

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01862

研究課題名（和文）電界効果によるナノ波長スピン波の生成と新規演算機能への応用展開

研究課題名（英文）Electric field induced spinwave generation and its magnonics device application

研究代表者

福間 康裕（Fukuma, Yasuhiro）

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：90513466

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、スピン波干渉を利用した多数決論理演算機能の実現に向けた基盤技術の構築を目的とする。MgO/CoFeB接合において、面内方向の磁気異方性を電界効果により制御できる技術を確認した。これにより平行励起とマグノン散乱過程を経て、効率的にナノスケール波長をもつスピン波を生成することに成功した。また、高品質なY3Fe5O12薄膜を作製してスピン波の緩和時間が面方位に依存することを明らかにした。その顕著な面内異方性がみられなかった(111)面へと配向させた試料にてスピン波の干渉実験を行い、2つの入力部からのスピン波の位相差に応じて出力部の検出信号が変化することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピン波とは、双極子であるスピンの歳差運動が位相を変えながら試料中を波のように伝搬する現象である。電荷の移動を伴わないことからジュール損失がない。このために、本研究にて開発した電界効果によるナノ波長スピン波の生成技術を活用して、発熱が極めて少ない低消費電力電子デバイスの開発が期待される。また、本研究にてスピン波励起に成功したMgO/CoFeB接合は、ハードディスクドライブ用磁気ヘッドや磁気ランダムアクセスメモリ応用におけるトンネル磁気抵抗素子として実用化されている。数十nmサイズまでの素子作製技術が確立されており、既存のCMOS技術とも高い整合性をもつことから、迅速な応用展開が期待される。

研究成果の概要（英文）：Electric-field controlled magnetization dynamics and low-relaxation magnetic materials are an important integrant in low power magnonics devices. Firstly, we demonstrate electric-field induced parametric excitation for CoFeB/MgO junctions by using interfacial in-plane magnetic anisotropy. When the in-plane magnetic anisotropy and the external magnetic field is parallel to each other, spinwave is efficiently excited by using electric-field induced parametric excitation. Its wavelength and wavenumber is tuned by changing input power and frequency of the applied voltage. Secondly, we report facet dependent induced magneto-crystalline anisotropy and its effect on magnetization relaxation parameters in 40 nm sputter deposited monocrystalline single phase Y3Fe5O12 thin films. For the (111) oriented sample, the relaxation shows a minimum which is no significant anisotropic direction and then the spinwave with smaller relaxation is observed.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス 界面磁気異方性 スピン波 マグノニクス パラメトリック励振

1. 研究開始当初の背景

スピントロニクス研究の進展は、スピン流からのスピントルクやスピン軌道相互作用からのスピン軌道トルク、さらには磁性体金属/誘電体界面における電場変調からの電場トルクを利用して、電気的手法によりナノスケール磁性体の磁化を自由に励起・制御をおこなう技術を確認しつつある。現在、スピントロニクス素子応用として磁性体のヒステリシス特性(静的特性)を用いた不揮発性磁気メモリが中心である。今後は、それらナノスケール磁性体の励起技術を活用して、磁化の動的特性を利用する新しい素子機能の創出が期待されている。例えば、磁性体の磁化を励起してスピン波を生成し、その伝搬により情報伝送を行う。かつ、ゲート電圧等によりスピン波を変調して演算機能を実現でき、スピン波論理演算素子は Beyond CMOS の有力候補に挙げられている。

これまでのスピン波の励起・検出方法として誘導性結合アンテナがよく利用されている。アンペールの法則から時間・空間的に変調された磁場を磁性体へと印加してスピン波を生成する。この誘導性結合アンテナから生成される磁場は空間的に広がっており、ナノスケールでの制御が困難であるという問題がある。これまでに実験研究が進められてきたスピン波の波長はマイクロメートルサイズであり、ナノスケールサイズにおける伝搬や緩和現象は未開拓の研究分野といえる。

2. 研究の目的

ナノデバイス応用に向けて、ナノ波長スピン波の生成技術を開発する。その伝搬特性を理解してコヒーレンス性の向上に取り組む共に、スピン波の干渉を利用した多数決論理演算機能の実現を目指す。

3. 研究の方法

CoFeB/MgO 接合における界面磁気異方性の電界変調効果を電圧駆動型のスピン波励起方法として検討した。CoFeB/MgO 接合を用いたトンネル磁気抵抗素子は、磁気ランダムアクセスメモリやハードディスクドライブの磁気ヘッド等に製品化されていることから、スピン波励起手法の確立により CMOS 回路との混載による演算機能の実現が期待される。

また、界面磁気異方性の電界変調効果を利用する場合、極薄 CoFeB 薄膜を利用する必要がある。一般的には 2 nm 以下の膜厚である。このような極薄膜におけるスピン波励起の実験報告はなく、その緩和時間や緩和長は明らかになっていない。そこで、相補的な材料として酸化物ガーネット Y₃Fe₅O₁₂ 薄膜に注目した。高品質な Y₃Fe₅O₁₂ はシリコンウェーハ上には作製できないという欠点があるが、ミリメートル長の緩和長を実現できる。スパッタ法により良質な Y₃Fe₅O₁₂ 薄膜を作製し、その特性を評価した。

4. 研究成果

(1) CoFeB/MgO 接合における界面磁気異方性の電界制御とスピン波励起

スパッタ法によりシリコンウェーハ上に CoFeB 薄膜を作製した。極薄膜においても均一な CoFeB 膜を得るために Ta/Ru/Ta 下地層を利用した。また、界面磁気異方性を得るために CoFeB 膜上に MgO 層を成膜し、さらに MgO 層を保護するために Al₂O₃ 層を製膜した。磁化測定により、CoFeB 膜厚の減少と共に垂直磁気異方性が増加しており界面磁気異方性が発生していることを確認した。この界面磁気異方性は空間反転対称性の破れを反映して、膜面に対して垂直方向の異方性磁場が生成している。CoFeB/MgO 界面における電場を変調することで異方性磁場を変化させることが可能であるが、面内磁化膜および面直磁化膜の両者に対してこの電場トルクを作用できないという問題があった。このために、従来の実験では電場トルクを磁化へと作用させるために、外部磁場を利用して磁化を薄膜面内および垂直方向から傾ける必要があった。

本研究では、熱処理を利用した界面磁気異方性の制御に取り組んだ。磁性体材料においては、磁場中熱処理により誘導磁気異方性が発生することが知られている。このために、スパッタ法により作製した多層膜を 100~400℃にて 0.5 T の磁場中で熱処理を行った。外部磁場印加の方

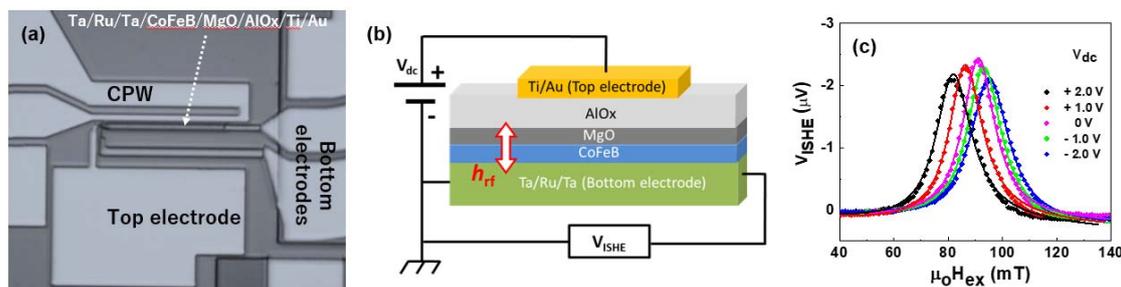


図 1 (a)作製した試料の光学顕微鏡像、(b)電氣的測定の概略図、(c)実験結果。

向に一軸磁気異方性が生成していることを確認した。この誘導磁気異方性が界面電場を変調することで変化するかどうかを確かめるために、図 1(a)に示す試料を微細加工技術により作製した。CPW にマイクロ波を印加して CoFeB 膜の強磁性共鳴を励起する。この CoFeB に接した Ta 膜にスピンポンピングによりスピン流が注入される。Ta 膜のスピンホール効果によりスピン流 → 電流へと変換され、電気的手法により強磁性共鳴を検出することができる。共鳴磁場の大きさは CoFeB へと作用する有効磁場に感度よく反応する。図 1(b)に示すように、 Al_2O_3 層状に電極を作製して外部電圧を利用して CoFeB/MgO 界面の電場を変調した。図 1(c)に実験結果の一例を示す。印加電圧の符号および大きさにより共鳴磁場が変化しており、CoFeB 膜へと作用する有効磁場が変化していることがわかる。試料に対して様々な角度から外部磁場を印加して共鳴磁場の解析を行った結果、 $\pm 2 \text{ V}$ の電圧印加により 10 mT の面直磁場成分および 3 mT の面内磁場成分が制御できていることがわかった。これにより、外部磁場により磁性体薄膜の磁化を傾けることなく電場トルクを作用させることが可能になった。

続けて、図 1(b)に示す直流電圧源から交流電圧源へと交換し、電圧駆動型の強磁性共鳴実験を行った。CPW からの磁場励起実験と比較して電圧駆動により検出した電圧信号は大幅に増加しており、効率的に磁化を励起できていると考えられる。しかし、電圧駆動型の実験においても CoFeB/MgO 接合にマイクロ波を印加しており、電場トルクに加え、変位電流からのエルステッド磁場トルクも作用していることがわかった。作製した試料のインピーダンス測定を行い、2つのトルク成分の寄与を比較した。印加するマイクロ波が 2 GHz 以下の場合には電界トルクが主成分となることがわかった。印加する周波数の増加と共に変位電流は増加するためにエルステッド磁場トルクの寄与が大きくなる。また、試料に対して様々な角度から外部磁場を印加しながら実験を行い、検出した電圧信号の大きさから電界トルクの大きさを見積った。直流の電圧印加実験で得られた値とよい一致を示した。更に、パラメトリック励振を利用した電圧駆動型の非線形磁化励起に取り組んだ。 0.08 W 以上のマイクロ波 ($f=3 \text{ GHz}$) を印加することで共鳴磁場が高磁場側へとシフトし、非線形励起現象が生じることがわかった。更に、大きな電力を入力することで3マグノン散乱過程により $k \neq 0$ のスピン波生成に成功した。図 2(a)に示すように、2つの電圧ピークに対して低磁場側信号がスピン波の寄与である。更に、マイクロ波電力を増加 ($P > 0.2 \text{ W}$) することで、4マグノン過程により短波長のスピン波励起が可能になる。実験結果を解析した結果(図 2(b))、ナノスケールの波長をもつスピン波の励起に成功していることがわかった。本手法では、スピン波の波長を入力電力にて制御できるためにデバイスのサイズに依存しない方法として非常に有用である。

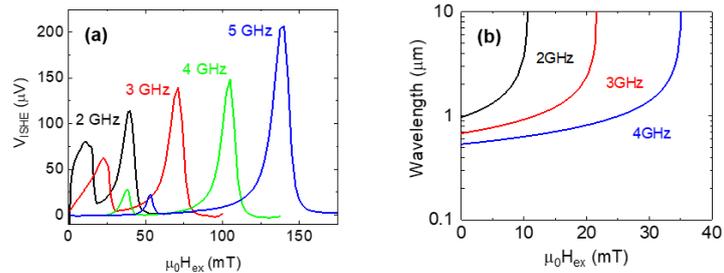


図 2 (a) $P=3 \text{ W}$ を印加したときの電圧スペクトル、(b)低磁場領域の電圧信号とスピン波波長の関係。

(2) スパッタ法による高品質 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜の作製とスピン波励起

スパッタ法により $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (GGG) ガーネット基板上に 40 nm 厚の $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG) 薄膜を作製した。図 3 に透過型電子顕微鏡により観察した試料断面の高分解能格子像を示す。GGG 基板の面方位に対して、YIG 薄膜は同じ面方位で成長していることがわかる。薄膜と基板との界面において、格子欠陥等はみられず良質な薄膜を得ることができた。磁気インピーダンス測定やベクトルネットワークアナライザにて YIG 薄膜のダンピング定数を測定した結果、 10^{-4} 程度と極薄 CoFeB 薄膜と比較して 2桁程度小さな値を実現した。2つの入力用誘導結合性アンテナおよび1つの出力用誘導結合性アンテナを YIG 薄膜上に作製し、ベクトルネットワークアナライザを利用してスピン波の検出実験を行った。2つの入力部へと印加するマイクロ波信号の位相差を変えることで出力側の信号強度が変化することを観測した。マイクロマグネティック計算を行い、YIG 薄膜内に励起したスピン波の干渉により実験結果を説明できた。

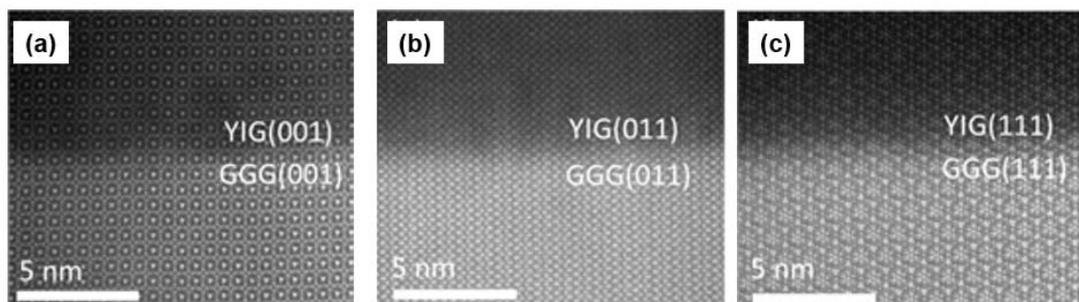


図 3 異なる面方位 ((a)001、(b)011、(c)111) GGG 基板上に作製した YIG 薄膜の高分解能断面 TEM 像。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shashank Utkarsh, Medwal Rohit, Shibata Taiga, Nongjai Razia, Vas Joseph Vimal, Duchamp Martial, Asokan Kandasami, Rawat Rajdeep Singh, Asada Hironori, Gupta Surbhi, Fukuma Yasuhiro	4. 巻 4
2. 論文標題 Enhanced Spin Hall Effect in S Implanted Pt	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Quantum Technologies	6. 最初と最後の頁 2000112 ~ 2000112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/qute.202000112	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
1. 著者名 Medwal Rohit, Chaudhuri Ushnish, Vas Joseph Vimal, Deka Angshuman, Gupta Surbhi, Duchamp Martial, Asada Hironori, Fukuma Yasuhiro, Mahendiran Ramanathan, Rawat Rajdeep Singh	4. 巻 12
2. 論文標題 Magnetoimpedance of Epitaxial Y3Fe5O12(001) Thin Film in Low-Frequency Regime	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 41802 ~ 41809
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.0c13213	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
1. 著者名 Deka Angshuman, Rana Bivas, Anami Ryo, Miura Katsuya, Takahashi Hiromasa, Otani YoshiChika, Fukuma Yasuhiro	4. 巻 101
2. 論文標題 Electric-field control of interfacial in-plane magnetic anisotropy in CoFeB/MgO junctions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.174405	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 Deka Angshuman, Tanaka Iori, Mohan John Rex, Fukuma Yasuhiro	4. 巻 56
2. 論文標題 Modulation of Magnetization Precession Trajectories by Perpendicular Magnetic Anisotropy in CoFeB Thin Films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2020.2987288	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 Deka Angshuman, Sato Katsunori, Tanaka Iori, Fukuma Yasuhiro	4. 巻 56
2. 論文標題 Simulations on the Effect of Magnetic Anisotropy on Switching of an Easy Cone Magnetized Free Layer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2019.2942339	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 Tyagi Shashank, Maeda Taito, Kimura Keisuke, Gupta Surbhi, Kishimoto Kengo, Koyanagi Tsuyoshi, Asada Hironori, Fukuma Yasuhiro	4. 巻 31
2. 論文標題 Spin Seebeck Effect in Neodymium Iron Garnet Multilayers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 2541~2541
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18494/SAM.2019.2335	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 Medwal Rohit, Gupta Surbhi, Rawat Rajdeep S., Subramanian Annapoorni, Fukuma Yasuhiro	4. 巻 13
2. 論文標題 Spin Pumping in Asymmetric Fe 50 Pt 50 /Cu/Fe 20 Ni 80 Trilayer Structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 physica status solidi (RRL) Rapid Research Letters	6. 最初と最後の頁 1900267~1900267
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssr.201900267	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8件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Y. Fukuma, S. Gupta, R. Medwal, R. S. Rawat, P. Agarwal, R. Singh
2. 発表標題 Spin to charge conversion for terahertz spintronics
3. 学会等名 47th IEEE International conference on Plasma Sciences and 2nd Asia-Pacific conference on Plasma and Terahertz Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 M. J. Rex, K. Ushima, S. Gupta, Y. Fukuma, R .S. Rawat, R. Medwal
2 . 発表標題 Voltage controlled magnetization dynamics of NiFe on PMN-PT single crystal
3 . 学会等名 47th IEEE International conference on Plasma Sciences and 2nd Asia-Pacific conference on Plasma and Terahertz Science (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 U. Shashank, R. Medwal, T. Shibata, R. Nongjai, J. V. Vas, M. Duchamp, K. Asokan, R. S. Rawat, H. Asada, S. Gupta, Y. Fukuma
2 . 発表標題 High charge-to-spin interconversion in Sulphur implanted Platinum
3 . 学会等名 5th International conference on Emerging Electronics (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Y. Fukuma, A. Deka
2 . 発表標題 Toward voltage driven spintronic devices
3 . 学会等名 20th International workshop on the physics of semiconductor devices (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 A. Deka, B. Rana, R. Anami, K. Miura, H. Takahashi, Y.C. Otani, Y. Fukuma
2 . 発表標題 Electric-field induced spin pumping in an in-plane magnetized CoFeB/MgO junction
3 . 学会等名 64th annual conference on Magnetic and Magnetic Materials (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Deka, I. Tanaka, K. Sato, Y. Fukuma
2. 発表標題 Effect of perpendicular magnetic anisotropy in voltage induced magnetization switching
3. 学会等名 The 30th Magnetic Recording Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Fukuma
2. 発表標題 Spin current generation by spin pumping
3. 学会等名 International conference on magnetic materials and applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Fukuma
2. 発表標題 Spin pumping, spin Hall effect and spin seebeck effect
3. 学会等名 63rd DAE solid state physics state symposium (招待講演) (国際学会)
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
研究協力者	浅田 裕法 (Asada Hironori) (70201887)	山口大学・創成科学研究科・教授 (15501)	

6. 研究組織（つづき）

	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	アソカン カダサミ (Asokan Kandasani)	大学間加速器研究センター・Materials Science Division・Scientist	
研究協力者	ラジディーブ ラワット (Rajdeep Rawat)	南洋理工大学・National Institute of Education・教授	
研究協力者	アナポorni サブラニアン (Annapoorni Subramanian)	デリ大学・Department of Physics and Astrophysics・教授	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
インド	University of Delhi	Inter University Accelerator Center	
シンガポール	Nanyang Technological University		