

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686001

研究課題名(和文)テラヘルツ磁化ダイナミクスの開拓

研究課題名(英文)Pioneering of terahertz magnetization dynamics

研究代表者

水上 成美(Mizukami, Shigemi)

東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・教授

研究者番号：00339269

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,000,000円

研究成果の概要(和文)：高感度・高磁場ポンプ・プローブ光学系を構築し、様々な高垂直磁気異方性と低飽和磁化を示す磁性金属単結晶薄膜を作製・評価した。高垂直磁気異方性と低飽和磁化を示す擬二次元層状磁性体単結晶薄膜の作製に成功し、0.1テラヘルツ程度のコヒーレント磁化オシレーションダイナミクスを見出した。また、超高磁気異方性を有する磁化補償フェリ磁性金属単結晶薄膜の作製に成功し、テラヘルツ波領域のコヒーレント磁化オシレーションダイナミクスを見出した。レーザー励起超高速磁化オシレーションダイナミクスの現象論の構築を行い、これらの実験結果を定性的に説明できることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Pump-probe optical system with a high sensitivity and large applied field has been constructed, and films of various magnetic materials with high anisotropy and low magnetic moments have been fabricated and investigated. Pseudo-two dimensional layered magnet films were successfully grown, in which coherent magnetization precessional dynamics with frequency of 0.1 THz were observed. Furthermore, the compensated ferrimagnet with ultra-high magnetic anisotropy has been grown and precessional dynamics in THz wave range have been observed. These experimental results were qualitatively explained by the phenomenological model constructed in this research.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：テラヘルツ スピントロニクス ポンププローブ 磁性体 レーザー エピタキシャル スピンダイナミクス 垂直磁化

1. 研究開始当初の背景

フェムト秒スケールのパルス幅をもつ超短パルスレーザーを磁性体薄膜に照射すると、サブピコ秒の時間スケールで磁化の消失や反転、あるいはコヒーレントな磁化オシレーションダイナミクスが励起される。これら超高速磁化ダイナミクスの研究は、十年ほど前から今にいたるまで活発に行われている[1]。金属磁性体におけるこの光誘起ダイナミクス現象の理解は十分ではなく、産業応用上の点でも重要である[2]。代表者は、これまでマンガングリウム合金がミリ波領域(0.25 テラヘルツ)のコヒーレントな磁化オシレーションダイナミクスを発生することを見出した[3]。従来の研究は希土類系合金薄膜や酸化物単結晶が主体であったが、このような実用的薄膜材料である金属磁性体の超高速磁化ダイナミクスの研究はまだそれほど進んではいない。

2. 研究の目的

金属磁性体の磁化オシレーションダイナミクスの周波数をテラヘルツ波領域(0.5 テラヘルツ~)まで拡大した超高速の磁化オシレーションダイナミクスを創出できれば、テラヘルツ波技術や新デバイス創製の足がかりが得られる。そこで本研究では、主に高垂直磁気異方性を有する金属フェリ磁性体薄膜の示す数テラヘルツ以上のコヒーレント磁化オシレーションダイナミクスを短パルスレーザーを用いて研究する。具体的には、

(1) 1 テラヘルツ以上のコヒーレント磁化オシレーションダイナミクスを実用合金薄膜において観測する。

(2) 磁化オシレーションダイナミクスの励起プロセスにかかわる現象論的理論を構築する。これらのもを旨とし、最終的にはテラヘルツ波応用への知見を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) ミリ波からテラヘルツ波領域の磁化ダイナミクスの評価

フェムト秒ポンプ・プローブレーザー光学系を用いた時間分解磁気光学カー効果を用いて測定を行った(図1)。パルス幅は約10フェムト秒であり、システムの時間分解はサブピコ秒である。電磁石によって磁場を様々な方向に印加することで、磁化オシレーションダイナミクス磁場強度および角度ならびに、レーザー強度などの依存性の評価を行った。

(2) 磁性薄膜ならびに多層膜の作製

超高真空マグネトロンスパッタ法を用いた二元ならびに三元系の合金・化合物薄膜を作製した。その際、コスパッタ法も併用した。主に酸化マグネシウム単結晶基板を用い、成長温度・アニール温度を最適化することで良質のエピタキシャル薄膜の形成を行った。

4. 研究成果

(1) ポンププローブ光学系の改良
測定系の高感度化・高磁場化を行い、すでに

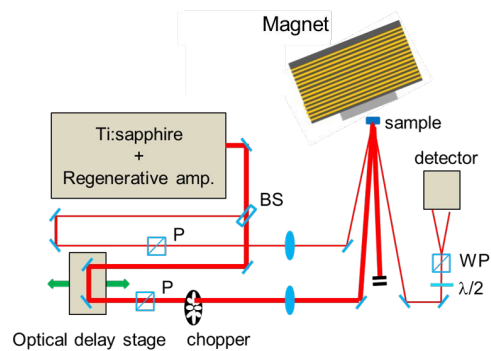


図1 フェムト秒ポンプ・プローブレーザー光学系を用いた時間分解磁気光学カー効果の測定系の模式図。BS, P, WPは、各々ビームスプリッター, ポラライザー, ウォラストンプリズム(アナライザー)を示す。

報告しているマンガングリウム単結晶薄膜(図2(a))のコヒーレント磁化オシレーションダイナミクスを調べ、印加磁場が2テスラで最大0.3テラヘルツの磁化オシレーションダイナミクスの観測に成功した(図3)。ダンピング定数が小さいことを確認した。

(2) 擬二次元層状磁性体のレーザー励起超高速磁化ダイナミクス

二次元的な層状構造、ならびに高垂直磁気異方性と低飽和磁化を示すマンガングリウム・アルミニウム・ゲルマニウム三元化合物単結晶薄膜(図2(b))を作製することに成功した。そのコヒーレント磁化オシレーションダイナミクスの周波数は0.1テラヘルツ程度(図3)と小さかったものの、二次元性に起因する新しいレーザー励起磁化ダイナミクスが生じている可能性があることを示した。

(3) 超高磁気異方性を有する磁化補償フェリ磁性金属単結晶のテラヘルツ波領域の磁化ダイナミクス

低飽和磁化、高磁気異方性を有し、20テスラ前後の超高磁気異方性磁場を有するマンガングリウム単結晶薄膜(図2(c))の創生が達成された。コヒーレント磁化オシレーションダイナミクス(フェリ磁性の同位相モード)の周波数は最大で0.56テラヘルツであることを明らかにした(図3)。

(4) 積層フェリ磁性複合膜の作製

低飽和磁化・高磁気異方性磁性体マンガングリウムと軟磁性体の積層膜の界面に負の交換相互作用が現れることを発見した。また、ホイスラー合金とマンガングリウム合金の多層膜が、垂直磁化人工フェリ磁性を示すことを見出した。この系においては、トータルの磁化が小さく、異方性磁場が大きいことから、テラヘルツ波領域の磁化ダイナミクスを原理的に期待できる。

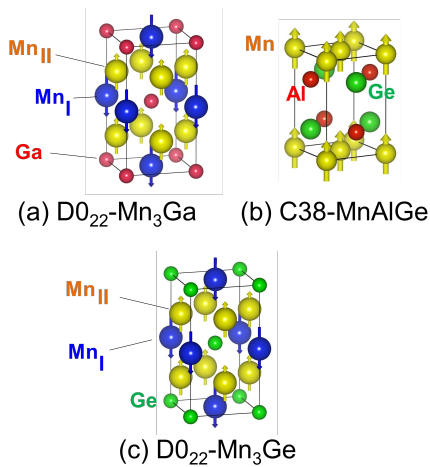


図2 本課題で研究した代表的な磁性材料の結晶構造の模式図。(a) マンガンガリウム, (b)マンガン・アルミニウム・ゲルマニウム, (c)マンゲルゲルマニウム。

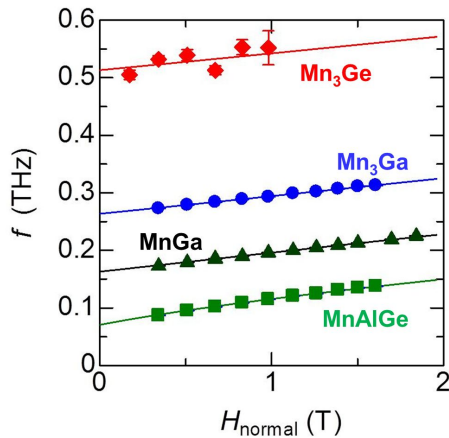


図3 代表的な単結晶薄膜におけるコヒーレント磁化才差ダイナミクスの周波数の外部磁場依存性

(5) レーザー励起超高速磁化才差ダイナミクスの現象論の構築

従来磁化ダイナミクスの記述に用いられてきたランダウリフシッツギルバート方程式を拡張し、磁化の大きさを記述する微視的3温度モデルを用いることでレーザー励起超高速磁化才差ダイナミクスの現象論の構築を試みた。その結果、上にのべた(1)-(3)の結果については、その現象論で実験を定性的に説明できることがわかり、熱的なトルクが支配的であることが分かった。しかしながら、定量的な説明には至らず、より詳細な検討、特に磁気異方性の変化するタイムスケールについて知る必要があり、より詳細な研究が必要である。

<引用文献>

A. Kirilyuk et al. Rev. Mod. Phys. 82, 2731 (2010).

W. A. Challener et al., Nat. Photonics 3, 220 (2009).

S. Mizukami et al. Phys. Rev. Lett. 106, 117201 (2011).

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21件)

Artificially engineered Heusler ferrimagnetic superlattice exhibiting perpendicular magnetic anisotropy, Q. L. Ma, X. M. Zhang, T. Miyazaki, and S. Mizukami, Scientific Reports 5: 7863 (2015). 査読有

DOI: 10.1038/srep07863

Fast Magnetization Precession and Damping for Magnetic Films with High Perpendicular Magnetic Anisotropy (review), S. Mizukami, Journal of the Magnetics Society of Japan 39, 1 (2015). 査読有

DOI: 10.3379/msjmag.1412R001

Interfacial exchange coupling in cubic Heusler Co_2FeZ ($Z = \text{Al}$ and Si)/tetragonal Mn_3Ga bilayers, R. Ranjbar, K. Suzuki, A. Sugihara, Q. L. Ma, X. M. Zhang, T. Miyazaki, Y. Ando, and S. Mizukami, J. Appl. Phys. 117, 17A332 (2015). 査読有

DOI: 10.1063/1.4918764

High perpendicular magnetic anisotropy in $\text{D0}_{22}\text{-Mn}_{3+x}\text{Ge}$ tetragonal Heusler alloy films, A. Sugihara, S. Mizukami, Y. Yamada, K. Koike, and T. Miyazaki, Appl. Phys. Lett., 104, 132404 (2014). 査読有

DOI: 10.1063/1.4870625

Magnetization dynamics for L1_0 MnGa/Fe exchange coupled bilayers, S. Mizukami, T. Kubota, S. Iihama, R. Ranjbar, Q. Ma, X. Zhang, Y. Ando, and T. Miyazaki, J. Appl. Phys. 115, 17C119 (2014). 査読有

DOI: 10.1063/1.4868087

Gilbert damping constants of Ta/CoFeB/MgO(Ta) thin films measured by optical detection of precessional magnetization dynamics, S. Iihama, S. Mizukami, H. Naganuma, M. Oogane, Y. Ando, and T. Miyazaki, Phys. Rev. B 89, 174416 (2014). 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevB.89.174416

Fast magnetization precession for perpendicularly magnetized MnAlGe epitaxial films with atomic layered

structures, S. Mizukami, A. Sakuma, T. Kubota, Y. Kondo, A. Sugihara, and T. Miyazaki, Appl. Phys. Lett. 103, 142405 (2013). 査読有
DOI: 10.1063/1.4824031

〔学会発表〕(計48件)

Tetragonal Mn-based alloy films for spintronics and THz wave applications, S. Mizukami, International Workshop on Microwave Magnetic Materials and Applications to Nano Information Devices, Sendai, 2015年3月13日.(招待講演)

Ultrafast magnetization precession in magnetic alloy films, S. Mizukami, Indo-Japan Workshop on Magnetism at Nanoscale, インド, 2015年1月11日.(招待講演)

The Interfacial Exchange coupling in cubic Heusler/tetragonal Heusler Mn₃Ga Bilayers, R. Ranjbar, S. Mizukami, Q. Ma, A. Sugihara, K. Suzuki, X. Zhang, Y. Ando, and T. Miyazaki, 59th Magnetism and Magnetic Material Conference (MMM), Hawaii, US, Nov. 7, 2014.

THz spin precession in Mn-based tetragonal Heusler and related alloy films, S. Mizukami, S. Iihama, A. Sugihara, K.Z. Suzuki, and T. Miyazaki, 59th Magnetism and Magnetic Material Conference (MMM), Hawaii, US, Nov. 6, 2014.

磁性合金薄膜におけるレーザー励起サブテラヘルツ磁化ダイナミクス, 水上成美, 応用電子物性分科会/スピントロニクス研究会共催, 東京, 2014年11月5日.(招待講演)

Laser Induced Sub-Terahertz Coherent Spin Dynamics in Ferrimagnetic D₀₂₂ Mn₃Ga Films, S. Mizukami, A. Sugihara and K. Z. Suzuki, International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2014), Tsukuba, Japan, Sep. 9, 2014.

Laser induced THz spin dynamics in magnetic alloys, S. Mizukami, Symposium of "spin manipulation using light", the Magnetism Society of Japan, Sep.3, 2014, Keio University, Japan. (招待講演)

Sub THz spin precession in D₀₂₂ Mn alloy films with perpendicular magnetic anisotropy, S. Mizukami, A. Sugihara, K. Suzuki, T. Miyazaki, IEEE International Conference on Microwave Magnetism 2014 (ICMM 2014), Sendai, Japan, Jun. 30, 2014

Laser-induced fast spin precession controlled by interfacial exchange, Q. L. Ma, S. Iihama, S. Mizukami, Y. Ando, and T. Miyazaki, IEEE International Conference on Microwave Magnetism 2014 (ICMM 2014), Sendai, Japan, Jun. 30, 2014

Tetragonal Mn-based metallic ferrimagnets for spintronics applications, S. Mizukami, A. Sugihara, Q. L. Ma, X. M. Zhang, T. Miyazaki, e-MRS Spring Meeting, Lille, France, May 27, 2014. (招待講演)

Manganese alloys with large magnetic anisotropy for spintronics application, S. Mizukami, International Conference on Nanoscale Magnetism 2013 (ICNM 2013), Istanbul, Sep. 4, 2013. (招待講演)

Optical detection of precessional dynamics and damping of magnetization in magnetic films with a large perpendicular magnetic anisotropy, S. Mizukami, Y. Ando, A. Sakuma, and T. Miyazaki, 12th Intermag/MMM joint conference, Chicago, Jan. 16, 2013. (招待講演)

〔図書〕(計1件)

Spintronic Properties and Advanced Materials, K. Takanashi and S. Mizukami, in Optical Properties of Advanced Materials, Chap. 5, eds. Y. Aoyagi and K. Kajiwara, Springer Series in Materials Science 168, Springer (2013)

〔その他〕

ホームページ等

http://www.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/mizukami_lab/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水上 成美 (MIZUKAMI, Shigemi)

東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・教授

研究者番号: 00339269