

	きくち のぶあき		
氏名	菊池 伸明		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成15年3月24日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 応用物理学専攻		
学位論文題目	人工微小磁性体の双安定性磁気特性の研究		
指導教官	東北大学教授 島田 寛		
論文審査委員	主査 東北大学教授 島田 寛	東北大学教授 宮崎 照宣	
	東北大学教授 松原 文卓	東北大学助教授 北上 修	

論文内容要旨

第1章 序論

磁性体をサブミクロン以下のスケールまで小さくすると、磁区や磁壁厚など磁性体の磁氣的挙動を決定付ける特性長と磁性体そのものの大きさが近づくため、バルクや薄膜とは異なる特徴的な磁化構造を示す。近年、高精度な製膜や微細加工の技術の向上により人工的な微小構造が設計・作製できるようになった。このことは、微小磁性体(ドット)の磁化状態を人工的に制御し、それを記憶情報として利用するという工学的な観点からの研究も促進した。微小磁性体の磁化の向きを記憶情報として応用するためには、微小磁性体の磁化の双安定性を実現すること、素子間の磁気特性のばらつきを抑制すること、が不可欠である。これらのことを明らかにするためには、これまでに行われているドットアレイの平均化された磁気特性を測定する手法ではなく、孤立したひとつひとつの微小磁性体の振舞いを明らかにすることが必要である。本研究では、双安定な磁化状態を期待できる $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ディスク状ドットおよび $\text{L}_{10}\text{-FePt}$ 単結晶ドットに着目して研究を行った。

第2章 実験方法

本研究では、膜厚 40nm、直径 80nm~4 μm の多結晶 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ディスク状ドットと膜面垂直方向に磁気異方性を持つ膜厚 10nm、直径 60nm~12 μm の $\text{L}_{10}\text{-FePt}$ 単結晶ドットを作製した。いずれの試料でも微小ドットパターンの形成は電子線リソグラフィー装置により行なった。また、 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 薄膜は抵抗加熱式蒸着法で、 FePt 薄膜はスパッタリング法で製膜した。磁気特性は、試料振動型磁力計、磁気光学効果、異常 Hall 効果および磁気力顕微鏡を用いて評価した。

第3章 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ディスク状ドットの spin-vortex 構造

本章では、 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ディスク状ドットの形状と磁化状態との相関について計算・実験の両面から検討した。この構造では、結晶磁気異方性が小さいために静磁エネルギーと交換エネルギーの競合が起こり、spin-vortex 構造と呼ばれる微小磁性体に特有な磁化構造があらわれた。本研究では、spin-vortex 構造の中心部分に現れる垂直成分は、反転磁場のばらつきが少なく、その大きさもドット形状で制御が可能な、良好な双安定磁気特性を示すことを明らかにした。しかしながら、ドット直径が小さくなると交換エネルギーが急増するために spin-vortex 構造が安定な領域は直径が 100nm 以上の領域に限られることがわかった。そのため、記憶素子の密度向上という観点からは spin-vortex 構造においては最小でも直径 100nm 程度に制限される。計算機シミュレーションを行なった結果、さらにドット直径が小さな領域では、膜厚を大きくする、つまり異方性の付与が双安定状態の実現には有効であった。

第4章 $\text{L}_{10}\text{-FePt}$ 単結晶ドットの作製と異常 Hall 効果の検出による孤立ドットの磁化測定

本章では、 $\text{L}_{10}\text{-FePt}$ 単結晶ドットの作製方法と、異常 Hall 効果により FePt ドット一個の磁化曲線を測定する方法について述べた。図 1 に、微細加工により形成した Hall 効果測定用 FePt ドット試料(直径 200nm)の SEM 像を示す。中央部に明るく見える点が FePt ドット、それを覆う十字状のパターンが Pt の電流・電圧端子である。図 2 には異常 Hall 効果を検出して測定した直径 60nm の FePt ドットの 10 K および 300 K における磁化曲線を示す。いずれの温度においても FePt ドットの反転に対応した矩形の磁化曲線が得られた。直径 60 nm のドットの磁化の大きさは 3×10^{-15} emu に相当し、本論文の方法が従来の微小磁化測定法に比べて高い感度を示すことを確認した。この方法では感度が高いことに加えて、薄膜の作製前に微細加工を必要としないため、単結晶薄膜や多層膜など、製膜時に清浄な基板表面が要求される材料にも適用であるという利点も持つ。

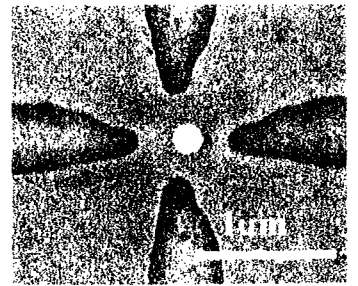


図 1 直径 200nm の FePt ドットの SEM 像

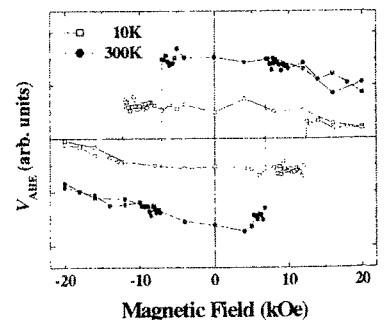


図 2 直径 60nm の FePt ドットの 10K および 300K における磁化曲線

第5章 $\text{L}_{10}\text{-FePt}$ 単結晶ドットの磁気特性 I

本章では、第 4 章で述べた方法によって調べた孤立 $\text{L}_{10}\text{-FePt}$ 単結晶ドットの磁気特性、特に反転磁場の直径依存性・温度依存性について述べた。結晶磁気異方性 $K_u=3.0 \times 10^7$ erg/cc の FePt ドットの反転磁場は、60nm

~12 μm のいずれの直径においても 300K で 6~8kOe, 10K で 9~11kOe で、直径に対する大きな依存性は見られなかった。また、いずれの直径のドットにおいても磁化曲線は図 2 に示したものと同様に完全な矩形であり、膜面に垂直方向の磁場のもとでは常に単磁区が安定であることがわかった。しかしながら、膜面内方向に 7 T の磁場を印加した後の初期磁化曲線の測定から、直径が 80nm 以上のドットでは準安定な多磁区構造が存在し、完全な双安定性を実現するためにはドット直径を 60nm 以下に低減する必要があることがわかった。反転磁場の温度依存性から FePt ドットの反転に要する障壁の大きさを求めると、約 $4 \times 10^{-12} \text{erg}$ という値が得られた。この値は全ての直径のドットでほぼ同様であり、磁壁長 δ_w と 磁壁エネルギー γ_w を用いて表される磁壁長程度の大きさの反転核のエネルギー $\gamma_w \cdot \delta_w^2$ にほぼ等しい。このことから、双安定性を示した直径 60nm のドットにおいても磁化反転は一斉回転ではなく、反転核の発生 \rightarrow 磁壁の伝播というプロセスで進行しているものと推察された。以上のように、FePt のような高磁気異方性材料においては、大きな磁壁エネルギーが逆磁区の発生を抑制するために、欠陥等に起因しない均一な反転磁場が実現されることが明らかになった。

第 6 章 L1₀-FePt 単結晶ドットの磁気特性 II

本章では、熱擾乱が温度だけではなく時間の関数であることにも着目し、反転磁場の磁場掃引速度依存性を調べることによって FePt ドットの磁化反転過程を検討した。その結果、反転磁場は温度だけでなく磁場の掃引速度にも強く依存し、また、温度・磁場掃引速度を固定した測定条件のもとでも反転磁場は広い分散を示した。このような反転磁場のランダムな振舞いは、FePt ドットの反転磁場が熱擾乱の影響を受けて確率的に反転を起こしていることを示すものである。この結果からエネルギー障壁を見積もると、 $3.8 \times 10^{-12} \text{erg}$ という結果が得られた。この結果は前章の反転磁場の温度依存性から求めた障壁の大きさともほぼ一致しており、FePt の反転磁場は交換結合長程度の反転核の挙動によって決定されていることを明らかにした。

第 7 章 総括

本章は本論文の総括である。磁気的な双安定性を持つ人工微小体である Ni₈₀Fe₂₀ ドット、L1₀-FePt 単結晶ドットについてその磁気構造、磁化反転過程を明らかにした。特に、異常 Hall 効果を検出して 100nm 以下のサイズの一個の微小磁性体の磁化曲線を測定する方法を確立した。その結果から、FePt ドットのような高磁気異方性材料では、磁壁エネルギーが反転核の成長を抑制するために反転磁場が欠陥に影響されず、磁性体の物性定数で記述し得ることを示した。

論文審査結果の要旨

強磁性体のサイズを数100nm以下にすると、交換結合エネルギーと磁気異方性定数で決まる交換長とほぼ同等になり、特異な磁化過程を示すようになる。本論文は、このサイズ領域の強磁性体が工学的に有用な磁気的双安定性を示すことに注目し、微小サイズ強磁性体の形成プロセスと磁化過程の解明、単一の微小サイズ強磁性体の磁化過程測定法開発、および高信頼性の磁気的双安定性を持つ微小サイズ強磁性体の作成に関する研究成果をまとめたもので、全編7章からなる。

第1章は、序論である。

第2章は、成膜方法、微小サイズ強磁性体の形成プロセス、計算機シミュレーションについて述べている。

第3章は、磁気異方性の弱い強磁性体の微小円板に見られるスピン **vortex** に注目し、その磁化構造の外部磁場依存性を詳細に調べて、磁化反転過程には双安定性があることを明らかにした。しかし、この双安定性を示す部分は全体の一部であり、微小体全体が双安定の磁化過程を持つためには、強い磁気異方性を付与する必要があることを示した。

第4章は、非常に強い磁気異方性を持つ **FePt** 合金の **L10** 型規則相の単結晶薄膜を、数 μm ～数10nmの広いサイズ領域で円板状試料を作成し、その磁化過程を決めている物理的要因を把握するために、一個の円板の磁化曲線を測定する実験について述べている。

第5章は、一個の **FePt** 微小円板の磁化曲線を測定し、完全な双安定性を示すこと、また反転磁場が数 μm ～数10nmの広いサイズ領域にわたってほぼ一定であることから、双安定性を決める要因は、従来考えられていたような、局所的な結晶欠陥、磁気異方性分散、円板形状の欠陥などではなく、磁気物性定数で決まる磁壁厚み程度の非常に微小な反転核であることを明らかにした。

第6章は、この反転核によって引き起こされる磁化反転の過程を、磁場掃引速度、温度への依存性から明らかにし、磁気異方性との関連を考察している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文では、一個の微小体の磁化過程を測定することに成功し、微小体の双安定性は、非常に強い磁気異方性を付与することにより、磁気物性的な反転核で制御できることを見出した。これは、微小サイズ強磁性体による情報記憶媒体のモデル構築の基礎となる発見であり、応用物理学の重要な成果である。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。