

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2019

課題番号：18K19021

研究課題名(和文)強磁性絶縁体における磁化ダイナミクスの電界制御

研究課題名(英文)Electric field control of magnetization dynamics in ferromagnetic insulator

研究代表者

塩田 陽一 (Shiota, Yoichi)

京都大学・化学研究所・助教

研究者番号：70738070

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、汎用性の高いスパッタリング法を用いて、ナノメートルスケールで膜厚制御された高品位なYIG薄膜の作製を行い、電界による効率的なスピン波の磁化ダイナミクスの制御を行った。まずアルゴンガスの流量を精密に制御する事で、磁気緩和定数の低いYIG薄膜の作製に成功した。また50-20nmの膜厚範囲で静磁表面波の配置でスピン波伝搬測定を行い、スピン波の伝搬を観測することができた。次に面内電界を加えながら垂直磁場印加下においてスピン波伝搬の測定を行った。すると外部電界によるジャロシンスキー守谷相互作用に起因すると思われる共鳴周波数の変調が観測された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電界による磁化ダイナミクスの制御とスピン波を用いた研究は、それぞれ電子機器の低消費電力化の観点から意義のある研究である。本研究で提案する電界制御を用いることで、低消費電力かつスケーラビリティなスピン波論理演算素子を実現する事ができる。また最近では、ナノメートルスケールの膜厚制御されたYIG薄膜のニーズが高まっている。例えば、スピン軌道歪み作用の大きな材料(Pt,Wなど)と組み合わせた「スピンオービトロニクス」や、THzオーダーの高速な磁化ダイナミクスを有する反強磁性体(IrMn,NiO,CoOなど)と組み合わせた「反強磁性体スピントロニクス」との組み合わせなど、様々な応用展開が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigated the fabrication of high quality YIG thin films with nano-meter scale thickness by using conventional sputtering technique. First, we successfully fabricated YIG thin films with low Gilbert damping constant by controlling the flow of Ar gas precisely. Propagating spin waves under the magnetostatic surface wave configuration was observed using 50 to 20 nm-thick-YIG. Next, we investigated the propagating spin waves under the applications of perpendicular magnetic field and in-plane electric field. We observed frequency shift which may result from the Dzyaloshinskii-Moriya interaction induced by electric field.

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 イットリウム鉄ガーネット 電界効果

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、情報化社会の急速な進展により、電子機器の低消費電力化が求められている。そこで、磁性体中の磁気モーメントの波であるスピン波（マグノン）を用いた研究が注目を集めており、「マグノクス」と呼ばれている。スピン波を伝搬させる媒体としては強磁性体を用いられるが、絶縁体においても情報伝送を行うことができるため、ジュール熱損失の影響がほとんどない低消費電力な電子機器の実現が期待されている。しかし、スピン波の周波数・位相・強度は電流磁場によって制御されるものがほとんどであり、演算操作に大きな電力を消費することが問題となっている。

そこで、申請者はこれまで強磁性金属における磁化ダイナミクス of 電界制御に関する研究を行ってきた。強磁性金属を用いた場合、遮蔽効果により電界の侵入長は数 Å と界面のみに限定されるため、膜厚を数原子層程度まで薄くする必要があった。一方、スピン波の群速度は膜厚に比例するため、数原子層の強磁性薄膜ではスピン波の観測が困難であった。そのため、強磁性金属において伝搬するスピン波の電界効果を観測した報告例はあるものの、効果としては非常に小さいものであった。

一方、強磁性絶縁体であるイットリウム鉄ガーネット（YIG）薄膜に電界を加えるとスピン波の共鳴周波数に変調されるという事が 2011 年に理論的に提案された[1]。YIG は金属に比べて磁気緩和定数が二桁程度低く、スピン波を伝搬させる媒体としてよく用いられる材料である。この論文では加えた電界によって YIG 内に存在するスピン軌道相互作用によりジャロシンスキ・守谷相互作用（DMI）が誘起され、共鳴周波数の変調  $\Delta f$  は  $\Delta f \propto (\mathbf{E} \times \mathbf{M}) \cdot \mathbf{k}$  で与えられる。ここで、 $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{k}$  はそれぞれ電界ベクトル、磁化ベクトル、スピン波の波数ベクトルである。より効率的なスピン波の電界変調のためにはナノメートルスケールで膜厚制御された高品位な YIG 薄膜の作製が必要であると考えられる。しかし、高品位な YIG 薄膜は液相エピタキシー法によって作製されるため、膜厚の制御性は低くマイクロメートル以下の厚さを実現する事が難しかった。

### 2. 研究の目的

本研究では最も汎用性の高いスパッタリング法を用いて、ナノメートルスケールで膜厚制御された高品位な YIG 薄膜の作製を目指す。また作製した YIG 薄膜を用いて、電界によって効率的にスピン波の磁化ダイナミクスを制御する事を目的に研究を行った。

### 3. 研究の方法

本研究ではナノメートルスケールで膜厚制御された YIG 薄膜中を伝搬するスピン波に対する電界効果を観測するために、以下の順に研究を進める。

#### (1) スパッタリングによる高品位な YIG 薄膜の作製

YIG 薄膜の作製は、単結晶 GGG(111)基板上に高周波スパッタリング法によって成膜を行った。膜厚は全て 50nm である。成膜後は大気中において 900°C, 8 時間にアニール処理を行った。YIG 薄膜の評価にはベクトルネットワークアナライザを用いた強磁性共鳴法を用いた。Si 基板上に作製したコプレーナ導波路に YIG 薄膜を置き、反射波  $S_{11}$  を測定することで測定を行った。

#### (2) YIG 薄膜スピン波デバイス

YIG 薄膜を 50 $\mu\text{m}$  幅の細線に加工し、その上にスピン波の励起・検出用に二つのアンテナを作製した。それぞれのアンテナはネットワークアナライザのポート 1 とポート 2 に接続し、スピン波の伝搬特性を評価した。外部磁場はスピン波の伝搬と垂直の方向に印加し、静磁表面波（MSSW; Magnetostatic surface wave）の配置で測定を行った。

#### (3) YIG スピン波デバイスにおける電界効果

外部電界によって誘起される DMI を介した周波数シフトは  $\Delta f \propto (\mathbf{E} \times \mathbf{M}) \cdot \mathbf{k}$  と表すことができる。この条件を満たすために、二つのアンテナの間に面内電界を加えられるように電極を作製し、電圧を加えながら外部磁場を面直に加えてスピン波伝搬の測定を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) スパッタリングによる高品位な YIG 薄膜の作製

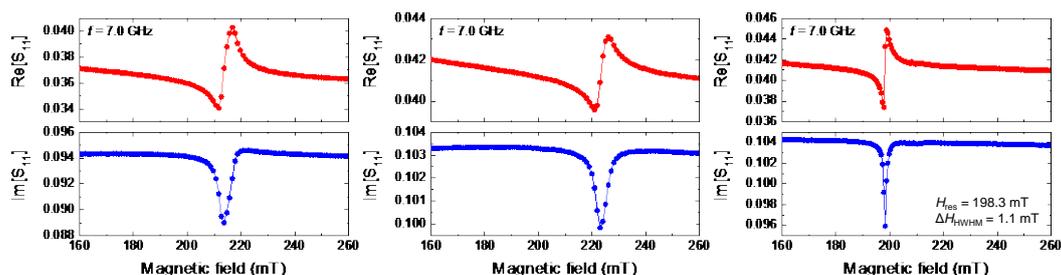


図 1 様々な Ar ガス流量で成膜した YIG 薄膜の強磁性共鳴スペクトル (a) 19.5 sccm (b) 14.5 sccm (c) 4.0 sccm

図 1 に様々な Ar ガス流量で成膜を行った YIG 薄膜の強磁性共鳴スペクトルを示す。Ar ガス流量が比較的多い 19.5 sccm と 14.5 sccm で成膜した YIG に関しては、共鳴スペクトルの線幅が大きいのに対して、Ar ガス流量が 4.0 sccm で成膜した YIG に関しては、共鳴スペクトルが小さいことがわかった。つまり、磁気緩和定数の小さい高品位な YIG の成膜には Ar ガス流量を小さくして成膜することが重要であることがわかった。

## (2) YIG 薄膜スピン波デバイス

作製した YIG 薄膜の伝搬特性を調査した。図 2(a) に作製したデバイスの光学顕微鏡図を示す。図 2(b) は様々な YIG 膜厚において測定したスピン波群速度の磁場依存性である。スピン波の群速度は小さい磁場および膜厚が厚いほど大きな値を示す。実線は MSSW の群速度の理論式で得られた曲線であり、実験と理論値が良い一致を示していることがわかる。次に、スピン波伝搬の非相反性について調べた。ここでいう非相反性とはスピン波の伝搬方向に依存してスピン波の強度が異なることを意味している。図 2(c) は様々な YIG 膜厚において非相反性の磁場依存性をプロットしたものである。ここで、非相反性の値が 1.0 というのは左右に伝搬するスピン波の強度差がないという事なので、非相反性の数字が小さいほど、非相反性が大きいという事に注意が必要である。この結果より、非相反性は磁場が大きくなるにつれて大きくなり、85 mT の磁場では 0.1 程度であることがわかった。強磁性金属である Py ではおよそ 0.6 程度であることが報告されているので、YIG は非常に大きな非相反性を有していることがわかった。これは YIG の飽和磁化が Py などの強磁性金属に比べて桁程度小さいことが理由であると思われる。これまで、数十ナノメートルオーダーの YIG 薄膜はパルスレーザー堆積 (PLD) 法など限られた手法でしか報告されていなかったが、本研究ではスパッタリング法でも最適な成膜条件において 20 nm という非常に薄い YIG 薄膜においてもスピン波の伝搬を観測することができた。

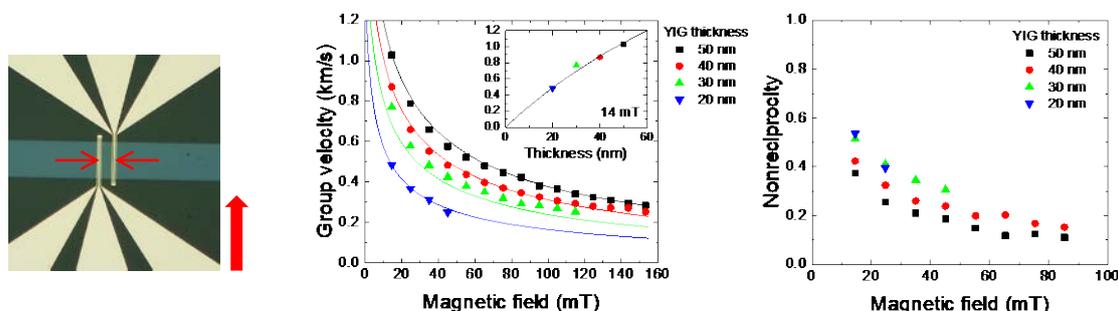


図 2 (a) スピン波デバイスの光学顕微鏡図 (b) スピン波群速度の磁場依存性 (c) 非相反性の磁場依存性

## (3) YIG スピン波デバイスにおける電界効果

YIG 薄膜中を伝搬するスピン波の電界効果を観測するために図 3(a) に示すようなデバイスを作製した。YIG の飽和磁化は 170 mT 程度なので、簡単に磁化を垂直に飽和させることは可能である。図 3(b)(c) は垂直に磁場を 300 mT 加えた時の  $S_{21}$  と  $S_{12}$  のスピン波伝搬スペクトルである。この配置は静磁前進体積波 (MSFVW; Magnetostatic forward volume wave) と呼ばれ、(2) で観測したスピン波のモードよりは群速度が小さく信号強度はかなり小さい。それでもスピン波の伝搬による信号の検出に成功した。

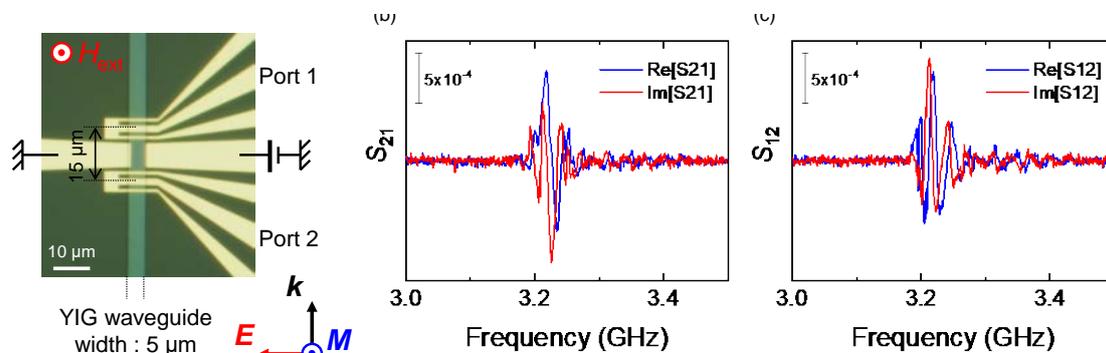


図 3 (a) 電界効果用スピン波デバイスの光学顕微鏡図 (b)(c) 垂直磁場 300 mT におけるスピン波伝搬スペクトル (b)  $S_{21}$  と (c)  $S_{12}$

次に電圧を加えながらスピン波伝搬の測定を行った。電圧によるスピン波の周波数シフトは非常に小さかったため、 $V = 0$  V と  $V \neq 0$  V の時のスピン波伝搬スペクトルを交互に測定し、それぞれのスペクトルの差分を積算することで、電界効果を評価する手法を試みた。図 4(a) は 60

V と -60 V の電圧を加えた時のスペクトルである。この結果から周波数シフトを見積もるために以下のような手法を用いた。まず 0 V におけるスピン波伝搬スペクトルを周波数  $f$  で微分したスペクトル  $dS/df$  を求める。次に、図 4(a) で得られたスペクトルと  $(dS/df)\Delta f$  のスペクトルが一致するような  $\Delta f$  を求めることによって、電圧による周波数シフト  $\Delta f$  を評価した。図 4(a) に示す黒線が最適な  $\Delta f$  を用いた時の曲線である。ここで、左上と右下のフィッティングに関しては、 $\Delta f$  が正の時の曲線を描いているため符号が反転しているが、これはつまり  $\Delta f$  が負であることを表している。図 4(b) は  $\Delta f$  の電圧依存性をプロットしたものである。まず電圧に対して線形に変化していることがわかる。また興味深いことに、 $S_{21}$  と  $S_{12}$  で  $\Delta f$  の符号が反転していることがわかった。ここで  $\Delta f$  から予想される DMI の変調量は以下の式で表すことができる。

$$\Delta D = \pi M_s \Delta f / (2\gamma |k|) \quad (1)$$

図 4(b) で得られた傾きと式(1)の関係式を用いると、電界による DMI の変調量は 218 fJ/(Vm) と評価することができた。この値は先行研究である強磁性金属を用いた Au/Fe/MgO の系に比べて一桁以上大きな値となっている。また強磁性金属の時は、電圧による磁気異方性変化も同時に周波数シフトに寄与するため、傾きの符号はスピン波の伝搬方向に対して同じであったが、YIG の場合は DMI の電界効果のみが寄与しているため、傾きの符号が反転していると考えられる。

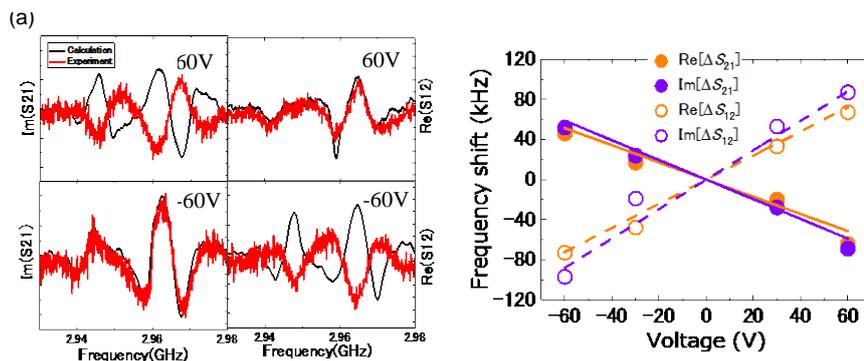


図 4 (a) 60 V および -60 V の電圧を加えた時のスピン波伝搬スペクトルの電圧変調成分  
(b) 電圧による周波数シフト  $\Delta f$  の印可電圧依存性

<引用文献>

[1] T. Liu et al., Phys. Rev. Lett. 106, 247203 (2011)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shiota Yoichi, Funada Shinsaku, Hisatomi Ryusuke, Moriyama Takahiro, Ono Teruo	4. 巻 116
2. 論文標題 Imaging of caustic-like spin wave beams using optical heterodyne detection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 192411 ~ 192411
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0010410	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 Funada Shinsaku, Shiota Yoichi, Ishibashi Mio, Moriyama Takahiro, Ono Teruo	4. 巻 13
2. 論文標題 Enhancement of spin wave group velocity in ferrimagnets with angular momentum compensation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 063003 ~ 063003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ab916d	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 Funada Shinsaku, Nishimura Tomoe, Shiota Yoichi, Kasukawa Shuhei, Ishibashi Mio, Moriyama Takahiro, Ono Teruo	4. 巻 58
2. 論文標題 Spin wave propagation in ferrimagnetic Gd <sub>x</sub> Co <sub>1-x</sub>	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 080909 ~ 080909
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab2f98	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 Shiota Yoichi, Moriyama Takahiro, Ono Teruo	4. 巻 12
2. 論文標題 Magnetic properties of ferrimagnetic Tb/CoFeB/MgO films	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 083002 ~ 083002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab2c23	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 Mio Ishibashi, Yoichi Shiota, Tian Li, Shinsaku Funada, Takahiro Moriyama, Teruo Ono	4. 巻 6
2. 論文標題 Switchable giant nonreciprocal frequency shift of propagating spin waves in synthetic antiferromagnets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eaz6931
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aaz6931	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 -

[学会発表] 計19件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Yoichi Shiota
2. 発表標題 Coupling between acoustic and optic magnons in synthetic antiferromagnets
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoichi Shiota
2. 発表標題 Coupling between acoustic and optic magnons in synthetic antiferromagnets
3. 学会等名 64th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoichi Shiota
2. 発表標題 Spin waves in synthetic antiferromagnets
3. 学会等名 11th International Conference on Advanced Materials and Devices (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoichi Shiota
2. 発表標題 Imaging of caustic-like spin wave beams radiated from different waveguide widths using heterodyne detection
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 船田晋作
2. 発表標題 フェリ磁性体GdCoにおけるスピン波伝搬
3. 学会等名 第17回ナノ学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinsaku Funada
2. 発表標題 Spin wave propagation of ferrimagnetic GdCo
3. 学会等名 Magnonics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mio Ishibashi
2. 発表標題 Large nonreciprocal frequency shift of propagating spin waves in synthetic antiferromagnets
3. 学会等名 Magnonics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinsaku Funada
2. 発表標題 Spin Wave Propagation in Ferrimagnetic GdCo
3. 学会等名 2019 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tian Li
2. 発表標題 Snell's law for isotropically propagating spin wave
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mio Ishibashi
2. 発表標題 Large Nonreciprocal Frequency Shift of Propagating Spin Waves in Synthetic Antiferromagnets
3. 学会等名 第43回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 船田晋作
2. 発表標題 フェリ磁性体GdCo におけるスピン波伝搬
3. 学会等名 第43回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石橋未央
2. 発表標題 人工反強磁性体中を伝播するスピン波の電流印加による周波数シフト制御
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 Fuyuki Ando
2. 発表標題 Fabrication of noncentrosymmetric Nb/V//Ta superlattice and its superconductivity
3. 学会等名 64th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塩田陽一
2. 発表標題 Magnetization compensation temperature and field-driven domain wall creep motion in ferrimagnetic Tb/CoFeB/MgO layer
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 柏川周平
2. 発表標題 Electric field effect on propagating spin wave in YIG film
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石橋未央
2. 発表標題 Spin wave propagation in synthetic antiferromagnets
3. 学会等名 International School on Spintronics and Korea-Japan Spintronics Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 粕川周平
2. 発表標題 Electric Field Effect on Propagating Spin Wave in YIG Thin Films
3. 学会等名 Joint Intermag/MMM 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 船田晋作
2. 発表標題 Spin wave propagation of ferrimagnetic GdCo
3. 学会等名 日本物理学会 2019年春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石橋未央
2. 発表標題 人工反強磁性体におけるスピンの波伝搬
3. 学会等名 日本物理学会 2019年春季大会
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----