

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2009～2010
 課題番号：21760261
 研究課題名（和文）紫外光を用いた高分解能力ー効果顕微鏡によるナノ磁性ドットの
 超高速動磁化反転機構
 研究課題名（英文）High speed dynamic magnetic reversal mechanism of magnetic nano-dots
 with a high-resolution Kerr microscope using ultraviolet light
 研究代表者
 竹澤 昌晃（TAKEZAWA MASAOKI）
 九州工業大学・大学院工学研究院・准教授
 研究者番号：20312671

研究成果の概要（和文）：本研究では、紫外光源および高速トリガ制御 CCD カメラを用いた「80 nm の空間分解能と 5 ns の高速応答」を有する磁気 Kerr 効果顕微鏡による「高分解能・高速動磁区観察システム」を構築し、「ナノ磁性ドットの高速磁化反転動作の磁区観察」を実現することを目的とした。イメージインテンシファイア付き CCD カメラと紫外光源により構築した高空間分解能・動磁区観察システムを作製し、様々な高周波用磁性材料の磁化過程を観察することで磁化反転の速度、磁区構造の寸法依存性を調べることができた。

研究成果の概要（英文）：In the present study, we build a high-resolution, high-speed magnetic domain observation system with the magnetic Kerr effect microscope having "the spatial resolution of 80 nm and the high-speed response of 5 ns" by using a Hg-Xe lamp as an ultraviolet light source and a high-speed trigger control CCD camera. By using the high spatial resolution dynamic magnetic domain observation system, the magnetic domain structure of various magnetic materials for high frequencies applications have been observed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：電子デバイス・集積回路、磁性、磁区観察、Kerr 効果顕微鏡、動磁区

1. 研究開始当初の背景

電子デバイスに応用される磁性体のマイクロ化と高速化が急速に進んでいる。MRAM 素子は半導体メモリ (DRAM) にかわる次世代

の超高速、高密度、低消費電力の不揮発性メモリ素子として大規模な研究プロジェクトチームが組織されて研究が進められている。また、携帯電話等に搭載されるマイクロインダクタは素子寸法の小型化のために極端に

動作周波数の高周波化が進められ、動作周波数は 1 GHz 程度が計画されている。これらのマイクロ磁気素子の開発研究は MRAM 素子においてはスピン分極、交換結合バイアス等の材料物理の観点から研究が進められている。また、高周波マイクロインダクタにおいては強磁性共鳴周波数を高く取るために磁気異方性と抵抗率がナノ構造を採用しながら操作されている。

物理定数を操作するような研究は、開発しようとする素子の本質的な進歩をもたらすが、マイクロ磁気素子の物理的特性を可視化し「磁区として把握する」ことは物理定数と物理現象の関係を理解し、開発研究にフィードバックするという観点から非常に重要である。近年、プローブ顕微鏡、スピン走査型電子顕微鏡、磁気円二色性 X 線励起光電子顕微鏡等の分解能に優れた磁区観察方法が開発され、ナノメートル寸法磁性体の磁区観察が可能となった。

一方で、申請者は「磁気光学的手法(磁気 Kerr 効果)」による磁区観察技術の開発を続けてきた。上記の近代ツールに比較して、光学顕微鏡は印加磁界下での磁区の動きを連続的に観察でき、「磁区・磁化過程のダイナミクス観察」が可能であるという大きな特長を有している。

申請者は、これらの特徴を活かすべく、動磁区観察 Kerr 効果顕微鏡、偏光面変調永久磁石磁区観察顕微鏡などを開発してきた。

特に磁区のダイナミクス観察に関しては、「CCD カメラのシャッター制御」による商用周波数での動的観察システムの開発を出発点として動作周波数の高速化を進め、10 kHz で励磁したアモルファス磁性薄帯の高速動磁区観察を実現している。

磁気 Kerr 効果を用いた高速動磁区観察は、ドイツ固体材料研究所(ドレスデン I.F.W.)などで短パルス幅のパルスレーザーを用いた方法が行われている。しかし、レーザーの繰り返し周波数は固定であるため、各種磁性材料の動作周波数にあわせた観察を行うのは不可能である。これに対して、申請者のカメラのシャッター制御による方式は、より自由な駆動周波数での動的磁区観察を可能とするものである。このような、高速シャッター制御による高周波磁性材料の動的磁区観察を行うという本研究の主旨は、MRAM 素子および高周波マイクロ磁気デバイスの実用化に大きく貢献できる発展性の高い研究である。

しかし一方で、光学顕微鏡は磁気力顕微鏡(MFM)などと比較して「空間分解能」が低いという欠点を有している。光学顕微鏡の分解能は使用する光源の波長で決定されるため、可視光を利用する場合、空間分解能は 350 nm 程度でありナノ寸法磁性体の磁区観察

に利用するには無理があった。そこで、申請者は空間分解能が低いという欠点を克服する為に短波長の「紫外光を利用する Kerr 効果顕微鏡」の開発に努めてきた。そして、平成 19 年には、顕微鏡の光学素子を紫外光対応のものに置換、改造することで波長 365 nm の紫外光(*i*線)が使用可能なカー効果顕微鏡の開発に成功し、約 150 nm の空間分解能を得ている。

この高分解能顕微鏡の「分解能をさらに向上」させるとともに、現有のカメラの高速シャッター制御による「動磁区観察技術を組み合わせる」ことで、ナノメートル寸法の磁性体の磁化反転過程の磁区のダイナミクス観察を実現でき、MRAM 素子、マイクロインダクタ等のマイクロ磁性体の動作周波数の高速化に大きく寄与できるものと確信する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)素子の高速磁化反転機構やマイクロインダクタの高周波磁気特性をミクロな観点から解明するために、紫外光源および高速トリガ制御 CCD カメラを用いた「80 nm の空間分解能と 5 ns の高速応答」を有する磁気 Kerr 効果顕微鏡による「高分解能・高速動磁区観察システム」を構築し、「ナノ磁性ドットの高速磁化反転動作の磁区観察」を実現することである。

本研究では、申請者が開発した紫外光を光源とする高空間分解能のカー効果顕微鏡をさらに改良するとともに、動磁区観察を可能とするため、以下の項目を実現することを目的とする。

- (1) 新たに「波長 248 nm の紫外光」を光源とすることで、「空間分解能 80 nm」で磁区観察が可能な高空間分解能 Kerr 効果顕微鏡を開発する。
- (2) 「5 ns の高速磁化過程」の様子を観察可能にするため、上記顕微鏡に高速シャッターを有する CCD カメラを組み合わせ高速動磁区観察システムを開発する。
- (3) 上記観察システムによる検討により、ナノメートル寸法の MRAM 素子、および、薄膜インダクタの高周波での動磁化反転特性を明らかにする。

3. 研究の方法

紫外線領域での光強度が大きな水銀キセノン灯を光源として、現在より短波長の 248 nm の波長フィルタを用いることで、顕微鏡の空間分解能を現状の 200 nm から 80 nm まで向上させる。この顕微鏡にシャッターのトリガ制御可能な高速・高感度 CCD カメラを組み合わせ、高速動磁区観察システムを構築する。

この観察システムを用いて、磁性材料の磁区構造が変化する瞬間の画像を高速・高空間分解能で取り込むことを可能とするため、以下の項目について検討する。

- (a) 顕微鏡の光源と使用波長の変更に伴うレンズや偏光子などの光学素子、および顕微鏡内光路のさらなる最適化を行う。これにより、磁区観察に十分な光量を得て、80 nmの高空間分解能磁区観察を実現する。
- (b) 外部トリガ信号により最速 5 ns での CCD カメラシャッター開閉動作を可能にするゲートイメージインテンシファイア(浜松ホトニクス製)を用いた動的磁区観察システムを構築して、磁性材料の磁区構造が変化する瞬間の画像を高速に取り込むことができるようにする。

このようにして構築した高空間分解能・高速動磁区観察システムを用いて、様々な種類・寸法・形状の高周波用磁性材料の磁化過程の様子を観察することで磁化反転の速度に加えて、磁区構造の寸法依存性を調べデバイス応用の際の最適な材料構成を把握する。

また、磁性材料の微細加工に伴う高速磁化反転の劣化を抑制する手法としての磁区構造制御法を確立する。磁区構造制御法として、これまでに申請者が検討してきた段差形状による磁壁ピンニングや、反強磁性層との積層構造による交換結合異方性の導入などを念頭に種々検討する。

4. 研究成果

21年度は、紫外線領域での光強度が大きな水銀キセノン灯を光源として、365 nmおよび248 nmの波長フィルタを用いることで、顕微鏡の空間分解能を向上させ、少なくとも200 nm~150 nm程度の磁区観察空間分解能が得られることを実証した。これは従来の可視光を用いた磁区観察では得ることが不可能な優れた空間分解能である。

また、磁性材料の高速駆動のため、高周波電磁界の伝送の際の反射・減衰等を抑制可能な高周波伝送線路として平面型のコプレーナ線路を設計・作製し、線路上に微細薄膜素子を設置してその磁化過程を磁区観察した。結果として、線路直上150 μmの場所において、数10 Oeの磁界強度で磁性薄膜素子を励磁でき、ほぼ設計通りの励磁特性が得られることが分かった。

これらの検討によって、高速・高分解能動磁区観察システムの構築、およびこのシステムの時間分解能、空間分解能の限界に関する知見を得ることができた。

22年度は、前年度に作製した高速シャッターを有するイメージインテンシファイア付

き CCD カメラと紫外光源である水銀キセノン灯により構築した高空間分解能・動磁区観察システムを用いて、様々な種類・寸法・形状の高周波用磁性材料の磁化過程の様子を観察することで磁化反転の速度に加えて、磁区構造の寸法依存性を調べデバイス応用の際の最適な材料構成を把握した。また、磁区コントラストの低い磁性薄膜試料においては、1回当たりの取り込み時間の短い高速動磁区観察で、観察像の SN 比が低く不鮮明な観察しか行うことができなかったため顕微鏡の光学素子やさらなる光路の調整・改善を行った。

さらに、磁性材料の微細加工に伴う高速磁化反転の劣化を抑制する手法としての磁区構造制御法として、形状変化による異方性制御・磁壁ピンニングの導入を行い、これが磁化反転の際にどのように動作するかを調べることで、微細磁性体素子における寸法・形状の最適化に関する知見を得ることができた。

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)

[雑誌論文] (計5件)

1. M. Takezawa, N. Tani, Y. Nagashima, Y. Morimoto, J. Yamasaki, N. Nozawa, T. Nishiuchi and S. Hirose: “Magnetic Domain Observation of Nd-Fe-B Magnets with Submicron-Sized Grains by High-Resolution Kerr Microscopy”, *J. Appl. Phys.*, 査読有, Vol. 109, pp. 07A709 (2011).
2. M. Takezawa, K. Maruko, N. Tani, Y. Morimoto, J. Yamasaki, N. Nozawa, T. Nishiuchi and S. Hirose: “Magnetic Domain Observation of Hydrogenation-Disproportionation-Desorption-Recombination Processed Nd-Fe-B Magnets with High-Resolution Kerr Microscope Using Ultraviolet Light”, 査読無, *Proceedings of the 21st Workshop on Rare-Earth Permanent Magnets and their Applications, Bled, Slovenia*, Vol. 21, pp. 51-54 (2010).
3. 竹澤 昌晃: “光で見る磁石(磁性材料)の磁氣的微細構造”, 電気学会誌, 査読有, Vol. 130, pp. 544-547 (2010).
4. M. Takezawa, K. Maruko, N. Tani, Y. Morimoto, J. Yamasaki, T. Nishiuchi and S. Hirose: “Magnetic domain observation of hydrogenation disproportionation desorption recombination processed Nd-Fe-B powder with a high-resolution Kerr microscope

using ultraviolet light”, *J. Appl. Phys.*, 査読有, Vol.107, pp.09A724 (2010).

5. 竹澤 昌晃: “磁気光学顕微鏡とその応用”, 電気学会論文誌 A (基礎・材料・共通部門誌), 査読有, Vol.129, pp.565-568 (2009).

[学会発表] (計 12 件)

1. M. Takezawa, N. Tani, Y. Nagashima, Y. Morimoto, J. Yamasaki, N. Nozawa, T. Nishiuchi and S. Hirosawa: “Magnetic Domain Observation of Nd-Fe-B Magnets with Submicron-Sized Grains by High-Resolution Kerr Microscopy”, 55TH ANNUAL CONFERENCE ON MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS, CS-02, ATLANTA, GA, 2010.11.12
2. 坂屋 啓祐, 竹澤 昌晃, 森本 祐治, 山崎 二郎: “トロイダル形状アモルファス磁性薄帯の動磁区観察”, 平成 22 年度 電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, 13-2A-08, 九州産業大学, 2010.9.26
3. M. Takezawa, K. Maruko, N. Tani, Y. Morimoto, J. Yamasaki, N. Nozawa, T. Nishiuchi and S. Hirosawa: “Magnetic Domain Observation of Hydrogenation-Disproportionation-Desorption-Recombination Processed Nd-Fe-B Magnets with High-Resolution Kerr Microscope Using Ultraviolet Light”, 21st Workshop on Rare-Earth Permanent Magnets and their Applications REPM '10, Bled, Slovenia, 2010.8.31
4. 永島 優樹, 竹澤 昌晃, 森本 祐治, 山崎 二郎: “Nd-Fe-B 系磁石の高磁界・高温下磁区観察のための磁気 Kerr 効果顕微鏡の試作”, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-10-73, 東北工業大学, 2010.8.2
5. M. Takezawa, Y. Nagashima, K. Maruko, Y. Morimoto and J. Yamasaki: “Hard Magnetic Characteristics of Nd-Fe-B Sintered Magnets for Electrical Vehicles at Elevated Temperature”, 8th European Magnetic Sensors and Actuators Conference Book of Abstracts, T10.14, Bodrum, TURKEY, 2010.7.6
6. 竹澤 昌晃, 丸子 覚博, 谷 奈緒美, 森本 祐治, 山崎 二郎, 野澤 宣介, 西内 武司, 広沢 哲: “紫外光源を用いた高分解能カー効果顕微鏡による Nd-Fe-B 系微細結晶磁石の磁区観察”, 粉体粉末冶金協会講演概要集 平成 22 年度春季大会, 1-17A, 早稲田大学 国際会議場, 2010.5.26
7. M. Takezawa, K. Maruko, N. Tani, Y.

Morimoto, J. Yamasaki, T. Nishiuchi and S. Hirosawa: “Magnetic Domain Observation of Hydrogenation Disproportionation Desorption Recombination Processed Nd-Fe-B Powder with a High-Resolution Kerr Microscope Using Ultraviolet Light”, 11th Joint MMM/Intermag Conference, GP-01, Washington, DC, 2010.1.21

8. 竹澤 昌晃: “紫外光源を用いた高解像度 Kerr 効果顕微鏡による Nd-Fe-B 磁石の磁区観察”, 日本磁気学会 第 169 回研究会, 169-4, 中央大学駿河台記念館, 2009.12.18
9. 丸子 覚博, 谷 奈緒美, 竹澤 昌晃, 森本 祐治, 山崎 二郎, 西内 武司, 野澤 宣介: “紫外光源を用いた高分解能カー効果顕微鏡による Nd-Fe-B 系異方性微細結晶磁石の磁区と磁化過程の観察”, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-09-195, 明治大学, 2009.12.3
10. 丸子 覚博, 竹澤 昌晃, 森本 祐治, 山崎 二郎: “偏光面変調素子を用いた画像処理法による永久磁石の磁区観察”, 平成 21 年度 電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, 13-2A-03, 九州工業大学, 2009.9.28
11. 谷 奈緒美, 竹澤 昌晃, 森本 祐治, 山崎 二郎: “紫外光カー効果顕微鏡を用いた微細軟質磁性薄膜の磁区観察”, 平成 21 年度 電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, 13-2A-01, 九州工業大学, 2009.9.28
12. 丸子 覚博, 谷 奈緒美, 竹澤 昌晃, 森本 祐治, 山崎 二郎, 西内 武司: “高分解能カー効果顕微鏡による Nd-Fe-B 系異方性微細結晶磁石の磁区と磁化過程の観察”, 第 33 回 日本磁気学会学術講演概要集, 12pE-8, 長崎大学, 2009.9.12

[図書] (計 1 件)

1. 日本磁気学会編, 共立出版, 磁気イメージングハンドブック (2010), 総ページ数 427(うち pp.228-237 を担当)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

[http://www.ise.kyutech.ac.jp/integrate/
researcher/takezawa_ma.html](http://www.ise.kyutech.ac.jp/integrate/researcher/takezawa_ma.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹澤 昌晃 (TAKEZAWA MASAAKI)
九州工業大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：20312671