

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14334

研究課題名(和文) 時間分解X線磁気円二色性測定による磁性薄膜の光照射磁化反転現象の研究

研究課題名(英文) Study of light-induced magnetic reversal of thin films by time-resolved x-ray magnetic circular dichroism measurement

研究代表者

平田 靖透 (HIRATA, Yasuyuki)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：50750692

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：X線自由電子レーザーを活用した時間分解共鳴磁気光学測定によって強磁性垂直磁化薄膜の磁性ダイナミクスを明らかにし、光照射で物質の磁性が制御される全光ヘリシティ依存スイッチング(AO-HDS)の起源に迫った。L10-FePt薄膜の時間分解X線磁気円二色性測定やCo-Pt超格子薄膜の時間分解磁気光学カー効果測定から、Ptサイトの消磁の時間スケールがFe・Coサイトに比べ6倍以上長いことが明らかになり、ダイナミクスのサイト依存性がAO-HDSのメカニズムに不可欠である可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年では電子計算機の処理速度の高速化に伴い、記憶媒体の応答も高速であることが要求されるようになりつつある。本研究で得られた薄膜磁性の光照射に対する応答についての知見は、基礎的な物質科学への貢献にとどまらず、光を利用した高速かつ効率的な磁化の制御が可能となる条件の解明を通し、優れた磁気記憶媒体の開発や今後のスピントロニクスの発展にもつながると期待される。

研究成果の概要(英文)：We have clarified the magnetic dynamics of ferromagnetic perpendicularly-magnetized thin films by time-resolved resonant magneto-optical measurement using an x-ray free electron laser, and explored the origin of all-optical helicity-dependent switching (AO-HDS) where the magnetism can be controlled by light irradiation. Our results of the time-resolved x-ray magnetic circular dichroism of L10-FePt thin film and the time-resolved magneto-optical Kerr effect of Co-Pt superlattice thin film have shown that the time scale of demagnetization of Pt site is more than 6 times longer than that of Fe and Co sites. It was suggested that the site dependence of magnetic dynamics can be essential for the mechanism of AO-HDS.

研究分野：光物性

キーワード：薄膜磁性 磁化反転 光誘起相転移 X線自由電子レーザー X線磁気円二色性 X線磁気光学カー効果
ポンプ・プローブ法

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

近年のスピンロニクス発展の中で活発な研究が行われている分野の一つが、光照射による高速な磁化制御技術である。特に、外部磁場を加えることなく、円偏光したレーザー光を照射することのみによって、磁性薄膜の磁化を制御することができる全光ヘリシティ依存スイッチング(All Optical Helicity Dependent Switching; AO-HDS)という現象が大きく注目を集めている。AO-HDS では右円偏光と左円偏光の光を使い分けることによって、薄膜上の磁化を選択的に反転させることができる。この現象は、Gd-Fe-Co 系アモルファス合金薄膜や Co-Ir 系人工超格子薄膜といったフェリ磁性の垂直磁化薄膜で起きることが知られており、フェリ磁性体の角運動量補償温度付近において磁化反転が起きると考えられていた。ところが最近になって Co-Pt 系超格子薄膜や、Fe-Pt を含むグラニューラー薄膜のような強磁性の垂直磁化薄膜においても AO-HDS が起こることが発見されたため、原理の説明が再考を迫られることとなり、強磁性垂直磁化薄膜における AO-HDS の振る舞いについて詳しい研究が必要とされていた。

2. 研究の目的

本研究では、AO-HDS が報告されている Co-Pt 系強磁性薄膜および、それに類似した FePt 合金薄膜について、X 線や極端紫外線を用いた時間分解共鳴磁気光学測定によって元素サイトごとの磁性のダイナミクスをフェムト秒の時間スケールで観測し、レーザー照射に対する磁化のダイナミクスを追うことによって、強磁性薄膜の AO-HDS のメカニズムに迫ることを目的とする。同様に AO-HDS が生じることが知られている Gd-Fe-Co 系フェリ磁性薄膜の振る舞いと比較し、磁性デバイス開発への示唆を得たい。

3. 研究の方法

(1) X 線自由電子レーザー(XFEL)による時間分解 X 線磁気円二色性(trXMCD)測定

国内の XFEL 施設である SACLA の硬 X 線ビームラインである BL3 を利用し、ポンプ・プローブ法による磁場下での時間分解 X 線吸収測定を行った。ポンプ光は波長 800 nm のフェムト秒チタンサファイアレーザーを用いた。プローブ光は円偏光した硬 X 線を用い、蛍光法によって吸収を測定した。測定の時間分解能は 50 fs 以下であった。

(2) 極端紫外線自由電子レーザー(EUV-FEL) による時間分解磁気光学カー効果(trMOKE)測定

SACLA の軟 X 線～極端紫外線ビームラインである BL1 を利用し、ポンプ・プローブ法による trMOKE 測定を行った。ポンプ光は波長 800 nm のフェムト秒チタンサファイアレーザーを用いた。プローブ光は直線偏光した極端紫外線を用い、試料上に 45°入射で反射させ、Mo-Si 多層膜を利用した回転分析器エリプソメトリー法によってカー回転角を求めた。測定の時間分解能は 50 fs 以下であった。

4. 研究成果

(1) XFEL を利用した L_{10} -FePt 薄膜の Pt L_3 吸収端フェムト秒 trXMCD 測定 (K. Yamamoto, Y. Hirata *et al.*, *New Journal of Physics* 21.12, 123010 (2019).)

SACLA BL3 を利用し、強磁性垂直磁化膜である L_{10} -FePt 合金薄膜 (膜厚 20 nm) の Pt L_3 吸収端(11.6 keV)における trXMCD を測定した。図 1 の青点で示した通り、0.6 ps の時間スケールで Pt サイトの磁気モーメントが光照射によって消磁されていることが明らかになった。同じ試料でポンプ光・プローブ光ともに波長 800 nm のレーザーを用いた trMOKE 測定を行ったところ、図 1 の赤点で示した通り 0.1 ps の時間スケールでの消磁を示した。この測定のカー回転角は試料全体の磁気モーメントを反映しているが、その 88%を Fe サイトの磁気モーメントが占めることから、Fe サイトの磁気モーメントが 0.1 ps の時間スケールで消磁されていると考えられる。このようにサイトによって消磁の時間スケールが異なる理由としては、Fe 3d 電子のフェルミ面近傍の状態密度が Pt 5d 電子のそれより大きいこと、また Pt は本来は常磁性であり、隣接する Fe サイトの影響で磁気モーメントが立っていることなどが考えられる。

このようなサイト依存の消磁時間スケールは AO-HDS を示す Gd-Fe-Co 系フェリ磁性薄膜でも観測されている。 L_{10} -FePt 薄膜それ自体は AO-HDS を示さないが、類似した組成で AO-HDS を示す Fe-Pt 系グラニューラー薄膜において、サイト依存性を持つ磁性のダイナミクスが AO-HDS のメカニズムに深く関わっている可能性がある。

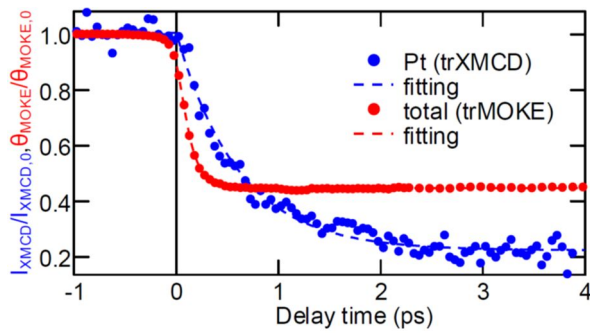


図 1: L_{10} -FePt 薄膜の Pt L_3 吸収端における XMCD の時間応答 (青)、および近赤外 trMOKE 測定におけるカー回転角の時間応答 (赤)

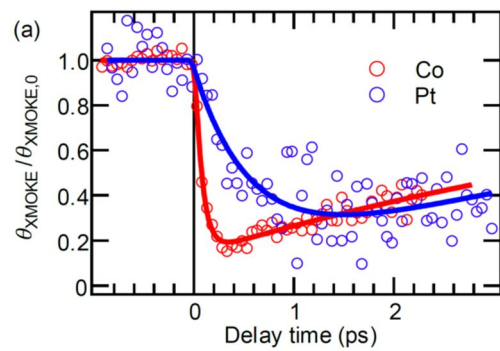


図 2: Co-Pt 超格子薄膜の Co $M_{2,3}$ 吸収端および Pt $N_{6,7}$ 吸収端におけるカー回転角の時間応答

(2) EUV-FEL を利用した Co-Pt 超格子薄膜のフェムト秒 trMOKE 測定

(K. Yamamoto, Y. Hirata *et al.*, *Applied Physics Letters* 116.17, 172406 (2020).)

SACLA BL1 を利用し、強磁性垂直磁化薄膜である Co-Pt 超格子薄膜 (Pt(1.7 nm)/[Co(0.4 nm)/Pt(0.7 nm)]₃/Co(0.4 nm)) の Co $M_{2,3}$ 吸収端 (60 eV) および Pt $N_{6,7}$ 吸収端 (72 eV) における trMOKE を測定した。図 2 に示したように、光照射に伴って Co サイトの磁気モーメントは 80 ± 60 fs、Pt サイトの磁気モーメントは 640 ± 140 fs の時間スケールでの消磁を示した。この試料は (1) で測定した試料と、Fe/Co と Pt が交互に重なる構造を持つ点で共通しているが、Fe/Co サイトと Pt サイトの消磁の時間スケールもそれぞれほぼ同程度の値が得られた。またこの試料は実際に AO-HDS を示すことを確認しており、サイト依存のダイナミクスが AO-HDS のメカニズムに不可欠である可能性を示唆する結果となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yamamoto Kohei, Hirata Yasuyuki, et al.	4. 巻 21
2. 論文標題 Ultrafast demagnetization of Pt magnetic moment in L10-FePt probed by magnetic circular dichroism at a hard x-ray free electron laser	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 123010 ~ 123010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab5ac2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Yamamoto Kohei, Moussaoui Souliman El, Hirata Yasuyuki, Yamamoto Susumu, Kubota Yuya, Owada Shigeki, Yabashi Makina, Seki Takeshi, Takanashi Koki, Matsuda Iwao, Wadati Hiroki	4. 巻 116
2. 論文標題 Element-selectively tracking ultrafast demagnetization process in Co/Pt multilayer thin films by the resonant magneto-optical Kerr effect	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 172406 ~ 172406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1063/5.0005393	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 該当する

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山本航平、Souliman El Moussaoui、平田靖透、山本達、久保田雄也、大和田成起、矢橋牧名、松田巖、関剛斎、高梨弘毅、和達大樹
2. 発表標題 X線自由電子レーザーによる時間分解共鳴磁気光学カー効果測定でみるCo/Pt薄膜の光誘起磁化ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 (10)山本航平、田久保耕、平田靖透、山神光平、Zhang Yujun、山本達、松田巖、安部弘隆、岡井啓輔、高橋龍之介、三浦紘大、横山利彦、山崎裕一、関剛斎、高梨弘毅、和達大樹
2. 発表標題 Co/Pt 薄膜の Co L 端磁気円二色性スペクトルの時間分解測定
3. 学会等名 第33回放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本航平、久保田雄也、平田靖透、田久保耕、上村洋平、田中健太、西村渉、大河内拓雄、鈴木基寛、片山哲夫、富樫格、玉作賢治、矢橋牧名、田中義人、関剛斎、高梨弘毅、和達大樹
2. 発表標題 Pt L端時間分解X線磁気円二色性測定でみるFePt薄膜の磁化ダイナミクス
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本航平、久保田雄也、平田靖透、田久保耕、上村洋平、深谷亮、田中健太、西村渉、大河内拓雄、鈴木基寛、片山哲夫、富樫格、足立伸一、玉作賢治、矢橋牧名、田中義人、関剛斎、高梨弘毅、和達大樹
2. 発表標題 Pt L端時間分解X線磁気円二色性測定でみるFePt薄膜の磁化ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本航平、久保田雄也、平田靖透、田久保耕、上村洋平、深谷亮、田中健太、西村渉、大河内拓雄、片山哲夫、富樫格、足立伸一、玉作賢治、矢橋牧名、田中義人、関剛斎、高梨弘毅、和達大樹
2. 発表標題 Pt L端時間分解X線磁気円二色性測定でみるFePt薄膜の磁化ダイナミクス
3. 学会等名 第32回放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本航平、El Moussaoui Souliman、平田靖透、山本達、久保田雄也、大和田成起、矢橋牧名、松田巖、関剛斎、高梨弘毅、和達大樹
2. 発表標題 X線自由電子レーザーによる時間分解共鳴磁気光学カー効果測定でみるCo/Pt薄膜の磁化ダイナミクス
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名	K. Yamamoto, Y. Kubota, M. Suzuki, Y. Hirata, K. Takubo, Y. Uemura, R. Fukaya, K. Tanaka, W. Nishimura, T. Ohkochi, T. Katayama, T. Togashi, K. Tamasaku, M. Yabashi, Y. Tanaka, T. Seki, K. Takanashi, and H. Wadati
2. 発表標題	Ultrafast demagnetization in Pt-containing ferromagnetic thin films probed by x-ray free electron laser
3. 学会等名	Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems 2019 (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	山本航平, 田久保耕, 平田靖透, 横山優一, 山本達, 松田巖, 辛埴, 関剛斎, 高梨弘毅, 和達大樹
2. 発表標題	時間分解磁気円二色性で見るCo/Pt多層膜の光誘起磁化変化のレーザー偏光依存性
3. 学会等名	日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年	2017年

1. 発表者名	山本航平, 田久保耕, 平田靖透, 横山優一, 山本達, 松田巖, 辛埴, 関剛斎, 高梨弘毅, 和達大樹
2. 発表標題	時間分解磁気円二色性測定でみた Co/Pt 多層膜の光誘起磁化変化のレーザー偏光依存性
3. 学会等名	第31回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	和達大樹, 山本航平, 田久保耕, 平田靖透, 横山優一, 山本達, 松田巖, 辛埴, 関剛斎, 高梨弘毅
2. 発表標題	時間分解磁気円二色性測定でみたCo/Pt多層膜の光誘起磁化変化のレーザー偏光依存性
3. 学会等名	第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年	2017年

1. 発表者名 山本航平、久保田雄也、平田靖透、田久保耕、上村洋平、田中健太、西村涉、大河内拓雄、鈴木基寛、片山哲夫、富樫格、玉作賢治、矢橋牧名、田中義人、関剛斎、高梨弘毅、和達大樹
2. 発表標題 Pt L端時間分解X線磁気円二色性測定でみるFePt薄膜の磁化ダイナミクス
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018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
--	---------------------------	-----------------------	----