

学 位 論 文 題 名

High sensitive scanning magnetoresistance microscope and its applications

(高感度走査型磁気抵抗効果顕微鏡の開発と応用に関する研究)

学位論文内容の要旨

近年公表されたストレージ分野における技術ロードマップによると、2014 年にはハードディスクの記録密度が 1 T bit/inch^2 に達するとされており、現在、この目標を達成すべく高密度化のための関連諸技術の研究開発が勢力的に進められている。 1 T bit/inch^2 の記録密度では、1 bit は正方形にすると $25 \times 25 \text{ nm}^2$ 程度の微小領域になる。また、次世代の不揮発性メモリデバイスとして注目されている磁気ランダムアクセスメモリにおいても、大容量化のためにはナノスケールの磁性体メモリセルの開発が必須となる。これらの研究開発動向と関連して、ナノスケールの磁性体に関する研究が盛んに行われている。ナノスケールの磁性体を利用したメディアやデバイスの研究開発には、ナノスケールの分解能を有する局所的な磁気構造・磁気特性を評価する技術が必要不可欠である。

磁性材料の磁気状態を局所的に調べるためには、磁性材料の磁区の構造を観察し、それぞれの磁区における磁化の大きさと方向を計測する必要がある。また、磁区境界の磁壁からは磁束が漏えいしている場合が多く、磁区構造の観察とともに、磁束分布の観察も有効である。磁区や磁束の分布を可視化するためには局所検出プローブが必要である。磁区や磁束を可視化する磁気イメージング技術は、大まかに検出プローブの種類により 3 つに分類される。それらは、ビッター法などの磁性粉末をプローブとして試料表面に付着させるもの、ローレンツ透過電子顕微鏡、スピン電子顕微鏡、カー効果顕微鏡や X 線磁気円二色性顕微鏡などの電子や光、X 線などのプローブ源を試料から離れたところに配置し、磁気状態を非破壊的に測定するもの、走査型プローブ顕微鏡 (scanning probe microscopy : SPM) 技術を応用してプローブを試料に近接させて磁気構造を観察するものがある。それぞれに一長一短があるが、特に SPM を応用した磁気イメージング技術は高分解能観察が可能であることから広く研究が行われている。強磁性探針をプローブとし試料表面磁極との間に働く磁気力の勾配を計測する磁気力顕微鏡 (magnetic force microscopy : MFM) では、試料準備に特殊な技術を必要とせず比較的手軽に 50 nm 程度の高分解能で磁気イメージングができる。そのため、研究開発の現場で多く利用されているが、MFM では使用する強磁性探針の磁化状態によって得られる情報が異なることが指摘されており、データの解釈には十分な注意が必要である。また、MFM が計測している量は探針に働く磁気力の勾配であり、磁場を直接定量的に計測していない。これが MFM で得られた情報の定量的解釈を困難にしている一因である。一方で、微小磁場センサプローブを試料表面近傍で走査し、磁場分布を定量的に測定する SPM が開発されている。この方法には、ホールセンサを用いた走査型ホールプローブ顕微鏡、SQUID センサを用いた走査型 SQUID 顕微

鏡、磁気抵抗センサ (MR センサ) を用いた走査型磁気抵抗効果顕微鏡 (scanning magnetoresistance microscopy : SMRM) がある。MR センサは、室温下で高感度であり、小型化が容易であることから高分解能測定に適している。MR センサを原子間力顕微鏡 (atomic force microscopy : AFM) 用カンチレバー上に作り込んだデバイスを AFM 装置に組み込んだ SMRM では、試料表面形状と漏えい磁場分布の同時測定が可能である。SMRM は室温大気中において、試料の導電性の有無や試料形状に関わらず試料表面の漏えい磁場分布を定量的に測定できることから、様々な応用が可能である有望な磁気イメージング技術である。

本研究は、MR センサにスピナバルブセンサを使用した SMRM システムを開発することにより、SMRM の高感度化、高分解能化および磁場無印加での測定を実現したものである。

本研究で得られた主な成果は次の通りである。① SMRM で使用するスピナバルブセンサ付きカンチレバーデバイスの作製プロセスを構築した。②作製したデバイスを使用した SMRM では、試料の表面形状と漏えい磁場分布を同時に磁場無印加で測定できることを明らかにした。③さらに、漏えい磁場を定量的に測定できることを金属細線中を流れる微小電流が作る磁場分布を測定することで明らかにした。④ MFM と比較すると、SMRM ではプローブからの漏えい磁場による試料磁気状態への影響が少ないことを示した。⑤ SMRM の高分解能化へ向けた新しい指針を提案した。これらの成果を下記の論文構成で論述した。

第一章では、本研究の背景として、磁気イメージングの重要性を明確にし、従来提案されてきた磁気イメージング技術の比較から本研究の特色および位置づけを明らかにした。

第二章では、SMRM の磁場センサである MR センサについて、異方性 MR センサとスピナバルブセンサの動作原理を述べた。

第三章では、SMRM の動作原理と性能 (磁場感度、空間分解能、時間分解能) について述べた。

第四章では、SMRM で用いるスピナバルブセンサ付きカンチレバーの作製プロセスについて述べた。デバイスの歩留まり向上を実現するために改良した点を特に詳しく述べた。

第五章では、スピナバルブセンサの作製とその特性評価に関して述べた。

第六章では、微小電流が流れている金属細線の SMRM 測定結果について述べた。金属細線の形状と微小電流により作られる磁場を同時に磁場無印加で測定できることを明らかにした。また、SMRM 測定システムの定量性について議論した。

第七章では、強磁性体試料の測定例として、マイクロメータサイズに加工したパーマロイ薄膜の SMRM 測定結果を示し、残留磁化状態での測定が可能であることを明らかにした。また、ガーネット薄膜の同一領域を MFM と SMRM で測定した結果から SMRM は MFM と比べて試料の磁気状態を乱さずに漏えい磁場分布を測定できることを示した。センサデバイスを磁気プローブとする SPM の空間分解能の上限はセンササイズで決まることが知られている。しかしながら、本研究では、センササイズよりもはるかに微細な磁区構造からの漏えい磁場分布を得た。これはスピナバルブセンサの磁化過程と関連があると考え、スピナバルブセンサの出力と磁区構造の同時観察を透過電子顕微鏡中にてローレンツ法により行い、その可能性について議論した。

第八章では、本研究を総括し、本研究の成果により期待される将来展望について記した。

本研究は、微小領域における磁場分布を磁場無印加で室温にて高感度・高分解能で計測可能な技術を構築し、その検証を行ったものである。特に、磁場の定量測定が可能であるという点に大きな特色を有している。今後、さらなる高感度・高分解能化を実現することにより必須の磁気計測技術となることが期待される。また、集積回路 (IC) の配線不良解析などへの応用も期待される。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 末 岡 和 久
副 査 教 授 三 島 瑛 人
副 査 教 授 山 本 眞 史
副 査 教 授 高 橋 庸 夫

学 位 論 文 題 名

High sensitive scanning magnetoresistance microscope and its applications

(高感度走査型磁気抵抗効果顕微鏡の開発と応用に関する研究)

本研究は、走査型磁気抵抗効果顕微鏡 (scanning magnetoresistance microscopy: SMRM) における磁気抵抗効果素子付カンチレバの新しい構造を提案し、カンチレバ作製プロセスに関する研究を行い、試作したカンチレバを用いた SMRM システムを構築し、SMRM による電流誘起磁場の高感度定量測定ならびに磁性体表面の磁区構造観察を試みた研究に関する成果をまとめたものである。

微細化が進められている磁気記録メディアでは記録密度が $25 \times 25 \text{ nm}^2$ 程度の微小領域に 1 bit の記録が必要となる 1 Tbit/inch^2 に達しようとしており、次世代の不揮発性メモリデバイスとして注目されている磁気ランダムアクセスメモリにおいても大容量化のためにナノスケールの磁性体メモリセルの開発が必要とされている。これらのナノスケールの磁性体を利用したメディアやデバイスの研究開発には、ナノスケールの分解能を有する局所的な磁気構造・磁気特性を評価する技術が必要不可欠である。

そのために、さまざまな磁気イメージング技術の開発が進められているが、微小磁場センサプローブを試料表面近傍で走査し、磁場分布を定量的に測定する走査型プローブ顕微鏡 (scanning probe microscopy: SPM) もその一つである。なかでも、磁気抵抗センサ (MR センサ) を用いた SMRM は、室温下で高感度であり、センサの小型化が容易であることから高分解能測定に適している。MR センサを作り込んだカンチレバを原子間力顕微鏡 (atomic force microscopy: AFM) 装置に組み込んだ SMRM では、試料表面形状と漏えい磁場分布の同時測定が可能である。

本研究は、MR センサにスピンバルブセンサを使用した SMRM システムを開発することにより、SMRM の高感度化、高分解能化および磁場無印加での測定を実現した。

本研究で得られた主な成果は次の通りである。① SMRM で使用するスピンバルブセンサ付きカンチレバデバイスの作製プロセスを構築した。②作製したデバイスを使用した SMRM では、試料の表面形状と漏えい磁場分布を同時に磁場無印加で測定できることを明らかにした。③さらに、漏えい磁場を定量的に測定できることを金属細線中に流れる微小電流が作る磁場分布を測定することで明らかにした。④磁気力顕微鏡 (magnetic force microscopy: MFM) と比較すると、SMRM では

プローブからの漏えい磁場による試料磁気状態への影響が少ないことを示した。⑤ SMRM の高分解能化へ向けた新しい指針を提案した。これらの成果は下記の論文構成で論述されている。

第一章では、本研究の背景として、磁気イメージングの重要性が明確にされ、従来提案されてきた磁気イメージング技術の比較から本研究の特色および位置づけが述べられている。

第二章では、SMRM の磁場センサである MR センサについて、異方性 MR センサとスピンバルブセンサの動作原理が述べられている。

第三章では、SMRM の動作原理と性能 (磁場感度、空間分解能、時間分解能) について述べられている。

第四章では、SMRM で用いるスピンバルブセンサ付きカンチレバデバイスの作製プロセスとデバイスの歩留まり向上を実現するために改良した点について述べられている。

第五章では、スピンバルブセンサの作製とその特性評価に関して記述されている。

第六章では、金属細線の形状と微小電流により作られる磁場を同時に磁場無印加で測定できることを明らかにしている。また、SMRM 測定システムの定量性について議論されている。

第七章では、強磁性体試料の測定例として、マイクロメータサイズに加工したパーマロイ薄膜の SMRM 測定結果を示し、残留磁化状態での測定が可能であることを明らかにしている。また、ガーネット薄膜の同一領域を MFM と SMRM で測定した結果から SMRM は MFM と比べて試料の磁気状態を乱さずに漏えい磁場分布を測定できることが示されている。

第八章では、本研究の総括、ならびに本研究の成果により期待される将来展望について、記されている。

これを要するに、本研究は、微小領域における磁場分布の高感度・高空間分解能計測が室温・無バイアス印加磁場条件下で可能なシステムとして、スピンバルブ型磁気センサ素子を搭載したカンチレバを用いた走査型磁気抵抗効果顕微鏡を構築し、その性能等を実験的に検証したものであり、これは磁気計測工学の進歩に寄与するところ大である。

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者と認める。