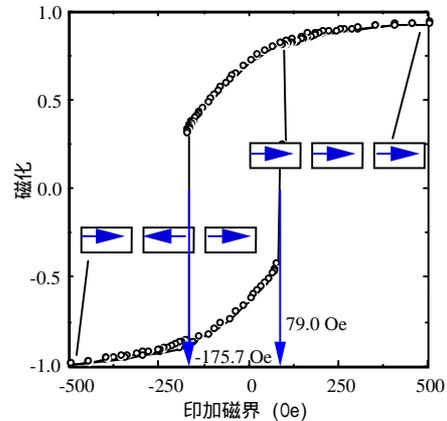


図2 情報反転磁界のばらつき

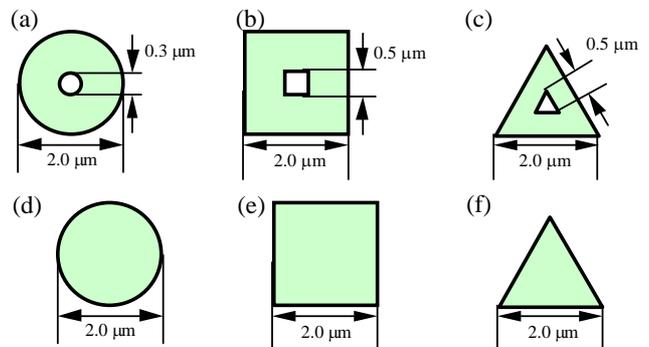


図3 検討した種々のメモリセル構造

図4に示すように、磁気光学効果による磁化過程の検討を行ったところ、円形アニュラードット、円形ドットとも、磁界が零に近い領域で、急激に磁化が変化する。これは、図中の模式図に示すように、磁化が円周に沿って還流しているためと考えられる。

次に、磁気力顕微鏡(MFM)による磁化状態の観察を行った。図5(a)に示すように、円形アニュラードットでは、その形状以外の像は見られない。これは、図5(b)に示すように、磁化が円周に沿って回っており、ドットの外に磁束が漏洩していないことを示す。これに対して、円形ドットの場合、その中心部で白いスポットが観察される。これは、円周付近では磁化が円周に沿って回っているが、中央部で磁化が膜面垂直方向を向き、磁束が漏洩していることを示す。

次に四角形アニュラードットおよび四角形ドットについて同様の検討を行った。図6に磁気光学効果による磁化過程の検討結果を示す。印加磁界の方向は、四角形の辺の方向および対角線の方向とした。図のように四角形アニュラードットでは、磁界の向きを変えても、磁化過程に大きな変化はない。これに対し、四角形ドットでは、辺の向きに磁界を印加した場合よりも、対角線方向に磁界を印加した場合の方が保磁力が低い。これは、四角形ドットでは、対角線の方向が磁化容易方向であることを示す。

四角形アニュラードットおよび四角形ドットの磁気力顕微鏡像を図7に示す。図のように、四角形アニュラードットおよび四角形ドットは、複雑な磁区構造を示す。四角形ドットのMFM像には、この像より予想される磁化の向きを示してある。なるべく磁化が外に漏洩しないように磁区構造が作られ、静磁エネルギーを低下させている。これに対し、四角形アニュラードットは、さらに複雑な磁区構造を示している。この状態では、円形アニュラードットの場合とは異なり、磁

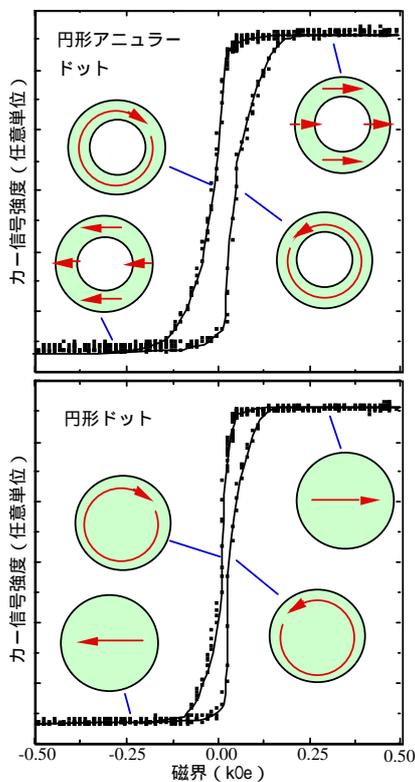


図4 円形ドット・円形アニュラードットの磁気光学効果曲線
Ni-20at%Fe(10 nm)/Hf(5 nm)、外径 2 μ m

束がドットの外に漏洩しているものと考えられる。従って、四角形アニュラードットは、磁性メモリセルには適していないことがわかる。

三角形アニュラードットおよび三角形ドットに対しても同様の検討を行った。図8に示すように、印加磁界の向きに

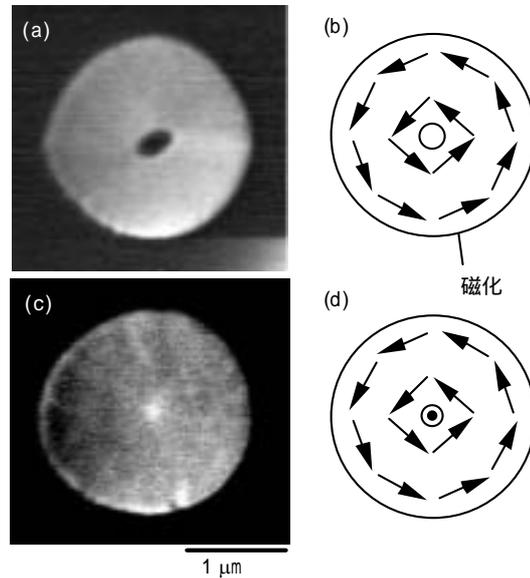


図5 Ni-20at%Fe(10 nm)/Hf(5 nm)ドットの磁化状態
(a) 円形アニュラードットのMFM像、(b) 円形アニュラードットの磁化状態の模式図、(c) 円形ドットのMFM像、(d) 円形ドットの磁化状態の模式図

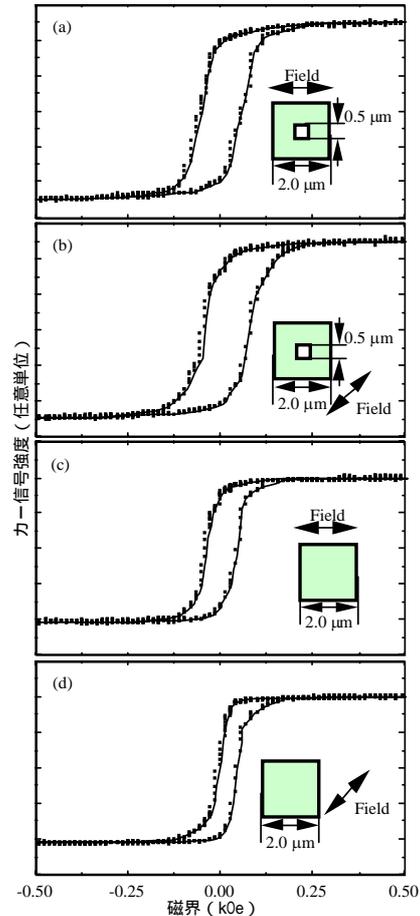


図6 四角形ドット・四角形アニュラードットの磁気光学効果曲線
Ni-20at%Fe(10 nm)/Hf(5 nm)、一辺 2 μ m

より、磁気飽和の様子が異なるために、複雑な磁化過程が見られる。また、図9に見られるように、三角形アニュラード

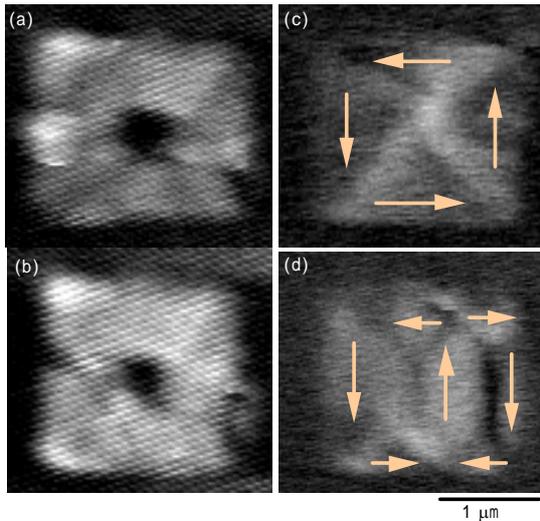


図7 Ni-20at%Fe(10 nm)/Hf(5 nm)ドットの磁化状態
(a), (b) 四角形アニュラードドットの磁化状態のMFM像、
(c), (d) 四角形ドットの磁化状態のMFM像

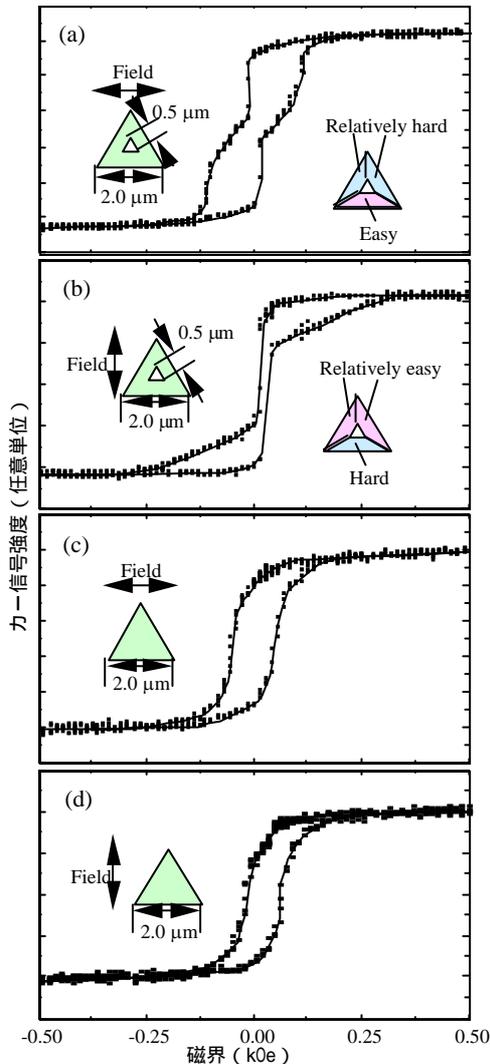


図8 三角形ドット・三角形アニュラードドットの磁気光学効果曲線
Ni-20at%Fe(10 nm)/Hf(5 nm)、一辺 2 μm

ットおよび三角形ドットは磁束を漏洩させており、磁性メモリセルには適していないことがわかる。

以上の検討により、円形アニュラードドットのみが、ドット外へ磁束を漏洩せず、隣接メモリセルに磁気的な影響を与えないことがわかった。

4-2 リング型メモリセルに対する情報の書き込み

前述のように、円形アニュラード型ドット(リング型ドット)は、ドットの外部に磁束を漏洩しないため、隣接するメモリセルに磁気的な影響を与えない理想的なメモリセル形状である。しかし、リング形状のドットに対して、時計回り・反時計回りの磁化状態を与えるためには、時計回り・反時計回りの磁界をドットに印加しなくてはならない。このような磁界は、膜面垂直方向に電流を流すことにより発生できる。

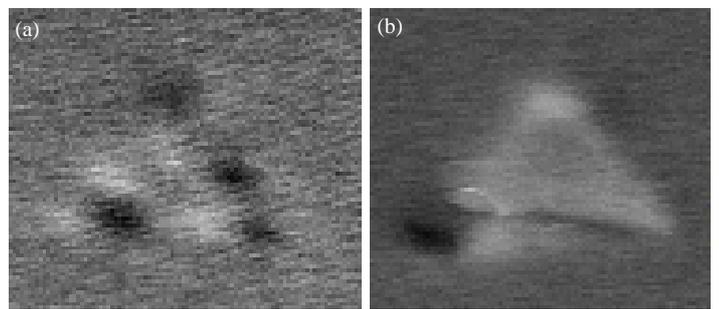


図9 Ni-20at%Fe(10 nm)/Hf(5 nm)ドットの磁化状態
(a) 三角形アニュラードドットの磁化状態のMFM像、
(b) 三角形ドットの磁化状態のMFM像

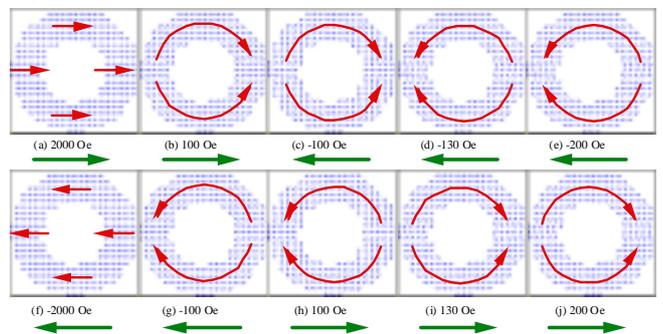


図10 通常のリング形状を有するメモリセルにおける磁化の向きの変化
Ni-20at%Fe(5 nm)

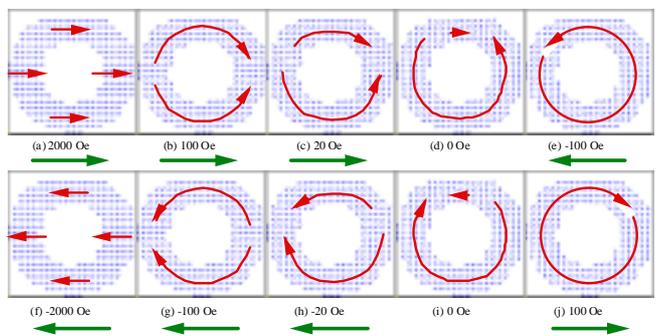


図11 一部分を切り取ったリング形状を有する
新型のメモリセルにおける磁化の向きの変化
Ni-20at%Fe(5 nm)

しかし、磁性メモリ材料としては、絶縁層を含む多層構造の適用が考えられており、絶縁層を含むために、膜面垂直方向に電流を流すことはできない。従って、膜面内方向に設置する電流線による面内の方向の磁界による書き込みが行えるような構造を考案する必要がある。本研究では、種々の構造のメモリセルについて検討を行った結果、リング形状を一部変形することにより、面内方向の磁界による書き込みが行えることを見出した⁽⁴⁾。

図10に通常のリング形状のドットに対して、左右方向に磁界を印加した時の磁化過程の計算機シミュレーション結果を示す。ドットの材料は厚さ5 nmのNi-Fe合金である。図のように、磁化過程において、時計回りあるいは反時計回りの磁化状態は見られず、このリング形状のドットでは、情報の書き込みが行えないことがわかる。ドット材料の厚さを10 nm以上にすると、時計回りあるいは反時計回りの磁化状態が形成されるが、印加磁界の向きにかかわらず、ドットの磁化の向きはランダムであり、「0」あるいは「1」の情報を選択的に書き込むことはできない。

これに対し、図11に示すように、リング形状を一部変形することにより、右向きの磁界を印加した場合には、反時計回りの磁化状態が、左向きの磁界を印加した場合には、時計回りの磁化状態が得られる。すなわち、印加磁界の向きにより、選択的に「0」あるいは「1」の情報を書き込むことができる。このように、本研究では、面内方向の磁界により選択的に「0」あるいは「1」の情報を書き込むことができる、全く新しい構造の磁性メモリセルの可能性を見出した。

4-3 低磁界で記録できるカップ型メモリセル

図12に本研究で検討を行ったカップ型ドットの形成プロセスを示す。図のように、基板上に穴を有するレジストパターンを形成し、その上に斜め方向から磁性材料をスパッタリングする。また、スパッタリング中には基板を回転させる。この方法により、一様な膜は基板上に形成されず、その結果、図に示すようなカップ型のドットを得ることができる。

図13に得られたカップ型ドットのSEM写真を示す。磁性材料としてはCo-17at%Pt合金を用いた。また、上述のレジストの穴の直径は500 nmおよび200 nmとした。図に示すように、明瞭なリング形状が得られている。そのリン

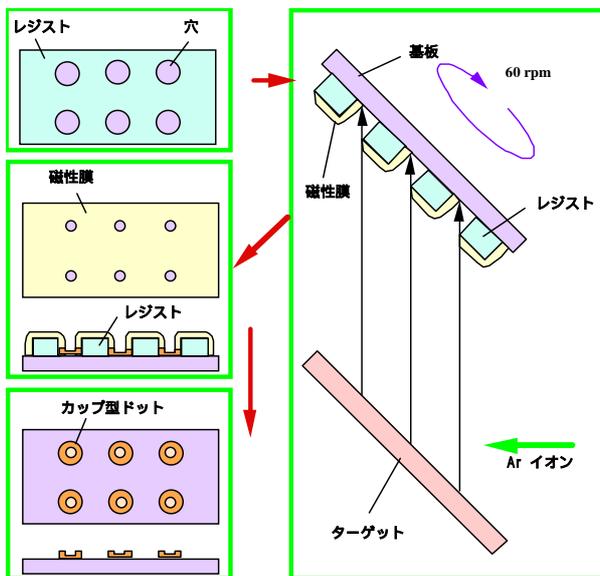


図12 カップ型ドットの形成プロセス

グ形状の内部は、基板の部分よりも明るく見え、内部にも薄い磁性層が形成されていることがわかる。

図13に示すカップ型ドットの原子間力顕微鏡(AFM)による形状観察結果を図14に示す。図のように、リング内部にも薄い磁性層が形成されている。直径200 nmのドットの場合には、リング形状の内部までAFMのカンチレバーが達せず、正確な形状の観察ができなかったが、図13(b)に見る限り、カップ型ドットが得られているものと考えられる。

さらに薄いNi-FeおよびCo-Ptを用いたカップ型ドットも作製した。図15に原子間力顕微鏡による形状の観察結果を示す。図のように、この場合もNi-FeおよびCo-Ptカップ型ドットが形成されている。

これらのカップ型ドットの磁化過程を磁気光学効果により検討した。図16には後で述べるMFM像から予想される磁化状態の模式図も記入した。図のように、零磁界付近では、Ni-Feカップ型ドットでは磁化がリング形状に沿って回転しているものと考えられる。Co-Ptカップ型ドットでは、Co-Pt合金の保磁力が高いため、カップ型ドットの保磁力も高くなっている。

図17に、Ni-FeおよびCo-Ptカップ型ドットのMFM像を示す。ドットが存在すると思われる部分の一部にドットの図を示してある。図17(a)に示すように、Ni-Feカップ型ドットのMFM像には、白黒の対になった像は観察されず、白いリング状の像が観測される。この白いリング状の像は、カップ型ドット上部のリング形状と考えられる。白黒の対になった像は観察されないことから、Ni-Feカップ型ドットでは、漏洩磁界は低く、(b)に示すように、磁化はドット内を還流しているものと考えられる。この磁化還流構造は、図16(a)のNi-Feカップ型ドットの磁界零領域の磁気光学効果曲線における信号強度が零に近いことと対応している。

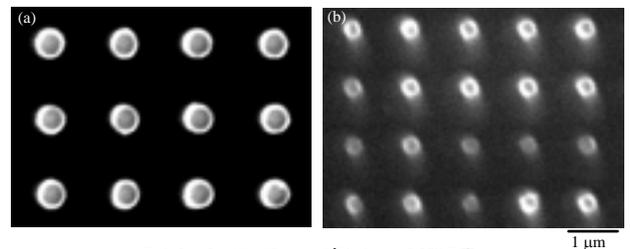


図13 Co-17at%Ptカップ型ドットのSEM写真
(a)直径500 nm、(b)直径200 nm

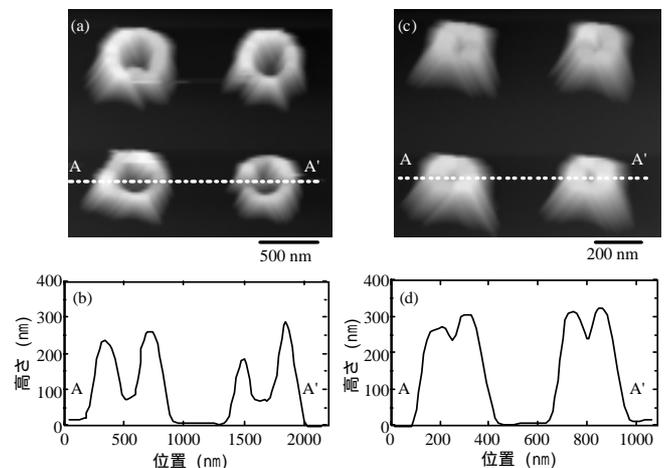


図14 Co-Ptカップ型ドットの形状のAFMによる観察結果
(a)直径500 nm、AFM像、(b)直径500 nm、A-A'部断面プロファイル、
(c)直径200 nm、AFM像、(d)直径200 nm、A-A'部断面プロファイル

また、図 17 (c)に示すように、Co-Pt カップ型ドットの MFM には、白黒の対になった像が 4 個観測される。これは、それぞれ 4 個の Co-Pt カップ型ドットから漏洩している磁界による像である。この漏洩磁界は、(d)に示すように、ドット毎に一方方向に磁化していることを表している。ドット毎に一方方向に磁化していることは、図 16 (b)のように、Co-Pt カップ型ドットの磁界零領域の磁気光学効果曲線における信号強度が高いことと対応している。従って、残留磁化状態では、Co-Pt カップ型ドットの磁化は一方方向を向いているものと考えられる。図 17 (c)においては、Co-Pt カップ型ドットのそれぞれの漏洩磁界の向きは揃っていない。この漏洩磁界の向きの分散の原因については、現在のところ不明である。

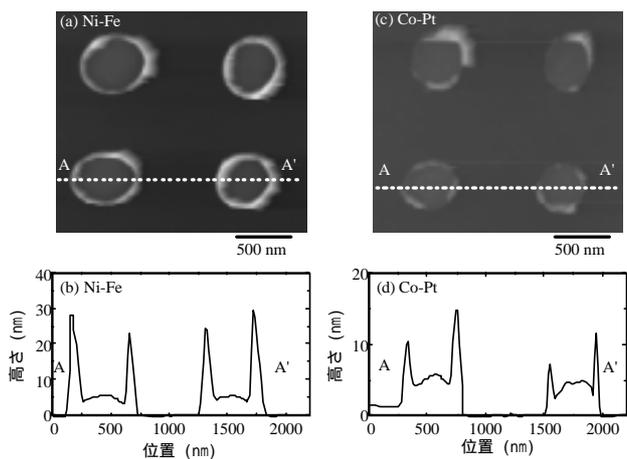


図 15 Ni-FeおよびCo-Ptカップ型ドットの形状のAFMによる観察結果
(a)Ni-FeドットのAFM像、(b)Ni-FeドットのA-A'部断面プロファイル、
(c)Co-PtドットのAFM像、(d)Co-PtドットのA-A'部断面プロファイル

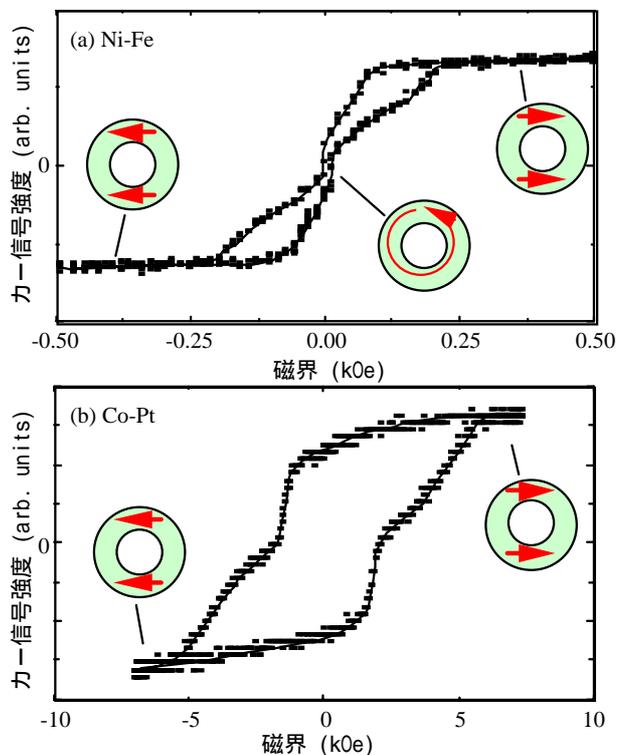


図 16 Ni-FeおよびCo-Ptカップ型ドットの形状の磁気光学効果曲線
カップ型ドットと通常のリング型ドットの磁化過程の違い

について調べるために、計算機シミュレーションを行った。図 18 に示すように、リング型ドットと比較してカップ型ドットの核生成磁界 H_n および核消失磁界 H_a は、ともに低い。

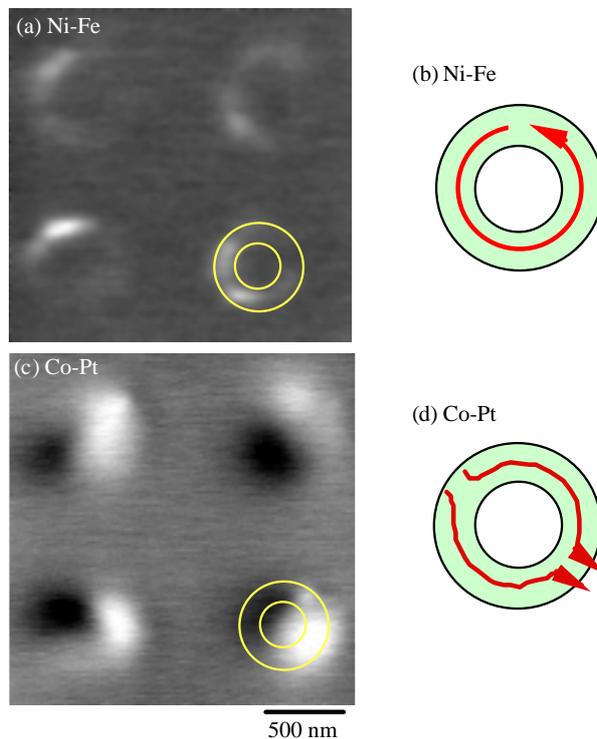


図 17 Ni-FeおよびCo-Ptカップ型ドットのMFM像

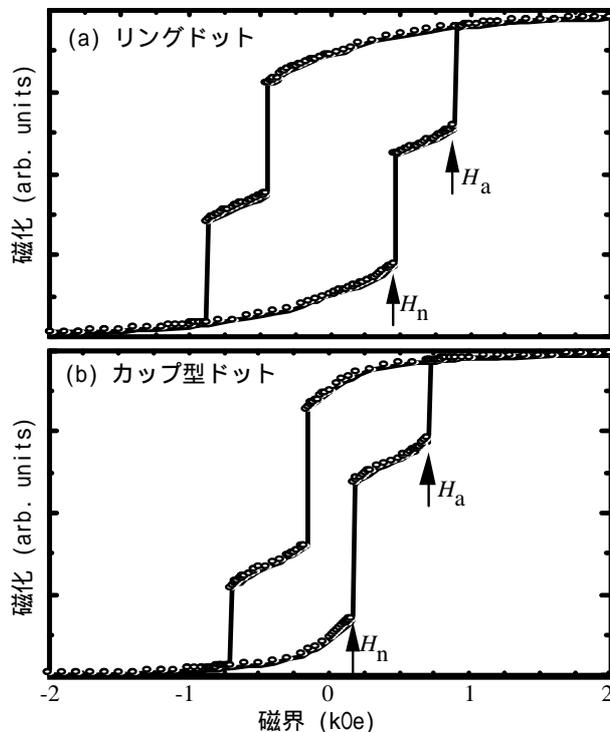


図 18 Ni-Feリング型ドットおよびNi-Feカップ型ドットの磁化曲線 (計算機シミュレーション)

核生成磁界と核消失磁界との間で磁化がリング形状に沿って

回転している状態が得られる。すなわち、リング型ドットと比較してカップ型ドットでは、低い磁界で磁化がリング形状に沿って回転している状態が得られる。このことは、リング型ドットと比較してカップ型ドットは、書き込みに必要な磁界が低く、消費電力も低いことを示す。

カップ型ドットにおいて低い核生成磁界 H_h および核消失磁界 H_a が得られる原因について調べるために、マイクロマグネティクス・シミュレーションによる磁化過程の解析を行った。図19は、カップ型ドットの最上部の磁化の向きの変化を示す。図のように、160 Oeと170 Oeとの間で、急激に磁化の向きが変化し、磁化還流構造となる。

図20に、カップ型ドットの最下部の磁化の向きの変化を示す。図のように、最上部の磁化が急激に変化し、磁化還流構造となる磁界において、磁化の渦状態が形成されている。このことから、カップ型ドットでは、円形の部分が渦状態を取り込むことにより、磁化還流構造が低磁界で生じていることがわかる。また、円形の部分が渦状態の核を低い磁界で消去するため、核消失磁界 H_a も低くなるものと考えられる。

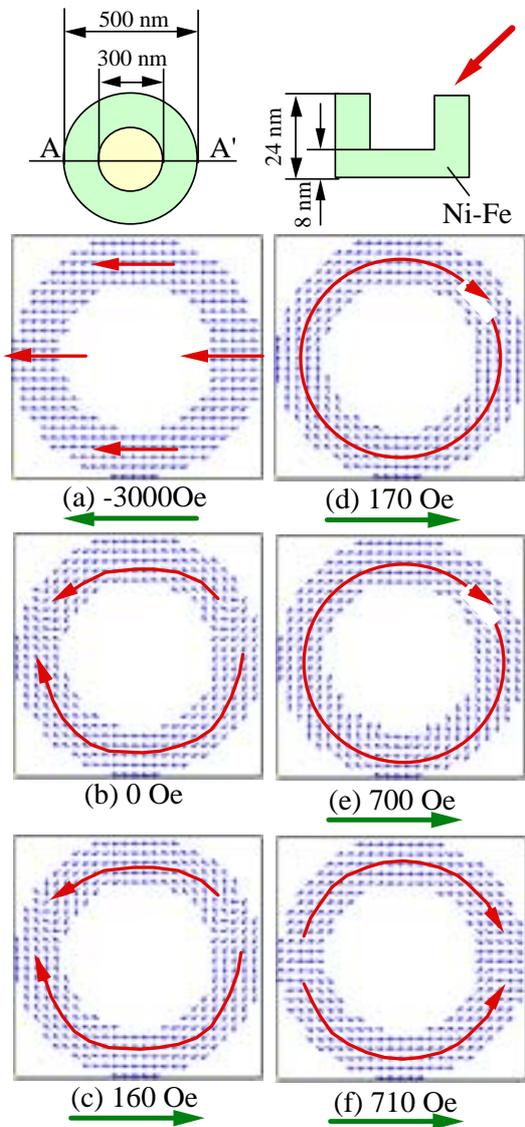


図19 Ni-Feカップ型ドットの最上部の磁化の向きの変化

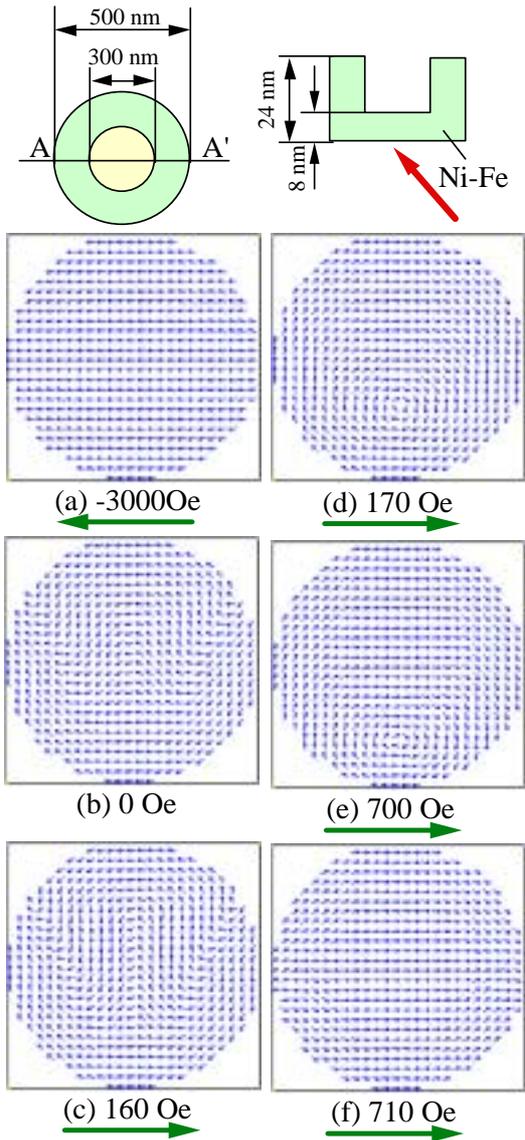


図20 Ni-Feカップ型ドットの最下部の磁化の向きの変化

5. 終わりに

超高密度配列が可能で、情報の書き込みが容易な磁性メモリセル構造を明らかにするために、種々の構造のメモリセルについて検討を行った。その結果、(1)円形のリング状のメモリセルは、漏洩磁束がないために高密度配列が可能である、(2)リング形状の一部を変形することにより面内磁界で書き込みが可能になる、(3)リング形状と円盤を組み合わせることにより、消費電力の少ないメモリセルを構成することができるとを明らかにした。

6. 文献

- (1) S. Tehrani, J. M. Slaughter, E. Chen, M. Durlam, J. Shi and M. DeHerrera, IEEE Trans. Magn., 35 (1999) 2814.
- (2) R. Nakatani, M. Yamamoto, H. Yakame, Y. Kamada and Y. Kawamura, J. Magn. & Magn. Mater., 239 (2002) 231-233.
- (3) R. Nakatani, N. Takahashi, T. Yoshida and M. Yamamoto, Jpn. J. Appl. Phys., 41 (2002) 7359-7366.
- (4) R. Nakatani and M. Yamamoto, Jpn. J. Appl. Phys., 42 (2003) 100-101.

