

強磁性共鳴による Co-Fe 合金単層膜自己誘起逆スピホール効果

白 承根、手木 芳男*、仕幸 英治
(阪市大院工、*阪市大院理)

Self-induced inverse spin-Hall effect in Co-Fe alloy single-layer films under the ferromagnetic resonance

S.K. Baek, Y. Teki*, E. Shikoh
(Osaka City Univ. Eng., *Osaka City Univ. Sci.)

はじめに

近年、強磁性共鳴(FMR)の下で強磁性体の単層薄膜に生じる自己誘起逆スピホール効果による起電力の生成が注目されている¹⁻³⁾。Fig. 1に強磁性薄膜内の局在磁気モーメントの、FMR下における動的特性の概要を示す。強磁性膜の上面側(空気層側)と下面側(基板側)との間で局在磁気モーメントの減衰特性が異なるため、膜の面直方向に純スピ流が生成され、その純スピ流は逆スピホール効果(ISHE)⁴⁾によって起電力に変換されると考えられている²⁾。これまでに Fe, Co, および Ni₈₀Fe₂₀の自己誘起 ISHE による起電力の生成が達成された¹⁻³⁾。しかしながら元素により起電力特性が異なった。本研究では FMR 下の Co-Fe 合金の単層膜における自己誘起 ISHE による起電力の生成を達成し、その Co と Fe の組成比依存性を評価した。

実験方法

電子ビーム蒸着法により、熱酸化膜付き Si 基板上に Co_xFe_{100-x} 合金(x = 0, 25, 50, 75, 100)の単層膜(膜厚 25 nm)を作製した。FMR の励起には ESR 装置を用いる方法と、電磁石による静磁界、およびネットワークアナライザによる高周波電流を伝送線路に印加することによって生成される高周波磁界を用いる方法を併用した。起電力の検出にはナノボルトメータを用いた。全ての測定は室温で行った。

実験結果

Fig. 2 に x = 75 の試料における FMR 下の起電力特性を示す。高周波の出力は 200 mW である。共鳴磁界付近において起電力が観測され、起電力の符号は静磁界の方向を逆転するとことにより、反転した。従来の解析手法⁴⁾により、起電力の起源は主に ISHE であると結論付けた。Fig. 3 に伝送線路を用いて評価した、Co-Fe 合金薄膜における FMR 下の ISHE による起電力の Co 濃度依存性を示す。高周波の出力は 20 mW である。組成の異なる各試料において静磁場に対する反転対称性を示す出力電圧特性が観測された。更に起電力は高周波出力に依存した。以上により ISHE⁴⁾によって起電力が発生したと結論付けた。即ち Co-Fe 合金薄膜においても FMR 下で ISHE による起電力の生成を達成した。学会時には以上の詳細を議論する。

参考文献

- [1] A. Tsukahara, et al., Phys. Rev. B **89**, 235317 (2014).
- [2] K. Kanagawa, et al., AIP Adv. **8**, 055910 (2018).
- [3] O. Gladii, et al., Phys. Rev. B **100**, 174409 (2019).
- [4] E. Saitoh, et al., Appl. Phys. Lett. **88**, 182509 (2006).

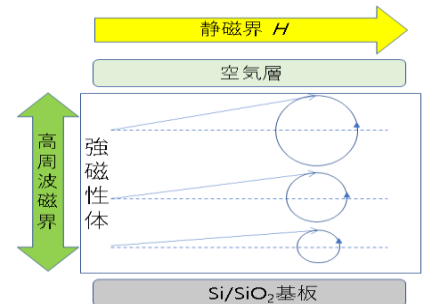


Fig. 1. Spin current generation mechanism in a ferromagnetic metal film under the FMR.

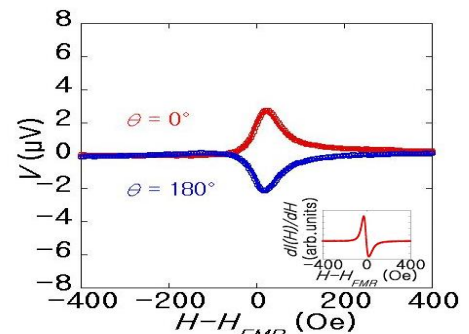


Fig. 2. Output voltage property of Co₇₅Fe₂₅ under FMR. (Inset) an FMR spectrum.

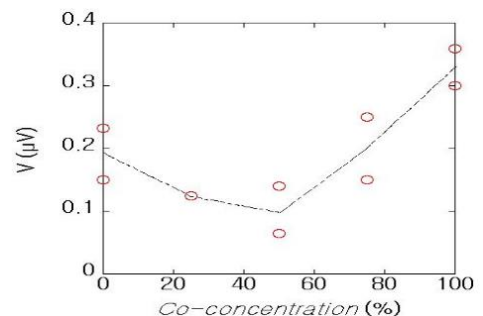


Fig. 3. Co concentration dependence of the output voltage due to the ISHE.

スロット線路を用いたイットリウム鉄ガーネットの磁化ダイナミクス励起とスピン波の検出

神田哲典、室賀翔¹、遠藤恭²
(大島商船高専、¹秋田大、²東北大)

Magnetization dynamics induced by slot line waveguide and detection of spin waves in yttrium iron garnet

T. Koda, S. Muroga¹, Y. Endo²

(National Inst. of Technology, Oshima College, ¹Akita Univ., ²Tohoku Univ.)

はじめに

我々はイットリウム鉄ガーネット(YIG)の磁化ダイナミクスを励起する高周波伝送線路としてスロット線路に着目し、高周波応答の線路形状依存性を評価した。その結果、スロット線路の間隔に依存する磁化ダイナミクスが励起されることを見出した[1]。マイクロマグネティクスシミュレーションによる解析から線路から発生するスピン波と磁化ダイナミクスの相互作用が存在することが示唆された。そこで、その高周波応答とスロット線路から発生するスピン波の相関を検討したので報告する。

実験方法

試料には(111)ガドリウムガリウムガーネット (GGG) 単結晶基板上に液相エピタキシャル法で成長された膜厚 10 μm の YIG(111)単結晶膜を用いた。試料上に高周波伝送線路として、フォトリソグラフィ法で非対称型のコプレーナウェーブ伝送線路、および、スロット伝送線路を形成した。0 dBm の高周波電力をこの伝送線路により YIG 上に入力し、反射電力強度の外部磁界依存性をネットワークアナライザで評価した。また、試料上にスピン波を検出するための非対称型コプレーナウェーブ線路を 1 mm 離れた位置に設置し、YIG を伝搬するスピン波をアンテナ法により検出・評価した。

実験結果

図1には信号線路幅 10 μm 、線路幅間隔 55 μm のスロット線路における測定結果を示す。入力周波数は 7.2 GHz である。反射強度は 1670 Oe および 1730 Oe 付近に吸収ピークが確認される。マイクロマグネティクスによる解析から、スロット線路のそれぞれの線路周辺で局所的に磁化歳差運動が誘起され、スピン波が伝搬することが示唆されている。実際、アンテナ法においてもスピン波に起因する信号が検出されている。1730 Oe 付近の吸収ピークよりも高磁場側においては、アンテナ法で検出されたスピン波の強度と吸収ピーク強度に大きな相関は見られなかった。一方、1700 Oe 近傍の挙動で、高周波電力の吸収強度が少ない磁場領域ではスピン波の検出出力が極小値を示しており、磁化歳差運動とスピン波強度に強い相関を示した。本試料で発生するスピン波は表面静磁波であり、その波長は同一周波数の場合、磁場の低下と共に短くなる。1700 Oe におけるスピン波の波長はおよそ 55 μm と見積もられる。電磁界解析より、伝送線路間の高周波磁場の位相は 180° ずれているため、このスピン波の波長において、スピン波と局所磁化歳差運動が逆位相の関係になり磁化歳差運動のスピン波が抑制されたと考えられる。すなわち、この結果はスピン波が局所磁化歳差運動に影響を及ぼしていることを強く示唆する結果と考えられる。講演では磁化歳差運動とスピン波の相関の素子サイズ依存性を中心に報告する。

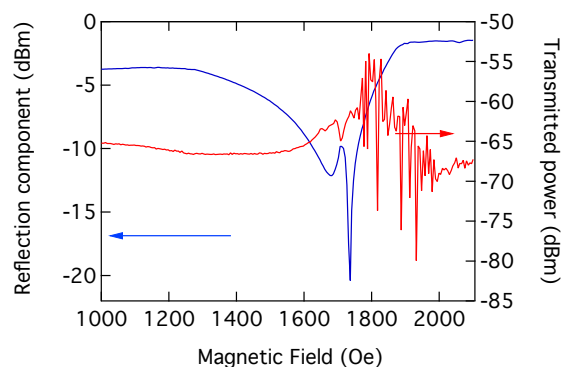


Fig.1. Magnetic field dependence of reflection component of input power and transmitted power for the detection of spin waves.

謝辞 本研究にあたり、株式会社グラノプトから測定試料の御協力を頂きました。本研究の一部は、JSPS 科研費 No.18K14114 の助成を受けて行われた

参考文献 [1] Koda et.al., Appl. Phys. Lett., vol. 116 102403 (2020).

準周期マグノンニック結晶を用いた MSSW の非相反性制御

藤井幹太, 笠原健司, 眞砂卓史
(福岡大理)

Propagation properties of spin waves in magnonic crystal with quasi periodic structure

K. Fujii, K. Kasahara, and T. Manago
(Fukuoka Univ.)

はじめに 近年、強磁性体導波路中に周期的な構造を導入したマグノンニック結晶(MC)を用いて、スピン波の伝搬特性を制御しようとする研究が精力的に行われている。これまでに我々は、強磁性体金属のパーマロイ(Py)に周期的な溝を導入した MC を作製し、アンテナを用いた電気的手法により特定の周波数帯でスピン波が伝搬できないマグノンニックバンドギャップの観測に成功した[1]。長期的な周期性を持たない準周期構造の MC は通常の MC にはない伝搬特性を示すことが期待されるものの、その調査はほとんど行われていない。本研究ではマイクロマグネティックシミュレーションを用い、準周期構造をもつ 1 次元の Py MC 中を伝搬する静磁表面波(MSSW)の伝搬特性を調査した。

計算方法 スピン波の伝搬特性の計算は、Object Oriented Micromagnetic Framework(OOMMF)により行った。縦×横×膜厚が $102.4 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m} \times 75 \text{nm}$ である Py 導波路を仮定し、深さが 25nm で溝の幅 d が $0.8 \mu\text{m}$ の溝と凸の幅が $\frac{1+\sqrt{5}}{2}d$ の凸を、漸化式 $A_{n+2} = A_{n+1} + A_n$ で表されるフィボナッチ数列に従い、Py の長辺方向に導入した(Fig.1)。+y 方向の印加静磁場に対して、右側に伝搬する方向を Forward、それと逆方向を Reverse と定義した。スピン波励起用のシグナル(S)とグラウンド(G)アンテナの磁場分布は MATLAB で行った。S 及び G アンテナ幅は、それぞれ 1.0 及び $50 \mu\text{m}$ で、SG 間距離は $1.0 \mu\text{m}$ 、それらの厚みは 205nm とした。この磁場分布を OOMMF に取り込み、パルス幅が 50ps のガウシアンパルスを印可することにより、スピン波を励起した。静磁場の印可方向は Py の短辺方向(20mT)としているため、伝搬するスピン波は MSSW モードとなる。

実験結果 Figure 2 は、励起アンテナからの距離が $40 \mu\text{m}$ のときのスピン波のスペクトルである。赤と青はそれぞれ、+y 方向の印加静磁場に対して、右側に伝搬する方向(Forward)と、それと逆向き(Reverse)のスペクトルを示している。構造のない Py 膜において+y 方向に磁化が向いている場合、アンテナ法で励起された MSSW は、-x 方向に比べ、+x 方向の強度が大きくなる非相反性を示すことがよく知られている。4 ~ 8 GHz 付近では、赤(+x 方向)のスペクトル強度が青(-x 方向)の強度より大きく、典型的な MSSW モードの非相反性が現れているが、8 ~ 10 GHz 付近では、赤と青のスペクトル強度が逆転しており、非相反性が逆転する現象が観測された。これは準周期構造により MSSW モードの非相反性が変化したことを示している。

参考文献 [1] Koji Shibata, Kenji Kasahara, and Takashi Manago. Applied Physics Express **12**, 053002 (2019).

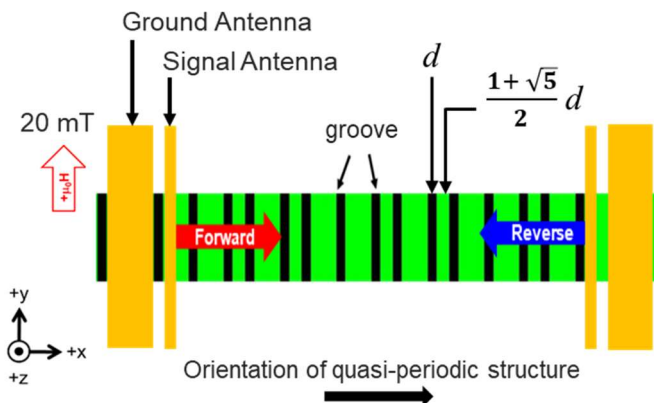


Fig.1 Schematic illustration of a quasi-periodic Py MC.

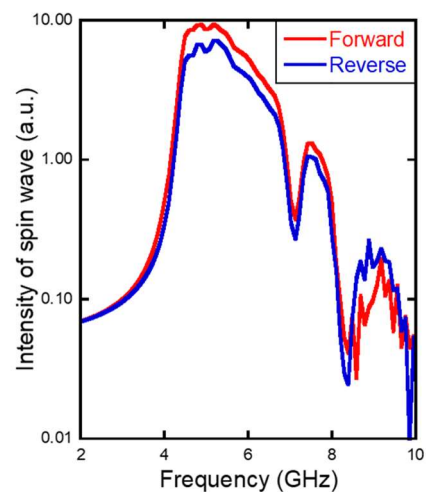


Fig.2 Spin wave spectra for forward and reverse direction of a quasi-periodic Py MC.

Spin Wave Resonance in Perpendicularly Magnetized Synthetic Antiferromagnets

Mio Ishibashi¹, Yoichi Shiota¹, Shinsaku Funada¹, Takahiro Moriyama¹, and Teruo Ono^{1,2}

¹*Institute for Chemical Research, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan*

²*Center for Spintronics Research Network, Graduate School of Engineering Science, Osaka University, Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan*

Spin wave polarization, i.e. the rotation direction of magnetic moments around an applied magnetic field, has been attracted much attention for a new freedom degree of spin waves in addition to spin wave amplitude and phase. Unlike ferromagnetic spin waves, antiferromagnetic spin waves in collinear antiferromagnets have both right and left-handed polarizations [1,2]. However, spin waves in crystal antiferromagnets have high resonance frequency of THz regime due to strong exchange coupling, which can cause difficulties in excitation or manipulation of spin waves. In this study, we experimentally demonstrate spin wave resonance in perpendicularly magnetized synthetic antiferromagnets by spectroscopy using a vector network analyzer.

Films of Ta(3.0)/Pt(2.0)/[Co(0.2)/Ni(0.7)]₅/Co(0.2)/Ru(0.5)/Co(0.2)/[Co(0.2)/Ni(0.7)]₅/Ru(3.0) (thickness in nm) were deposited using dc magnetron sputtering on thermally oxidized Si substrates. The films were fabricated to devices for spin-wave-spectroscopy as shown in Fig. 1 (a). Figure 1 (b) shows a contour plot of spin wave resonance spectra ($k = 1.2 \mu\text{m}$) generated from $\text{Re}[S_{11}]$ spectra measured at a given out-of-plane bias magnetic field. The applied magnetic field swept from +250 mT to -250 mT with a step of 10 mT. Two resonance modes were observed from 130 mT to -190 mT, where the two magnetic moments were antiferromagnetically aligned. These two resonance frequencies increase and decrease linearly with the bias magnetic field, which indicates excitation of right and left-handed polarized spin waves. In the presentation, we will discuss more details with theoretical analysis based on the equation of motion.

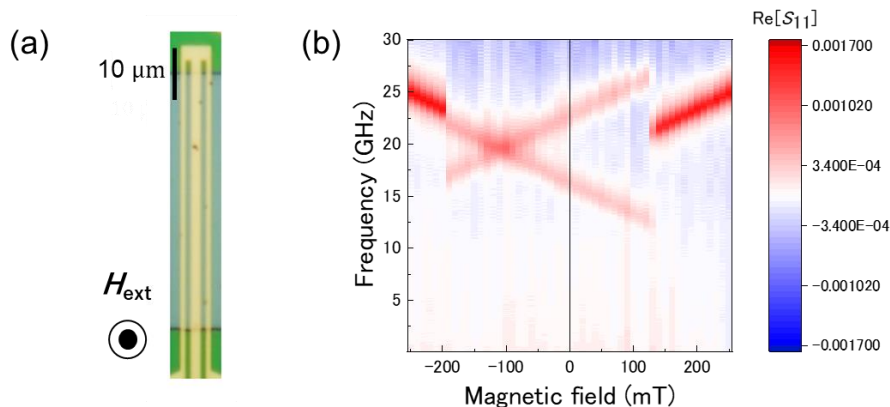


Fig.1 (a) Optical micrograph of the device. (b) Contour plot of $\text{Re}[S_{11}]$ spectra.

[1] F. Keffer and C. Kittel, *Phys. Rev.* **85**, 329 (1952).

[2] F. Keffer, H. Kaplan, and Y. Yafet, *Am. J. Phys.* **21**, 250 (1953).

Co/Pt 多層膜のコプラナー導波路強磁性共鳴

富田知志、菊池伸明、畑山正寿、岡本聡
(東北大)

Co-planar waveguide ferromagnetic resonance of Co/Pt multilayers
Satoshi Tomita, Nobuaki Kikuchi, Masatoshi Hatayama, Satoshi Okamoto
(Tohoku Univ.)

はじめに

Co/Pt 多層膜は垂直磁気異方性を持つことから、これまで記録媒体やメモリの観点から精力的に研究されてきた¹⁾。一方で人工磁性体という点からは、Co 膜厚と Pt 膜厚というふたつの自由度を持つため、これらを変化させることで多層膜の磁気特性が制御できることが興味深い。例えば多層膜の g 値が制御できた暁には人工フェリ磁性構造での角運動量補償が可能となり²⁾、スピン波デバイスなど新たな応用への可能性が広がる³⁾。しかしながらこれらの自由度が具体的に多層膜の g 値やダンピングにどのような影響を与えるかは明らかではない。そこで今回我々は Co 膜厚を変化させた Co/Pt 多層膜を作製し、コプラナー導波路 (CPW) を用いた強磁性共鳴 (FMR) を測定し、 g 値やダンピングを調べる。

実験方法

多層膜はマルチターゲット DC スパッタリング法で作製する。基板は石英基板を用いる。まず下地層として Ta を 1nm、更に Pt を 2nm 成膜する。その上に Co (膜厚 Xnm) と Pt (膜厚 0.3nm) を 10 周期積層して Co/Pt 多層膜とし、最後に 1.7nm の Pt でキャップする。Co 膜厚の X が 0.3、0.6、0.9、1.2、1.5 の 5 種類の試料を作製した。

CPW を作製する前に、多層膜をフォトリソグラフィと Ar イオンエッチングで幅 10 μ m、長さ 1.5mm の短冊状に加工し、厚さ 100nm の SiO₂ スペースを堆積する。Co/Pt 多層膜の短冊の上に CPW の信号線が載るようフォトリソグラフィを行い、Cr を 5nm、Au を 200nm、Cr を 5nm スパッタ成膜し、リフトオフを経て CPW を作製する。CPW の信号線の幅は 10 μ m である。

CPW を高周波プローブと同軸ケーブルを介してベクトルネットワークアナライザに接続する。マイクロ波の透過率に対応する S パラメータの S_{21} を測定し、絶対値 $|S_{21}|^2$ を得る。外部直流磁場は面直方向に印加する。特定の磁場で測定する直前に 1.5T でバックグラウンドスペクトルを測定して差し引く。すると差分の $|S_{21}|^2$ スペクトルに FMR 信号が吸収 (ディップ) として現れる。

結果と考察

図に X=0.9 の試料の CPW-FMR スペクトルを示す。面直方向の外部直流磁場を 0.1T から 1.0T まで変化させている。図のスペクトルに現れるディップは、磁場の大きさを増加させると高周波にシフトすることから、FMR 信号であると考えられる。これらスペクトルのディップをローレンツ関数でピーク分離し、外部磁場に対する共鳴周波数のプロットから g 値が、共鳴周波数に対する半値幅のプロットからダンピング定数が得られる。講演では g 値やダンピング定数の、Co 膜厚

(X) 依存性について解析した結果を報告する。本研究は科研費 (20H01911) により支援された。

参考文献

- 1) Yakushiji et al., APEX 8, 083003 (2015).
- 2) Fukuda et al., APEX 13, 063003 (2020).
- 3) Roldan-Molina et al., PRL 118, 061301 (2017).

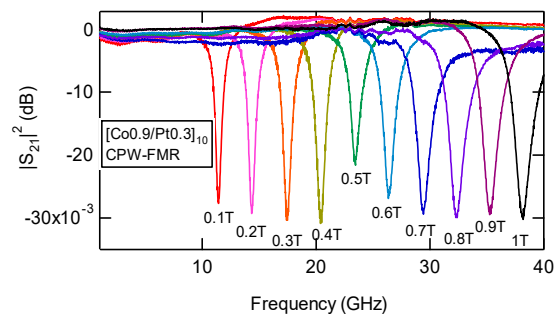


Fig. CPW-FMR spectra of a [Co0.9/Pt0.3]₁₀ multilayer sample at various magnetic fields.