

学 位 論 文 題 名

Spin-Polarized SEM Study on Magnetic Domain Structures in Ferromagnetic Disks

(スピン偏極走査型電子顕微鏡によるディスク状強磁性薄膜の
磁気構造に関する研究)

学位論文内容の要旨

磁性体薄膜や磁性体多層薄膜は、高い情報記録密度を実現する磁気記録技術を支える磁気記録媒体や記録再生ヘッドデバイス、各種のセンサーに広く用いられている。磁気記録再生ヘッドや近年注目を集めている磁気ランダムアクセスメモリ (Magnetic Random Access Memory: MRAM) などへの応用では、微細加工を施した磁性膜の磁区構造をセンサーやメモリ素子として利用する。薄膜や多層膜の磁氣的性質はそれらを構成する物質固有の磁性に加え、微細加工を施した後の形状や膜厚に依存する。MRAM は誘電体フラッシュメモリと同様に不揮発性であり、DRAM と同程度のアクセス時間を実現できると期待されており、トンネル磁気抵抗効果素子の磁気応答特性の改善などに関する研究が進められているところであるが、MRAM においてもメモリセルを構成する磁性体多層膜の形状の工夫が必要とされる。

磁気ボルテックスはクロスタイ磁壁や軸対称性の良い微小磁性体で見られる特徴的な磁気構造の一つであり、薄膜面に垂直な磁化を有する中心部分の近傍に、垂直磁化の中心部を軸に同心円状に回転する磁化分布をもつ構造をとる。同心円状の磁化は中心近傍では垂直成分を有するが、遠方では薄膜面内成分のみを有する。磁気交換エネルギーの寄与が中心部分での磁化配置を決定付けている。磁気ボルテックスは中心部より離れたところでは還流磁化構造となっているため、薄膜外への漏洩磁場が少なく、MRAM のメモリセルへの応用も提案されている。

本研究では、主に、ディスク形状をした強磁性体薄膜の磁気構造の観察を行い、その磁区構造ならびに磁気ボルテックスの状態制御に関する研究を行った。電磁気学的な解析では、磁気ボルテックス状態は、薄膜の軸対称性のみを境界条件として与えると得られる構造であり、境界の大きさには依存しない。これまで報告されている磁気ボルテックスは、磁性微粒子や 1 ミクロン以下の直径のディスク状薄膜で観察されており、大きな直径を有するディスク状薄膜での観察、研究例はない。本研究では特に、大きな直径を有するディスク状薄膜を対象として研究を行った。

高空間分解能が得られる磁気力顕微鏡では、強磁性体プローブからの漏洩磁場により試料の磁区構造が測定中に変化する場合がある。本研究では、試料の磁区構造に影響を与えずに、高分解で磁区構造の観察が可能なスピン偏極操作型電子顕微鏡 (spin-polarized scanning electron microscope: SP-SEM) を用いた。本研究では、小型モットスピン分析装置を用いた超高真空対応の SP-SEM 装置の開発を行い、これを用いた。これにより、従来では観察されていなかった数ミクロンの半径を持つディスク状のパーマロイ薄膜でも欠陥のないスピنبルテックス構造が観察できることを見出した。また、磁気ボルテックスが得られるディスク状強磁性体薄膜では、目状の磁区構造が多く観察され、ディスク状強磁性体薄膜においてはスピنبルテックスに次ぐ準安定状態であることを見出した。

第一章では、本研究の背景を述べた。近年の微細化技術の急速な進展を背景とした磁気デバイスの微細化と、磁気記録分野及び磁気計測技術の動向をまとめた。また、本研究で使用される磁気計測技術の特徴と並びに微細な磁性薄膜における磁気ボルテックス状態の特徴とこれまで研究結果についてまとめた。

第二章では、磁気ボルテックス状態について電磁気学的な解析結果を中心に磁気ボルテックス状態における磁化分布について述べた。

第三章では、本研究で使用する SP-SEM に用いたスピン分析器について、その動作原理について述べ、開発した SP-SEM の詳細について述べた。

第四章では、開発した SP-SEM を用いたパーマロイ薄膜の表面磁区構造を観察した結果より、開発した SP-SEM システムの評価を行った。

第五章では、磁気ボルテックス状態の観察の実験について述べた。これまでに報告されてきたディスク状薄膜における磁気ボルテックス状態の測定結果ならびに磁化特性との比較検討を行い、観察された磁気ボルテックス状態について考察を行った。また試料作成など実験手順の詳細についても記述した。

第六章では、ディスク状強磁性体薄膜の磁化状態として、準安定状態の一つと考えら得る目状磁区構造について、その測定結果をもとに、その構造についてまとめた。前章で使用した試料に対して外部磁場を印加し、その前後の SP-SEM 観察を行った。また、SQUID による測定と合わせ準安定状態について議論した。

第七章では、本研究を総括し、本研究成果より期待させる事柄について述べた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 末 岡 和 久

副 査 教 授 山 本 眞 史

副 査 教 授 高 橋 庸 夫

学 位 論 文 題 名

Spin-Polarized SEM Study on Magnetic Domain Structures in Ferromagnetic Disks

(スピン偏極走査型電子顕微鏡によるディスク状強磁性薄膜の
磁気構造に関する研究)

磁性体薄膜や磁性体多層薄膜は、高い情報記録密度を実現する磁気記録技術を支える磁気記録媒体や記録再生ヘッドデバイス、各種のセンサーに広く用いられている。磁気記録再生ヘッドや近年注目を集めている磁気ランダムアクセスメモリ(Magnetic Random Access Memory: MRAM)などへの応用では、微細加工を施した磁性膜の磁区構造をセンサーやメモリ素子として利用する。薄膜や多層膜の磁気的性質はそれらを構成する物質固有の磁性に加え、微細加工を施した後の形状や膜厚に依存する。MRAMは誘電体フラッシュメモリと同様に不揮発性であり、DRAMと同程度のアクセス時間を実現できると期待されており、トンネル磁気抵抗効果素子の磁気応答特性の改善などに関する研究が進められているところであるが、MRAMにおいてもメモリセルを構成する磁性体多層膜の形状の工夫が必要とされる。

磁気ボルテックスは枕木磁壁や軸対称性の良い微小磁性体で見られる特徴的な磁気構造の一つであり、薄膜面に垂直な磁化を有する中心部分の近傍に、垂直磁化の中心部を軸に同心円状に回転する磁化分布をもつ構造をとる。同心円状の磁化は中心近傍では垂直成分を有するが、遠方では薄膜面内成分のみを有する。磁気交換エネルギーの寄与が中心部分での磁化配置を決定付けている。磁気ボルテックスは中心部より離れたところでは還流磁化構造となっているため、薄膜外への漏洩磁場が少なく、MRAMのメモリセルへの応用も提案されている。

本研究では、主に、ディスク形状をした強磁性体薄膜の磁気構造の観察を行い、その磁区構造ならびに磁気ボルテックスの状態制御に関する研究を行った。電磁気学的な解析では、磁気ボルテックス状態は、薄膜の軸対称性のみを境界条件として与えると得られる構造であり、境界の大きさには依存しない。これまで報告されている磁気ボルテックスは、磁性微粒子や1ミクロン以下の直径のディスク状薄膜で観察されており、大きな直径を有するディスク状薄膜での観察、研究例はない。本研究では特に、大きな直径を有するディスク状薄膜を対象として研究を行った。

高空間分解能が得られる磁気力顕微鏡では、強磁性体プローブからの漏洩磁場により試料の磁区構造が測定中に変化する場合がある。本研究では、試料の磁区構造に影響を与えずに、高分解で磁区構造の観察が可能なスピン偏極操作型電子顕微鏡 (spin-polarized scanning electron microscope: SP-SEM) を用いた。本研究では、小型モットスピン分析装置を用いた超高真空対応のSP-SEM装置の開発を行い、これを用いた。これにより、従来では観察されていなか

った数ミクロンの半径を持つディスク状のパーマロイ薄膜でも欠陥のない磁気ボルテックス構造が観察できることを見出した。また、磁気ボルテックスが得られるディスク状強磁性体薄膜では、目状の磁区構造が観察され、ディスク状強磁性体薄膜においては磁気ボルテックスに次ぐ準安定状態であることを見出し、弱い横磁場中では目状磁化状態が磁気ボルテックスより安定であることを示した。

第一章では、本研究の背景を述べた。近年の微細化技術の急速な進展を背景とした磁気デバイスの微細化と、磁気記録分野及び磁気計測技術の動向をまとめた。また、本研究で使用される磁気計測技術の特徴と並びに微細な磁性薄膜における磁気ボルテックス状態の特徴とこれまで研究結果についてまとめた。

第二章では、磁気ボルテックス状態について電磁気学的な解析結果を中心に磁気ボルテックス状態における磁化分布について述べた。

第三章では、本研究で使用するSP-SEMに用いたスピン分析器について、その動作原理について述べ、開発したSP-SEMの詳細について述べた。

第四章では、開発したSP-SEMを用いたパーマロイ薄膜の表面磁区構造を観察した結果より、開発したSP-SEMシステムの評価を行った。

第五章では、磁気ボルテックス状態の観察の実験について述べた。これまでに報告されてきたディスク状薄膜における磁気ボルテックス状態の測定結果ならびに磁化特性との比較検討を行い、観察された磁気ボルテックス状態について考察を行った。また試料作成など実験手順の詳細についても記述した。

第六章では、ディスク状強磁性体薄膜の磁化状態として、準安定状態の一つと考えら得る目状磁区構造について、測定結果をもとに、その構造についてまとめた。前章で使用した試料に対して外部磁場を印加し、その前後のSP-SEM観察を行った。また、SQUIDによる測定と合わせ準安定状態について議論した。

第七章では、本研究を総括し、本研究成果より期待される将来展望について記した。

本論文は、磁性体表面の磁区構造を非破壊的かつ定量的に観察可能なスピン偏極走査型電子顕微鏡を開発し、これをディスク形状の強磁性体薄膜の磁化状態の研究に応用し、磁気ボルテックス状態と目状磁区様態の存在と安定性について考察したもので、磁気記録や磁気デバイスならびにスピンエレクトロニクスの分野に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。