

学 位 論 文 題 名

スピン分析器の応用に関する基礎研究

学位論文内容の要旨

磁気記録の高密度化は過去10年で100倍の速度で進んでおり、2000年に20Gbit/inch²を達成するための新しい磁性材料、磁気記録ヘッドの開発、これらを組み合わせるシステム技術、記録再生信号処理技術等の研究が進められている。微小領域への記録には磁性薄膜の磁区構造制御およびこれら磁気記録状態の評価の基礎研究、これを基にして磁性体記録媒体開発、記録再生ヘッド用材料・デバイスの開発が重要である。微小磁区構造観察としてはこれまでに磁気力顕微鏡、ピクチャー法、走査型カー効果顕微鏡などが多く利用されてきたが、磁化の向きについての定量性や空間分解能などの問題点を抱えており、20Gbit/inch²を超える記録密度開発のための評価技術としては十分ではない。磁性体表面近傍電子状態のスピン偏極度を検出し、直接磁区構造を評価する手法が必要である。

表面電子状態のスピン偏極度を測定する方法としては、X線、紫外線、放射光照射による光電子や電子線照射によるオージェ電子・2次電子のスピン偏極度分析、スピン偏極イオン散乱、走査型トンネル顕微鏡(Scanning Tunneling Microscope; STM)を用いたスピン偏極トンネル効果の測定がある。このようなスピン分解能を持つ表面分析手法には、高性能、高安定な電子線スピン分析器が必要不可欠である。スピン偏極走査型トンネル顕微鏡(Spin Polarized STM; SP-STM)やオージェ電子・2次電子線スピン分析装置を組み合わせた走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope; SEM)は高い空間分解能が期待され、特に2次電子線分析を行うスピンSEMは、その広範な応用性において磁気記録工学分野を始め磁性研究領域で注目されている。

スピンSEMはすでにいくつかの研究室において研究が進められており、高電圧Mott分析器や緩慢散乱型分析装置、低速電子線回折による分析装置が利用されている。それぞれ優れた点を有するが、汎用的に利用される分析装置としては構造やシステムが複雑であったり、取り扱いがその専門領域の研究者以外には難しいという欠点がある。本研究では、そうした問題点を解決するための小型で低加速、中加速領域での動作が可能な阻止電極型Mott分析器を新たに開発し、スピンSEMへの応用を試みた。このMott分析器の基本性能はGaAsを用いたスピン偏極光電子により評価した。この際、GaAsスピン偏極光電子源の安定化についての研究を行い、光電子源作製のための最適条件を見いだした。さらに超高真空走査型電子顕微鏡とMott分析器を組み合わせたスピンSEMシステムを試作し、スピンSEMへの応用の可能性を示すとともに、いくつかの磁性体表面の観察を行いスピン偏極測定技術を確立するための指針について検討を行なった。

本論文は以下の構成でその詳細を論述している。

第1章では本論文の背景と目的、概要を述べてる。

第2章では電子線のスピン分析原理であるMott散乱理論の概要について述べ、Mott分析器を作製する際に重要なパラメータであるSherman関数について述べている。

第3章では高速散乱Mott分析器と低速散乱Mott分析器のそれぞれの優位性および問題点を明確にすることで低加速、中加速散乱小型Mott分析器を設計する基本方針を明らかにする。そしてこの基本方針に従った小型Mott分析器の設計について述べている。また設計した分析器の基本性能を評価するために静電レンズで構成した電子輸送系を設計した。これらの設計には電子軌道シミュレータを用いた。この小型Mott分析器は非弾性散乱の少ない領域(60kV)から測定中の放電の少ない領域(20kV)で動作可能な電極構造を設計し、SP-STMの開発に必要とされている磁性体探針からの電界放射電子スピン分析測定ができる新しい電極構造を提案した。また、簡易型電子線分析システムを構築するため静電レンズ系を設計・製作し、熱電子源を用いた電子の輸送と検出試験により設計値の妥当性を確認した。

第4章では第3章で提案したMott分析器のスピン検出性能を確認するために、GaAsからの光電子のスピン分析を行った。負の電子親和力(NEA)を持つように表面処理をしたp型GaAsの光励起電子線は良いスピン偏極電子源として知られているが、寿命の長い光電面を得るためには適切な表面処理が必要である。本章ではそのための処理方法を検討した。また、その結果得られた光電面を用いてスピン偏極度測定を試みた。光電子のスピン偏極度はGaAsに照射した赤外レーザの円偏光度により変化する。円偏光度を変化させたときMott分析器で散乱非対称性の変化を測定し、計算により求めた実効Sherman関数を適応したところ、円偏光照射時にスピン偏極度 $\pm 24\%$ が得られた。

第5章では小型Mott分析器を用いたスピンSEMシステムの設計と試作を行った。スピンSEMシステムは、分解能20nmで1画像を10分以内に取得することを目的として、小型Mott分析器の検出効率の改良、1次電子源、2次電子コレクタについてそれぞれシミュレーションによる設計を行った。小型Mott分析器については画像取得時間の改善を図るため、電極構造に散乱電子検出立体角を広げる改良を加え、性能指数は 2×10^{-5} まで向上した。電子源については高輝度の1次電子線を得るために磁界型対物レンズの電子銃を採用したが、電子銃からの漏洩磁場が試料の磁化状態を乱さないように、ポールピース下部に磁気シールドを設置することを提案し、磁気シールド構造の最適化を行った。磁気シールドを設置することにより電子銃動作時に試料位置での漏洩磁場は約0.2Gaussとなり、およそ1/10に低減できることを実験により確認した。2次電子コレクタの設計については収集効率を考慮し、電極への衝突によるスピン偏極度の低下を防ぐ形状を電子軌道計算により考案した。以上の改良した小型Mott分析器、1次電子銃、2次電子コレクタを超高真空磁気シールドチャンバ内に組み込みスピンSEMを構成した。さらに検出電子系、画像処理系についての詳細についても述べている。

第6章では試作したスピンSEMを用いた磁性体観察結果について述べ、スピン偏極測定技術を確立するための指針について明らかにした。鉄単結晶(001)表面を観察したところ、鉄の典型的な磁区構造が得られ、最大スピン偏極度 $\pm 14\%$ を得た。また、フォトリソグラフで作製した微小80Ni-Fe薄膜パターンの磁区構造およびCoCrTaPt薄膜上に記録された記録ビットの磁区構造の観察を行った。

第7章では本論文の成果を総括する。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 武 笠 幸 一
副 査 教 授 池 田 正 幸
副 査 教 授 岡 田 亜紀良
副 査 助教授 末 岡 和 久

学 位 論 文 題 名

スピン分析器の応用に関する基礎研究

磁気記録の高密度化は過去10年で100倍の速度で進んでおり、2000年に20Gbit/inch²を達成する目標がたてられている。微小領域への記録には磁性薄膜の磁区構造制御およびこれら磁気記録状態の評価の基礎研究、これを基にして磁性体記録媒体開発、記録再生ヘッド用材料・デバイスの開発が重要である。20Gbit/inch²を超える記録密度開発のための評価技術としては、磁性体表面近傍の電子状態のスピン偏極度を検出し、直接磁区構造を評価する手法が必要である。

スピン分解能を持つ表面分析手法には、高性能、高安定な電子線スピン分析器が必要不可欠である。スピン偏極走査型トンネル顕微鏡(Spin Polarized STM; SP-STM)やオージェ電子・2次電子線スピン分析装置を組み合わせた走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope; SEM)は高い空間分解能が期待され、特に2次電子線分析を行うスピンSEMは、その広範な応用性において磁気記録工学分野を始め磁性研究領域で注目されている。

本研究では、小型で低加速、中加速領域での動作が可能な阻止電極型Mott分析器を新たに開発し、スピンSEMへの応用を試みた。このMott分析器の基本性能はGaAsを用いたスピン偏極光電子により評価した。この際、GaAsスピン偏極光電子源の安定化についての研究を行い、光電子源作製のための最適条件を見いだした。さらに超高真空走査型電子顕微鏡とMott分析器を組み合わせたスピンSEMシステムを試作し、スピンSEMへの応用の可能性を示すとともに、いくつかの磁性体表面の観察を行いスピン偏極測定技術を確立するための指針について検討を行なった。

本論文の要旨は以下の通りである。

1. 高速散乱Mott分析器と低速散乱Mott分析器のそれぞれの優位性および問題点を明確にすることで低加速、中加速散乱小型Mott分析器を設計する基本方針を明らかにし、この基本方針に

従った小型Mott分析器の設計した。設計した分析器の基本性能を評価するために静電レンズで構成した電子輸送系を設計した。この小型Mott分析器は非弾性散乱の少ない領域(60kV)から測定中の放電の少ない領域(20kV)で動作可能な電極構造を設計し、スピン偏極走査型トンネル顕微鏡 (SP-STM) の開発に必要とされている磁性体探針からの電界放射電子スピン分析測定ができる新しい電極構造を提案した。また、簡易型電子線分析システムを構築するため静電レンズ系を設計・製作し、熱電子源を用いた電子の輸送と検出試験により設計値の妥当性を確認した。

2. Mott分析器のスピン検出性能を確認するために、GaAsからの光電子のスピン分析を行った。寿命の長い光電面を得るためには適切な表面処理が必要で、処理方法の検討を行った。その結果得られた光電面を用いてスピン偏極度測定を試み、円偏光度を変化させたときMott分析器で散乱非対称性の変化を測定し、計算により求めた実効Sherman関数との対応により円偏光照射時にスピン偏極度 $\pm 24\%$ が得られた。
3. 小型Mott分析器を用いたスピンSEMシステムの設計と試作を行った。スピンSEMシステムは、分解能20nmで1画像を10分以内に取得することを目的として、小型Mott分析器の検出効率の改良、1次電子源、2次電子コレクタについてそれぞれシミュレーションによる設計を行った。小型Mott分析器については画像取得時間の改善を図るため、電極構造に散乱電子検出立体角を広げる改良を加え、性能指数は 2×10^{-5} まで向上した。電子源については高輝度の1次電子線を得るために磁界型対物レンズの電子銃を採用したが、漏洩磁場を除くために磁気シールドを設置することを提案し、磁気シールド構造の最適化を行った。2次電子コレクタの設計については収集効率を考慮し、電極への衝突によるスピン偏極度の低下を防ぐ形状を電子軌道計算結果に基づいて考案した。以上改良した小型Mott分析器、1次電子銃、2次電子コレクタを超高真空磁気シールドチャンバ内に組み込みスピンSEMを構成した。
4. 試作したスピンSEMを用いた磁性体観察結果について述べ、スピン偏極測定技術を確立するための指針について明らかにし、鉄単結晶(001)表面を観察したところ、鉄の典型的な磁区構造が得られ、最大スピン偏極度 $\pm 14\%$ を得た。80Ni-Fe薄膜パターンの磁区構造およびCoCrTaPt薄膜上に記録された記録ビットの磁区構造の観察を行った。

本論文は小型で低加速、中加速領域動作の阻止電極型Mott分析器を開発しスピンSEMへの応用をはかり、有益な多くの新知見を得ており、磁気工学、磁気記録工学分野に貢献するところ大なものがある。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。