

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05028

研究課題名(和文) 強磁性体/白金界面に誘起された磁気分極のダイナミクス

研究課題名(英文) Dynamics of induced moment at the interface between platinum and ferromagnetic materials

研究代表者

菊池 伸明 (Nobuaki, Kikuchi)

東北大学・多元物質科学研究所・助教

研究者番号：80436170

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：ナノスケールに集光した硬X線を用いたX線磁気円二色性(XMCD)測定により、Co/Pt積層膜およびCoCrPt-SiO₂グラニューラー薄膜のGHz帯の高周波磁場・電流による磁化の応答について調べた。その結果、GHz帯の励起においても界面および合金中で分極したPtの磁気モーメントはCoのそれと結合してふるまっており、Pt原子のXMCDが試料全体の磁化状態を計測するプローブとして利用できることが分かった。また、グラニューラー薄膜の磁化の空間分布の計測から、マイクロ波アシスト磁化反転の際のクラスターサイズは励起周波数に大きく依存し、周波数の増大に伴ってクラスターが小さくなることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Ptを含む積層膜や合金は、大きな磁気異方性を発現し、また、それらに含まれるPt自身も大きな磁気モーメントを持つことが知られている。このPtの磁気モーメントの磁化ダイナミクスの解明が新たなデバイスの創成に重要であるが、既存の手法での計測は困難であった。そこで、本課題では元素選択性を実現できる放射光を用いることで、Pt原子のモーメントのGHz帯域での挙動を明らかにすることを目指した。

研究成果の概要(英文)：Magnetization behaviors of a Co/Pt layer and CoCrPt-SiO₂ granular media were investigated by X-ray magnetic circular dichroism (XMCD) with focused hard X-ray in 100 nm scale. The samples were excited by spin-polarized current or magnetic field in GHz frequency range. XMCD measurement have revealed that the polarized Pt moment were strongly coupled with Co moment, indicating that XMCD signal of Pt can be used as a probe for magnetization dynamics measurement of those multilayer and alloys. Two-dimensional mapping measurement have revealed that the cluster size during microwave assisted switching in CoCrPt-SiO₂ granular media strongly depends on the excitation frequency, and the size becomes smaller with increasing of frequency.

研究分野：磁化ダイナミクス

キーワード：強磁性共鳴 X線磁気円二色性 スピントロニクス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

3d 磁性金属と Pt の合金・多層膜においては巨大な磁気異方性が発現することが知られており、主に磁気記録媒体材料や永久磁石材料としての研究が進められてきた。また、近年になって、磁性薄膜と Pt との界面が、電界効果や大きなスピンホール効果などの現象を示し、新たな磁化の制御手法として利用できることが報告されていた。また、これらの強磁性体/Pt 界面においては、非磁性元素である Pt 原子に大きな磁気モーメントが誘起されることが知られていた。これらの現象をメモリ等のデバイスに利用するためにはその高速化が必須であるものの、これらの現象のカギとなる界面での Pt の磁化ダイナミクスについての研究はほとんど行われていなかった。その理由の一つには、通常の磁氣的・電氣的手法では試料全体からの平均信号が検出されること、Pt の磁気モーメントは界面から数原子層に限られるため、得られる信号に占める割合が極めて小さいことが挙げられる。

2. 研究の目的

本課題では元素選択性を持ち、Pt 原子の磁気モーメントだけをプローブできる、放射光を用いた X 線磁気円二色性 (X-ray Magnetic Circular Dichroism: XMCD) を主な測定手法に採用した。また、放射光は、元素選択性を実現できるだけでなく、100nm 程度に集光が可能であり、また、時間幅数十ピコ秒のパルス光として発生されるため、GHz 帯の時間分解測定が可能であるという利点を持つ。そこで、本課題では硬 X 線による MCD を検出することにより、GHz 帯の高周波電流・磁場により励起された Pt 原子に誘起された磁気モーメントのダイナミクスの元素・時間・空間分解測定を行い、その解明を試みた。

3. 研究の方法

(1) 試料の構成

スピンホール効果により励起したダイナミクス

スピンホール効果により励起した磁化のダイナミクス計測には、Si 基板上に成膜した Pt/Co/Ru 三層膜を用いた。Co の膜厚は膜面に垂直な方向の有効磁気異方性 H_k^{eff} の大きさがほぼゼロになるように 1.5nm とし、Pt, Ru の膜厚はそれぞれ 3nm, 2nm とした。この構造では、スピンホール効果によりスピン分極した電流が Pt 層から Co 層へと注入され、磁化方向を変化させることが期待できる。成膜した薄膜は十分な電流密度を確保するため幅 $2\mu\text{m}$ の細線状に微細加工した。観測領域 (長さ $4\mu\text{m}$) 以外の部分は電流印加による発熱を防ぐため、厚さ 200nm の Au 層で被覆した。試料の顕微鏡写真の一例を Fig. 1 に示す。

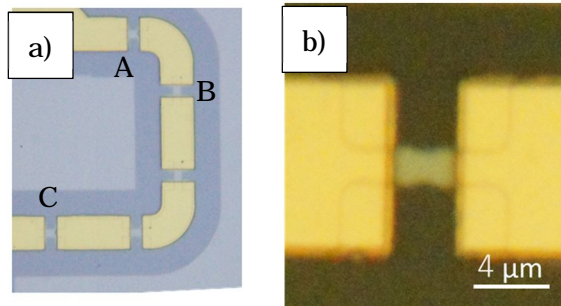


Fig. 1 試料の光学顕微鏡像 (a)全体像 (b) 観測領域の拡大図

マイクロ波アシスト磁化反転領域の二次元分布計測

マイクロ波アシスト磁化反転実験は、膜厚 15nm の CoCrPt-SiO₂ グラニューラ薄膜を用いて行った。ノンドープの Si 基板上に高周波磁場印加用の信号線路幅 $1\mu\text{m}$ のコプレナー伝送線路を微細加工により作製し、厚さ 100nm の SiO₂ 絶縁層を形成後、スパッタリングにより CoCrPt-SiO₂ グラニューラ薄膜を下地層・保護層とともに成膜した。グラニューラ薄膜を幅 $1\mu\text{m}$ 、長さ $1.6\mu\text{m}$ の矩形上に加工し、下地層を異常 Hall 効果測定用の電極に加工した。グラニューラ薄膜部の写真を Fig. 2 に示す。

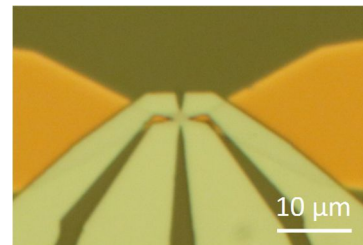


Fig. 2 CoCrPt-SiO₂ グラニューラ試料の光学顕微鏡像

(2) 放射光による XMCD 測定

本課題における XMCD 測定はすべて SPring-8 の硬 X 線ビームライン BL39XU で行った。蓄積リングから入射した X 線パルスは KB ミラーを用い、試料位置で半値幅 100nm 程度のスポットにまで集光した。X 線のエネルギーは Pt の L3 端 ($\sim 11.57\text{keV}$) を用いた。X 線パルスの長さは半値幅で約 60ps である。高周波信号源と蓄積リングとを同期させることにより、X 線パルスの繰り返し周期は約 508MHz であり、その整数倍の周波数では X 線パルスと高周波信号が常に同じ位相となる。そのため、高周波信号の遅延を変化させることにより X 線パルスと高周波信号の相対位相

を変化させることができ、時間分解測定が可能となる。

4. 研究成果

(1) スピンホール効果により励起したダイナミクス

XMCD 測定の際は、基板を X 線の入射方向から 60 度傾けて配置した。XMCD で得られる信号は、X 線の入射方向に平行な磁化成分に比例する。試料は Fig.1(a) に示したように U 字状の線路に配置してあるため、試料位置によって膜面で電流に平行な磁化成分の変化 (B)、および膜面で電流に直交する成分の変化 (A および C) を検出することが可能になる。試料はプリント基板上に貼付け、回路と Al ワイヤで接続した。プリント基板の裏面には永久磁石を配置し、試料位置で基板面に垂直に約 0.6kOe の磁場を印加し、試料磁化を膜面に垂直方向に飽和させた。試料に直流電流を印加させた際の各試料位置での XMCD 信号を計測した。XMCD 信号の電流依存性を Fig. 3 に示す。X 線の入射方向と電流が直交する B 位置では電流に対する MCD 信号の変化がほとんどないのに対し、電流と X 線の入射方向が平行な成分を持つ A および C では電流の印加により MCD 信号が最大で 50% 程度変化し、また、電流の向きが反対になる A と C ではその変化の符号が反転する。この結果は、直流電流の印加に対して磁化が電流と平行な方向に傾区ことを示している。この磁化の変化はスピンホール効果により Pt 層から Co 層に注入されたスピン分極した電子によるトルクにより Co の磁化が傾き、それと強く結合した Pt の磁気モーメントが傾いたものと理解することができる。次に、これらの試料に強磁性共鳴の周波数に近い約 2GHz の高周波電流を印加したところ、A~C のいずれの位置でも MCD 信号の振動が見られ、大振幅の歳差運動が励起されることが分かった。このことは、スピンホール効果による励起の際に界面の Pt の磁気モーメントの方向が動的に大きく変化し、界面でのスピン注入効率への影響を考慮する必要があることを示唆している。

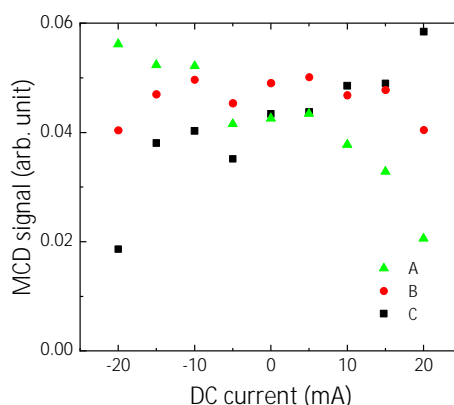


Fig. 3 Pt/Co/Ru 三層膜における MCD 信号の電流依存性

(2) マイクロ波アシスト磁化反転領域の二次元分布計測

XMCD 測定の際には X 線は基板面に垂直に入射し、最大 12kOe の磁場を基板面に垂直に印加した。振幅 7600e の高周波磁場を印加しながら MCD 信号の磁場依存性を測定した。高周波磁場の周波数は 0~24GHz の間で変化させた。MCD の結果を Fig. 4 に示す。高周波磁場の周波数の増加に伴い明瞭に保磁力が減少した。この結果は、事前に測定した振動型磁力計および異常 Hall 効果による結果とよく一致しており、放射光により計測した Pt の MCD が試料の磁化状態をよく反映していることを示すものである。次に、それぞれの周波数において保磁力に対応する外部磁場を印加し、高周波磁場を印加した後、残留磁化状態で MCD の二次元分布を計測した。二次元分布の測定は試料表面上で X 線を 50nm ステップで操作することにより行った。いずれの条件下でも保磁力近傍では MCD のコントラストは大きく低下し、明瞭な多磁区構造は見られなかった。しかしながら、弱いながらもコントラストが見られたことから、各ピクセル間での自己相関関数を求めたところ、高周波磁場を印加しない、あるいは周波数 8GHz の場合には約 400nm であった相関長が、周波数 16 および 24GHz の場合には 150nm にまで低下することが分かった。この 150nm という値は、測定に用いた X 線の空間的広がりの半値幅と同程度であり、実際には相関長はさらに短い可能性がある。これらの結果は、グラニューラ薄膜における反転クラスターのサイズが高周波磁場の周波数により大きく変化することを示している。

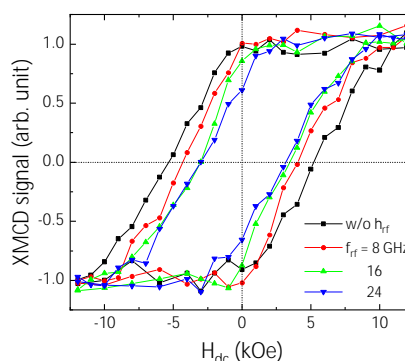


Fig. 4 高周波磁場印加下での CoCrPt-SiO₂ グラニューラ薄膜の MCD 信号の外部磁場依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kikuchi Nobuaki, Shimada Kyohei, Shimatsu Takehito, Okamoto Satoshi, Kitakami Osamu	4. 巻 57
2. 論文標題 Frequency dependence of microwave-assisted switching in CoCrPt granular perpendicular media	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 09TE02 ~ 09TE02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.7567/JJAP.57.09TE02	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nobuaki Kikuchi, Hitoshi Osawa, Motohiro Suzuki, and Osamu Kitakami	4. 巻 54
2. 論文標題 Time and Spatially Resolved Hard X-Ray MCD Measurement on a Co/Pt Multilayer Dot Excited by Pulsed RF Field	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 6100106-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2017.2745211	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kikuchi Nobuaki, Sato Katsunari, Kikuchi Shun, Okamoto Satoshi, Shimatsu Takehito, Kitakami Osamu, Osawa Hitoshi, Suzuki Motohiro	4. 巻 126
2. 論文標題 Microwave-assisted switching in CoCrPt granular medium under continuous microwave fields	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 083908 ~ 083908
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5111576	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kikuchi N., Yomogita T., Sato K., Okamoto S., Kitakami O., Osawa H., Suzuki M., Toyoki K., Kotani Y., Nakamura T.	4. 巻 59
2. 論文標題 Imaging of transient magnetization dynamics of Co/Pt multilayer dots with X-ray magnetic circular dichroism excited by microwaves	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SEED03 ~ SEED03
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab6cb1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計22件（うち招待講演 14件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 菊池伸明
2. 発表標題 GHz帯で動作するスピントロニクスデバイスのXMCD計測
3. 学会等名 第7回 実用スピントロニクス新分野創成研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Kikuchi, K. Shimada, S. Kikuchi, K. Sato, S. Okamoto, O. Kitakami, T. Shimatsu
2. 発表標題 Microwave assisted switching on CoPtCr based granular media
3. 学会等名 日本磁気学会学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菊池伸明
2. 発表標題 CoPtCr系グラニューラ薄膜におけるマイクロ波アシスト磁化反転 - TMRC2018を振り返りながら -
3. 学会等名 IDEMA JAPAN クォーターリーセミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤勝成, 菊池伸明, 岡本聡, 北上修, 島津武仁
2. 発表標題 連続波を用いたCoCrPtグラニューラ記録媒体のマイクロ波アシスト磁化反転実験
3. 学会等名 日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Kikuchi, K. Shimada, S. Kikuchi, K. Sato, S. Okamoto, O. Kitakami, and T. Shimatsu
2. 発表標題 Microwave-assisted switching behavior of CoCrPt based granular media
3. 学会等名 NIMS Week 学術シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Kikuchi, K. Shimada, S. Kikuchi, K. Sato, S. Okamoto, O. Kitakami, T. Shimatsu
2. 発表標題 Microwave assisted switching behavior of CoCrPt based granular media
3. 学会等名 TMRC 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菊池伸明
2. 発表標題 時間分解XMCDによる磁化ダイナミクス計測
3. 学会等名 第5回 実用スピントロニクス新分野創成研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nobuaki Kikuchi, Hitoshi Osawa, Motohiro Suzuki, Osamu Kitakami
2. 発表標題 Time and spatial resolved XMCD-FMR measurement on a Co/Pt multilayer dot excited by rf magnetic field in GHz regime
3. 学会等名 The Magnetic recording conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 N. Kikuchi, T. Yomogita, D. Kanahara, S. Okamoto, O. Kitakami, T. Shimatsu, H. Osawa, M. Suzuki
2. 発表標題 Time- and spatially resolved hard X-ray MCD with pulsed rf field excitation on a Co/Pt multilayer dot
3. 学会等名 Conference on Magnetism and Magnetic Materials (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 菊池伸明
2. 発表標題 XMCD でみるスピンの界面現象
3. 学会等名 第6回 実用スピントロニクス新分野創成研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菊池伸明
2. 発表標題 元素・空間・時間分解MCD測定による強磁性共鳴測定
3. 学会等名 東北大学金属材料研究所共同利用ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 菊池伸明
2. 発表標題 時間・空間分解XMCDによる強磁性共鳴測定
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 N. Kikuchi, Y. Yomogita, D. Kanahara, S. Okamoto, O. Kitakami, T. Shimatsu, H. Osawa, Y. Kotani, K. Toyoki, M. Suzuki, T. Nakamura
2. 発表標題 Elementally resolved ferromagnetic resonance by X-ray magnetic circular dichroism on Co/Pt multilayer dots
3. 学会等名 Magnetics and Optics Research International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菊池伸明, 蓬田貴裕, 金原大樹, 岡本聡, 北上修, 島津武仁, 大沢仁志, 鈴木基寛
2. 発表標題 硬X線MCDによるCo/Ptナノドットの 時空間分解強磁性共鳴測定
3. 学会等名 平成29年度スピニクス特別研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 菊池伸明
2. 発表標題 XMCDでみるCo/Pt多層膜のスピンダイナミクス
3. 学会等名 第86回ナノマグネティクス専門研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菊池伸明
2. 発表標題 グラニューラー媒体におけるマイクロ波アシスト効果
3. 学会等名 IDEMA国際ディスクフォーラム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Kikuchi, K. Sato, S. Okamoto, O. Kitakami, T. Shimatsu
2. 発表標題 Microwave assisted switching on CoPtCr-baed granular media
3. 学会等名 Magnetics and Optics Research International Symposium 2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菊池伸明
2. 発表標題 XMCDによるスピンドYNAMICS計測
3. 学会等名 第32回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Kikuchi, H. Osawa, S. Okamoto, M. Suzuki, O. Kitakami
2. 発表標題 Transient magnetization dynamics of a Co/Pt multilayer dot probed by XMCD
3. 学会等名 The 19th international conference on solid films and surfaces (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Kikuchi, T. yomogita, K. Sato, S. Okamoto, O. Kitakami, H. Osawa, M. Suzuki, Y. Kotani, K. Toyoki, T. Nakamura
2. 発表標題 SPATIALLY-, TEMPORALLY-, AND ELEMENTALLY-RESOLVED IMAGING OF MAGNETIZATION DYNAMICS WITH X-RAY MAGNETIC CIRCULAR DICHROISM
3. 学会等名 Magnetics and Optics Research International Symposium
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菊池伸明
2. 発表標題 放射光による磁化ダイナミクス測定
3. 学会等名 第8回スピントロニクス新分野創成研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菊池伸明
2. 発表標題 硬X線XMCDによるナノ構造ダイナミクス計測
3. 学会等名 第9回スピントロニクス新分野創成研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	鈴木 基寛 (Suzuki Motohiro)		
研究協力者	大沢 仁志 (Osawa Hitoshi)		