

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19360183
 研究課題名（和文） 時分割法による磁化ベクトル履歴動画像を撮影可能な縦カー効果顕微鏡の作製
 研究課題名（英文） Development of longitudinal magneto-optical Kerr microscope for observation of dynamics of local magnetic moment by using time division method
 研究代表者
 齊藤 伸 (SAITO SHIN)
 東北大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：50344700

研究成果の概要：

本研究では、「マイクロメートル領域内の局所的な磁化ベクトルの方向を可視化表現できる磁区観察顕微鏡」を実現した。磁化方向の特定のためには、対物レンズ入射瞳の直交方向の辺縁部に微小径の直線偏光を入射させて、磁化ベクトルの各軸方向成分像を得、それらを合成することが有効であった。各軸からの照明タイミングをずらす方法（時分割法）に加え、高周波掃引磁界と同期を取って撮像する方法（ストロボ法）を組み合わせた。これらにより局所領域の磁化ベクトルのダイナミクスの可視化も可能となった。本装置は永久磁石やトランス鉄芯材料、スピントロニクスデバイスの研究開発に大いに役立っている。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
2008年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
年度			
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：計測機器、磁区観察、光学顕微鏡、偏光顕微鏡、時分割法

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究分野の背景

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 μm ～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、パターン試料内部の磁区構造観察に対する需要が高まっていた。反射面内に磁化が配向して

いる強磁性体試料の磁区構造は、原理的には縦カー効果を利用した偏光顕微鏡を用いて観察可能である。しかしながら 2001 年当初、偏光状態を維持しつつ試料を均一に照明する技術・装置設計指針ならびに、局所領域からの反射光に含有される極微量の偏光情報を高感度に検出する技術・装置設計指針が確立されていなかった。このため材料・デバイス開発に携わる研究者は、市販の偏光顕微鏡に対し改良を施して試行錯誤的に磁区観察を行っていた。

(2) 研究代表者による関連研究の背景

これに対し研究代表者は、高倍率化と高明暗比化との両立を図った光学系の設計を行い、高明暗比縦 Kerr 効果顕微鏡を完成させた (Fig. 1)。鍵となった技術は、旧来のケーラー照明法の見直しであった。すなわち開口絞り (図中 A.S.) を極端に小口径化することにより、対物レンズの後側焦点位置に結像される開口の像を極小化できる。このことにより白色光を偏光特性が良好に維持される「対物レンズの辺縁部」のみに入射させ得る結果、視野内の均一照明と良好な直線偏光性を両立できることを見出した。さらに光源として半導体レーザを用い、ストロボ法を応用することにより低時間分解能の CCD カメラ (シャッター開放時間: 約 30 ms) を用いたまま、数十 ps オーダーの磁化過程の一括撮像できることも示した。(平成 17-18 年度 科学研究費補助金 若手研究 A; 17686034 の成果)

2. 研究の目的

本研究は、上記の科学研究費補助金 若手研究 A の発展研究であり、局所領域の簡便な磁気特性計測装置として要望が強い、「磁化方向の検出が可能な縦カー効果顕微鏡」を実現することにある。本計測装置が実現できれば、磁区履歴動画の撮影や磁界印加方向と直交する方向の局所磁気履歴曲線も計測可能となるため、 μm オーダーの局所領域の磁気特性評価装置としても活用することも目的としている。

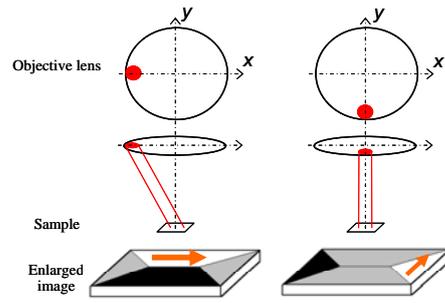


Fig. 2 対物レンズへの入射光落射位置と磁区コントラストとの関係

3. 研究の方法

磁化方向検出可能な縦カー効果顕微鏡を実現するためには、観察に十分な強度の入射光量を確保し、Fig. 2 に示すように、対物レンズの x, y 各軸の辺縁部に入射光を落斜させて、各軸方向の磁化ベクトル成分に比例したコントラストを付すことが必要である。さらに磁界掃引時の磁化ベクトル方向のマッピングを行うためには、各落斜光軸からの入射光による照明タイミングと同期をとって CCD カメラのシャッターを切る時分割法を確立する必要がある。

4. 研究成果

(1) 複数軸入射光学系による磁化ベクトル成分検出の原理検証

原理検証実験ではスミスミラーを用いた同軸落射光学系を採用し、Fig. 3 に示すように手動の直線移動機構を 2 軸設けて後側リ

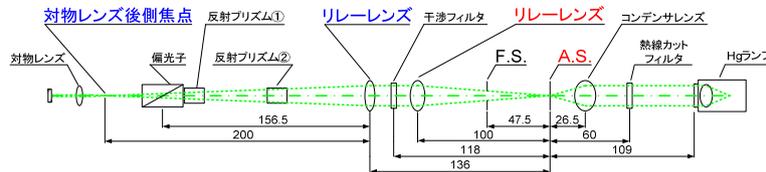


Fig. 1 ケーラー照明を応用して設計した、磁区観察顕微鏡の照明光学系。

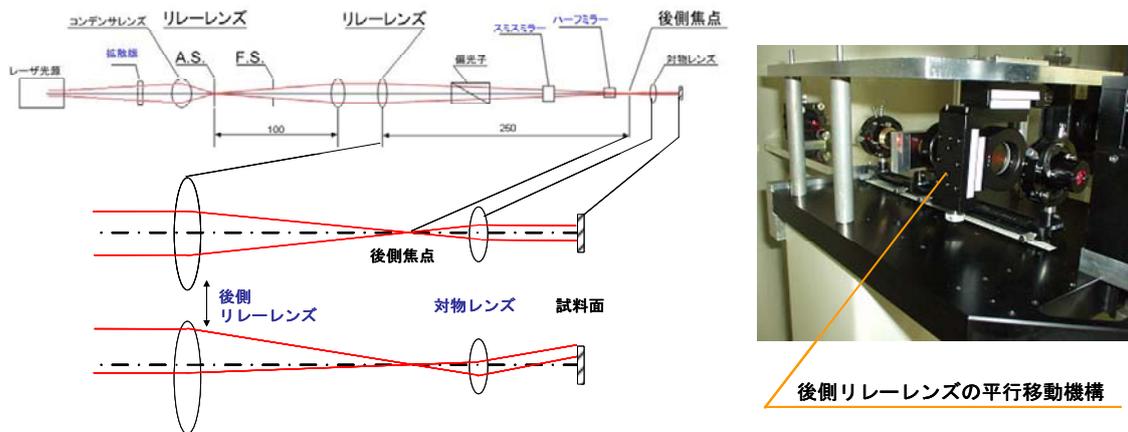


Fig. 3 後側リレーレンズの平行移動により、試料への照明光の斜め入射を実現できることを示す模式図。原理検証実験にて実際に作製した後側リレーレンズの2軸移動機構の写真も示す。光学ベースからの高さに余裕がなかったため、後側リレーレンズは上側から吊り下げた。

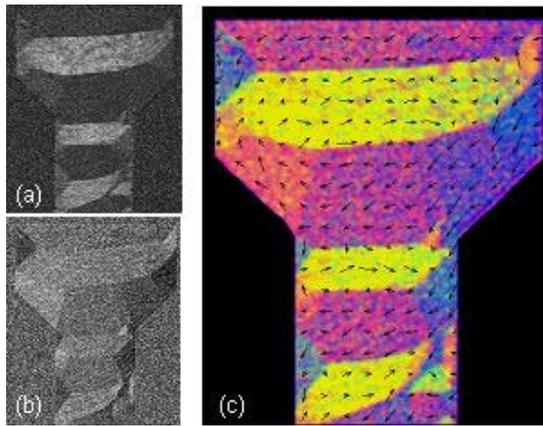


Fig. 4 楔形NiFe薄膜の磁化ベクトル像。(a)入射光をx軸方向から落射させた場合。(b)y軸方向から落射させた場合。(c)(a)をx軸成分、(b)をy軸成分として合成した磁化ベクトル像。

レーンズを光軸中心から移動させることにより、対物レンズへの入射スポット位置を移動させて落斜方向を変化させた。加えて、光量確保の観点から、光源には半導体レーザー光(LD: 657 nm)を用いた。Fig. 4には、(a)x方向、(b)y方向から入射光を落斜させた場合のくさび形テスト試料の磁区像を示す。これらの像に色合いを割り付け、合成した磁区像(c)も併せて示した。磁化ベクトル像には、参考のために輝度情報から算出したベクトルを矢印で示してある。これまで同時にコントラストをつけることができなかつた入射方向に対して直交する方向の磁気モーメントをもつ磁区に対して異なった色合いを対応させることにより、ベクトル情報が可視化できていることがわかる。

(2) 光源のコヒーレンシーに関する検討

Fig. 4(c)を一見してわかるように各磁区内部の色合いは均一ではなく、この色情報と対応して磁化の方向を表す矢印も同一磁区内で方向が揃っていない。これは半導体レーザー光の干渉パターン(スペックル)が秒単位で変化しているために、観察像(多磁区状態)と飽和像(単磁区状態)との差分像(a),(b)の時点でスペックルパターンが除去できていないことに起因する。光スペクトル解析の結果、半導体レーザーの駆動電流には600 MHzの高周波変調を印加してマルチモード発振させ、さらに150~300 kHzの低周波の矩形波変調も重畳させて縦モード間の遷移を抑制させることが、スペックルの時間変動の抑制に有効であることがわかったが、完全な抑制には至らなかった。

(3) 時分割落斜照明による磁化ベクトル履歴動画像

4-(1)項において検証した方法、すなわち「直交2方向から光を交互に落斜させ時分割撮影した磁区像を合成することにより、面

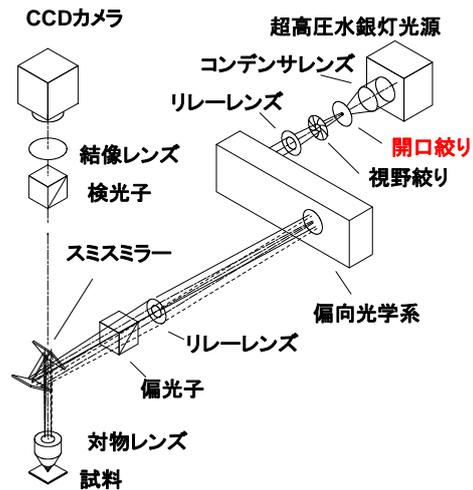


Fig. 5 白色光源を用いた磁化ベクトル可視化可能な磁区観察顕微鏡の光路図。

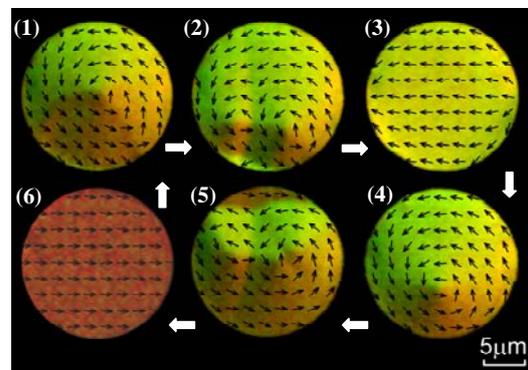


Fig. 6 円形NiFe試料の磁化ベクトル像。図中には局所的な磁化方向を示す矢印を添えた。印加磁界は紙面左右方向、右向きを正として(1)0,(2)-15,(3)-100,(4)-15,(5)+15, and (6)+100 Oeである。

内方向の局所磁化方向のマッピング像を得る方法」を装置に実装した。装置作製に当たっては、4-(2)項にて述べた理由により半導体レーザーを用いることはやめ、光源に白色光を用い、入射方向切り替え光学系を設けて電氣的に制御することにより1光源で直交2方向の入射光軸を実現した。Fig. 5に開発した顕微鏡の光路図を示す。照明法はこれまで同様、ケーラー照明法を踏襲した。落斜部にはスミスミラーを用い同軸落斜光学系を採用した。入射方向切り替え光学系はリレーレンズの光源側焦点位置に配置した。これは対物レンズの入射瞳のxおよびy方向の辺縁部に対物レンズの光軸と平行に光を入射させる条件である。この光学設計では、入射瞳径の異なる対物レンズを用いても照射光の角度調整のみで入射条件を最適化できるとともに、スミスミラーへの入射角を一定に保つことで偏光特性を維持できるという利点を有する。Fig. 6には、紙面横方向に磁界を印加した場合のNiFe円形パターン薄膜の磁区履歴像を局所的な磁化方向を示す矢印を添え

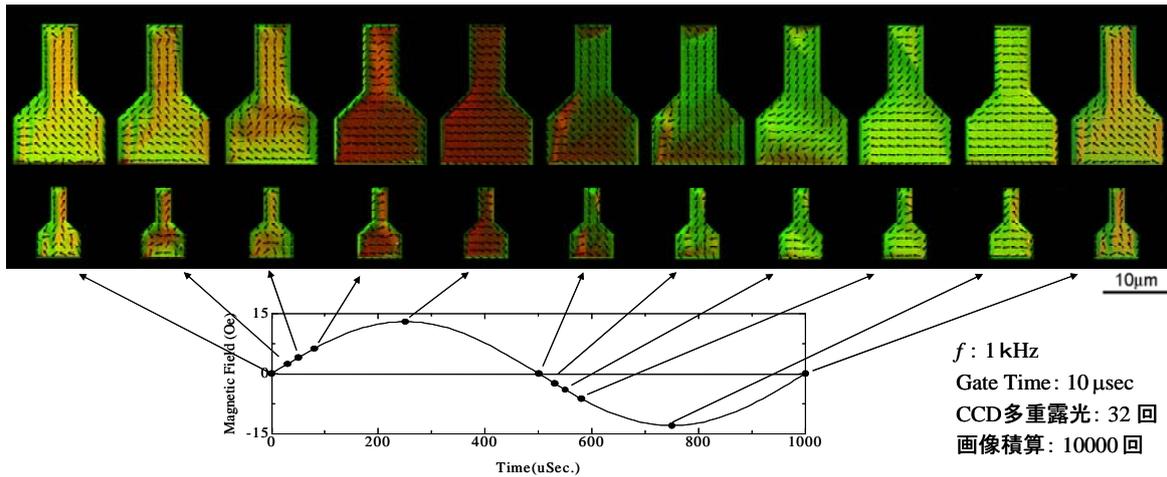


Fig. 7 時分割・ストロボ法により直交2軸方向成分の磁区像を合成して得た時間分解磁化ベクトル像。

て示す。磁化方向は、単位画素毎に直交2方向それぞれについて、基準画像からの輝度差を、正負に飽和させた際の輝度変化分で規格化して方向余弦を求めることにより決定している。円形のNiFe試料の観察結果によると、渦状磁化状態の渦中心が移動して磁化反転が進行していることがみてとれる。

(4) 時分割照明とストロボ撮像法を組み合わせた時間分解磁化ベクトル履歴動画像

4-(3)で作製した顕微鏡に、過年度の科研費にて確立したストロボ法を組み合わせると適用すれば、局所磁化ベクトルのダイナミクスも画像化できると考えられる。そこで撮像側に電子シャッター機能を有するイメージインテンシファイアユニットを導入し、ストロボ法を実現した。Fig. 7に時分割法ならびにストロボ法を適用し、直交2軸方向成分の磁区像を合成して得た、NiFe楔形パターンの時間分解磁区履歴像を示す。ストロボ法によって明瞭な磁区構造が得られていることから、パターン化試料では磁区構造の磁界掃引に対する再現性が極めて高いことがわかる。電子シャッターの動作速度と磁区像の信号雑音比から判断すると、本手法によりゲート時間をナノ秒から数100ピコ秒まで短縮できる目処が付き、本装置はナノ秒オーダーの磁化ベクトルのダイナミクスの観察も可能であることがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計3件)

- ① 目黒栄、齊藤伸、小林昌博、赤羽浩一、高橋研、「ストロボ法による高時間分解縦Kerr効果顕微鏡像のノイズ評価」、第32回日本磁気学会学術講演会、2008年9月14日、東北学院大学多賀城キャンパス、多賀城市。

- ② 目黒栄、齊藤伸、小林昌博、赤羽浩一、高橋研、「白色光を用いた縦Kerr効果顕微鏡による局所磁化方向の決定」、第31回日本応用磁気学会学術講演会、2007年9月13日、学習院大学、東京目白。
- ③ 齊藤伸、目黒栄、赤羽浩一、高橋研、「Kerr効果顕微鏡 ~ μm オーダーの迅速な磁区構造観察と磁区内局所磁化方向の決定」、日本応用磁気学会 第155回研究会、2007年7月20日、中央大学駿河台記念館、東京麹町(依頼講演、講演会講師)。

[その他]

- ① 本件に関連した受賞
平成20年度 第56回電気科学技術奨励賞、小林昌博(東北大学技術職員)、「 μm 領域の局所磁化方向検出可能な縦Kerr効果顕微鏡の開発と高性能化に関する功績」、財団法人電気科学技術奨励会、2008年11月26日。研究代表者の技術アイデアを元に、大学技術職員の援助により原理検証がなされたという点で功績が評価され、大学技術職員が受賞。
<http://www.ohmsha.co.jp/information/shourei/2008/56list.htm/>
- ② 公開
研究成果の一部は、研究代表者が所属する研究室のホームページにて公開中。
<http://www.takahashi.ecei.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
齊藤伸 (SAITO SHIN)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 50344700
- (2) 研究分担者
なし
- (3) 連携研究者
なし