

学 位 論 文 題 名

Scanning magnetoresistance microscopy using
micro-fabricated magnetoresistive sensor cantilevers

(磁気抵抗カンチレバーを搭載した走査型磁気抵抗効果顕微鏡に関する研究)

学位論文内容の要旨

これまで半導体業界や磁気記録分野において、デバイスの微細化および記録密度の高密度化が著しい速度で進められている。様々な技術的ブレークスルーを経て、現在ではデバイス内の素子サイズや1ビットの記録面積がナノメートルオーダーにまで到達している。さらなる微細化・高密度化を進めるために、半導体分野ではデバイス作製上重要となる新しいリソグラフィ技術の開発やエッチング技術の改良、磁気記録分野では記録再生ヘッドの改良や記録媒体のための新材料の開発など多くの努力がなされているが、まだ技術的に困難な点が数多く存在しており、革新的な技術の開発が待たれている。一方で、このような微小領域においては走査型プローブ顕微鏡 (SPM) を応用した様々な技術が有効であることはよく知られており、微細構造の観察・評価だけでなくボトムアップによる加工の有力な手段として期待されている。

走査型トンネル顕微鏡 (STM) をはじめとして、これまでに SPM 技術を応用した顕微鏡は多くの分野で開発が進められている。特に広く普及されている磁気顕微鏡として磁気力顕微鏡 (MFM) があげられる。MFM は数 10nm という高空間分解能を有することから、磁気記録分野における評価手段としてだけでなく、磁性研究における観察・測定手段としても用いられている。しかしながら、MFM はプローブと試料との間に働く磁気力を検出するという測定原理のために、取得したデータから試料の磁区構造などを求めることが一般に難しいという問題があり、様々な解析手法、測定方法の提案が成されているが、現在に至っても根本的な解決を見いだしていない。このような理由から MFM に変わる磁気顕微鏡の開発が進められ、走査型ホールプローブ顕微鏡 (SHPM)、走査型 SQUID 顕微鏡 (SSM)、走査型磁気抵抗効果顕微鏡 (SMRM) といった、定量測定の可能な磁気センサを搭載した SPM が提案された。本研究では搭載しているセンサ構造がシンプルであり、最も高い空間分解能を有し、比較的磁場感度が高いと期待される SMRM に着目し、SMRM の高感度化、高分解能化に関する研究を行った。これまで実現されている SMRM は磁気プローブとして市販のハードディスクで使用されている MR ヘッドを用いており、高精度での位置制御を可能にするチューブスキヤナを使用することで、測定対象と MR ヘッドを接触走査することで観察を行う手法であった。この手法では測定対象は表面が比較的平らなものに制限されてしまうという問題があった。そこで本研究では、3 次元的な構造を有する試料に対する測定を可能にするため、AFM 用カンチレバーと MR センサを融合させた MR カンチレバーの開発を行った。MR センサおよびカンチレバーの設計、MR カンチレバーの作製プロセスの検討を行い、プロセスフローに基づいて MR カンチレバーを作製した。また、作製したプローブの特性は、微細金属細線に電流を印加することで誘起される電流磁場を観察することで評価した。さらに迷路磁区を形成することで知られる磁性ガーネットを観察し、SMRM の空間分解能について議論した。

第一章では本研究の背景として、半導体分野におけるデバイスの微細化と磁気記録分野における記録密度の高密度化を例に取り、SPM ファミリーが微細な領域における形成・制御・評価・測定などにおいて非常に重要な役割を担っていることを種々の SPM を例に挙げ説明した。また、本研究で着目した磁気顕微鏡についてはこれまで開発されている MFM、SHPM、SSM、SMRM の特性を比較し、本論文で研究対象とした SMRM の優位性ならびに問題点を明らかにした。

第二章では SMRM の動作原理の詳細について議論した。まず、磁気センサ部分である MR 効果の簡単な説明および MR センサとしての基本的な動作原理を述べた。また現在の磁気ヘッドなどで主として用いられている高感度なスピナルブセンサの基本原理を簡潔にまとめた。最後に磁気ヘッドをプローブとして用いている従来法の SMRM について説明し、MR カンチレバーを適用した本研究の SMRM との違いを明確にした。

第三章では MR カンチレバーの設計と作製プロセスの詳細を記述した。MR センサ部分については MR 素子サイズによる MR 曲線の形状の違いを調べ、SMRM に適するセンサの構造について検討した。また、作製プロセスにおいては、歩留まりよく MR カンチレバーが作製できるように、各工程に用いる手法（リソグラフィ、エッチング、パターニング、成膜など）やそれぞれの箇所に使用する材料などを検討した。

第四章では前章で述べた手法を用いて作製した MR カンチレバーの特性評価について論じた。標準試料としては幅 $5\mu\text{m}$ の金属電流細線を作製し、これに一定電流を印加することで発生する誘導磁場を SMRM で測定した。金属細線からの誘導磁場は簡単に見積もれることから、測定結果と計算結果を比較し、SMRM が磁場を定量的に測定できることを確認した。また、微細な迷路磁区構造をとる磁気ガーネットを測定対象試料として、SMRM を用いて漏えい磁場の面内成分をイメージできることを示した。これにより空間分解能が MR 素子サイズ程度であることも確認した。現段階で実現できている空間分解能は約 $1\mu\text{m}$ であるが、これは MR 素子サイズを微細化することでさらなる高分解能化が可能である。この章の最後には本論文で提案した SMRM において現状で明らかになっている問題点を記述した。

第五章では前章で議論した SMRM に関する問題点を踏まえ、さらに高感度・高空間分解能化するための改良案として、MR センサ部分のスピナルブ化について論じる。MR センサをスピナルブセンサに置き換えることにより、MR の応答出力が大きくなることで高感度化されるだけでなく、その結果 MR 素子を微細化したときの出力低下を軽減でき、SMRM の高分解能化にもつながる。そこで実際にスピナルブセンサを設計・試作し、その特性を評価した結果を簡単に述べる。

第六章では本研究を総括し、SMRM の開発における将来展望について記した。本研究では MR カンチレバーを作製し、その特性を評価することで、SMRM が外部磁場を定量的に測定できることを示したが、素子の微細化、高感度化を進めることで、微細磁気構造観察の重要な手法となるだけでなく、LSI などの配線不良解析などへの応用も期待できる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 武 笠 幸 一

副 査 教 授 山 本 眞 史

副 査 教 授 岡 田 亜紀良

副 査 助教授 末 岡 和 久

学 位 論 文 題 名

Scanning magnetoresistance microscopy using micro-fabricated magnetoresistive sensor cantilevers

(磁気抵抗カンチレバーを搭載した走査型磁気抵抗効果顕微鏡に関する研究)

これまで半導体業界や磁気記録分野において、デバイスの微細化および記録密度の高密度化が著しい速度で進められている。様々な技術的ブレークスルーを経て、現在ではデバイス内の素子サイズや1ビットの記録面積がナノメートルオーダーにまで到達している。このような微小領域においては走査型プローブ顕微鏡 (SPM) を応用した様々な技術が有効であることはよく知られており、微細構造の観察・評価だけでなくボトムアップによる加工の有力な手段としても期待されている。

走査型トンネル顕微鏡 (STM) をはじめとして、これまでにSPM技術を応用した顕微鏡は多くの分野で開発が進められている。磁気力顕微鏡 (MFM) は数10nmという高空間分解能を有することから、磁気記録分野における評価手段としてだけでなく、磁性研究における観察・測定手段としても用いられている。しかしながら、MFMはプローブと試料との間に働く磁気力を検出するという測定原理のために、取得したデータから試料の磁区構造などを求めることが一般に難しいという問題があり、様々な解析手法、測定方法の提案が成されているが、現在に至っても根本的な解決が見いだされていない。このような理由からMFMに代わる磁気顕微鏡の開発が進められ、走査型ホールプローブ顕微鏡 (SHPM)、走査型SQUID顕微鏡 (SSM)、走査型磁気抵抗効果顕微鏡 (SMRM) といった、定量測定の可能な磁気センサを搭載したSPMが提案された。本研究では搭載しているセンサ構造が単純であり、最も高い空間分解能を有し、比較的磁場感度が高いと期待されるSMRMに着目し、SMRMの高感度化、高分解能化に関する研究を行った。これまで実現されているSMRMは磁気プローブとして市販のハードディスクで使用されているMRヘッドを用いており、高精度での位置制御を可能にするチューブスキャナを使用することで、測定対象とMRヘッドを接触走査することで観察を行う手法であった。この手法では測定対象は表面が比較的平らなものに制限されてしまうという問題があった。そこで本研究では、3次元的な構造を有する試料に対する測定を可能にするため、AFM用カンチレバーとMRセンサを融合させたMRカンチレバーの開発を行った。

第一章では本研究の背景として、半導体分野におけるデバイスの微細化と磁気記録分野における記録密度の高密度化を例に取り、SPMファミリーの比較および研究対象としたSMRMの優位性

ならびに問題点を明らかにした。

第二章ではSMRMの動作原理の詳細について議論した。磁気ヘッドをプローブとして用いている従来法のSMRMについて説明し、MRカンチレバーを適用した本研究のSMRMとの違いを明確にした。

第三章ではMRカンチレバーの設計と作製プロセスの詳細を記述した。

第四章では前章で述べた手法を用いて作製したMRカンチレバーの特性評価について論じた。測定結果と計算結果を比較し、SMRMが磁場を定量的に測定できることを確認した。また、磁気ガーネットを測定対象試料として、SMRMを用いて漏えい磁場の面内成分をイメージできることを示した。これにより空間分解能がMR素子サイズ程度であることも確認した。現段階で実現できている空間分解能は約 $1\mu\text{m}$ であるが、これはMR素子サイズを微細化することでさらなる高分解能化が可能である。

第五章では前章で議論したSMRMに関する問題点を踏まえ、さらに高感度・高空間分解能化するための改良案として、MRセンサ部分のスピンバルブ化について論じた。

第六章では本研究を総括し、SMRMの開発における将来展望について記した。

本論文は磁気抵抗カンチレバーを作製し、SMRMが外部磁場を定量的に測定できることを示し、微細磁気構造観察、LSIの配線不良解析などの新手法を提案したもので、有用な多くの新知見を得ており、磁気計測、計測工学ならびにナノテクノロジーの分野に貢献するところ大なるものがある。よって本論文は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。