

静磁表面スピン波ソリトンの形成の外部磁場依存性

岩田時弥, 関口康爾
(横浜国立大学)

External magnetic field dependence of formation of magnetostatic surface spin-wave soliton

Tokiya Iwata and Koji Sekiguchi
(Yokohama National Univ.)

1. はじめに

スピン波は電子スピンの角運動量の伝播であり電荷の移動を伴わないため、ジュール熱の損失無しで導波路を伝搬する。この性質によりスピン波は超低消費電力での情報処理を実現させる可能性を有しており、次世代の情報キャリアとして注目されている。しかしスピン波伝搬に伴う信号の減衰・歪みが課題であり、スピン波ソリトンの利用はその解決策の1つとして考えられている。スピン波ソリトンが形成されると波形は安定化し、長距離伝搬が可能となる。これまでにスピン波ソリトンの実験的な観測¹⁾や理論的な形成条件²⁾が報告されている。本研究では安定的なソリトン形成を目指し、静磁表面スピン波ソリトンの外部磁場依存性を調べた。

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 4 mm である。外部磁場 H_{ex} を導波路に対して面内垂直に印加し、入力アンテナに励起パルスを印加することで静磁表面スピン波(MSSW)を伝搬させ、出力信号の振幅が最大となる周波数でスピン波伝搬を観測した。測定電圧 V_{out} を特性インピーダンス $Z_0 = 50 \Omega$ を用いて $P_{out} = V_{out}^2 / Z_0$ により出力信号 P_{out} に変換した。

3. 結果および考察

$H_{ex} = 300, 1300 \text{ Oe}$ における出力波形の結果の代表例を Fig. 2 に示す。励起パルスの幅は 25 ns とした。どちらの外部磁場においても、入力電力が大きくなるにつれて出力電力のピーク値は大きくなり、出力波形の急峻化が観測された。また、 $H_{ex} = 300, 1300 \text{ Oe}$ における入力電力とスピン波信号のピーク電力、半値全幅の解析結果を Fig. 3 に示す。入力電力 P_{in} の増加に伴うスピン波電力の応答に関して、 $H_{ex} = 1300 \text{ Oe}$ においては $P_{in} \geq 54.5 \text{ mW}$ の領域(網掛け部分)で線形関係(破線)から上方への逸脱が見られ、非線形性が観察された。この非線形性は先行研究¹⁾でソリトンの特徴とされている。 $H_{ex} = 300 \text{ Oe}$ においてはそのような応答は見られず、線形に増加した。一方、半値全幅に関してはどちらの場合も減少し、 $H_{ex} = 300 \text{ Oe}$ では 3.4 ns、 $H_{ex} = 1300 \text{ Oe}$ では 8.5 ns へ飽和した。分散関係によると、波数 k と群速度 v_g はそれぞれ、 $H_{ex} = 300 \text{ Oe}$ で $k = 8.5 \times 10^3 \text{ rad/m}$ 、 $v_g = 1.3 \times 10^5 \text{ m/s}$ 、 $H_{ex} = 1300 \text{ Oe}$ で $k = 1.3 \times 10^4 \text{ rad/m}$ 、 $v_g = 5.1 \times 10^4 \text{ m/s}$ であった。ソリトンの形成には波形を急峻化させる非線形効果が必要である。 $H_{ex} = 300 \text{ Oe}$ で非線形性が観察されなかったのは、群速度が大きいため伝搬時間が短くなり、十分な非線形効果を受けなかったためであると考えられる。

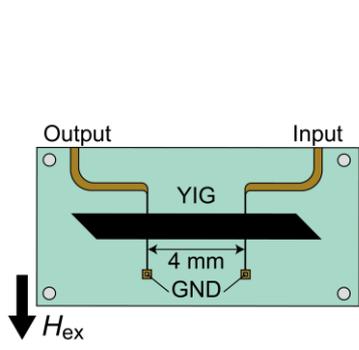


Fig. 1 : Schematic of the experimental device. A pair of microstrip lines were used as the input and output antennas.

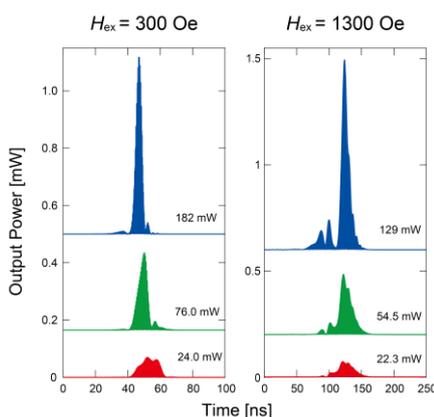


Fig. 2 : The output signal of propagating spin waves, as a function of input excitation power.

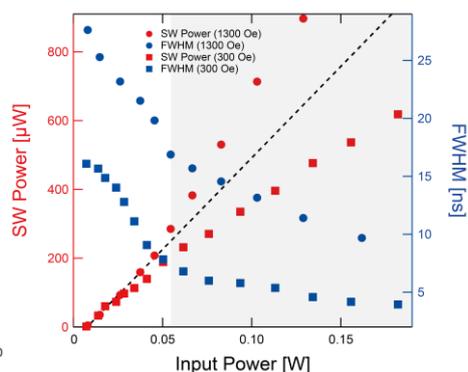


Fig. 3 : Powers and FWHMs of output signals for different input powers.

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).
- 3) J. S. Harms and R. A. Duine, *J. Magn. Magn. Mater.* **557**, 169426 (2022).

スピン波リザーバー高性能化に向けた短期記憶容量のスケーリング

○飯浜賢志^{1,2}, 小池雄也^{3,2,5}, 水上成美^{2,4}, 義永那津人^{2,5}

(¹東北大学学際科学フロンティア研究所, ²東北大学材料科学高等研究所,
³東北大学工学研究科応用物理学専攻, ⁴東北大学先端スピントロニクス研究開発センター,
⁵産総研・東北大数理先端材料モデリングオープンイノベーション)

Scaling of memory capacity for high-performance spin-wave reservoir computing

S. Iihama^{1,2}, Y. Koike^{3,2,5}, S. Mizukami^{2,4}, N. Yoshinaga^{2,5}

(¹FRIS, Tohoku Univ., ²WPI-AIMR, Tohoku Univ., ³Department of Applied Physics, Tohoku Univ.,
⁴CSIS, Tohoku Univ., ⁵MathAM-OIL AIST)

はじめに

近年、省電力人工知能の実現に向けてスピントロニクスを用いた脳型計算機の物理実装が注目を集めている。リザーバー計算はニューラルネットワーク内部の重みを調整しないため、物理実装の有望な手法となる。これまでにスピントルク発振器[1]やスピン波[2]を用いた物理リザーバー計算が実験的に報告されてきたが短期記憶容量といった性能は他の物理系である光リザーバーに比べて劣っているのが現状である。そのため、スピントロニクスを使ったリザーバー計算の高性能化、短期記憶容量を大きくする手法の検討が必要である。本研究では、スピン波リザーバー計算をマイクロマグネティックシミュレーションによって実行し、短期記憶容量に関するスケーリングを示すこと、および高性能な時系列予測タスクの実証を目的とする。

計算手法

図1にスピン波リザーバー計算の模式図を示す。直径500 nmの円周上にスピン注入かつ検出のための物理ノードを配置した。各物理ノードにおいてスピン移行トルクを用いることでスピン波を励起でき、磁化情報は各ノードにおける磁気抵抗効果によって検出できる。材料は低ダンピング定数を有するホイスラー合金 Co_2MnSi を想定した。外部磁場を印加し磁化を面直方向に飽和させ、磁化のx成分(m_x, m_x^2)を計算に用いた。また物理ノードに加え、複数の仮想ノードを使いリザーバー計算で重要となる自由度を大きくした。マイクロマグネティックシミュレーションはMumax³および線形化したLLG方程式による解析的な式を用いた。リザーバー計算性能評価には短期線形記憶容量(MC)、2次の非線形記憶容量(IPC)、NARMA10タスクを用いた。

リザーバーコンピューティング性能評価

8つの物理ノード、8つの仮想ノードを用いたスピン波リザーバー計算においてMC, IPC ~ 60を達成した。仮想ノード間隔を大きくするとMC, IPCが小さくなる傾向を示した。この傾向は解析的な応答関数によるシミュレーションで再現することがわかった。大きなMC, IPCを有する系でNARMA10タスクを実行すると規格化平均二乗偏差で約0.2と高性能な時系列予測を実現した。解析的な応答関数を用いることで物理ノードの間隔、スピン波の群速度を変えたシミュレーションを実行しスケーリングを示した。情報伝搬速度と入力データ時間間隔、物理ノードの距離に関する統一的なスケーリングを見出し、スピン波を用いることでナノスケールにおける高性能リザーバー計算を実現できる[3]。

【謝辞】

本研究の一部はJST PRESTO(No. JPMJPR22B2), JST FOREST (No. JPMJFR2140), 科研費(Nos. 21H04648, 21H05000), X-NICS of MEXT(No. JPJ011438)の援助のもと行われた。

参考文献

- 1) S. Tsunegi *et al.* Appl. Phys. Lett. **114**, 164101 (2019)
- 2) S. Watt *et al.* Phys. Rev. Appl. **15**, 064060 (2021)
- 3) S. Iihama *et al.* arXiv:2301.02193

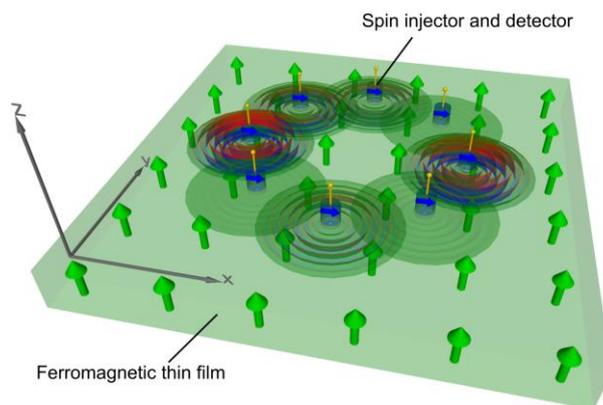


Fig. 1 (a) Schematic illustration of spin-wave reservoir computing.

立方異方性材料におけるパラメトリック励起スピン波の閾値電力の研究

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)

Threshold power of parametrically excited spin waves in cubic anisotropic materials

Shoki Nezu¹, Thomas Scheike², Hiroaki Sukegawa² and Koji Sekiguchi¹
(Yokohama National Univ.¹, NIMS²)

1. はじめに

情報社会の発展に伴う計算需要の増加により、あらゆる分野において電子デバイスの超低消費電力化に向けた技術開発が行われており、スピントロニクス分野ではスピン波を用いた演算素子の開発が進行している。近年では、立方磁気異方性材料特有の静磁スピン波伝搬特性からエピタキシャル鉄薄膜はスピン波デバイスの開発において有望な材料であることが示された^{1,2)}。本研究では、エピタキシャル鉄薄膜を利用したスピン波増幅システムや量子デバイスの開発を目指し、エピタキシャル鉄薄膜上においてパラメトリックポンピングによって生成されたスピン波の伝搬特性を調査した。

2. 実験方法

実験模式図を Fig. 1 に示す。スピン波導波路は DC マグネトロンスパッタリングによって MgO(001) 基板上的 Cr 薄膜を下地として作製された膜厚 25 nm のエピタキシャル Fe(001) 薄膜であり、リフトオフ法及び Ar イオンミリングによって $180 \mu\text{m} \times 110 \mu\text{m}$ の矩形に加工した。導波路上にはスピン波励起・検出のためのマイクロ波アンテナを作製した。アンテナ間距離は $5 \mu\text{m}$ である。エピタキシャル鉄薄膜の磁化困難軸方向に沿って印加した外部磁場 H_{ex} の存在下で、励起アンテナに $f_p = 8.9 \text{ GHz}$ の連続波を入力し、パラメトリックポンピングによりスピン波を生成した。励起されたスピン波を検出アンテナに接続されたスペクトラムアナライザによって観測した。

3. 結果および考察

パラメトリックポンピングによるスピン波生成の閾値電力 P_{th} と外部磁場 H_{ex} の関係を Fig. 2 に示す。Fig. 2 の挿入図は $\mu_0 H_{\text{ex}} = 80 \text{ mT}$ におけるパラメトリックポンピングで生成された $f_p/2$ の周波数を有するスピン波振幅の入力電力依存性である。閾値電力 P_{th} は観測されたスピン波振幅を関数 $a\sqrt{P - P_{\text{th}}}$ によるフィッティングにより解析した。ただし、 a と P_{th} はそれぞれフィッティング係数と閾値電力である。閾値電力は外部磁場の増加に伴い緩やかに減少し、 $\mu_0 H_{\text{ex}} = 80 \text{ mT}$ を境として急峻な増加が確認され、非対称なバタフライカーブが得られた。閾値電力の最小値は $\mu_0 H_{\text{ex}} = 80 \text{ mT}$ における 0.29 mW であり、先行研究の ZnO/YIG/GGG/YIG/Pt 構造バルク音響波共振器におけるパラメトリック励起スピン波生成の閾値電力と比較して約 28% 減少した³⁾。立方異方性による導波路の内部磁場の減少と素子の微細化による励起磁場の増大により低い入力電力でのスピン波生成が実現したと考えられる。

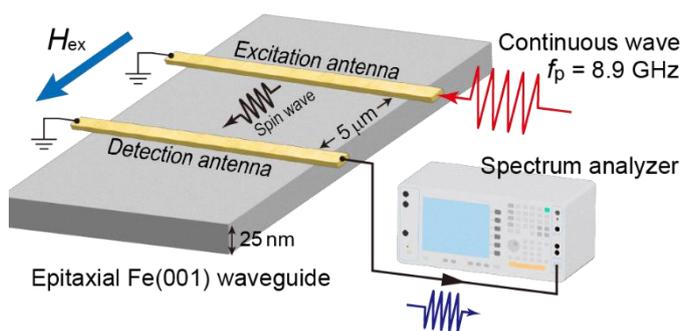


Fig. 1 : Schematic diagram of an experimental setup. Pumped spin waves were generated by a continuous wave at $f_p = 8.9 \text{ GHz}$ and detected by a spectrum analyzer.

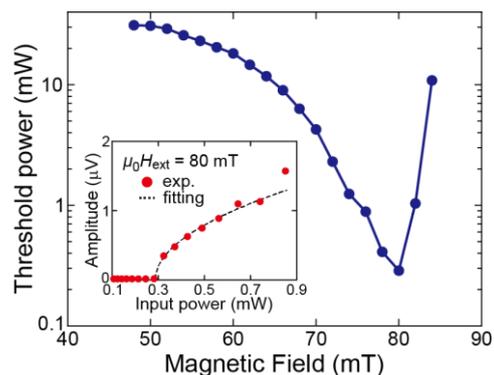


Fig. 2 : The magnetic field dependence of the threshold power at $f_p = 8.9 \text{ GHz}$. The inset represents the amplitudes of pumped spin waves as a function of the input power at $\mu_0 H_{\text{ex}} = 80 \text{ mT}$.

References

- 1) K. Sekiguchi, S-W. Lee, H. Sukegawa, *et al.*, *NPG Asia Mater.* **9**, e392 (2017).
- 2) S. Nezu, T. Scheike, H. Sukegawa, *et al.*, *AIP Adv.* **12**, 035320 (2022).
- 3) S. G. Alekseev, S. E. Dizhur, N. I. Polzikova, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **17**, 072408 (2020).

ナノスピノ波増幅器に向けた帰還構造の開発

岩場雅司¹, 関口康爾^{2,3}

(¹横浜国立大学 大学院理工学府, ²横浜国立大学 大学院工学研究院 ³横浜国立大学 先端科学高等
研究院)

Development of nano-scaled spin-wave amplifier using feedback structure

Masashi Iwaba¹ and, Koji Sekiguchi^{2,3}

(¹Graduate school of engineering Yokohama national university, ²Faculty of engineering Yokohama national
university, ³Institute of advanced sciences Yokohama national university)

概要

磁化の歳差運動を波として伝搬させるスピノ波は、ジュール損失のない超低消費電力の情報伝達システムとして注目されている。現在は微細加工によるスピノ波導波路を使用して、nm, μm スケールのスピノ波素子が研究されている¹⁾。しかし、スピノ波は磁気損失の極めて小さい材料を用いてもスピノ波が減衰するという本質的な欠点がある。そのため、スピノ波の多段化・集積化に向けては増幅器の開発が不可欠となる。増幅器の開発のため、平面的な制御ができる曲線伝搬に着目した²⁾。本研究では直線の導波路にリング型ループ回路を接続した帰還構造を考案し、平面的な制御を用いて増幅器の開発を目指す。帰還構造はスピノ波の位相によって強度が大きく変化すると考えられるため、励起位相によるスピノ波強度の変化を観測した。

実験方法・結果

スピノ波導波路として強磁性金属であるパーマロイ薄膜を用いた。電子線描画およびリフトオフ法により帰還構造をパーマロイ薄膜で作製した。スピノ波帰還構造は図 1(a)より全長 $4\ \mu\text{m}$, 線幅 $w_{\text{py}} = 300\ \text{nm}$, ループ径 $R = 600\ \text{nm}$ である。スピノ波励起には周波数 $f = 6\ \text{GHz}$, 電力 $P = 9\ \text{mW}$ の高周波電力を用いた。帰還構造の端とループ回路の中央にそれぞれ線幅 $w_1 = w_2 = 300\ \text{nm}$ の金アンテナを配置し、ループ中央のアンテナに位相変換器を接続した。スピノ波の検出にはマイクロブリルアン散乱分光法を使用した。

ループ回路を通過した後の直線部の点 $x = 3.7\ \mu\text{m}$ に対して測定した結果を図 1(b)に示す。位相変換器により励起電力の位相を $0 \sim 3\pi/2\ \text{rad}$ で変化させた結果、 $0 \sim \pi\ \text{rad}$ まではスピノ波強度 $I_{\text{sw}} = 9 \sim 15$ とランダムに強度が変化しているが、 $\pi \sim 3\pi/2\ \text{rad}$ ではスピノ波強度が最大 $I_{\text{sw}} = 22$ まで増大した。これはループ回路をスピノ波が伝搬したことで、スピノ波干渉による強め合い・打ち消し合いが生じたためと考えられる。

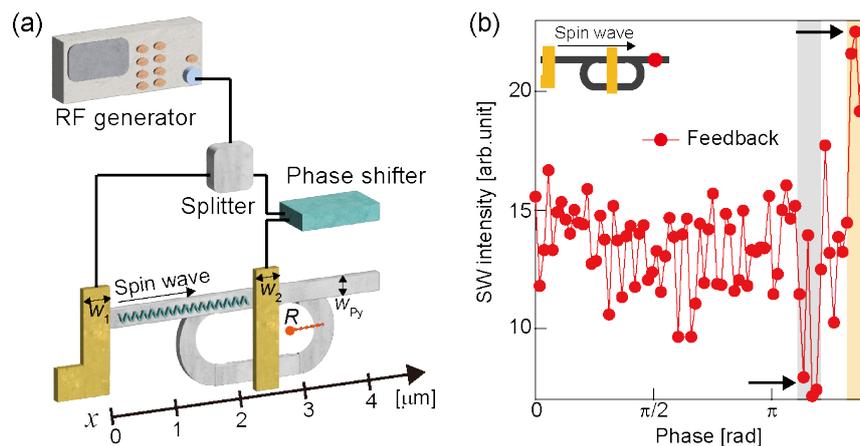


図 1 (a) 2 アンテナ励起によるスピノ波帰還構造の実験概略図。(b) スピノ波強度における励起電力の位相依存性。挿入図より、導波路の直線部の点 $x = 3.7\ \mu\text{m}$ で観測した。

参考文献

- 1) B. Heinz, Q. Wang, M. Schneider et al., *Appl. Phys. Lett.* **118**, 132406 (2021).
- 2) A. V. Sadovnikov, C. S. Davies, V. V. Kruglyak et al., *Phys. Rev. B* **96**, 060401(R) (2017).

微細 Y 字型構造におけるスピン波伝搬の時間分解電気計測

林龍之介, 根津昇輝, 関口康爾
(横浜国立大学大学院)

Time-domain electrical detection of spin waves in Y-shaped microstructures

Ryunosuke Hayashi, Shoki Nezu, and Koji Sekiguchi
(Yokohama National Univ.)

1. はじめに

電荷の移動を伴わないスピン波は低消費電力な情報キャリアとして有望視されており、スピン波を用いた情報処理デバイスについて様々な研究がなされている。近年では、バルクサイズのイットリウム鉄ガーネット(YIG)を用いた多数決論理ゲートが実現された¹⁾。スピン波演算デバイスの開発を促進するためには、微細構造を連結させた導波路におけるスピン波の伝搬特性の解明は不可欠である。本研究では、静磁表面スピン波(MSSW)を利用したスピン波演算デバイスの開発を目指し、Y字型のYIG微細構造における時間領域でのスピン波伝搬特性を調査した。

2. 実験方法

実験模式図を Fig. 1 に示す。スピン波導波路は RF マグネトロンスパッタリングによって作製された膜厚 115 nm の YIG 薄膜であり、結晶化のために 800°C で 6 時間アニール処理をした後にリフトオフ法及び Ar イオンミリングによって幅 50 μm の Y 字型に加工した。導波路上にはスピン波励起・検出のためのマイクロ波アンテナを作製した。アンテナ間距離は 100 μm である。導波路の幅方向に外部磁場 H_{ex} を印加し、励起アンテナ 1、2 にパルス幅 25 ns の正弦波パルス波を入力することで MSSW を励起し、アンプで信号を増幅した後にオシロスコープによりスピン波を検出した。励起アンテナ 1 の入力に位相変換器を接続することで、位相変化に伴う波の干渉による信号強度の変化について観測した。

3. 結果および考察

YIG 薄膜の減衰定数 α は FMR 測定の結果、 1.35×10^{-3} であった。Fig. 2 は Y 字型導波路において測定した時間領域信号である。外部磁場の増加によりスピン波パケットの到達時間が変化し、到達時間の差 Δt が MSSW の理論値である $H_{\text{ex}} = 50\text{--}100$ Oe 間で $\Delta t = 17.2$ ns、 $H_{\text{ex}} = 100\text{--}140$ Oe 間で $\Delta t = 11.8$ ns と概ね一致しており、アンテナ間距離 100 μm かつ斜め方向に渡って伝搬した MSSW の信号を時間領域で電氣的に検出できた。2 つの励起アンテナに入力する正弦波パルスの位相差 $\Delta\phi$ を 0 と π に変化させたときの検出したスピン波信号を Fig. 3 に示す。アンテナ 2 のみで励起したスピン波振幅 1.14 mV に対して、 $\Delta\phi = 0$ のときには 2.25 mV、 $\Delta\phi = \pi$ のときには 0.24 mV のスピン波振幅が得られた。 $\Delta\phi = 0$ のときにスピン波の強め合う干渉、 $\Delta\phi = \pi$ のときにスピン波の弱め合う干渉が観測されたと考えられる。この結果から、Y 字型導波路において MSSW の位相を制御することでスピン波干渉による論理演算が可能であることが示された。

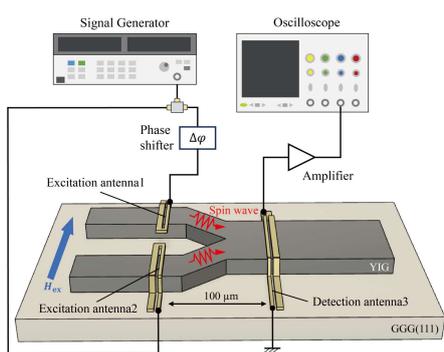


Fig. 1 : Schematic diagram of an experimental setup.

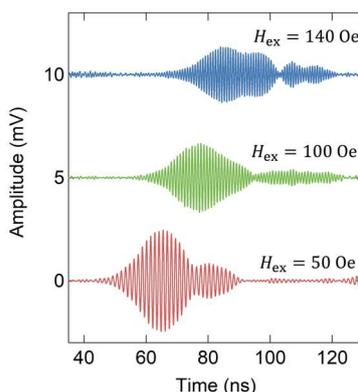


Fig. 2 : Output profiles of detected spin-wave waveforms for three different external magnetic fields.

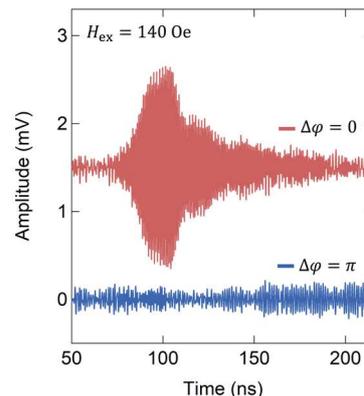


Fig. 3 : Real-time waveforms of output signals with input phase differences $\Delta\phi$. The phase differences of the sinusoidal waves are π and 0, respectively.

Reference

- 1) Naoki Kanazawa, Taichi Goto, Koji Sekiguchi, *et al.*, *Sci. Rep.* **7**, 7898(2017).

アンテナ法によるスピン波の励起・観測を用いた物理リザーブの実証

長瀬翔, 根津昇輝, 関口康爾
(横浜国立大学大学院)

Physical reservoir devices using excitation and observation of spin-wave via antenna method

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

1. はじめに

テクノロジーの劇的な進歩により IoT 社会の到来が一部実現している現代では、膨大な情報処理の効率化を図るエッジコンピューティングが重要視されており、ニューラルネットワークのような高度な演算を行なうためには低消費かつ高効率なデバイスが必要不可欠である。そのデバイスとして非線形性と履歴依存性を有する物理現象を用いて学習の負荷を抑える物理リザーブという手法があり、スピン波を用いた物理リザーブデバイスが研究されている。本研究ではパーマロイ薄膜(Py)を微細加工し、アンテナ法を用いた物理リザーブデバイスを作製した。アンテナ法を用いることで実測データとしてリザーブ動作の検証が可能であり、検出されたスピン波の電気信号を利用した学習タスクにて物理リザーブの動作を確認した。

2. 実験方法

実験模式図を Fig. 1 に示す。酸化膜付き Si 基板上に二層構造の試料を作製した。一層目は Py ($\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$)を用いたスピン波導波路であり、スパッタリング法を用いたミリングプロセスにて膜厚 300 nm、 $40\ \mu\text{m} \times 80\ \mu\text{m}$ の形状に加工した。二層目はスピン波の励起及び観測に用いるアンテナであり、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。入力アンテナに幅 10 ns、振幅 5 V の矩形波信号を印加し Surface Mode のスピン波を励起した。励起アンテナ直下の導波路には 2 つのスリットが配置されており、励起されたスピン波は 3 つの球面波として伝搬する。隣り合う球面波と干渉を起こしたスピン波を 4 つの検出アンテナに接続されたサンプリングオシロスコープより観測した。面内 x 軸方向に $B_{\text{ext},x} = 600\ \text{Oe}$ 、面内 y 軸方向に $B_{\text{ext},y} = 20 \sim 90\ \text{Oe}$ の 8 パターンの外部磁場を印加した。各磁場におけるスピン波の電気信号から法則性を学び、 $B_{\text{ext},y}$ の大きさを予測する学習タスクを行った。

3. 結果および考察

面内 y 軸方向に印加した外部磁場 $B_{\text{ext},y}$ と観測されたスピン波の電気信号を用いた磁場予測 (機械学習) 結果の関係を図 2 に示す。 $B_{\text{ext},y} = 30, 50, 70, 90\ \text{Oe}$ の 4 つはトレーニングデータとして重みづけを行った。 $B_{\text{ext},y} = 20, 40, 60, 80\ \text{Oe}$ の 4 つはテストデータであり、トレーニングデータより調整された重みベクトルを用いて磁場予測を行った。学習精度を確認する指標に平均平方二乗誤差 (RMSE) を利用している。予測する各値の差は 10 であるため、各値の ± 5 以内に予測値が収まるのが望ましく、RMSE が 5 より小さければ全ての入力パターンで学習が成功したと判断する。トレーニングデータの RMSE は 2.953、テストデータの RMSE は 4.670 となり、アンテナ法を用いた Py 薄膜デバイスはスピン波の電気信号より法則性を適切に学習し、物理リザーブとしての汎化性を有していることが示された。

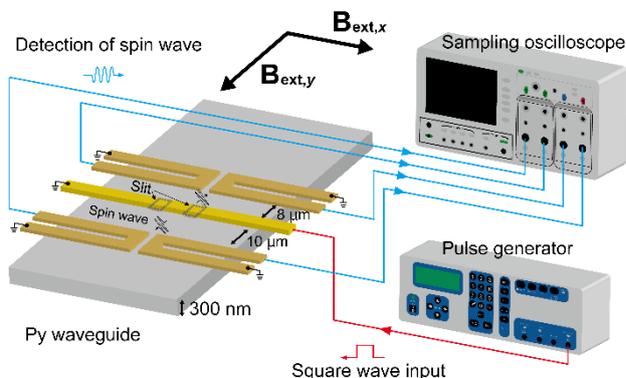


Fig. 1 : Schematic diagram of an experimental setup.

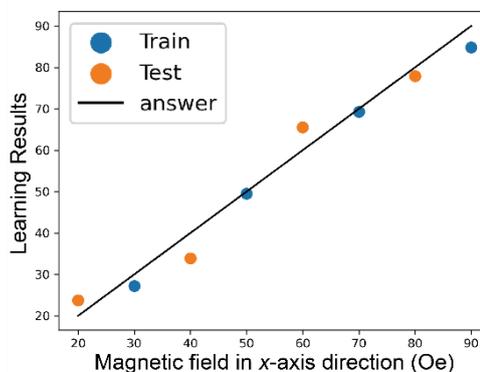


Fig. 2 : The magnetic field dependence of the learning result.

References

- 1) R. Nakane et al., IEEE Access 6, 4462 (2018)