

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：14301
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：21H01798
研究課題名（和文）チューナブルなスピン波スピン流伝搬の研究

研究課題名（英文）Study on tunable spin-wave spin current

研究代表者

大島 諒 (Ohshima, Ryo)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：10825011

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,000,000円

研究成果の概要（和文）：強磁性金属薄膜を用いた導波路について、スピン波スピン流の電界制御の実現について研究した。スピン波スピン流は、磁性体中の最低励起状態であり、電子スピンのゆらぎが波のように伝搬していく流れを指す。電界印加用の電極によるスピン波スピン流の減衰について観測し、その起源について明らかにした。強磁性共鳴測定を用いることで導波路へのバッファ層やゲート電圧印加による磁気緩和の変調効果を観測した。また、磁性体/非磁性体構造の導波路について系統的にスピン波スピン流の伝搬特性を評価し、伝搬モードの表面/裏面分離を実現する条件を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピン波スピン流は、スピン情報を利用した省電力スピントロニクスデバイスへの応用が検討されている。本研究の成果はスピン波スピン流の回路設計に指針を与えるとともに、電荷レスの情報輸送というスピン波スピン流の特徴を活かすジュール熱による損失の小さな制御手法であるゲート電圧によるスピン波スピン流の緩和・整流性・動作周波数の制御の実現に大きく貢献する結果と言える。

研究成果の概要（英文）：This study aims to realize a control of spin-wave spin current in a waveguide made of ferromagnetic metals. A decay of spin-wave spin current by attaching gate electrodes and its origin were studied. A modulation of magnetization damping via introducing several buffer layers and applying gate electric field was studied by a ferromagnetic resonance measurement. Systematic studies on spin-wave spin current transport in nonmagnetic/ferromagnetic bilayers enables us to find a condition to realize the separation of spin-wave spin current in top/bottom sides.

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 スピン波

1. 研究開始当初の背景

Beyond-CMOS 技術の一つとして、電子のスピン情報を自在に制御するスピントロニクスが注目されている。スピン情報の輸送は、スピン偏極した伝導電子による拡散スピン流に加え、局在電子間の相互作用を介した伝搬であるスピン波スピン流がある。スピン波スピン流は、磁性体中の最低励起状態であり、電子スピンのゆらぎが波のように伝搬していく流れを指す。(図1)室温以下の熱エネルギーで励起可能、磁氣的結合(磁気ダイポール・交換相互作用)を介して伝搬するため電流が流れない、さらに平均自由行程が最長1cm以上であることから、生成・伝搬にかかる消費電力を極限まで低減可能であり、スピン情報を利用したスピントロニクスデバイスへの応用が検討されている。例えば、高速・不揮発性である磁気メモリ(MRAM)は、磁性体の磁化方向をスピン情報メモリとするが、この磁化方向をスピン波スピン流で伝導可能である。全スピン波スピン流回路も提案されており、波動性を利用した並列演算や電流によるスピン波スピン流の整流性を利用した論理演算などが提案されている。[1]

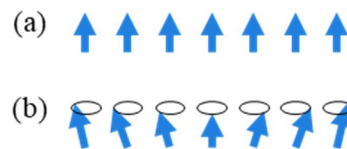


図1 (a) 偏極した電子スピンと(b) スピン波スピン流

素子の集積化を検討するうえでチャンネルの薄膜化が重要であるが、磁性薄膜中のスピン波スピン流伝搬には、(i) 表面や接合界面でのスピン波スピン流散乱の顕在化や、(ii) 表面と裏面の対称性による逆方向の波数を持ったスピン波スピン流同士の結合といった課題を持つ。つまり、薄膜中でスピン波スピン流は輸送長が短くなり、論理演算に要する整流性の獲得も困難となる。実際に、現在最もスピン波スピン流伝送に適した強磁性体絶縁体(YIG)において、膜厚が1 μm 以上では1cmを超える平均自由行程が薄くすることで数十 μm まで短くなる。さらに、強磁性金属については薄膜にすることで平均自由行程が100nm以下になる。[2]

スピン波スピン流の制御方法も重要である。外場によるスピン波スピン流の制御方法としてスピン波スピン流の干渉・トポロジカル絶縁体の表面状態・強磁性体の磁化方向などが提案されているが、いずれも制御に電流や磁場を用いており、スピン波スピン流の秀でた点の一つである電荷レスの情報輸送によるジュール損低減という特徴を損なうことになる。[1,3,4]

以上を背景として、薄膜磁性体中のスピン波スピン流の緩和を低減できるか、特に学術研究に耐えうる1 μm 程度の輸送長を薄膜磁性体でも実現できるか、電荷レスの情報輸送という特徴を活かすジュール損の小さなスピン波スピン流の伝搬制御が可能か、具体的にはゲート電圧によるスピン波スピン流の緩和・整流性・動作周波数の制御が可能か、を学術的「問い」として提起した。

2. 研究の目的

本研究は、上記の「問い」に対する回答として、材料の接合界面に現れる非対称性に着目することで上記課題の解決を検討し、(1)非磁性バッファ層・キャップ層制御による外因性スピン波散乱の低減、(2)キャップ層・キャップ層/導波路界面のスピン軌道相互作用のゲート電圧制御、(3)飽和磁化の変調による動作周波数の制御を提案した。スピン波スピン流をゲート電圧による制御するという研究は、申請者が高周波によるスピン波励起・観測とイオンゲートによる金属薄膜物性の変調に実績を持つが故に着想し、実現できると考えた。

3. 研究の方法

(1) 非磁性バッファ層・キャップ層制御による外因性スピン波散乱の低減

薄膜化に伴うスピン波スピン流の散乱要因として、(a) 薄膜表面・界面のラフネスや表面欠損や、(b) 異種材料接合界面での異方性磁場(エネルギー)などがある。申請者は、強磁性薄膜表裏面に適切な材料を接合することで上記の散乱要因の低減に成功しており [5]、これを用いてスピン波スピン流伝搬における緩和の低減を実現する。

(2) キャップ層・キャップ層/導波路界面のスピン軌道相互作用のゲート電圧制御

キャップ層やその界面によるスピン軌道相互作用について、ゲート電圧による変調を行う。PtやPdなどの金属超薄膜においてイオンゲルを用いた高電界印加によるスピン軌道相互作用の変調を実現しており、同様の手法を用いる [6,7]。例えば、スピン軌道相互作用の大きな白金は研究(1)に不適だが、ゲート電圧の印加でスピン軌道相互作用を低減することでスピン波の散乱を電界で制御できる可能性を見出した。

(3) 飽和磁化の変調による動作周波数の制御

スピン波の周波数分散関係は、導波路となる磁性体の磁化と磁気異方性エネルギーで決定される。磁化の大きさを外場で変調することでスピン波スピン流の動作周波数を制御可能と考えた。手法としては、(a) ゲート電圧印加による磁化変調と、(b) Gdなど反強磁性体と強磁性体の接合による導波路の作製とそのゲート電圧変調である。反強磁性体/強磁性体間の交換相互作用

により巨大な界面異方性磁場が導入されるが、ゲート電圧による磁気特性変調により界面交換相互作用の変調を図る。Gd はキュリー温度が室温以下であるため、スピン波スピン流の温度依存性からも磁化強度、あるいは角運動量に対しスピン波スピン流の動作周波数がどのように変調されるか観測し、ゲート変調の物理的起源を解明する。

4. 研究成果

(1) 電極が導波路中のスピン波スピン流に与える効果

スピン波スピン流素子・回路を設計する上で導波路上に電極材料を成膜するが、成膜後はスピン波が反射・減衰されることが知られており、緩和の要因としては電極へのスピン流侵入、あるいは電極が磁性体であれば磁化による散逸などが挙げられていた。電極によるスピン波減衰について、電極の膜厚依存性や絶縁層を挟むなどの系統的实验により、わずか数十 nm の金属の存在によりスピン波スピン流減衰が始まり、その要因がスピン波スピン流からのダイポール磁場を介した緩和であることを明らかにした。具体的には、フェリ磁性絶縁体であるイットリウム鉄ガーネット (YIG) 上に 2 本のアンテナを形成し、その間に電極を成膜することによるスピン波スピン流の減衰を観測した。[8] 図 2 にデバイスの概念図と測定結果を示すが、電極として NiFe 合金 (Py) を 60 nm 成膜するとスピン波スピン流の伝送を意味する係数 S_{21} が大きく減衰した。また、電極と導波路の間に絶縁体である SiO_2 層を 100 nm 程度導入しても同様の結果が得られた。抵抗率の異なる電極材料でも同様の実験を行うことにより、観測された減衰がダイポール磁場による電極への渦電流生成が緩和の起源であることを明らかにした。本研究はスピン波スピン流のゲート電圧制御素子を設計する上で重要な研究であり、英文学術論文雑誌に掲載された。[8]

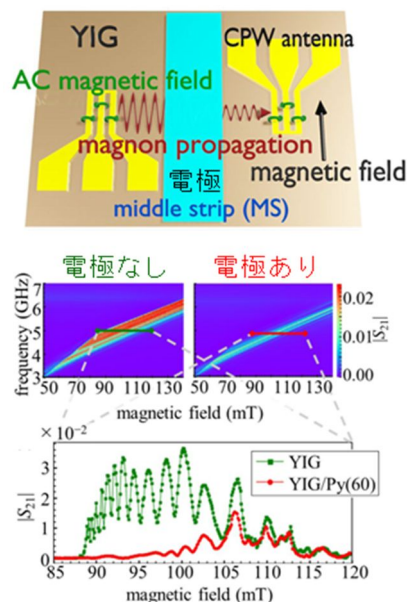


図2 デバイスの概略図と電極の有無によるスピン波伝送信号 S_{21} の測定結果の比較 [8]

(2) 接合材料制御によるスピン波緩和の変調とゲート電圧制御

強磁性共鳴測定によりバッファ層による磁気異方性エネルギーの導入や、白金超薄膜をキャップ層に用いたゲート電圧変調効果による磁気緩和の変調効果について観測し、スピン波スピン流の変調につながる結果を得た。磁性体/非磁性体によるスピン波スピン流導波路について系統的にスピン波スピン流の伝搬特性を評価し、スピン波スピン流の分散モードや導波路の形状について検討することで、伝搬モードの表面/底面分離を実現する条件を明らかにした。これにより、界面スピン軌道相互作用によるスピン波スピン流伝搬の変調が可能となる。

(3) その他

低温 RF プロローパーの導入により、上記の計画していた内容に加え、近年注目を集めている強磁性層状物質を強磁性金属薄膜に搭載することによるスピン波スピン流モードの変調や、スピン波スピン流を量子化した準粒子であるマグノンと共振器フォトンとの結合状態へのけんきゅうなど、当初予定していた研究よりもより広範な研究を展開することができた。

<参考文献>

- [1] A. V. Chumak, arXiv 1901.08934 (2019). [2] E. Michel *et al.*, Phys. Rev. B **94**, 014420 (2016). [3] A. Navabi *et al.*, Phys. Rev. Appl. **11**, 034046 (2019). [4] K. S. Das *et al.*, Phys. Rev. B **101**, 054436 (2020). [5] S. Yoshii, R. Ohshima, *et al.*, Sci. Rep. **10**, 15764 (2020). [6] S. Yoshitake, R. Ohshima *et al.*, Appl. Phys. Lett. **117**, 092406 (2020). [7] R. Ohshima *et al.*, Sci. Rep. **11**, 21779 (2021). [8] S. Mae[†], R. Ohshima[†], *et al.*, Phys. Rev. B **105**, 104415 (2022). [†]Contributed equally.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Mae Sotaro, Ohshima Ryo, Shigematsu Ei, Ando Yuichiro, Shinjo Teruya, Shiraishi Masashi	4. 巻 105
2. 論文標題 Influence of adjacent metal films on magnon propagation in Y3Fe5012	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 104415
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.105.104415	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 S. Mae, E. Shigematsu, R. Ohshima, Y. Ando, T. Shinjyo and M. Shiraishi
2. 発表標題 Investigation of magnon absorption from Y3Fe5012 into metals
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Mae, E. Shigematsu, R. Ohshima, Y. Ando, T. Shinjyo and M. Shiraishi
2. 発表標題 Investigation of magnon suppression from Y3Fe5012 into metals
3. 学会等名 The 26th Symposium on the Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Mae, R. Ohshima, Y. Ando and M. Shiraishi
2. 発表標題 Magnon Suppression Flowing Y3Fe5012 via Inductive Effect
3. 学会等名 Magnonics 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Mae, E. Shigematsu, R. Ohshima, Y. Ando, T. Shinjyo and M. Shiraishi
2. 発表標題 Magnon loss propagating in YIG due to the eddy current
3. 学会等名 24th international Colloquium on Magnetic Films and Surface (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Mae, E. Shigematsu, R. Ohshima, Y. Ando, T. Shinjyo and M. Shiraishi
2. 発表標題 Investigation of magnon absorption from Y3Fe5O12 into metals
3. 学会等名 MMM-Intermag 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Mae, E. Shigematsu, R. Ohshima, Y. Ando, T. Shinjyo and M. Shiraishi
2. 発表標題 The effect of eddy current on magnon propagation
3. 学会等名 The 5th International Union of Materials Research Societies International Conference of Young Researchers on Advanced Materials (国際学会)
4. 発表年 2022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

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
---------	---------