

	あかはね こういち
氏 名	赤羽 浩一
授 与 学 位	
学位授与年月日	平成16年9月 8日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最 終 学 歴	昭和45年 9月
	東京電機大学第1部工学部電子工学科修了
学 位 論 文 題 目	磁気光学効果を用いた磁気特性評価装置の高空間分解能化と高感度化に関する研究
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 高橋 研 東北大学教授 荒井賢一 東北大学教授 大野英男 東北大学教授 村岡裕明

論 文 内 容 要 旨

第1章 緒言

本章では、本論文の背景ならびに目的について記述している。HDDヘッドやMRAMに代表される高密度磁気記録デバイスでは、1990年代後半からの飛躍的な微細加工技術の進展にともなって基幹部品となる磁性材料が数 $10\mu\text{m}$ ～サブ μm にパターン化され小型化されてきた。これらの磁性材料では試料内各場所での磁気特性がその性能を左右することから、局所領域の磁気特性評価装置に対する需要が高まっていた。可視光の磁気光学効果を用いる測定は、原理的には波長程度の空間分解能を実現できると考えられ、また反射の際の偏光状態の変化を通して試料の磁化情報を得るという検出原理により試料の非破壊性、評価の簡便性、高速性を併せ持つことから前記需要に相応するものである。しかしながら研究開始当時(1997年)には、偏光状態を維持しつつサブ μm 程度の面内空間分解能を有する入射光を確立する技術・物理指針ならびに、局所領域からの反射光に含有される極微量の磁気光学信号を高感度に検出する技術・物理指針が確立していなかった。そこで本研究では、縦磁気 Kerr 効果検出の空間高分解能化と検出高感度化との両立を図り、磁気履歴曲線の測定装置および磁区像観察装置の開発ならびにこれら装置の設計指針の確立を目的とした。

第2章 磁気光学効果の現象論とその検出原理

本章では、磁気光学効果の現象論とその検出原理について議論している。すなわち、材料の磁気光学定数と光学応答量とが如何なる関係にあるか電磁光学的現象論により議論し、本論文で開発する磁気履歴曲線検出、磁区像観察装置の基本原理解である縦磁気 Kerr 効果とその測定原理を概説した。

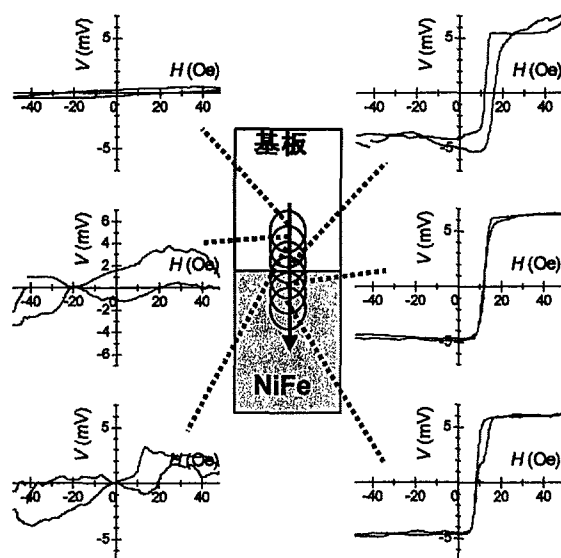
第3章 磁気光学効果を用いた磁気特性評価装置のシステムならびに構成素子の現状と問題点

本章では、従来の縦磁気 Kerr 効果を用いた磁気履歴曲線検出装置および磁区像観察装置に採用されてきた光学系、信号処理系等の主要な構成要素の現状と問題点を記述している。特に、局所領域への入射光の照射ならびに局所領域からの磁気光学信号の高感度検出のためには、顕微鏡対物レンズを用いる斜向入射方式が最適な方法であることを提案すると同時に、本素子を用いる場合入射光学系や偏光光学系の設計が課題であることを議論している。すなわち、顕微鏡対物レンズには、収差を回避して集光、拡大特性を確保する目的で胴付側に有効径を制限する絞りが設けられているが、これはスポット径の設定ならびに斜向入射の実現の際に障害となる。また、曲率の大きな球面に直線偏光が入

射する場合には、レンズ面内各部での P 偏光と S 偏光に対する透過・反射特性が異なるため、レンズへの入射位置に対応して入射光の偏光軸が回転する。これは対物レンズ出射後に入射直線偏光を維持できる領域がレンズ面内の十文字状の領域に限定されることを意味し、偏光光学系や光軸調整機構の自由な設計に際し問題となる。

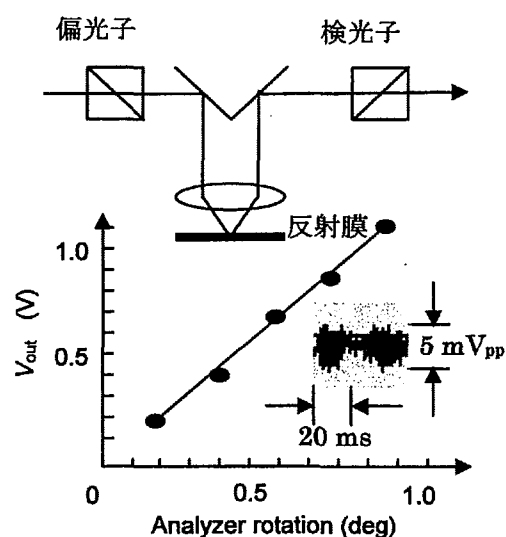
第 4 章 局所領域での磁気光学信号計測装置の製作とその性能評価

本章では、レーザ光の斜向入射を用いた従来の磁気履歴曲線検出装置である MOKE (Magneto Optical Kerr Effect) 装置に対し、顕微鏡対物レンズを導入して空間高分解能化を図った μ MOKE 装置 (MOKE with μm -spot probe)、 μ SMOKE (Surface MOKE with μm -spot probe) 装置について、検出高感度化を実現した施策と装置の性能評価を行った内容に関して記述している。いずれの装置においても検出高感度化のためには、光源ならびに偏光検出法の改善が有効であった。 μ MOKE 装置に採用した放電管レーザ (He-Ne レーザ) では、共振器長の温度変化に伴う発振モードの遷移や競合が雑音の起源となるためレーザ管を断熱容器に収納して熱平衡状態を持続させるとともに、発振強度フィードバック方式によって出力光強度の安定化を図った。検出光学系の中で偏光検出法には、PBS (Polarizing Beam Splitter) 差動法を採用しノイズ成分の抑制と磁気光学信号の強調検出を図った。これらの改善により、本装置の従来装置に対する検出感度はおよそ 6 倍になると見積もられる。開発した装置の性能について空間分解能を (図 1) に示すナイフエッジ法、検出感度を (図 2) に示す偏光解析法にて検証した結果、それぞれ、 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 、 $0.005\ \text{deg}$ であることがわかった。 μ SMOKE 装置では、光源には半導体レーザ、偏光検出法には円偏光変調法を採用した。特に光源駆動回路には、時間的コヒーレンシーを低下させて干渉に起因する雑音を低減するために高周波電流を重畳して半導体レーザを多モード発振させている。(図 3) に示したように、開発した装置により線幅 $0.2\ \mu\text{m}$ の軟磁性薄膜細線の磁化過程が検出され、プローブ光寸法と細線との面積比により、実効 Kerr 楕円率にして $0.001\ \text{deg}$ 以下の高検出感度を有する装置が実現可能であることが明らかになった。



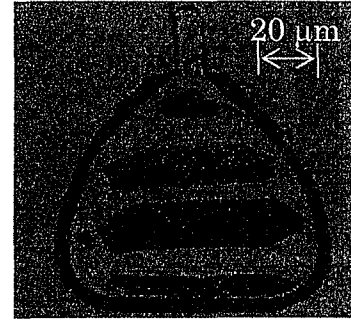
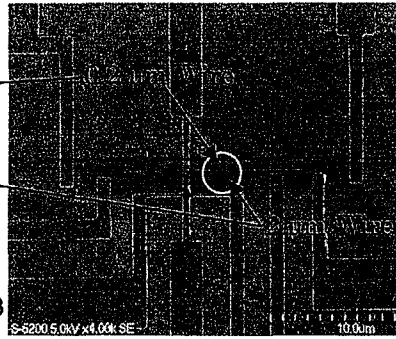
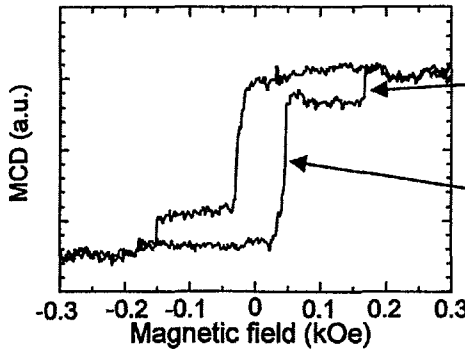
(図 1) ナイフエッジ法による空間分解能の検証

ガラス基板に作製されたパターン試料に対し、測定点を $1\ \mu\text{m}$ 移動する毎に磁気光学信号を検出した。検出信号が確定した移動量から空間分解能が $2\sim 3\ \mu\text{m}$ であることが検証された。



(図 2) 検出感度の検証

偏光解析手法を適用して装置の検光子を 1 度回転した際の実出力電圧と、含有される雑音電圧とを比較し、検出感度が $0.005\ \text{deg}$ であることが検証された。



(図 3) μ SMOKE 装置で検出した Spin Injection Device の磁気履歴曲線

幅 $2\ \mu\text{m}$ と $0.2\ \mu\text{m}$ の NiFe 磁性細線の磁化反転が複合した磁気履歴曲線が検出されている。 $0.2\ \mu\text{m}$ の磁性細線の磁化反転情報も検出に十分な信号雑音比を有する。

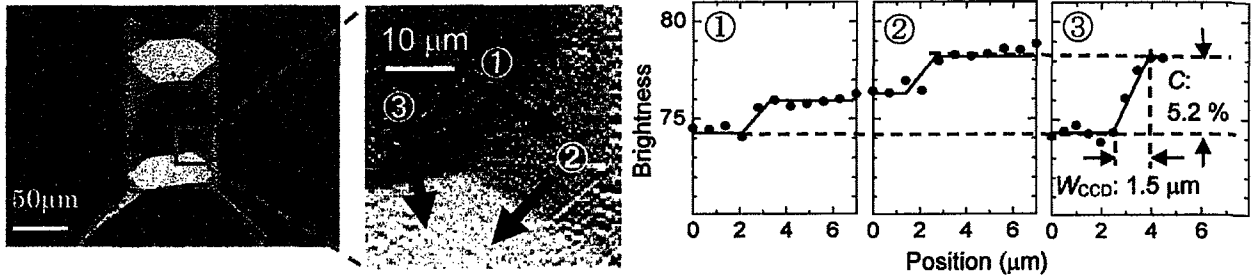
(図 4) 走査型磁気像観察装置で

検出した磁気ヘッドシールド部の磁気像

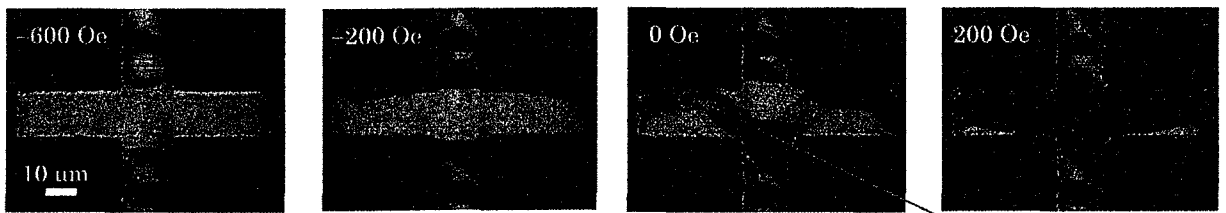
第 5 章 空間高分解能化ならびに高明暗比化による磁気像観察装置の製作とその性能評価

本章では顕微鏡対物レンズを利用して空間高分解能化を図った、走査型および一括型の 2 種類の原理の磁気像観察装置について製作ならびに性能評価を行った内容に関して記述している。走査型装置は、 μ MOKE 装置に走査用 XY ステージならびに磁気像可視化用信号処理系を付加することにより実現される。試料表面の瑕や信号検出回路の直流成分の経時変化の影響で画像が不鮮明なることを回避するために磁壁揺動法を採用した。磁壁揺動法とは、適度な微小交流磁界により磁壁を揺動させた状態において試料各位置での磁気光学信号を検出し、信号中の交流成分の強度情報を走査位置に対応させて配列する方法である。本装置により観察した磁気ヘッドシールド材のヨーク部ならびに先端部の磁気構造を (図 4) に示す。

一括型磁気像観察装置では、従来の金属顕微鏡や偏光顕微鏡を基に白色光を用いた入射・結像光学系を構築し磁気像の空間高分解能化ならびに高明暗比化を図った。まず磁気観察顕微鏡の性能を定量的に評価するための評価指標を提案した。性能評価用の試料は 180° 磁壁が容易に確認できるパーマロイパターン化試料とした。空間分解能については 180° 磁壁を形成する両磁区の画像上における輝度遷移長、明暗比については両磁区の輝度幅および各磁区内部の輝度分散の半値幅を試料からの反射率に相当する平均輝度により規格化した値と定義した。次に画像取得法ならびに画像処理法について検討した。明暗比の高い画像を取得するためには、試料からの反射光のうち磁気光学信号のみを抽出し、輝度に対応させる必要がある。そこで、磁化の飽和状態での撮像と観察したい印加磁界条件での撮像の差分像を得る手法を採用した。この飽和像差分法にて得られる画像に対して明度とコントラストを表示機器に対し適切に調節するためにレベル補正画像処理を行い、磁気像を得ることとした。尚、輝度分散の低減には 10 回以上の画像加算平均化処理法が有効であることもわかった。さらに光学系の改善により高明暗比化を図った。落射光学系には S および P 偏光を維持しつつ 3 回の全反射により光路を 90° 変換することができるベレックプリズムを用い入射光の強度損失を抑制した。入射光学系にはケーラー照明法を採用した。この方法の本来の特徴の一つは高次光の量を調整することにより視野の明るさを制御できる開口絞りを有することである。本研究では、この原理を偏光特性維持の用途に応用展開し、高明暗比磁気像の取得に成功した。すなわち、開口絞りを $0.5\ \text{mm}^\phi$ 以下に極端に小口径化することにより高次光を遮断し、対物レンズの後側焦点位置に結像されるスポット径を極小化できる。このことにより顕微鏡対物レンズのレンズ面のうち、偏光特性が良好な対物レンズの



(図5) 一括型磁区像観察顕微鏡で検出した NiFe 試料の磁区像とその空間分解能、コントラスト評価結果
右図は、パターン試料の磁区像を中央図のように拡大して磁壁を横切る輝度の遷移をプロットしたものである。



(図6) 一括型磁区像観察装置にて撮影した磁区像と μ MOKE 装置にて
検出した局所磁気履歴曲線との対応

パターンニング試料の局所磁気履歴曲線は、測定箇所によっては、あたかも一方向異方性の発現を反映したようにシフトする。この現象は、本研究で開発したパターン形状の異方性により形成された残留磁区構造と磁壁移動型の磁化過程の進行を考え併せると明快に理解される。

辺縁部のみに光を入射させ得ることを明らかにした。装置性能を評価した結果、20 倍の顕微鏡対物レンズを用いた場合、開口絞り径 0.3 mm^ϕ の条件下において、空間分解能は $1.5 \text{ }\mu\text{m}$ 、明暗比は 5.2%、輝度分散は 0.7% を実現した。このように高明暗比化できた結果として、微小形状に加工されたパーマロイ薄膜の内部に形成される 3 種類の磁区を 3 段階の輝度で明瞭に観察可能となった(図 5, 6)。

第 6 章 結言

本章では本研究を総括している。可視光の縦磁気 Kerr 効果を利用した、 μm からサブ μm オーダーの空間分解能を有する磁気履歴曲線の測定装置および磁区像観察装置を開発した。縦磁気 Kerr 効果検出の空間高分解能化と検出高感度化との両立を図りこれら装置の設計指針を検討した結果、以下のことが明らかになった。① 顕微鏡対物レンズの瞳辺縁部に光を入射することにより斜向入射の実現が可能である。② He-Ne レーザを用いた磁気履歴曲線の測定に関する検討の結果、光源の安定化ならびに PBS 作動法に基づく偏光検出により、局所領域 (スポット径: $2\sim 3 \text{ }\mu\text{m}$) からの微小な磁気光学効果の検出 (回転角: 0.005 deg) が可能となることを明らかにした。さらに円偏光変調法により偏光検出を行えばスポット内の $0.2 \text{ }\mu\text{m}$ の細線からの磁気履歴曲線も検出できることがわかった。③ 白色光を用いた磁区像の一括観察に関する検討の結果、入射光学系にはケーラー照明法を応用し、落射光学系にはベレックプリズムを用いることにより、空間分解能 $1.5 \text{ }\mu\text{m}$ 、明暗比 5.2%、輝度分散 0.7% を実現した。この結果、微細加工試料の内部に形成される磁区をその磁化方向と明暗の輝度とを対応させて明瞭に観察できることを明らかにした。

論文審査結果の要旨

可視光の縦磁気 Kerr 効果を用いる磁気特性評価法は、波長程度の面内空間分解能を実現でき、局所領域の磁性を評価する上で有益な方法である。しかしながら、偏光状態を維持しつつミクロンオーダーの面内空間分解能を達成するための入射光学系に関する設計指針、ならびに、局所領域からの反射光に占める極微量の磁気光学信号を高感度に検出する設計指針は確立されておらず、これらの課題の解決がデバイスの高周波・小型化のために強く要求されていた。本論文は、縦磁気 Kerr 効果を用いた計測装置の高空間分解能化と検出高感度化の両立を図ったもので、ミクロンオーダーの微小領域の磁気履歴曲線の測定ならびに磁区像観察を可能とするための設計指針を確立して、実際に測定装置を開発したものであり、全文 6 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、縦磁気 Kerr 効果の現象論を記述し、磁気履歴曲線検出および磁区像観察装置の基本的な測定原理について概説している。

第 3 章では、従来の縦磁気 Kerr 効果を用いた磁気特性評価装置の光学系と信号処理系の現状、および高感度化に際しての問題点について記述している。特に局所領域への入射光の照射ならびに局所領域からの磁気光学信号の高感度検出のためには顕微鏡対物レンズを用いる斜向入射方式が最適であること、ならびに、本方式を用いる場合直線偏光の維持が課題となることを指摘した。これは装置設計上有用な指摘である。

第 4 章では、レーザ光を用いた磁気履歴曲線検出装置に対して高空間分解能化と高検出感度化を実現させた装置の技術要素とその性能評価を行った内容に関して記述している。光源には発振モード競合状態の安定化と非干渉化のための強度変調技術を適用し、偏光検出には磁気光学信号の強調検出のため PBS (Polarizing Beam Splitter) 差動法もしくは円偏光変調法を採用した。その結果、測定スポット径 2~3 μm 、Kerr 回転角検出感度 0.005 deg を実現し、線幅 200 nm の軟磁性薄膜細線の磁化過程の検出を可能とした。これは極めて有用な成果であり、高く評価できる。

第 5 章では、走査型および一括型の磁区像観察装置の製作ならびに性能評価に関して記述している。特に白色光を用いる一括型磁区像観察装置では、入射・落射光学系としてケーラー照明法およびベレックプリズムの導入が、強度損失を抑制し、かつ、直線偏光を楕円化させない方策として極めて有効であることを明らかにした。NiFe パターンド薄膜の磁区構造観察の結果、空間分解能 1.5 μm 、明暗比 5.2%、輝度分散 0.7% を実現している。これは極微領域の磁区構造を観察可能にした極めて有用な装置であり、工学的に高く評価できる。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、縦磁気 Kerr 効果による磁気特性の評価に際して、入射・検出光学系に対して物理的・光計測学的視点から技術改善を加え、ミクロンオーダーの磁性体に対する局所磁気履歴曲線の検出および磁区像観察のための指針を明らかにしたもので、磁気物性工学および電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

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。