

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400328

研究課題名(和文) 軟X線共鳴カー効果による希薄磁性物質のスピンダイナミクス研究

研究課題名(英文) Study of spin dynamics in diluted magnetic materials using the soft X-ray resonant Kerr effect

研究代表者

松田 巖 (Matsuda, Iwao)

東京大学・物性研究所・准教授

研究者番号：00343103

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)：物質の磁性情報を取得できる磁気光学カー効果(MOKE)について、プローブ光の波長を吸収端に合わせるとカー回転角が通常の可視光測定に比べて何10倍も大きくなることを我々は発見した(共鳴磁気光学カー効果、共鳴MOKE)。この方法は元素選択性や大きな磁性信号、そして超高速時間分解測定の可能性が高いことから、本研究では分析法としての技術開発を行った。その結果、自由電子レーザーなどの次世代超短パルス軟X線源と組み合わせることで、化合物磁性体の超高速スピンダイナミクスを元素選択的に追跡するができ、さらに厚さ< 1nmのFe超薄膜を含むヘテロ構造体におけるFe スピンのフェムト秒時間分解測定に成功した。

研究成果の概要(英文)：The magneto-optical Kerr effect (MOKE) has been used to investigate magnetic information of materials. Tuning the probing photon energy at an absorption-edge of a material, typically in the ultra-vacuum ray to soft X-ray region, we discovered that the Kerr rotation angles become several 10 times larger than those measured with the conventional visible light. Since this resonant MOKE allows us to probe a magnetic material with element selectivity, large-signals and a possible extension to the time-resolved measurement, we developed the technique in the present research. Using an ultrashort-pulse soft X-ray laser, such as a free electron laser, we succeeded in tracing ultrafast spin inversion at the Fe atom in a GdFeCo crystal and in performing the femto-seconds time-resolved measurement on < 1nm-thick Fe film buried in the heterostructure.

研究分野：磁気光学効果

キーワード：磁気光学効果 軟X線 自由電子レーザー 磁性体 スピンダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

磁石及びスピントロニクス材料における磁性及びスピンドYNAMIKSの研究は、我々の学問及び産業にとって重要なテーマである。しかしながら最近の材料は、複数の元素から構成され、ヘテロ接合などの不均一な構造を取り、微小化が急速に進み、さらにその超高速現象の解明が望まれている。このような背景の中、元素選択性や大きな磁性信号、そして超高速時間分解測定が可能な実験法が求められていた。

2. 研究の目的

磁気光学カー効果測定とは物質の磁性情報を取得する強力な分析法である。我々はこのプローブ光の波長を吸収端に合わせると、そのカー回転角が通常の可視光測定に比べて何10倍も大きくなることを発見した。これは共鳴磁気光学カー効果(共鳴 MOKE)に相当し、我々はその分析法として技術開発を行ってきた。そして本研究では、この新しい手法を磁性ドーパしたトポロジカル絶縁体物質などの磁性物質に対して適用し、その磁性の起源を明らかにする。さらに、この軟X線共鳴 MOKE 技術と相性のよい自由電子レーザーや高次高調波レーザーなどの次世代超短パルス軟X線源を利用する。そして希薄磁性物質における磁性を元素選択的かつそのスピンドYNAMIKSをリアルタイムで観測することで、今後のスピントロニクスなどのへの応用を研究する。

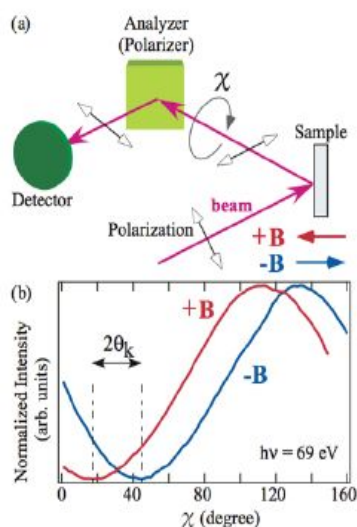


図 1 (a) 回転分析器エリプソメトリ (rotating analyzer ellipsometry)法の様子、(b) 測定データ。正負の磁場印加に対する左から磁気光学カー回転角の2倍が得られる。

3. 研究の方法

本研究では共鳴磁気光学カー効果(共鳴 MOKE)測定として回転分析器エリプソメトリ (rotating analyzer ellipsometry)法を採用した(図1)。多様な磁性体試料に対応するために20Kでの測定が可能なマニピュレータを製作し、さらに外部磁場印加が可能な試料ホルダーを含める装置本体をコンパクトにすることで研究室だけでなく、国内外の放射光及びX線自由電子レーザーの真空紫外線・軟X線ビームラインでも実験ができるようにした。

4. 研究成果

研究期間中は高次高調波レーザーや自由電子レーザーでの手法開発を行った。さらに磁性超薄膜、磁性ヘテロ構造や希薄磁性体など様々な磁性体試料について共鳴磁気光学カー効果の測定も行った。その中で研究成果として特にまとまったものを以下に示す。

(1) フェリ磁性体 GdFeCo 結晶の超高速磁化反転機構の観測

フェリ磁性体 GdFeCo 結晶は、光照射によってフェムト秒の時間スケールで Fe 原子のスピンの反転と言われている。そこで、Fe M 殻吸収端にプローブ光エネルギーを合わせ、その共鳴磁気光学効果によりその時間変化を直接調べた。放射光により GdFeCo 試料の Fe M 殻吸収端ピークでの磁気光学カー回転角は3度であることが分かった。イタリア国シード型自由電子レーザー施設 FERMI@ELETTRA でフェムト秒時間分解測定をしたところ、数100フェムト秒かけてカー回転角の3度から-1度へ符合が反転することが観測され、その超高速磁化反転の様子を直接捉えることに成功した(図2)。本成果は論文にまとめて発表した。

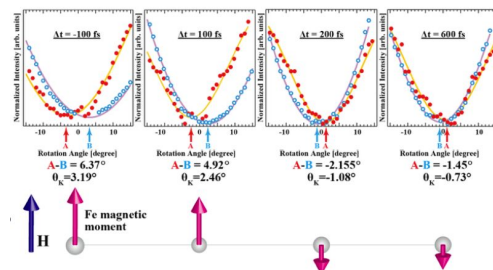


図2 GdFeCo のフェムト秒時間分解共鳴磁気光学実験の結果。下に外部磁場 H に対する Fe の磁気モーメントの大きさを向きを示す。

(2) 厚さ<1 nm Fe 超薄膜のフェムト秒時間分解共鳴磁気光学カー効果測定

Fe などの遷移金属薄膜は膜厚によって磁化が変化することが知られ、特に超薄膜では面直磁化が誘起されやすくなることから、応用面でも重要である。そこで磁性体試料として、厚さが 1 nm 以下の Fe の磁性膜とそれを挟む非磁性膜から構成されるヘテロ構造体を作製した。試料が面直磁気異方性を有することを確認し、さらに放射光 X 線円二色性実験でその起源が Fe 原子の軌道磁気モーメントの膜厚依存性であることを調べた。

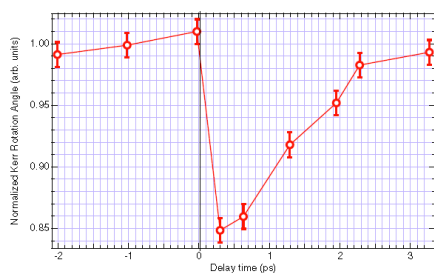


図 3 厚さ<1 nm Fe 超薄膜のフェムト秒時間分解共鳴磁気光学カー効果測定の結果。ポンプレーザー照射前を基準に磁気光学カー回転角の変化を追跡した。

本期間最終年度に我が国の X 線自由電子レーザー(FEL)施設 SACLA において軟 X 線自由電子レーザービームラインの供用が開始された。そして、その初のユーザーとして本試料をもとに、フェムト秒時間分解共鳴磁気光学カー効果の実験が行った。時間分解測定は赤外線レーザーと軟 X 線 FEL によるポンププローブ法で実施した。その結果、試料への光照射に伴うフェムト秒の超高速消磁とその後のピコ秒の緩和過程を追跡することができた(図 3)。この結果、本研究で開発した新手法は微小試料に対しても十分な感度と元素選択性を有し、そして時間分解測定も実施できることが実証された。一方、本試料は放射光施設において、より遅い時間での時間分解共鳴磁気分光実験も行っており、これらを組み合わせて Fe 超薄膜のスピンドイナミクス全貌の解明を行う。

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 4 件)

1. K. Takubo, K. Yamamoto, Y. Hirata, Y. Yokoyama, Y. Kubota, S. Yamamoto, S. Yamamoto, I. Matsuda, S. Shin, T. Seki, K. Takanashi, and H. Wadati, Appl. Phys. Lett.

110, 162401-1,-5 (2017).

2. Y. Kubota, K. Murata, J. Miyawaki, K. Ozawa, M. Onbasli, T. Shirasawa, B. Feng, Sh. Yamamoto, Ro-Ya Liu, S. Yamamoto, S. Mahatha, P. Sheverdyayeva, P. Moras, C. Ross, S. Suga, Y. Harada, K. Wang, and I. Matsuda, J. Phys. Condens. Matter **29**, 055002-1,-6 (2017).
3. Y. Kubota, Sh. Yamamoto, T. Someya, Y. Hirata, K. Takubo, M. Araki, M. Fujisawa, K. Yamamoto, Y. Yokoyama, M. Taguchi, S. Yamamoto, M. Tsunoda, H. Wadati, S. Shin, and I. Matsuda, J. Elec. Spec. Rel. Phenom., in press (2016).
4. Sh. Yamamoto, M. Taguchi, T. Someya, Y. Kubota, S. Ito, H. Wadati, M. Fujisawa, F. Capotondi, E. Pedersoli, M. Manfreda, F. Casolari, Maya Kiskinova, J. Fujii, P. Moras, T. Nakamura, T. Kato, T. Higashide, S. Iwata, S. Yamamoto, S. Shin, and I. Matsuda, Rev. Sci. Instrum. **86**, 083901-1,-5 (2015).

[学会発表](計 13 件)

1. 山本真吾、山本航平、田久保耕、福田憲吾、大島大輝、加藤剛志、岩田聡、和達大樹、松田巖、ラシュバ型スピン軌道相互作用誘起の Fe 超薄膜の垂直磁気異方性の変化、量子ビームサイエンスフェスタ、2016 年 3 月 15 日、つくば国際会議場(茨城県つくば市)。
2. 山本真吾、山本航平、田久保耕、福田憲吾、大島大輝、加藤剛志、岩田聡、和達大樹、松田巖、ラシュバ型スピン軌道相互作用誘起の Fe 超薄膜の垂直磁気異方性の変化、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月 19 日、東北学院大学(宮城県仙台市)。
3. 山本真吾、山本航平、田久保耕、福田憲吾、大島大輝、加藤剛志、岩田聡、和達大樹、松田巖、界面スピン軌道相互作用誘起の Fe 超薄膜の垂直磁気異方性の変化、第 40 回日本磁気学会学術講演会、2016 年 9 月 6 日、金沢大学(石川県金沢市)。
4. 山本真吾、山本航平、高橋良暢、丸山航平、鈴木雄太、久保田雄也、伊藤俊、福田憲吾、大島大輝、大和田世起、加藤剛志、藤沢正美、保原麗、C. Schussler-Langeheine、平田靖透、山本達、

- 小嗣真人、岩田聡、和達大樹、矢橋牧名、辛埴、松田巖、時間分解共鳴磁気光学効果/磁気円二色性測定による Au/Fe/Fe 系の超高速消磁・緩和過程の追跡、第 30 回日本放射光学会年会、2017 年 1 月 9 日、神戸芸術センター（兵庫県神戸市）。
5. Iwao Matsuda(国際会議招待講演)、Spin dynamics at buried magnetoc layers, probed by free-electron laser an synchrotron radiation, 日本表面科学会関西支部 25 周年国際シンポジウム、2017 年 1 月 24 日、京都市国際交流会館（京都府・京都市）。
 6. Iwao Matsuda, Ultrafast spin dynamics of magnetic metal alloys trace by resonant magneto-optical Kerr effect using free electron laser, Frontiers in Theoretical and Applied Physics, UAE2017, 2017 年 2 月 22 日、AUS (UAE, Sharjah).
 7. Sh. Yamamoto, T. Someya, J. Itatani, R. Hobara, M. Fujisawa, R. Yoshida, T. Yamamoto, T. Nakamura, M. Tsunoda, S. Yamamoto, S. Shin, and I. Matsuda, Development of measurement system for magneto-optical effect with a vacuum ultraviolet high harmonic generation laser, the 1st Conference on Laser and Synchrotron Radiation Combination Experiment, 2014 年 4 月 2 3 日パシフィコ横浜（神奈川県横浜市）
 8. 山本真吾、染谷隆史、和達大樹、藤沢正美、Flavio Capotondi, Emanuele Pedersoli, Michele Manfreda, Francesco Caslari, 保原麗、中村哲也、加藤剛志、山本達、Maya Petrova, 辛埴、松田巖、日本物理学会 2014 秋季大会、2014 年 9 月 7 日、中部大学(愛知県春日井市)。
 9. Sh. Yamamoto, T. Someya, M. Taguchi, Y. Kubota, S. Ito, H. Wadati, M. Fujisawa, F. Capotondi, E. Pedersoli, M. Manfreda, F. Casolari, M. Kiskinova, J. Fujii, P. Moras, T. Nakamura, T. Kato, S. Shin, and I. Matsuda, Femtomagnetism in a ferrimagnetic metal alloy studied by time-resolved magneto-optic Kerr effect measurement using a seeded free electron laser, the 7th International Symposium on Surface Science, 2014 年 11 月 2 日、くにびきメッセ（島根県松江市）。
 10. 山本真吾、染谷隆史、久保田雄也、伊藤俊、田口宗孝、和達大樹、藤沢正美、F. Capotondi, E. Pedersoli, M. Manfreda, F. Casolari, 保原麗、中村哲也、加藤剛志、山本達、M. Kiskinova, 辛埴、松田巖、日本放射光学会、2015 年 1 月 10 日、立命館大学（滋賀県草津市）。
 11. 山本真吾、田口宗孝、染谷隆史、久保田雄也、伊藤俊、和達大樹、藤沢正美、F. Capotondi, E. Pedersoli, M. Manfreda, F. Casolari, M. Kiskinova, 藤井純、P. Moras, 中村哲也、加藤剛志、岩田聡、辛埴、松

田巖、日本応用物理学会、2015 年 3 月 11 日東海大学（神奈川県平塚市）。

12. 山本真吾、久保田雄也、伊藤俊、角田匡清、武市泰男、間瀬一彦、松田巖、物構研サイエンスフェスタ、2015 年 3 月 17 日、つくば国際会議場(茨城県つくば市)。
13. 山本真吾、田口宗孝、久保田雄也、伊藤俊、染谷隆史、藤沢正美、保原麗、中村哲也、加藤剛志、山本達、辛埴、松田巖、日本物理学会 2015 年春季大会、2015 年 3 月 21 日、早稲田大学（東京都新宿区）。

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

松田 巖 (Matsuda, Iwao)
 東京大学・物性研究所・准教授
 研究者番号：00343103

(2) 研究分担者

山本 達 (Yamamoto, Susumu)
 東京大学・物性研究所・助教
 研究者番号：50554705

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

P. Moras
 Istituto di Struttura della Materia, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Trieste, Italy

M. Kiskinova
 Elettra-Sincrotrone Trieste, Italy