

膜厚の異なる Fe-Ge 薄膜における磁化ダイナミクスに関する研究

蔣曄, 室賀翔, 宮崎孝道, 阿加賽見, 遠藤恭 (東北大学)

Study on magnetization dynamics for Fe-Ge thin films with various thicknesses

Ye Jiang, Sho Muroga, Takamichi Miyazaki, Saijian Ajia, Yasushi Endo (Tohoku Univ.)

はじめに

磁性薄膜における磁化の動的挙動は, Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式によって現象論的に記述される⁽¹⁾. なかでも, ダンピング定数 (α) は磁化の歳差運動に対する緩和速度を対応する重要なパラメータである. したがって, α の機構を理解することが必要不可欠であり, そのためには, α と他の磁気パラメータとの相関性を研究する必要がある.

我々はこれまでに Fe 系二元合金として Fe-Si および Fe-Ge 膜におけるブロードバンド強磁性共鳴 (B-FMR) 測定を行い, 磁化ダイナミクスを評価した⁽²⁾. 50 nm 厚の Fe-Ge 多結晶薄膜において有効面内ダンピング定数 ($\alpha_{\parallel, \text{eff}}$) が有効面直ダンピング定数 ($\alpha_{\perp, \text{eff}}$) に比べて数倍高くなることを報告した. 本研究では, より薄い膜厚を有する Fe-Ge 薄膜における磁化ダイナミクスの Ge 組成依存性を検討した結果について報告する.

実験方法

試料作製には DC マグネトロンスパッタリングを用い, ガラス基板上に 10 および 30 nm 厚の $\text{Fe}_{100-x}\text{Ge}_x$ (Fe-Ge) 薄膜を作製した. 試料の Ge 組成 (x) は 6.3–19.4 at.% であり, EDX を用いて評価した結果である.

作製した薄膜の構造に関しては, XRD および TEM を, また, 磁気特性に関しては, VSM, 光てこによる磁歪測定法および B-FMR 法を用いて評価した.

研究結果

Fig.1 は, 10 および 30 nm 厚の Fe-Ge 膜における飽和磁化 ($4\pi M_s$) の Ge 組成依存性である. $4\pi M_s$ は 14.9 at.% 以下の Ge 組成ではほぼ一定であり, それらの値は約 18 kG であった. また, 14.9 at.% 以上の Ge 組成では, Ge 組成の増加とともに減少し, 19.4 at.% の Ge 組成では $4\pi M_s$ は約 15 kG に減少した. これらの挙動は, 50 nm 厚の場合とほぼ同じであり, VSM から出られた結果とも類似している. この原因は, 非磁性組成の増加による結晶構造の変化に起因するものと考えられる.

Fig.2 は, 10 および 30 nm 厚の Fe-Ge 膜における有効面直ダンピング定数 ($\alpha_{\perp, \text{eff}}$) の Ge 組成依存性である. $\alpha_{\perp, \text{eff}}$ は Ge 組成の増加とともに減少し, 16.2 at.% 以上の Ge 組成において, ほぼ一定となった. これらの変化は, 50 nm 厚の場合と比べると, Ge 組成 14.9 at.% 以下において異なった. この原因は, 膜厚の減少にともなう磁気的な不均一性の増大に由来するものと考えられる. なお, 当日 $\alpha_{\parallel}$ および λ_s との関連性についても報告する予定である.

謝辞 本研究の一部は, 文部科学省次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業 JPJ011438 の助成を受けた. また, 本研究の一部は, 東北大学 CSIS, 東北大学 CSRN, 東北大学 CIES, 東北大学 GPSP および ASRC の支援のもと行われた.

参考文献 (1) T. L. Gilbert, IEEE Trans. Magn, 40, 3443-3449 (2004). (2) Y. Jiang, S. Muroga, T. Miyazaki and Y. Endo, IEEE Trans. Magn, 59(11), 1-4 (2023).

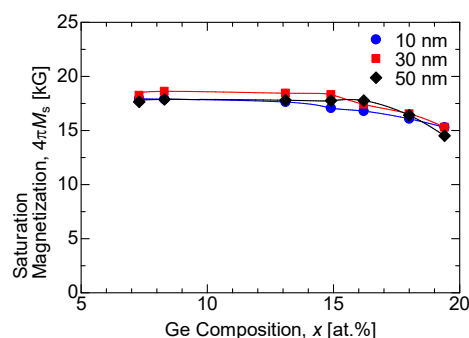


Fig.1 Dependence of saturation magnetization on the Ge compositions for 10, 30, 50 nm thick Fe-Ge thin films

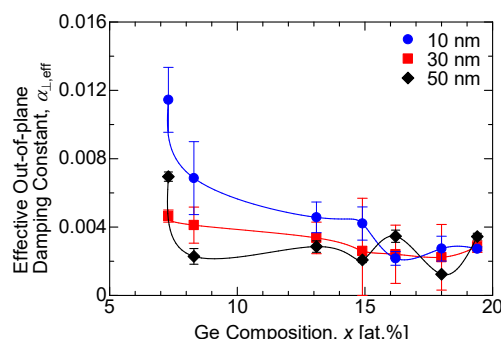


Fig.2 Dependence of effective out-of-plane damping constant on the Ge compositions for 10, 30, 50 nm thick Fe-Ge thin films

超強結合マグノン - ポラリトンのコヒーレント発振の原理

千葉 貴裕^{1,2}, 鈴木 龍之介², 松枝 宏明^{2,3}

(¹ 東北大学学際科学フロンティア研究所, ² 東北大学大学院工学研究科, ³ 東北大学 CSIS)

Coherent Microwave Generation of Ultrastrongly Coupled Magnon-Polaritons

Takahiro Chiba^{1,2}, Ryunosuke Suzuki², and Hiroaki Matsueda^{2,3}

(¹FRIS, Tohoku Univ., ²Graduate School of Engineering, Tohoku Univ., ³CSIS, Tohoku Univ.)

1. はじめに

近年、マグノンと光子が結合したマグノン - ポラリトン (Magnon-Polariton, MP) の実現を契機として共振器マグノニクスが急速に発展している。最近、共振器の代わりに鉄芯コイルを模した構造体において、室温にて「超強結合」と呼ばれる非常に強いマグノン - 光子結合が報告された¹⁾。応用面では、従来のマイクロ波共振器に増幅回路を実装することにより、高い Q 値 ($>10^7$) を有する MP のマイクロ波発振が実証された²⁾。一方、スピントロニクスでは磁気トンネル接合や磁性体/重金属膜をベースとしたスピントルク発振器が広く研究されている。しかし現状では発振自体がまだ不安定なために実用化には至っていない。この問題にアプローチするため、本研究では発振回路をベースとした超強結合 MP のマイクロ波発振を理論的に研究した。

2. 数理モデル

Figure 1(a)に示すように動的インダクタ及びゲインを与える負性抵抗素子 S を含む発振回路を想定して MP のマイクロ波発振をモデル化した。動的インダクタは厚さ d_M をもつ磁性絶縁体 (MI) が挿入されたコイルから構成される。 d_M はマグノン - 光子結合 g の制御パラメータに相当する³⁾。コイル内に生じる交流磁場を光子、MI の磁化ダイナミクスをマグノンとみなすと、これらの電磁相互作用により動的インダクタに MP が形成される。そのため Fig. 1(a)の回路において、コヒーレントな結合 g を通じたゲインの移行によりマグノンを発振させることができる。本研究では、発振を記述するファンデルポール方程式及びランダウ-リフシッツ-ギルバート方程式に基づいて、結合 g を変化させた際の MP の発振をシミュレーションした。

3. 計算結果

Figure 1(b)に g の値に応じた計算結果を示す。図ではマグノンの発振の様子を見るために磁化ダイナミクスの x 成分に注目している。まず結合 g が小さい場合 (「強結合」と呼ばれる)、先行研究と同様に発振に不安定な振動が見られる²⁾。一方で g の値が超強結合に相当する場合³⁾、先の振動が殆ど見られない。このことから先の不安定な振動は、結合が (強結合では) まだ小さいために生じる Rabi 振動であり、光子-マグノン間でゲインの移行に時間を要するために生じていると考えられる。これは逆に言う と Rabi 振動の様子が消える超強結合ではゲインが瞬時に移行されるため、マグノンの発振という立場に立てばスピントルク (一種のゲイン) に代わる新しい発振原理に相当する。今後、本原理のスピントロニクスへの展開が期待される。

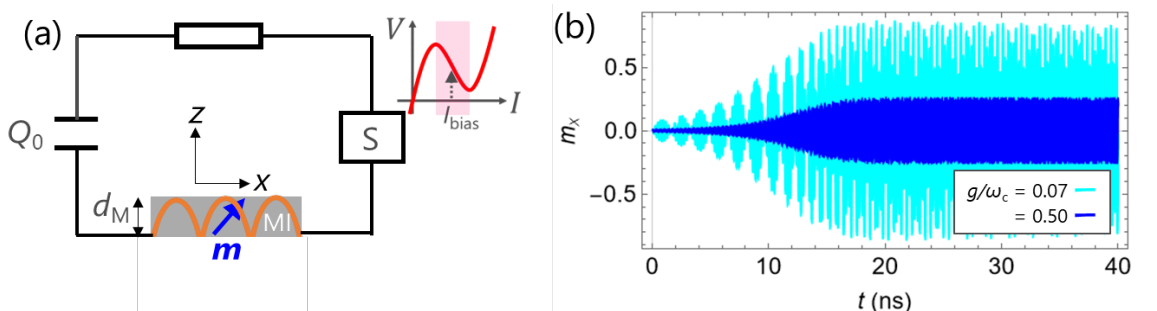


Fig. 1. (a) Magnon-polariton oscillator circuit consisted of a dynamical inductor involving a magnetic insulator (MI). The element “S” denotes an active device with gain and capacitor is charged (Q_0). (b) Time-evolution of the x -component of the magnetization m for different coupling rate g/ω_c with $\omega_c/2\pi = 4.5$ GHz. We use material parameters of $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ for MI with $d_M = 2,100$ nm.

参考文献

- 1) 三田健太郎, 千葉貴裕他, 「磁気カイラルメタ分子における超強結合マグノン - ポラリトン」, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会[25a-P01-25], 2024 年 3 月 25 日.
- 2) B. Yao *et al.*, Phys. Rev. Lett. **130**, 146702 (2023).
- 3) T. Chiba *et al.*, J. Magn. Soc. Jpn. **48**, 21–27 (2024).

磁気カイラルメタ分子での超強結合非相反マグノンポラリトンの観測

富田知志^{A,B}, 三田健太郎^A, 児玉俊之^B, 上田哲也^C, 中西俊博^D, 澤田桂^E, 千葉貴裕^{F,G}

(^A 東北大理, ^B 東北大高教機構, ^C 京都工繊大電子, ^D 京大工, ^E 理研 SPring-8, ^F 東北大学際研, ^G 東北大工)

Observation of ultrastrongly-coupled non-reciprocal magnon-polaritons in magnetochiral metamolecules

S. Tomita^A, K. Mita^A, T. Kodama^A, T. Ueda^B, T. Nakanishi^C, K. Sawada^D, T. Chiba^A

(^ATohoku Univ., ^BKyoto Inst. Tech., ^CKyoto Univ., ^DRIKEN SPring-8)

1 はじめに

固体物理学では素励起を伴った様々な準粒子が活躍する。異なる準粒子を組み合わせることで、物質の新しく興味深い性質が発現することが期待される。磁性体での素励起であるスピン波の準粒子（マグノン）は、交流電磁場（光子）と結合すると、マグノンポラリトンとなる¹⁾。マグノンポラリトンは、ハイブリッド量子系への応用が可能なため、量子情報技術やスピントロニクス分野で注目を集めている²⁾。なかでもマグノンと光子が極めて強く結合した超強結合系（結合強度比が0.1以上）は特に興味深い。本研究ではマイクロ波領域でのメタ分子を用いて、電磁応答が非相反性な超強結合マグノンポラリトンの室温での観測に成功したので報告する。

2 実験方法

金属である銅のカイラル構造（カイラルメタ原子）にフェリ磁性体であるイットリウム鉄ガーネット（YIG）の円柱（磁性メタ原子）を挿入して、磁気カイラルメタ分子を作製した³⁾。メタ分子の長さは約15mmである。時間反転対称性と空間反転対称性が同時に破れている磁気カイラルメタ分子を用いると、10GHz帯のマイクロ波領域で方向非相反性（磁気カイラル効果）が発現することが知られている。磁気カイラルメタ分子をWR-90導波管に入れ、外部直流磁場をかけながら、ベクトルネットワークアナライザを用いて、マイクロ波の複素透過係数に対応する S パラメータ（ S_{21} と S_{12} ）を室温で測定した。導波されるマイクロ波の交流磁場は、カイラル軸及びYIG円柱軸と平行に設定した。

3 結果および考察

Fig. 1は、測定した S_{21} の振幅強度を、縦軸を周波数、横軸を外部直流磁場として二次元プロットしたものである。二次元プロットで黒色から黄色を経て白色になると、マイクロ波の透過が小さくなる。aとa'はカイラルメタ原子での光子の分散であり、cは、YIG磁性メタ原子でのマグノンの分散である。Fig. 1の350mT付近で、光子の分散とマグノンの分散が反交差していることがわかる。反交差でのRabi的分裂幅から見積もった結合強度比は0.22であり、超強結合と言ってよい。WR-90導波管でのマイクロ波交流磁場を介して、カイラルメタ原子と磁性メタ原子が直接結合していることが、この強結合の原因であると考えられる⁴⁾。当日は S_{21} と S_{12} の差分として現れる方向非相反性についても議論する。

安田秀史氏、元田侑希氏、黒澤裕之博士の助言に感謝する。本研究は科研費(JP24H02232, 23K13621, 22K14591)、JST-CREST(JPMJCR2102)により支援されている。

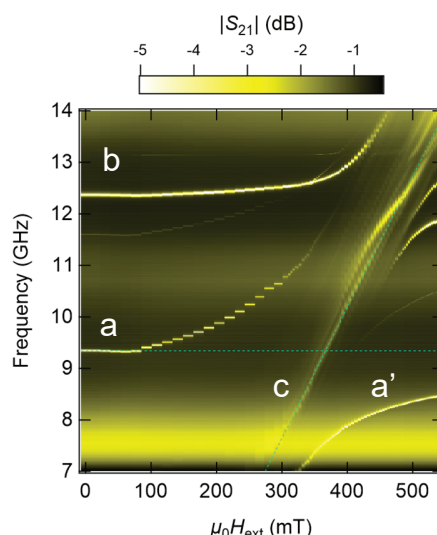


Fig. 1 Experimentally obtained dispersion relations of magnon-polaritons of a single magnetochiral metamolecule.

References

- 1) Harder et al., *J. Appl. Phys.*, **129**, 201101 (2021).
- 2) Lachance-Quirion et al., *Appl. Phys. Expr.*, **12**, 070101 (2019).
- 3) Tomita et al., *Phys. Rev. Lett.*, **113**, 235501 (2014); *Phys. Rev. B*, **95**, 085402 (2017); *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **51**, 083001 (2018).
- 4) Mita et al., to be submitted.

反強磁性マグノン伝搬における回転極性の制御と検出

塩田陽一^{1,2}、谷口知大³、林大寿¹、成田秀樹¹、軽部修太郎^{1,2}、
久富隆佑^{1,2}、森山貴広⁴、小野輝男^{1,2}

(¹京大化研、²京大 CSRN、³産総研、⁴名大工)

Handedness detection and manipulation of propagating antiferromagnetic magnons

Y. Shiota^{1,2}, T. Taniguchi³, D. Hayashi¹, H. Narita¹, S. Karube^{1,2}, R. Hisatomi^{1,2}, T. Moriyama⁴, T. Ono^{1,2}

(¹Kyoto Univ., ²CSRN, Kyoto Univ., ³AIST, ⁴Nagoya Univ.)

はじめに

磁気モーメントが反平行に結合した反強磁性体は、回転極性の異なる二つの磁気共鳴モードを有しており、その回転極性を利用することでマグノンに偏光自由度を追加することが可能である^{1,2)}。前回、われわれは垂直磁化人工反強磁性体 (p-SAF) を用いて広帯域円偏波分解磁気共鳴測定を行い、回転極性の異なる反強磁性共鳴モードの直接計測を報告した³⁾。今回は Pt 層で挟んだ p-SAF をホールバー形状に微細加工し、伝搬する反強磁性マグノンにおける回転極性の制御および逆スピンホール電圧による検出を実証したので報告する⁴⁾。

実験方法

試料は垂直磁化容易軸を持つ Co/Ni 多層膜ベースの人工反強磁性体を用いた。熱酸化膜付 Si 基板上に Ta(2.0)/Pt(5.0)/[Co(0.3)/Ni(0.6)]_{8.5}/Ru(0.42)/[Co(0.3)/Ni(0.6)]_{8.5}/Pt(5.0) [()内の単位: nm] を DC スパッタリング法で成膜後、Fig.1 に示すようなホールバー構造に微細加工を行い、ホールバーから 0.4 μm だけ離れた位置にマグノン励起用のストリップラインアンテナを作製した。パルス変調したマイクロ波をアンテナに印加することでマグノン励起を行い、伝搬してホールバーに到達した反強磁性マグノンは上下 Pt 層による逆スピンホール電圧をロックイン検出することで測定した。

実験結果

まず垂直磁場 ($\theta_H = 0^\circ$) で測定を行ったところ、異常ネルンスト効果に起因する Co/Ni 多層膜の垂直磁化成分に比例する信号しか得られなかった。一方、マグノン伝搬方向に傾斜した磁場 ($\theta_H = 30^\circ$) 下では、マグノン伝搬に起因する磁気共鳴ピークが観測された。また固定磁場下においては逆スピンホール電圧の符号が、反強磁性マグノンの回転極性に依存することがわかり、Fig.2 に示すようにアンテナに印加するマイクロ波周波数を制御することで伝搬する反強磁性マグノンの回転極性の制御・検出に成功した。講演では上下異なる重金属層で挟んだ人工反強磁性体の結果についても紹介し、詳細に議論する。

参考文献

- 1) R. Cheng *et al.*, *Sci. Rep.* **6**, 24223 (2016).
- 2) J. Lan *et al.*, *Nat. Commun.* **8**, 178 (2017).
- 3) Y. Shiota *et al.*, *Phys. Rev. Appl.* **18**, 014032 (2022).
- 4) Y. Shiota *et al.*, *arXiv*: 2403.06549 (2024).

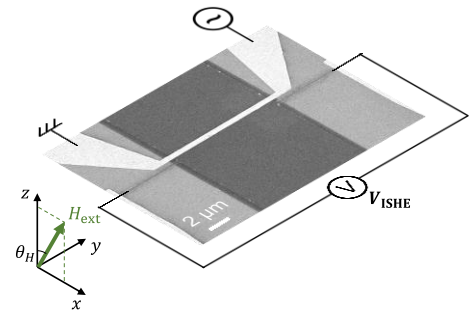


Fig. 1 Schematic of device structure and measurement setup.

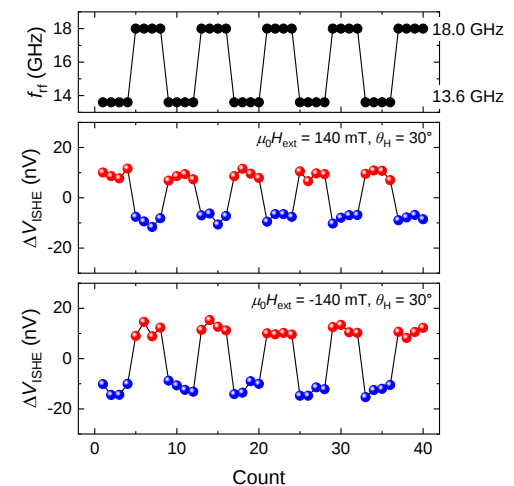


Fig. 2 Handedness detection and manipulation of propagating antiferromagnetic magnons.

Li ドープした NiO の格子歪みと電子相関効果が与える 反強磁性共鳴周波数への影響

名和 憲嗣^{1,2}, 中村 浩次¹
(三重大¹, NIMS²)

Influences of lattice distortion and electron correlation on antiferromagnetic resonance in Li-doped NiO

Kenji Nawa^{1,2} and Kohji Nakamura¹
(Mie Univ.¹, NIMS²)

はじめに

反強磁性体物質の磁化ダイナミクスはテラヘルツ (THz) 周波数帯で動作し, 超高速磁気メモリやテラヘルツ光センシングなど反強磁性スピントロニクスへの応用が期待されている. 反強磁性 NiO は THz 帯の反強磁性共鳴 (AFMR) 周波数を示し, 非磁性カチオン (Li^+ , Mg^{2+}) や磁性カチオン (Mn^{2+}) を NiO にドープすることで AFMR 周波数が変調可能であることが Moriyama らの実験で観測された¹⁾. 我々も第一原理計算による解析から, 実験結果とおおよそ定性的な一致を得るとともに, 各カチオン種による AFMR 周波数変化の起源を明らかにした²⁾. しかし, Li^+ をドープした系では AFMR 周波数は実験値との一致が得られず, その原因として AFMR 周波数が格子歪みと電子相関効果に敏感であることを示唆してきた²⁾. 本発表では, Li ドープした NiO (Li-NiO) に焦点を当て, 引き続き第一原理計算から, 格子歪みと電子相関効果が与える AFMR 周波数への影響を詳細に解析した.

解析方法・結果

AFMR 周波数 (ω_r) を Kittel の式 ($\omega_r = \gamma \sqrt{2H_E H_A}$) に基づき評価した. γ は磁気回転比, H_E と H_A はそれぞれ交換磁場と異方性磁場である. H_E は交換相互作用定数, H_A は磁気異方性定数から算出できる. 第一原理計算にはフルポテンシャル線形化補強平面派法を用い, Ni 3d 軌道の電子相関効果の扱いには +U 法 (GGA+U; $U_{\text{eff}} = 0 \sim 9$ eV) を適用した³⁾. Li-NiO の結晶構造 (Fig. 1) を z 軸方向に Δz だけ膨張 (x, y 軸方向に $\Delta x, \Delta y$ だけ圧縮) させたときの H_E , H_A , ω_r , および全エネルギーの変化を調べた.

例えば $U_{\text{eff}} = 6$ eV において, 格子歪みがないとき ($\Delta z = 0$) は $H_E = 91.3$ T, $H_A = 6.2$ T であり, ω_r として 0.94 THz が得られた. これは実験値 (1.02 THz) より僅かに下回る. 続いて z 軸方向に格子を歪ませたところ ($\Delta z = 1 \sim 6\%$), H_E は Δz に依存して 82.5 ~ 106.3 T の範囲で変化した. H_A は Δz に対して僅かに単調減少する傾向が見られ, $\Delta z = 0$ のときと比べて 5.2 T まで減少した. これらの結果, ω_r は最大で 0.95 THz ($\Delta z = 2\%$), 最小で 0.82 THz ($\Delta z = 6\%$) が得られ, 格子歪みによる AFMR 周波数は $\Delta\omega_r \sim 0.13$ THz の幅で変化した. 発表では実験結果とも比較しながら, 格子歪みと電子相関効果による ω_r の変化を示し, その起源を考察する.

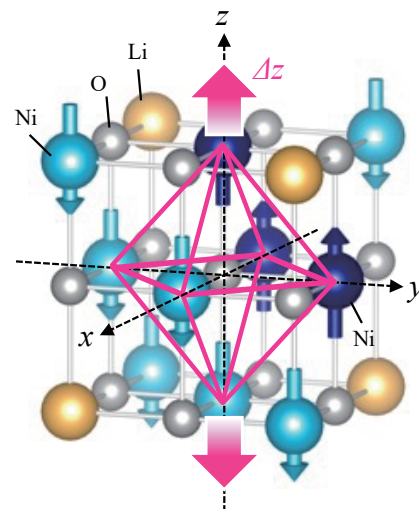


FIG. 1 Crystal structure of Li-doped NiO, $\text{Li}_{0.125}\text{Ni}_{0.875}\text{O}$, where the lattice is expanded and compressed along z axis and in xy plane.

This work is partly supported by JSPS KAKENHI (No. JP22K14290, JP21K03444, JP21H04562), the Center for Spintronics Research Network, Osaka University, and Cooperative Research Project of the Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University. Computations were performed by Numerical Materials Simulator at NIMS.

参考文献

- 1) T. Moriyama *et al.*, Phys. Rev. Mater. **4**, 074402 (2020).
- 2) K. Nawa *et al.*, Phys. Rev. Appl. **21**, 034040 (2024).
- 3) K. Nakamura *et al.*, Phys. Rev. B **67**, 014420 (2003); K. Nawa *et al.*, Phys. Rev. B **97**, 035117 (2018).

Predicted multiple Walker breakdowns for current-driven domain-wall motion in antiferromagnets

Mu-Kun Lee¹, Ruben M. Otxoa^{2,3}, and Masahito Mochizuki¹

¹Department of Applied Physics, Waseda University, Tokyo 169-8555, Japan

²Hitachi Cambridge Laboratory, Cambridge CB3 0HE, UK

³Donostia International Physics Center, San Sebastian 20018, Spain

Spintronics based on antiferromagnets has attracted significant attention in recent decades due to their advantages over ferromagnets including, e.g., the absence of stray fields and high-speed operation in terahertz range. Meanwhile, it is well-known that a ferromagnetic domain wall (DW) suffers from Walker breakdown under a large current or magnetic field, which causes the DW to lose its rigid texture and decrease its velocity. The antiferromagnetic DW has been proposed to be immune to Walker breakdown such that its speed is limited by the magnon maximal velocity which is much higher than the breakdown threshold velocity in ferromagnets. In this work [Ref. 1], we challenge this common belief by theoretically discovering possible emergence of reentrant Walker breakdowns for current-driven domain walls in layered antiferromagnets, in drastic contrast to the unique Walker breakdown in ferromagnets.

Based on analytical calculation and micromagnetic simulation, we first unambiguously demonstrate the dominant efficiency of current-induced staggered spin-orbit torque (SOT) in layered antiferromagnets [e.g., Mn₂Au, CuMnAs, see Fig. 1(a)] over spin-transfer torque (STT) to drive DW motion as shown in Fig. 1(b). Intriguingly, we find the DW velocity driven simultaneously by both STT and SOT is not a simple addition of those driven by STT and SOT separately, and there is a nonlinear dependence of velocity on applied current. We resolve these mysteries by considering the relativistic Lorentz contraction of DW width uniquely existent in antiferromagnets, and our analytical calculation of DW speed agrees with the simulated result with high precision [Fig. 1(b)].

The Lorentz contraction of DW width not only gives rise to the nonlinear velocity, but also induces novel nonlinear dependence of the hard-axis tilt angle of the DW texture on current, from which we derive and predict the possibility of reentrant Walker breakdown and Walker regimes for DWs in layered antiferromagnets, as shown in Fig. 1(c). The physical mechanism of this exotic behavior stems from the competition between STT plus SOT which depend on the nonlinearly contracted DW width and the torques exerted by antiferromagnetic exchange interaction and anisotropy energy. The DW speeds in each regime are calculated either analytically or numerically. Our findings are proposed to be observable experimentally in synthetic antiferromagnets, and the similar idea can be extended to other topological magnetic textures such as antiferromagnetic skyrmions. We expect our work will provide important information for the development of spintronics based on antiferromagnetic textures.

Reference

- 1) M.-K. Lee, R. M. Otxoa, M. Mochizuki, arXiv:2312.10337 (2023)

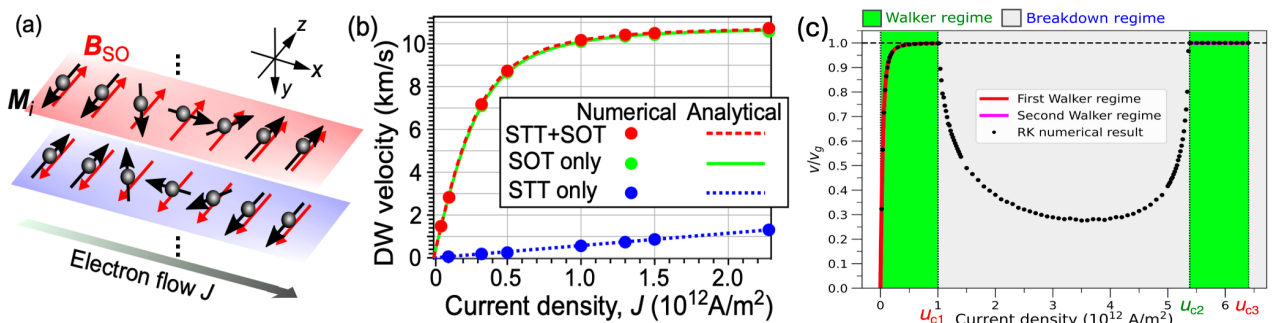


Fig.1 (a) Schematics of the layered antiferromagnetic system, with M_i being the magnetization vector at site i and B_{SO} the staggered spin-orbit field. (b) Numerical and analytical results of the DW velocities. (c) Predicted multiple Walker regimes, with curves being analytical DW velocities in Walker regimes, and dots representing terminal (time-averaged) velocities in Walker (breakdown) regimes numerically calculated by Runge-Kutta (RK) method.

強磁性 FePt 薄膜における電磁波吸収発電

平田武豊、強博文、宮町俊生、水口将輝

(名古屋大学)

Electromagnetic wave absorption power generation in ferromagnetic FePt thin films

T. Hiratra, B. W. Qiang, T. Miyamachi, M. Mizuguchi

(Nagoya Univ.)

はじめに

近年、持続可能な社会実現に向け、熱や振動などのエネルギーを活用する環境発電への関心が高まっている。電磁波は周辺環境に存在しており、そのエネルギーの電力利用や関連現象に関心が集められている。これまでに、電磁波を照射することにより励起した強磁性共鳴を利用して強磁性金属膜に給電する研究が報告されており、強磁性体を活用した電磁波発電は興味深い現象である[1]。そこで本研究では、磁気異方性が異なる強磁性薄膜を用いることによって、外部磁場不要の電磁波吸収発電を行うことを目的とした。強磁性材料として、 $L1_0$ 型規則化構造をとった際に大きな一軸磁気異方性を持つ硬磁性材料である FePt を選択した。FePt の $L1_0$ 構造は成膜温度によってその規則度が変わることが知られている。作製した FePt 薄膜に特定の周波数の電磁波を照射し、発生する起電力を測定することにより、発電現象の観測を行った。

実験方法

マグネトロンスパッタリング法により、MgO(001)単結晶基板上に膜厚 10nm の FePt を成膜した。成膜温度を 300~700°Cの間で変化させ、磁気異方性の異なる薄膜を作製した。薄膜の磁気特性を磁気光学カー効果 (MOKE) により行い、磁気異方性の大きさを評価した。ネットワークアナライザーから出力した電磁波を平面アンテナから薄膜に垂直に照射することにより、電磁波を照射した。電磁波照射時における発生電圧の測定は、薄膜にアルミワイヤーボンディングを施して接続したナノボルトメーターを用いて行った。

実験結果

MOKE 測定の結果、成膜温度に依存して、磁気異方性の大きさが大きく変化したことを確認した。5~15GHz の電磁波を薄膜に照射した状態で電圧を測定したところ、それぞれの周波数で大きさが異なる直流起電力が観測された。また、起電力がピークをとる周波数は、FePt の磁気異方性に依存して変化することが分かった。講演では、電磁波吸収発電量の周波数依存性についても詳細に議論する。

参考文献

[1] Y. Nogi *et al.*, AIP advances, **11**, 085114 (2021).

鉄単結晶ワイヤにおける局在スピン波モードの検出

香川和毅¹, 根津昇輝¹, Thomas Scheike², 介川裕章², 関口康爾¹

(横浜国立大学¹, 物質・材料研究機構²)

Detection of localized spin-wave modes in single-crystal iron wires

Kazuki Kagawa¹, Shoki Nezu¹, Thomas Scheike², Hiroaki Sukegawa³ and Koji Sekiguchi¹

(Yokohama National Univ.¹, NIMS²)

1. はじめに

スピン角運動量の伝搬であるスピン波は電荷の移動が伴わないことから、超低消費電力での情報処理に向けた次世代の情報キャリアとして研究が行われている¹⁾。近年、鉄単結晶薄膜は立方異方性に起因する特徴的なスピン波伝搬特性からデバイス開発において有望な材料であることが示された^{2,3)}。しかし、鉄単結晶薄膜の研究においては単一モードのスピン波伝搬のみの観測にとどまっている。そこで本研究では、鉄単結晶薄膜を用いたスピン波デバイスでの周波数多重化による情報処理を目指し、Fe 細線における複数の幅方向局在スピン波モードを調査した。

2. 実験方法

実験模式図を Fig. 1 に示す。スピン波導波路として用いる Fe(001)単結晶薄膜は DC マグネトロンスパッタリングによって MgO(001)基板上に Cr 薄膜を下地として成膜され、膜厚は 30 nm である。その後、Ar イオンミリングによって幅 $w = 110 \mu\text{m}$ の矩形導波路と $w = 2 \mu\text{m}$ の細線導波路に加工した。導波路上にはスピン波励起のためのマイクロ波アンテナを作製した。外部磁場 H_{ex} は Fe 薄膜の磁化困難軸に沿って印加し、マイクロ波アンテナに RF 電流を入力しスピン波を励起した。励起されたスピン波強度をマイクロフォーカスブリルアン散乱 (μBLS) 分光法によって光学的に測定し、矩形および細線導波路におけるスピン波分散関係を取得した。

3. 結果および考察

外部磁場 $150 \leq H_{\text{ex}} \leq 900 \text{ Oe}$ 、入力周波数 $3.5 \leq f_{\text{in}} \leq 11 \text{ GHz}$ の範囲で観測した、矩形および細線導波路におけるスピン波強度をそれぞれ Figs. 2 (a), (b) に示す。矩形導波路 ($w = 110 \mu\text{m}$) では単一モードのスピン波が観測されたが、細線導波路 ($w = 2 \mu\text{m}$) では $H_{\text{ex}} \leq 540 \text{ Oe}$ において 2 つのモードのスピン波が観測された。また、 $H_{\text{ex}} > 540 \text{ Oe}$ においてスピン波分散が矩形導波路の単一モードと比較して太くなっているが、これは 2 つのモードが重なっているためだと考えられる。Fe 薄膜は立方異方性磁場 $H_A = 660 \text{ Oe}$ を有するため、Fig. 2 (a) のように $H_{\text{ex}} = 660 \text{ Oe}$ を頂点として折り返す特徴的なスピン波分散を有するが、細線導波路では形状異方性により $H_{\text{ex}} = 540 \text{ Oe}$ で折り返すスピン波分散が得られた。導波路の微細化による幅方向局在スピン波の生成により、Fe 薄膜を用いたデバイスにおいて周波数多重化による情報処理が可能であることが示唆された。

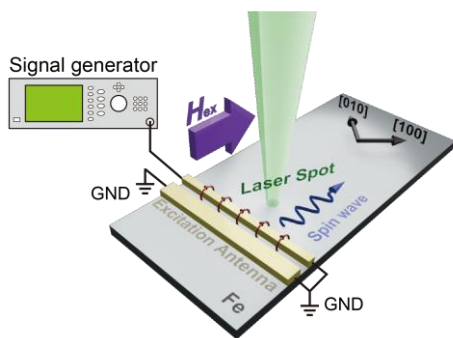


Fig.1: Schematic diagram of experimental setup. Spin waves were generated by a continuous wave and detected by μBLS .

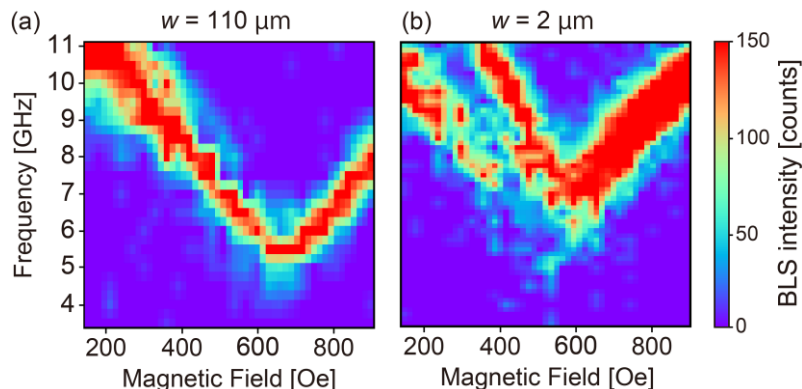


Fig.2: Spin-wave intensity in the range $3.5 \leq f_{\text{in}} \leq 11 \text{ GHz}$ and $150 \leq H_{\text{ex}} \leq 900 \text{ Oe}$ on (a) rectangular ($w = 110 \mu\text{m}$) and (b) wire waveguides ($w = 2 \mu\text{m}$).

References

- 1) Q. Wang, M. Kewenig, M. Schneider, R. Verba, *et al.*, *Nat. Electron.* **3**, 765-774 (2020).
- 2) K. Sekiguchi, S-W. Lee, H. Sukegawa, N. Sato, *et al.*, *NPG Asia Mater.* **9**, e392 (2017).
- 3) S. Nezu, T. Scheike, H. Sukegawa, and K. Sekiguchi, *Phys. Rev. B* **109**, 184402 (2024).

多階調入力を用いたスピン波リザーバーの性能評価

吉田涼太, 長瀬翔, 根津昇輝, 関口康爾
(横浜国立大学大学院)

Performance evaluation of spin-wave reservoir for multi-level inputs

Ryota Yoshida, Sho Nagase, Shoki Nezu, and Koji Sekiguchi
(Yokohama National Univ.)

1. はじめに

5G の普及により、IoT 社会はさらなる発展の機会を迎えている。しかし、膨大な情報処理によりネットワークに多大な負荷がかかることから、低消費電力かつ高速なエッジデバイスの開発が必要不可欠である。物理リザーバーコンピューティングは、非線形性や履歴依存性を有する物理現象を利用して学習負荷を削減する手法であり、どちらの特性も有するスピン波を用いたリザーバーデバイス¹⁾の開発が進行している。しかし、音声認識などの高度なタスクへの応用には、時系列データを 01 信号の 2 階調では表現しきれないため階調の増加が必要である。本研究では、パーマロイを微細加工してスピン波導波路を作製し、アンテナ法を用いた物理リザーバーデバイスを構築した。導波路上の高周波アンテナに 8 階調のランダムビット列信号を入力することでスピン波を励起し、検出されたスピン波の電気信号から学習を行った。

2. 実験方法

実験模式図を Fig. 1 に示す。RF スパッタリングによって成膜された膜厚 300 nm のパーマロイ (Ni₈₁Fe₁₉) を Ar イオンミリングによって 120 $\mu\text{m} \times 90 \mu\text{m}$ の形状に加工し、スピン波導波路を作製した。導波路上にはスピン波励起・検出のための高周波アンテナを作製した。入力アンテナに 500 列のランダムビット列信号を印加し、表面スピン波を励起した。励起アンテナ直下に存在する 2 つのスリットによって、励起されたスピン波は球面波として伝搬する。8 つの検出アンテナを用いて伝搬したスピン波の電気信号をリアルタイムオシロスコープにより観測した。観測したスピン波信号からパリティチェック(PC)タスクとショートタームメモリ(STM)タスクを行い、多階調入力に対する性能を評価した。

3. 結果および考察

観測したスピン波信号を Fig. 2、PC タスク、STM タスクを行った結果を Fig.3 に示す。入力した 500 列のうち、前半 200 列をトレーニングデータとして重みづけを行った。後半 300 列はテストデータであり、トレーニングデータから調整された重みベクトルにより各タスクを実施した。STM タスクでは 2 階調の学習容量 $C_{\text{STM}} = 6.10$ に対し、8 階調では $C_{\text{STM}} = 5.98$ であった。階調の増加による容量の低下は 2.0 % であり、8 階調での短期記憶性能の保持を確認した。また PC タスクでは、2 階調の学習容量 $C_{\text{PC}} = 2.34$ に対し、8 階調では $C_{\text{PC}} = 1.27$ となった。学習容量は 46 % 低下したが $\text{Delay Step} = 1$ における相関係数 r^2 が 0 に落ち切らず保持されているため高度なタスクへの非線形性を有していると考えられる。このことから、音声認識などのより高度なタスクへの応用可能性が示された。

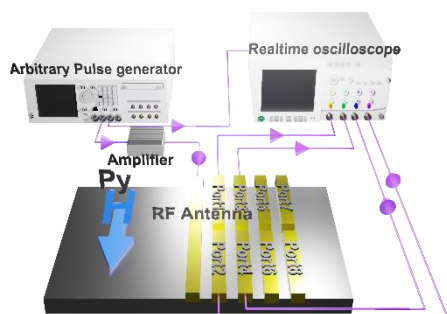


Fig. 1 : Schematic illustration of an experimental setup.

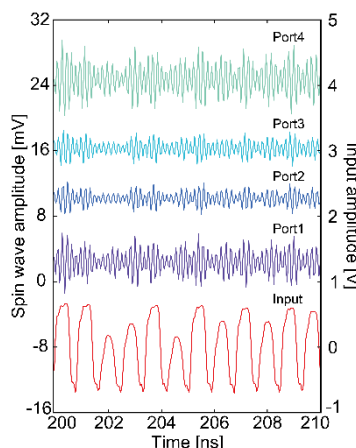


Fig. 2 : Spin-wave signals for multi-level inputs

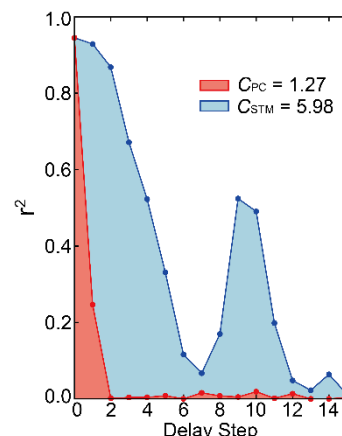


Fig. 3 : Results of short-term memory (STM) and parity check (PC)

References

- 1) T. Ichimura, R. Nakane, G. Tanaka and A. Hirose, *IEEE Access*, **9**, 72637-72646 (2021).
- 2) Abreu Araujo, F., Riou, M., Torrejon, J. et al., *Sci Rep* **10**, 328 (2020).

不規則格子状導波路を利用したスピン波リザーバードバイスの性能検証

羽田 拓真, 長瀬 翔, 関口 康爾
(横浜国立大学大学院)

Performance Evaluation of Spin Wave Reservoir Devices Utilizing Irregular Lattice Waveguides

Takuma Hada, Sho Nagase, and Koji Sekiguchi
(Yokohama National Univ.)

1. はじめに

IoT 社会の実現に向けて、膨大な情報処理における効率化が求められている。エッジコンピューティングがその役割を担うとされるが、機械学習のような高度な演算を可能とするためには限定的リソースで動作するエッジデバイスが必要不可欠である。そこで、非線形性や履歴依存性を有する物理現象を利用することで学習負荷を軽減した物理リザーバードコンピューティングのデバイス導入が提案されており、物理現象としてスピン波を利用したデバイスが研究されている。本研究では、パーマロイ(Py)導波路及びアンテナ法を用いたスピン波リザーバードに対して、スピンドायナミクスの不安定化を目的として導波路を不規則な格子状に加工したデバイスを作製した。アンテナ法によりリザーバード動作の実検証が可能であることから、検出したスピン波の電気信号を利用して学習タスクを実施し、性能評価を行った。

2. 実験方法

実験模式図を Fig.1 に示す。SiO₂ が成膜された Si 基板上に試料を作製した。一層目に Py (Ni₈₁Fe₁₉)を用いたスピン波導波路を、スパッタリング法により成膜後ミリングプロセスを経て膜厚 200 nm、60 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ の形状に微細加工して配置した。その後、一部表面をミリングプロセスで削ることで加工した。二層目にスピン波励起及び検出用アンテナを、真空蒸着法を用いたリフトオフプロセスにて Ti(5 nm)/ Au(100 nm)で作製した。スピン波伝搬方向に対して面内垂直に印加した外部磁場 $10 \leq H_{\text{ext}} \leq 150 \text{ Oe}$ の存在下で、二値[0,1]で構成された 500 step の信号列を二種の矩形波信号列へと変換し、励起アンテナへ入力することで Surface Mode スピン波を励起した。導波路上の微細孔によりスピン波は複雑に伝搬する。伝搬したスピン波を 4 つの検出アンテナに接続されたリアルタイムオシロスコープで検出した。検出された信号から特徴を学習し、入力信号の二値を用いた短期記憶 (STM) タスク及びパリティチェック (PC) タスクを実施した。

3. 結果および考察

Fig. 2 に実験で観測した入力信号及び伝搬スピン波信号を示す。入力信号に応じた時刻にて、4 検出点において異なる波形が得られており、リザーバードの高次元化が期待される。この波形を利用して学習し STM/PC タスクを実施した。外部磁場に対する容量の推移を Fig. 3 に示す。不規則格子状導波路においてのみ、共に極大値となる外部磁場が存在し、 $C_{\text{STM},100 \text{ Oe}}=5.611$, $C_{\text{PC},90 \text{ Oe}}=1.996$ と同等の値を示した。よって、不規則格子状導波路による容量増加がスピンドાયナミクスの不安定化に起因していると考えられる。また、PC 容量の平均値をみると、 $C_w=1.681$, $C_{w/o}=1.242$ と導波路微細加工に伴い増加しており、本リザーバードの非線形性向上が推察できる。したがって、不規則格子状導波路により生じるスピンドાયナミクスの不安定化がリザーバード性能向上に寄与する可能性が示された。

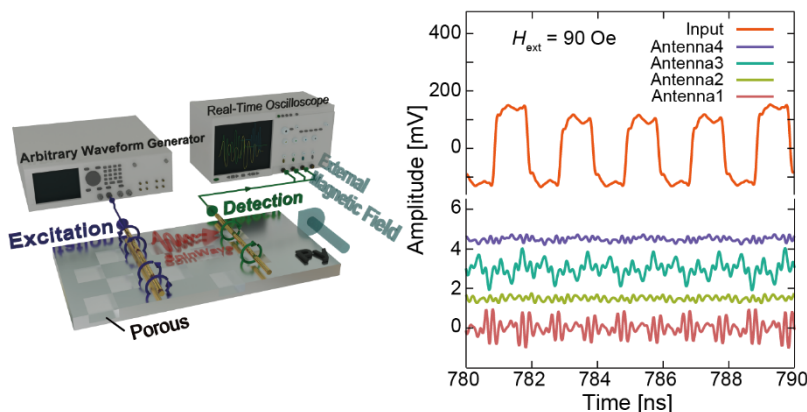


Fig. 1: Schematic diagram of an experimental set up.

Fig.2: Signals detected by a real-time oscilloscope.

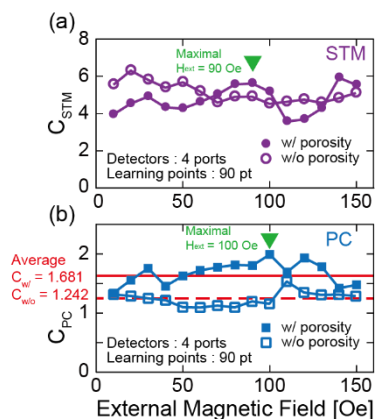


Fig.3: Learning performance variation due to porosity.

References

- 1) Nakane, Ryosho, et al., *Physical Review Applied* **19.3** (2023): 034047.
- 2) Namiki, Wataru, et al., *Advanced Intelligent Systems* **5.12** (2023): 2300228.

高密度な表面スピン波ソリトントレインの形成

岩田時弥, 関口康爾

(横浜国立大学)

Formation of high-density surface spin-wave soliton train

Tokiya Iwata and Koji Sekiguchi

(Yokohama National Univ.)

1. はじめに

昨今の情報化社会において、“beyond CMOS”が期待される技術としてスピン波応用が注目されている。スピン波は磁化の歳差運動の伝播現象であり、ジュール熱損失なしで導波路を伝搬するため、超低消費電力情報処理の実現が見込まれている。しかし伝搬に伴う信号の減衰・歪みが課題であり、その解決策の1つがスピン波ソリトンの利用である。ソリトンとは分散効果と非線形効果がつり合い、波形の拡散と急峻化が均衡することで形成される安定した孤立波を指す。さらに、自己変調不安定性により形成されるソリトントレインは複数のピークを持ち、より高密度な情報伝送に有用であるとされる。ソリトンの形成条件として Lighthill 基準²⁾が存在する。表面スピン波は一般的にこの基準を満たさないが、表面スピンがピン留めされると双極子交換モードにより“dipole gap”を境としてソリトン形成が可能となる。本研究では表面スピン波の高密度化を目指し、ソリトントレインを形成した上でパケットの密度に関する解析を行った。

2. 実験方法

実験基板を Fig. 1 に示す。導波路としてイットリウム鉄ガーネット(YIG)を使用した。厚さ、幅、長さはそれぞれ 10 μm 、2 mm、20 mm、アンテナ間距離は 5 mm である。外部磁場 $H_{\text{ex}} = 120 \text{ mT}$ を導波路に対して面内垂直に印加し、入力アンテナに幅 T_0 [s] のパルス信号を印加することで表面スピン波を励起した。伝搬スピン波をオシロスコープおよびベクトルネットワークアナライザで観測した。単一ソリトンを形成した後、入力周波数 f_{in} [Hz] を変調することで自己変調不安定性を誘起しソリトントレインを形成した。パルス幅によるソリトントレインの波形変化を観察し、スピン波密度を解析した。

3. 結果および考察

ソリトンの時間領域波形を Fig. 2 に示す。入力電力は $P_{\text{in}} = 174 \text{ mW}$ とした。 $f_{\text{in}} = 5.323 \text{ GHz}$ において、単一ソリトン波形が観測された。この入力周波数を $f_{\text{in}} = 5.342, 5.370 \text{ GHz}$ へ変調することで、それぞれ 2 ピーク、3 ピークのソリトントレインが形成された。また、 $f_{\text{in}} = 5.385 \text{ GHz}$ の下でパルス幅 T_0 を変化させたときのスピン波波形を Fig. 3 に示す。黒縁の円はソリトントレインの各ピークの位置を示している。パルス幅の増加に伴うピーク数の増加とピーク間隔の減少が観測された。これは十分に非線形効果を与えた上でパルス幅を増加させ、継続的に変調不安定性を誘起することでスピン波ソリトントレインのパケット密度が上昇したためであると考えられる。

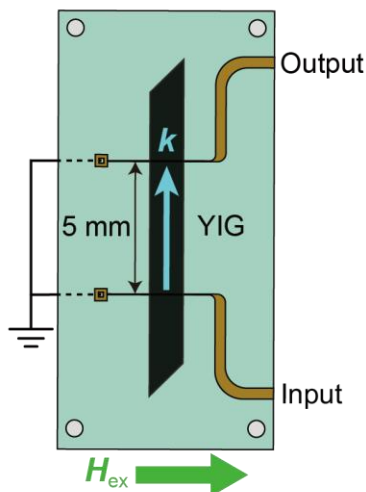


Fig. 1: Schematic of the experimental device. A pair of microstrip lines were used for excitation and detection.

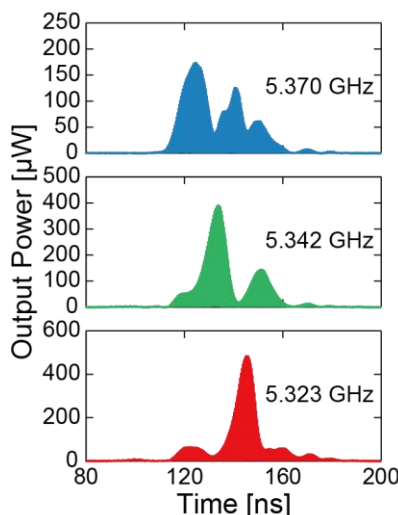


Fig. 2: Formation of soliton trains. The time-domain waveforms split due to modulational instability.

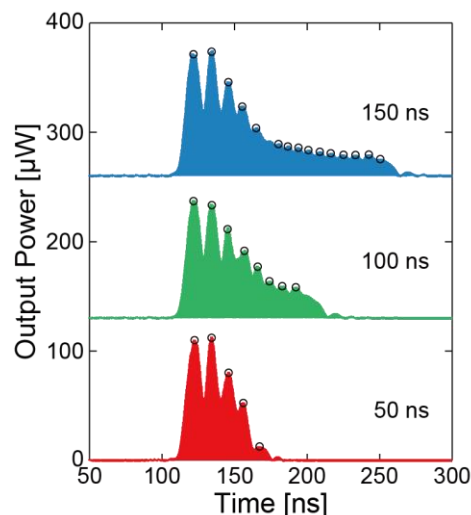


Fig. 3: Time-domain waveforms of soliton trains as pulse width T_0 was varied. The density of peaks increased with increasing T_0 .

References

- 1) T. Eguchi, M. Kawase, and K. Sekiguchi, *Appl. Phys. Express* **15**, 083001 (2022).
- 2) M. J. Lighthill, *IMA J. Appl. Math.* **1**, 3 (1965).

マグノニックノイズ測定による3マグノン散乱下におけるマグノンダイナミクスの解明

西脇友莉, 根津昇輝, 関口康爾

(横浜国立大学大学院)

Magnon dynamics of 3-magnon scattering revealed by magnonic noise measurement

Yuri Nishiwaki, Shoki Nezu, and Koji Sekiguchi

(Yokohama National Univ.)

1. はじめに

スピン波を量子化した準粒子であるマグノンを信号キャリアとして活用したマグノニックデバイスは電荷の移動を伴わないため、超低消費電力の次世代デバイスとして注目されている。マグノニックデバイスの多くはマグノン干渉に基づいており、動作あたりの最小エネルギーはノイズレベルによって制限される¹⁾。高磁場下においてマグノニックノイズと4マグノン散乱は密接に関係することが確認されたが²⁾、3マグノン散乱が発生する条件でのノイズ特性は未だに深く解明されていないため、正確な測定及び評価がマグノニックデバイスの実用化を大きく左右する。本研究では3マグノン散乱が発生する条件におけるマグノニックノイズ特性を調査した。

2. 実験方法

実験模式図を Fig. 1 に示す。導波路として厚さ 10 μm 、幅 2 mm、長さ 20 mm のイットリウム鉄ガーネット(YIG)を使用した。外部磁場 H_{ex} を導波路に対して面内平行に印加し、マイクロストリップアンテナに高周波信号 f_{exc} を印加することでマグノンを生成した。生成された信号をスペクトラムアナライザにより電気的に取得した。取得した信号を高速フーリエ変換によりパワースペクトルに変換し、10 Hz $\leq f \leq$ 500 Hz にわたる周波数範囲のスペクトルの平均値をノイズパワーとして定義した。なお、電磁石の電源からの不要な電磁干渉(EMI)を排除するために永久磁石を使用した。

3. 結果および考察

Figure 2 に入力パワー 0 dBm $\leq P_{\text{in}} \leq$ 4 dBm において、3マグノン散乱により $f = f_{\text{exc}}/2$ に生成されたマグノン強度、4マグノン散乱により生成されたマグノン強度をそれぞれ示す。3マグノン散乱による信号はノイズレベル (青いプロット、thermal と表記) に対して約 13.4 nV 増加したことにに対し、4マグノン散乱による信号は $P_{\text{th}} = 1.8$ dBm を境にして急激に増加した。Figure 3 にマグノニックノイズ測定結果を示す。青いプロットはスピン波振幅を示し、入力パワー増加により線形に増加した。赤いプロットはノイズパワーを示し、0 dBm $\leq P_{\text{in}} \leq$ 2.7 dBm ではノイズパワーはランダムに変化したが $P_{\text{in}} = 2.8$ dBm を境にして急激に上昇した。この変化はマグノン散乱に起因すると考えられる。また、3マグノン散乱が発生しない条件では $P_{\text{th}} = 5.0$ dBm で4マグノン散乱が発生した。3マグノン散乱が発生する場合、3マグノン合流過程により f_{exc} に高い波数 k を持つマグノンが生成されることで非線形効果が大きくなり、低い入力パワーで4マグノン散乱が発生した可能性がある。以上から特定の条件下では低パワーにおいてもノイズパワーの上昇によってデバイス化の際に影響を与える恐れがある。

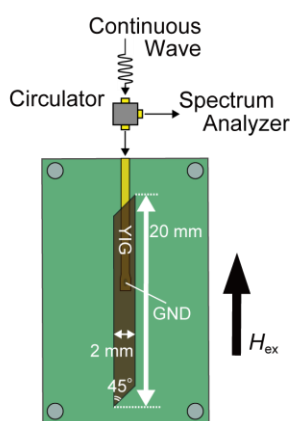


Fig. 1 : Schematic of the experimental setup.

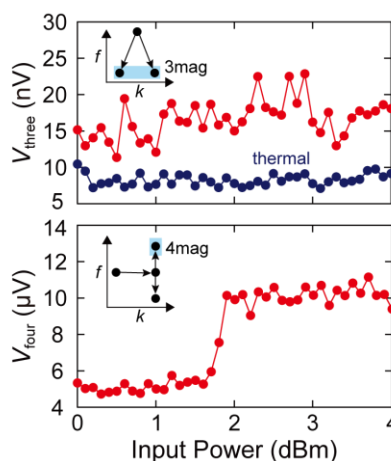


Fig. 2 : Magnon intensity generated by 3-magnon and 4-magnon scattering process.

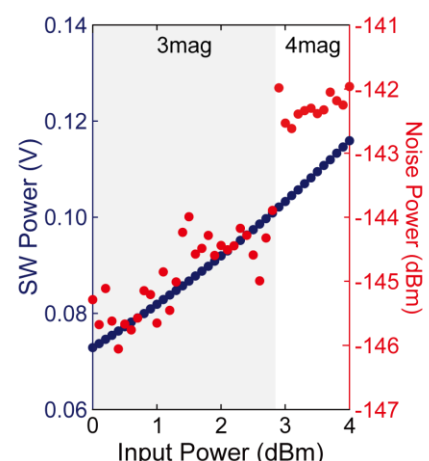


Fig. 3 : The input power dependence of magnonic noise at f_{exc} .

References

- 1) K. Vogt *et al.*, Realization of a spin-wave multiplexer. *Nat. Commun.* **5**, 3727 (2014).
- 2) R. Furukawa, S. Nezu, T. Eguchi and K. Sekiguchi, *NPG Asia Materials*. **16**, 2 (2024).

表面弾性波を用いた磁気回転結合の温度依存性

慶大^A, 慶大スピノン研^B

山野井 一人^A, 鳥羽竜生^A, 能崎 幸雄^{A, B}

Temperature dependence of the gyro magnetic effect using surface acoustic wave

^ADept. of Phys. Keio Univ., ^BKeio Spintronics Center

K. Yamanoi^A, R. Toba^A, and Y. Nozaki^{A, B}

はじめに

格子振動と不均一な磁化歳差運動であるスピン波が結合した磁気弾性波は、両者の特徴が混在した結合波として注目されている。格子振動とスピン波の相互作用は磁気弾性効果が一般的であるが、近年、固体表面を伝搬する表面弾性波の GHz 領域の超高速な格子振動を用いることで、結晶格子の局所的な回転（渦度）と電子スピンの相互作用である磁気回転結合による磁気弾性波も報告された[Y. Kurimune et al. RPL (2020)]。磁気回転効果による磁気弾性波の起源には結晶格子の回転が強磁性体中で引き起こすバーネット磁場と非磁性体中のスピン蓄積によるスピントルクによる寄与が報告されている[Y. Kurimune et al. RPB (2020)]。そこで本研究では磁気回転効果を利用した磁気弾性波の微視的機構の理解を深めるため、NiFe 単層と NiFe/Pt 2 層膜に表面弾性波を注入して生じる磁気弾性波の励起強度の温度及び周波数依存性を調べたので報告する。

実験方法および結果

図 1 に示すように強誘電 LiNbO₃ 基板上に表面弾性波を励起・検出するための 1 対のくし形電極を作製し、くし形電極間に NiFe(20 nm) 単層、もしくは NiFe(20 nm)/Pt(30 nm) 2 層膜をレーザーソグラフィと電子線蒸着法にて作製した。つぎに、ベクトルネットワークアナライザ(VNA)から片方のくし形電極に交流電圧を印加することで逆圧電効果を介して、LiNbO₃ 基板上を歪ませることで表面弾性波を励起する。NiFe 単層もしくは NiFe/Pt 2 層膜に表面弾性波が注入されると、膜表面に微小な振動が生じる。そのため、膜表面から膜厚方向に時間的かつ空間的な交流の結晶格子点の回転が誘起され、渦度勾配が形成される。この渦度勾配によって、Pt 中にはスピン蓄積が生じ、そのスピン流が隣接した NiFe にスピントルクを与える。これと同時に、NiFe 中にも結晶の格子回転に伴うバーネット磁場によるトルクが作用する。これらの合成トルクが NiFe に作用し、磁気弾性波が励起される。この時の磁気弾性波の励起によって表面弾性波の信号強度が減少する。NiFe 単層もしくは NiFe/Pt 2 層膜を通過した表面弾性波は、再度 LiNbO₃ 基板上を伝搬し、もう一方のくし形電極の直下に到達すると圧電効果によって電気信号となり、VNA によって透過信号(S_{21})として検出される。図 2(a)に NiFe 単層に表面弾性波を注入しながら測定した S_{21} 信号の周波数依存性を示す。1.85 GHz 付近に明確なピークが観測されている。同様の実験を -10 mT ~ 10 mT の範囲で外部磁場を表面弾性波の伝搬方向と平行に印加して実験を行い、-10 mT で測定した S_{21} 信号を参照信号として規格化した ΔP^{norm} を図 2(b) に示す。赤点線はスピン波の分散関係を示しており、 ± 4 mT の外部磁場印加時に表面弾性波の励起周波数において大きなエネルギー吸収が観測された。このエネルギー吸収とスピン波の分散関係がよく一致しており、磁気弾性波の励起を確認した。その後、くし電極の構造周期を変化させることで、 ΔP^{norm} の周波数依存性を調べた。その結果、室温での ΔP^{norm} の周波数依存性が NiFe 単層では約 4 乗に比例しており、NiFe/Pt2 層膜では約 6 乗に比例していることが分かった。講演では、NiFe 単層と NiFe/Pt2 層膜の周波数・温度依存性を議論することで磁気弾性波の励起メカニズムの起源解明を行う。

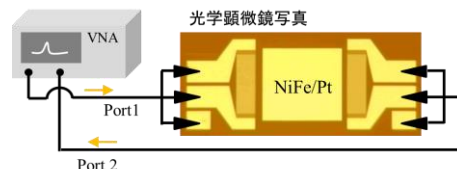


Fig. 1 Measurement setup of the magnetoelastic wave in NiFe/Pt.

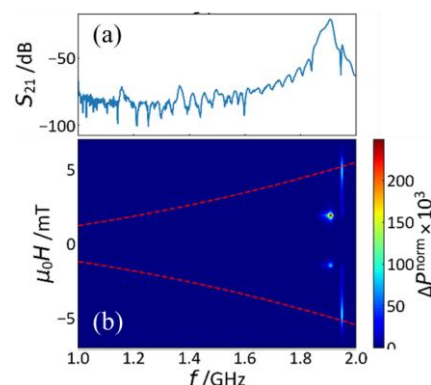


Fig. 2 (a) The frequency dependence of transmission signal for surface acoustic wave. (b) Color plot of spin wave amplitude as a function of the frequency and magnetic field.

表面弾性波とスピン波間の磁気弾性結合定数の定量評価

小見山 遥¹、多賀 光太郎¹、松本 啓岐¹、久富 隆佑^{1,2}、塩田 陽一^{1,2}、小野 輝男^{1,2}
(¹京大化研、²京大 CSRN)

Quantitative evaluation of the magnetoelastic coupling constants
between surface acoustic waves and spin waves

Haruka Komiya¹, Kotaro Taga¹, Hiroki Matsumoto¹, Ryusuke Hisatomi^{1,2},
Yoichi Shiota^{1,2} and Teruo Ono^{1,2}
(¹ICR, Kyoto Univ., ²CSRN Kyoto Univ.)

はじめに

表面弾性波とスピン波の結合は、スピン波の長距離伝送や磁場によるフォノン制御といった観点から近年注目されている¹。表面弾性波とスピン波間の磁気弾性結合強度は電気測定によって評価が可能である。しかし、その結合強度は、物質由来の各種定数の他に表面弾性波の波長や印加磁場角度に依存するため、特定の条件下でのみ有効な物理量となっている。そこで我々は、電氣的測定と光学イメージング測定を組み合わせることにより、磁性薄膜の表面弾性波とスピン波間の磁気弾性定数を定量評価する手法を開発した。

実験方法

評価対象の磁性薄膜を Fig.1 に示すように LiNbO₃ 基板上で楕円電極(IDT)と2つのブラッグミラーからなる表面弾性波共振器中に設置する。今回は膜厚 50 nm の Ni 薄膜を用いた。面内方向に角度 θ で磁場 H_{DC} を印加しながら、IDTを通してベクトルネットワークアナライザ(VNA)を用いて得られる電気反射スペクトルを解析することで、表面弾性波とスピン波間の磁気弾性結合強度 g の評価を行う。この測定および解析は単一磁区化していることが確認されている磁場下で行う。次に、先行研究と同様のセットアップ^{2,3}を用いた光学測定を行うことで表面弾性波の空間イメージングを行う。以上の電氣的測定から得られた結合強度 g の情報と、光学イメージング測定から得られた表面弾性波の空間情報を組み合わせることで、磁性薄膜の表面弾性波とスピン波間の磁気弾性結合定数を導出する。

実験結果

Fig.2 は、 $|H_{DC}|=15$ mT における電氣的測定によって得られた磁気弾性結合強度 g の磁場角度 θ 依存性(青点)を示す。さらにフィッティング(赤線)により磁気弾性結合に対して各歪みを与える寄与を特定した。最後に光学イメージングによって得られた表面弾性波共振器モードの空間情報を用いることによって、磁性薄膜が持つ各歪み由来の表面弾性波とスピン波間の磁気弾性結合定数の評価を行った。

参考文献

- 1) Y. Li *et al.*, APL Mater. **9**, 060902 (2021).
- 2) K. Taga *et al.*, Appl. Phys. Lett. **119**, 181106 (2021).
- 3) R. Hisatomi *et al.*, Phys. Rev. B **107**, 165416 (2022).

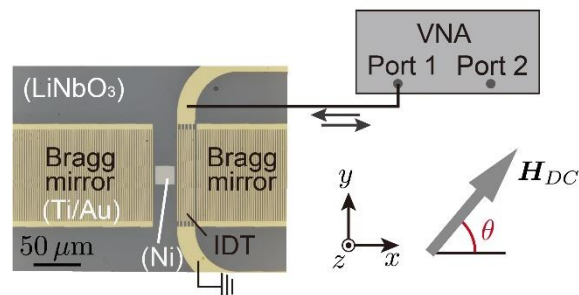


Fig.1 Electrical measurement setup, including optical microscope image of the fabricated device.

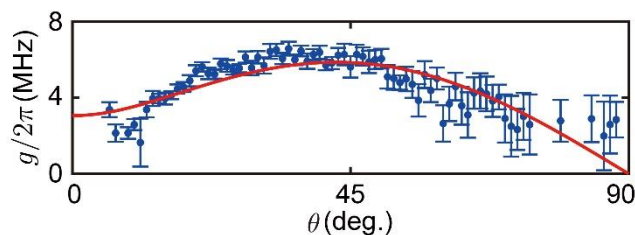


Fig.2 Dependence of coupling strength g on magnetic field angle θ .