

鉄単結晶を用いたスピン波干渉による物理リザーバーの検討

小屋祐真、関口康爾
(横浜国立大学)

Reservoir computing by spin-wave interferometry using Fe single crystals

Y. Koya, and K. Sekiguchi
(Yokohama National Univ.)

はじめに

IoT 社会の到来に向けて情報処理の効率化の手段としてエッジコンピューティングが導入され始めている。エッジコンピューティングを低消費・高効率で行うためには現在のサーバーに代わる新たなデバイスが必要である。その一つとしてイットリウム鉄ガーネット(YIG)を用いたスピン波リザーバーデバイス¹⁾が提案されている。鉄単結晶を用いる利点として Voltage-Controlled Magnetic Anisotropy(VCMA)を用いたスピン波励起やスピン波の高速化が期待できるため²⁾、本研究では鉄単結晶によるスピン波物理リザーバーの検討を行った。

シミュレーション方法

本研究では Mumax3 によるマイクロマグネティックシミュレーションを用いて鉄単結晶を用いたスピン波物理リザーバーを検討した。縦 12 μm 、横 12 μm 、厚さ 10 nm の鉄単結晶に中心(0, 0)に対して直径 250 μm の円柱状に励起点(1 μm , 0), (-1 μm , 0)と観測点(0, 1 μm), (0, 0), (0, -1 μm)を設置した。Fig.1 は励起信号で、一軸磁気異方性 K_{ul} が変化することで磁化が変動しスピン波が励起されるため、一軸磁気異方性を矩形波状に変化させることでスピン波を励起した。観測点で出力されたスピン波の包絡線信号をとり、重み付けを行い学習した。学習では矩形波信号の一部分(第二領域)の時間を変化させ、その時間の推定を行った。

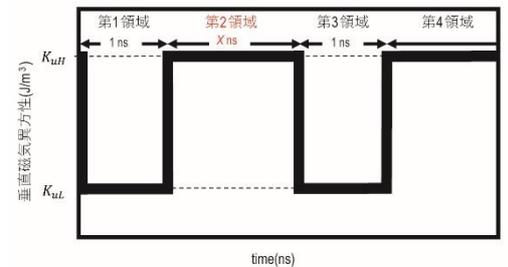


Fig.1 励起信号

シミュレーション結果

Fig.2 は学習開始時間と RMSE(二乗平均平方根誤差)の関係である。2 回目のスピン波が到達した時間付近である 7 ns~8 ns で学習結果を抜粋した。学習開始時間 7.65 ns で RMSE は 0.204 となり最小の誤差となった。

Fig.3 は誤差が最小となった学習開始時間 7.65 ns のときの推定結果である。横軸が矩形波信号の変化させた部分の実際の時間、縦軸が推定された時間である。4 つの学習用のトレインデータおよび 3 つのテストデータの誤差は小さく、推定値での逆転がないことから時間ごとの分離が可能である精度での学習ができていることが分かる。これにより鉄単結晶を用いたスピン波物理リザーバーの汎化性が示された。

これらの結果から鉄単結晶を用いた場合でも YIG⁽¹⁾を用いた場合と同様にスピン波による物理リザーバーで学習が行えることがわかった。

参考文献

- 1) R. Nakane *et al.*, IEEE Access **6**, 4462 (2018)
- 2) K. Sekiguchi *et al.*, NPG Asia Mater, **9**, e392 (2017)

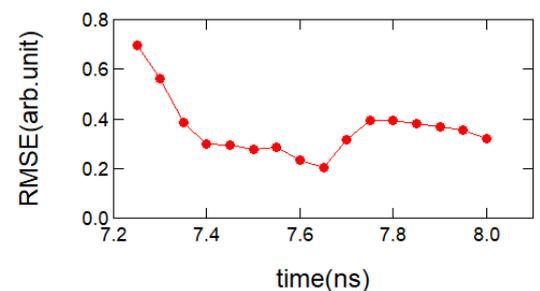


Fig.2 学習開始時間と RMSE の関係

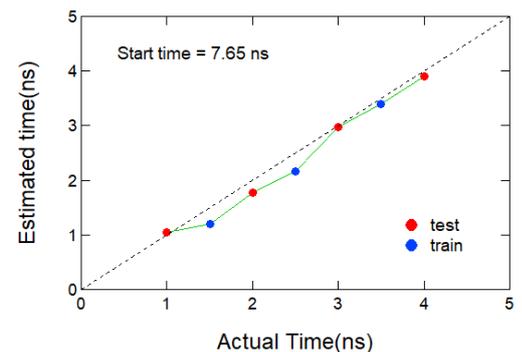


Fig.3 推定結果

周期的な変調磁場によるスピン波の減衰

岩場雅司, 関口康爾
(横浜国立大学)

Strong reflection of spin wave by a periodic modulation field

M. Iwaba and K. Sekiguchi
(Yokohama National Univ.)

1 はじめに

スピンの歳差運動を伝達するスピン波は、電荷の移動が無くジュール熱が発生しない。そのため、スピン波を用いた情報伝達デバイスが盛んに研究されている^{1,2)}。スピン波デバイスの実用化に向けて、スピン波を制御する必要がある。本研究ではスピン波の磁気的性質を利用して動的制御を目指し、スピン波の導波路に対して周期的な変調磁場を印加して^{3,4)}、スピン波を減衰制御する実験を行った。

2 実験方法

スピン波の導波路として厚さ $5.1 \mu\text{m}$ 、幅 1.3 mm のイットリウム鉄ガーネット (YIG) を用いた。端面からの反射を減らすため、両端を 45° にカットした。直角にスピン波を曲げて分散関係を変化させて、スピン波を急激に減衰させるためである。幅 $75 \mu\text{m}$ のアンテナに周波数 $f = 1.85 \text{ GHz}$ 、持続時間 5 ns 、電力 10 dBm のマイクロ波パルスを入力して、誘導磁場を発生させてスピン波を励起した。励起されたスピン波は導波路中にある周期的な変調磁場を通過する。スピン波による誘導起電力をアンテナによって検出し、リアルタイムオシロスコープで実時間波形を測定した。アンテナ間の距離は 16 mm である。外部磁場 $H_{\text{ex}} = 160 \text{ Oe}$ をスピン波の進行方向に対して面内垂直に印加し、表面モードのスピン波を励起させた。

スピン波の導波路中に変調磁場を印加するため、線幅 $w_1 = 75 \mu\text{m}$ 、 $w_2 = 130 \mu\text{m}$ 、それぞれ周期 $n = 10$ のメアンダ構造を YIG 表面に配置した。メアンダ構造による周期的な磁場によって一部のスピン波が減衰する。メアンダ構造には直流電流 $I = 0.3 \text{ A}$ を印加し、これによって発生する磁場はそれぞれ $H_{w1} = 1.71 \text{ Oe}$ 、 $H_{w2} = 3.03 \text{ Oe}$ となった⁵⁾。

3 結果および考察

変調磁場を印加しないときのスピン波の実時間波形を図 1 の挿入図における赤線で示す。最大振幅は到達時間 $t = 175 \text{ ns}$ のときに最大振幅 23.3 mV であった。このときの群速度は $v_g = 9.16 \times 10^4 \text{ m/s}$ であり、また YIG の端面から反射したスピン波が遅れて検出されており、複数パケットが $t = 186 \text{ ns}$, 195 ns に確認できる。

表面モードのスピン波の減衰効果を図 1 の矢印における振幅の違いで示す。電流 $I = 0.3 \text{ A}$ によって変調磁場を印加したときスピン波の振幅が 16.4 mV になり、 29.6% の減衰があった。

また電流 $I = 0 \text{ A}$ のときは到達時間 $t = 175 \text{ ns}$ であったが、電流 $I = 0.3 \text{ A}$ のときは到達時間 $t = 187 \text{ ns}$ と遅れていた。到達時間が遅れた原因として、変調磁場内でスピン波が反射を繰り返して、反射した経路分の長さだけ遅延が生じたと考えられる。シミュレーションにおいても変調磁場内でスピン波が反射を繰り返して到達時間が遅れることが確認された。

スピン波の実時間波形をフーリエ変換して、周波数スペクトルを求めたものを図 1 に示す。スピン波の帯域は $1.68 < f < 1.92 \text{ GHz}$ であり、スペクトルの強度比は 18.7% だけ減少した。

以上の実験から、表面モードのスピン波において変調磁場による減衰効果を確認できた。減衰強度を改善すればスイッチングも可能になるため、スピン波デバイスの応用に期待ができる。

文 献

- 1) A. Chumak, A. Serga, B. Hillebrands: *Nat. Commun.*, **5**, 4700 (2014).
- 2) K. Sekiguchi, D. Chiba, T. Tachizaki: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **57**, 0902B4 (2018).
- 3) A. Chumak, V. Tiberkevich et al.: *Nat. Commun.*, **1**, 141 (2010).
- 4) 岩場雅司, 藤原早希, 関口康爾: 日本磁気学会論文特集号, **4**, 18 (2020).
- 5) A. Chumak, T. Neumann et al.: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42**, 205005 (2009).

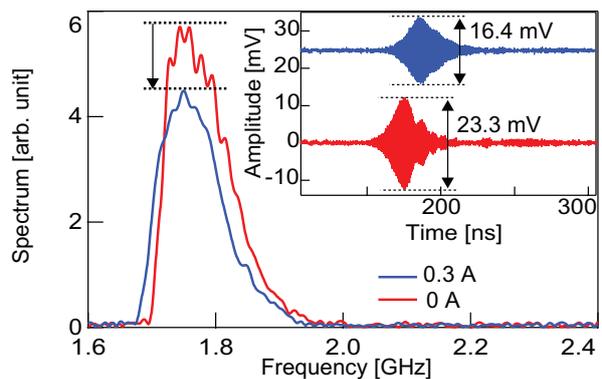


図 1 Powerspectrum of spin wave signal. Inset shows real-time waveforms. Parameters are external magnetic field $H_{\text{ex}} = 160 \text{ Oe}$ and excited frequency $f = 2.85 \text{ GHz}$

磁壁おけるスピン波伝播の研究

根津昇輝, 関口康爾
(横浜国立大学理工学部)

Study of spin-wave propagation in a magnetic domain wall

S. Nezu and K. Sekiguchi
(Yokohama National Univ.)

1. はじめに

現代の情報化社会では、あらゆる活動が情報システムに依存し、今後ますます増大するであろう膨大なデータを処理する必要がある。エネルギー消費量の増加を防ぐため、超低消費電力の情報デバイスの開発が急務であり、スピン波を超低消費電力な次世代計算機の情報キャリアとして活用するための研究が盛んに行われている。その中の一つとして、磁壁は再構成可能なスピン波導波路として利用できると考えられている¹⁾。本研究では、ナノサイズのスピン波伝播の実験とシミュレーションを行った。

2. 実験方法

Fig. 1 に試料の光学顕微鏡像を示す。熱酸化膜付き Si 基板上に二層構造で試料を作製した。一層目のスピン波導波路は Py ($\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$) であり、膜厚 40 nm、横幅は 5 μm から 10 μm まで徐々に広がっている楕円のような形状である。二層目のアンテナは Ti (5 nm)/Au (100 nm) である。いずれもレーザーリソグラフィを用いたリフトオフ法によってパターンを形成し、その後、一層目はスパッタリング法、二層目は真空蒸着法により成膜した。磁気光学カー効果顕微鏡を用いた磁区構造の観察や磁壁を伝播するスピン波の電気的検出に先立ち、Fig. 2 に示すように Mumax3 を用いて、マイクロマグネティックシミュレーションを行った。Fig. 2 (a) は試料の磁区構造を示しており、形状は長辺 5 μm 、短辺 1 μm 、膜厚 10 nm の Py である。Fig. 2 (b) と Fig. 2 (c) 上の励起点から正弦波の磁場を印加してスピン波を励起した。

3. 結果および考察

試料は Fig. 1 に示すように入力用アンテナと検出用アンテナの間隔が 1 μm から 0.5 μm 間隔で 4.5 μm までのものを作製できた。Fig. 2 (b) と Fig. 2 (c) はスピン波をそれぞれ 1.28 GHz、5.68 GHz で励起したときの磁化の面外成分の様子であり、5.68 GHz のような高い周波数では磁壁だけでなく磁区においてもスピン波が伝播していることから、励起周波数を大きくすると磁区への漏れが大きくなることが分かった。Fig. 3 に励起周波数が 1.28 GHz におけるシミュレーション上でのスピン波の強度分布を示す。半値全幅が約 34 nm の信号となっており、今までに報告されている磁壁の幅と一致していることからスピン波が磁壁内に閉じ込められていることが分かった。

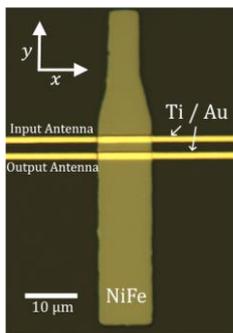


Fig. 1 | OM image of the spin-wave waveguide and the microwave antennas.

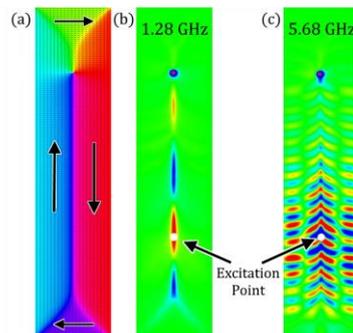


Fig. 2 | Micromagnetic simulation. (a) Magnetic domain of a Py element. Spin-wave was excited at (b) 1.28 GHz or (c) 5.68 GHz at the white dot.

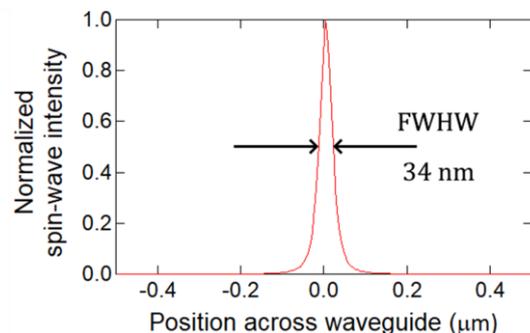


Fig. 3 | Intensity distribution of spin-wave for $f = 1.28$ GHz. The center of the short side of the waveguide is set to be zero.

参考文献

- 1) K. Wagner *et al.*, Nat. Nanotechnol, **11**, 432-436(2016).

スピン波伝送における磁化勾配効果の研究

江口拓朗, 苗村侑, 関口康爾
(横浜国立大学理工学部)

Study of Magnetization Gradient effect on Spin-Wave Propagation

T. Eguchi, Y. Naemura, and K. Sekiguchi
(Yokohama National Univ.)

1 はじめに

スピン波は低消費電力のデータ処理装置の新しい情報キャリアとして期待され、世界的に研究されている。例えば、後方体積モードスピン波で動作するマグノトランジスタ¹⁾、表面モードスピン波で動作するマルチプレクサ²⁾などが実現されている。しかし、後方体積モードと表面モードの伝播特性は大きく異なり、現状では外部磁場や磁化が固定された状態では分散関係が異なる。故に、この2つのモードのスピン波は、同一の周波数帯で共存することができない。つまり、2次元平面上に複数種類のデバイスを搭載することが困難である。本研究ではこれまでに研究されてきた、レーザによる温度勾配で生成された磁化勾配中でのモード変換を再検討し³⁾、ペルチェ素子を用いて加熱・冷却を行い、スピン波の伝播特性および伝搬方向の制御について研究した。

2 実験方法

本研究で用いた加熱・冷却それぞれの場合の試料・基板構成を Fig. 1 に示す。スピン波導波路としてイットリウム鉄ガーネット (Yttrium Iron Garnet: YIG) を使用しており、厚さ $5.1 \mu\text{m}$ 、幅 2 mm 、長さ 13 mm である。スピン波は、入力アンテナ 1 に GHz 帯域での高周波を投入して励起した。出力アンテナ 2 によって、伝播方向が変化せず直進するスピン波を検出し、出力アンテナ 3 によって、伝播方向が変化し曲がったスピン波を検出する。YIG と接するアンテナ幅は $75 \mu\text{m}$ で、スピン波の励起・検出はベクトルネットワークアナライザ (VNA) で行った。ここで、入力アンテナ 1 と出力アンテナ 2 間の距離は 10 mm で、入力アンテナ 1 と出力アンテナ 3 間の距離は 5 mm である。外部磁場は、 0 Oe から 1300 Oe を Fig. 1 の矢印方向に印加し、スピン波の後方体積モードと表面モードをそれぞれ発生させた。加熱・冷却はペルチェ素子を用いて、YIG に熱を局所的に伝達させた。

3 結果および考察

Fig. 2 は、YIG を局所加熱したときの加熱部分の温度と、スピン波伝送 S_{21}, S_{31} のピーク周波数の関係について、後方体積モードにおけるスピン波の分散関係を理論値と比較したグラフである。このとき外部磁場は 600 Oe である。実験結果から YIG 内の温度を上昇させることで、ピーク周波数が減少することがわかる。実線は、温度上昇により磁化が減少するとして計算した場合の、ピーク周波数の結果である。これらは一致しているため、YIG への熱勾配が正しく行われ、磁化勾配が生成された可能性がある。Fig. 3 は、 333 K における後方体積モードのスピン波について、試料に印加する外部磁場と、スピン波伝送 S_{21}, S_{31} のピーク周波数の関係を理論値と比較したグラフである。結果から、外部磁場を増加させると、ピーク周波数が増加することがわかる。実線は温度 333 K で磁化一定として計算できる場合に、外部磁場を増加させた時のピーク周波数の結果である。これらは一致しているので、Fig. 2 の温度と周波数の関係は、YIG 内の磁化の変化により、磁気的相互作用が変化した可能性がある。

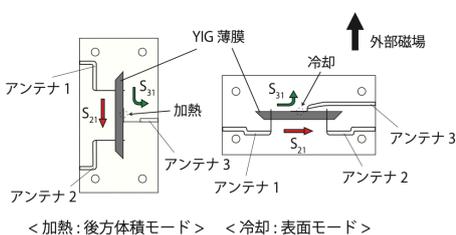


Fig. 1 Schematic of device.

The S_{31} (S_{21}) parameter depicts the transmission of spin waves from antenna 1 to 3 (1 to 2).

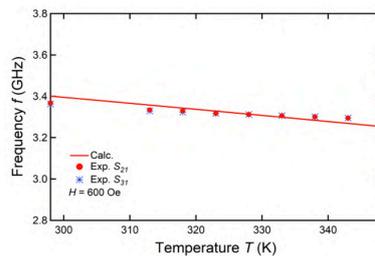


Fig. 2 Spin wave resonance frequency as a function of a temperature. The dots are experimental values measured with VNA. The solid line is a calculation result.

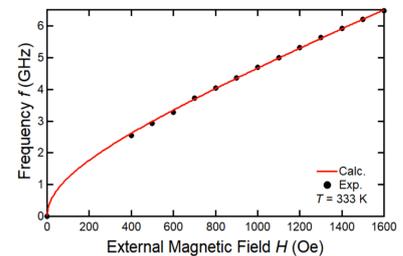


Fig. 3 Spin wave resonance frequency as a function of a magnetic field. The dots are experimental values measured with VNA. The solid line is a calculation result.

References

- 1) A. V. Chumak *et al.*: *Nature Commun.*, **5**, 4700 (2014).
- 2) K. Vogt *et al.*: *Nature Commun.*, **5**, 3727 (2014).
- 3) M. Vogel *et al.*: *Scientific Reports.*, **8**, 11099 (2018).

時間分解ブリルアン散乱分光法によるマグノン生成過程の検出

小田鴻志, 岩場雅司, 関口康爾
(横浜国立大学理工学部)

Magnon-generation process detected by a time-resolved Brillouin light scattering spectroscopy

K. Oda, M. Iwaba, and K. Sekiguchi
(Yokohama National Univ.)

1 はじめに

磁性材料に励起されたスピン波は新しい情報処理基盤として近年集中的に研究されている。しかし、スピン波による情報処理は信号伝送中の減衰が大きくその情報を失ってしまう課題がある。そのため、スピン波信号を増幅、成形、加工する方法として高周波信号の入力によるパラメトリックポンピングが用いられる¹⁾。マグノンボース・アインシュタイン凝縮(マグノン BEC)はパラメトリックポンピングにより同一のエネルギーを持ったコヒーレントなマグノンの密度が上昇する現象であり、巨視的量子現象の観測が可能となる。マグノン BEC の形成はブリルアン散乱分光測定法 (BLS) によって観測できる。BLS は光子のブリルアン散乱を用いて量子情報を調べる分光法であり²⁾、干渉計により得られる周波数情報から励起マグノンと熱マグノンを同時に観測できるという利点を有する。本研究では、パラメトリックポンピングによって励起されたマグノンがマグノン BEC を形成する時間発展過程を研究した。

2 実験方法

本研究で用いたイットリウム鉄ガーネット (YIG) 薄膜を Fig.1 挿入図に示した。YIG 薄膜のサイズは一辺が 2 mm の正方形で厚さが 28 μm である。パラメトリックポンピングはマグノンの共鳴周波数の 2 倍の周波数の高周波磁場を印加した際に最も効率が良いため¹⁾、入力周波数に応じて外部磁場を変化させた。この時、高周波磁場の入力にスイッチを用いて任意の時間だけマグノンの励起を行い、スイッチの動作に用いるパルス信号と BLS 測定装置の同期をとり励起されたマグノンの密度の時間変化を観測した。マグノン密度の時間発展を観測してパラメトリックポンピング及びマグノン BEC が形成されることを確認する。

3 結果および考察

Fig.1 に BLS 測定によるマグノン密度の周波数スペクトルを示す。入力周波数は 6 GHz、外部磁場は 928 Oe である。高周波磁場の印加の有無 (No pumping が入力無し、Continuous が連続入力) に対して ± 3.2 GHz 付近で高周波磁場の入力によるマグノンのピークが確認できる。また、5 GHz 付近で膜面に対して垂直方向に存在する定在波である PSSW も確認できた。一方、スイッチを用いて高周波磁場の印加時間 τ_p を 1 μs ~ 4 μs まで変化させた時の共鳴周波数 (-3.3 GHz ~ -3.1 GHz) のマグノン密度の時間発展の様子を Fig.2 に示す。Fig.2 より、高周波磁場の印加時間が 1 μs の時 (Fig.2 最下段) に 0.76 μs でマグノン密度が増加し、1.17 μs でマグノン密度が減少することがわかる。高周波磁場の印加時間を 2 μs , 3 μs , 4 μs と長くすると印加時間に比例してマグノンの生成される時間が長くなることが確認できた。

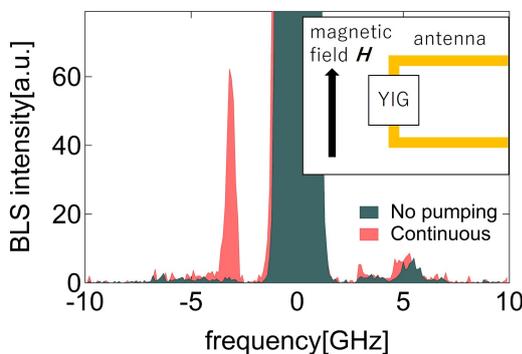


Fig. 1 BLS spectrum of pumped magnons.(The inset shows the experimental set-up for magnon generation.)

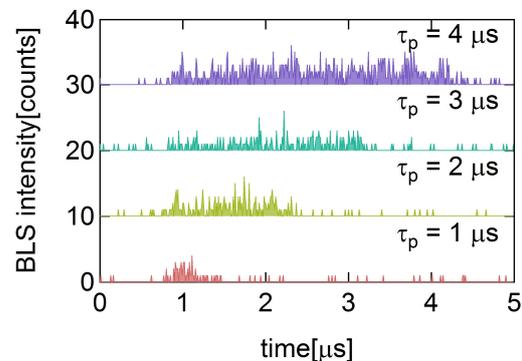


Fig. 2 Time evolution of magnon density.

References

- 1) T. Neumann, A. A. Serga, V. I. Vasyuchka and B. Hillebrands: *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 192502 (2009).
- 2) S.O. Demokritov *et al.*: *Phys. Rep.*, **348** 441-489 (2001).

マグノニックデバイスにおけるノイズ評価

古川諒, 岩場雅司, 関口康爾
(横浜国立大学理工学部)

Noise evaluation in magnon devices
R. Furukawa, M. Iwaba, and K. Sekiguchi
(Yokohama National Univ.)

はじめに

マグノンとはスピン波を量子化した準粒子であり、マグノンを信号キャリアとして活用するデバイスをマグノニックデバイスと言う。マグノニックデバイスは電子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期待されている。一般的な電子デバイスのノイズは $1/f$ ノイズが支配的であるのに対して、マグノニックデバイスのノイズはランダムテレグラフノイズ (RTN) が大きな寄与とすることが近年報告された。本研究はイットリウム鉄ガーネット (YIG) を媒体として用い、入力アンテナから出力アンテナへマグノンを伝搬し、出力側に到達したパワーを観測することで最も単純なマグノン伝送路におけるノイズ特性を明らかにすることを目的とした。

実験方法

本研究で用いた実験回路の概略図を図1に示した。YIGは厚さ $5.1 \mu\text{m}$ 、幅 1.5 mm であり、アンテナ間距離は 5 mm である。図の $+y$ 方向へ静磁場 H_{ex} を印加し、入力アンテナにスピン波共鳴が起きる GHz 帯域の電力を流した。これにより YIG 内の $+x$ 方向にマグノンの静磁波モードを伝搬させた。出力アンテナでスピン波が生じる誘導起電力を検出し、スペクトラムアナライザでスピン波伝送によって生じるノイズを測定した。ノイズの検出と増幅にはダイオード検出器を用いた。

結果および考察

図2にスペクトラムアナライザで観測されたマグノンノイズ ΔV を示す。 ΔV は静磁場 H_{ex} 印加前後における出力の差をとっている。 ($\Delta V = V(H_{ex}) - V(H_{ex} = 0)$) 下の赤色のデータはマグノンが伝搬しない周波数で励起したノイズスペクトルで、上の緑色のデータはマグノンが伝搬する周波数で励起したノイズスペクトルである。図2のデータはマグノンによってノイズが大きくなることを表しており、これらのノイズの発生原因はマグノンの散逸プロセスに関連していると考えられる。スピン波共鳴で起こるマグノン散乱では励起された2つのマグノンが消滅し、周波数が近く逆方向の急速に散逸するマグノンのペアをつくる。ある密度でこれらのプロセスは雪崩のように起こり、マグノンの急激な減衰につながる。この減衰がノイズの発生原因として考えられる。¹⁾

結論

マグノンを伝搬させた時に生じるマグノンノイズの検出に成功した。これらのマグノンノイズについて適切に評価・制御することにより、マグノニックデバイスでのノイズ低減をする指標を見つけることが可能である。また、ノイズ強度が小さくなる周波数や入力電力の条件を見つけることで今後のマグノニックデバイスへの応用が期待できる。

参考文献

- 1) S. Rumyantsev *et al*: Phys. Lett. A, **114**, 090601(2019).

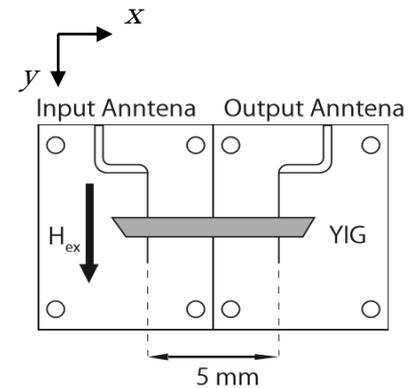


図1 マグノニック基板構成

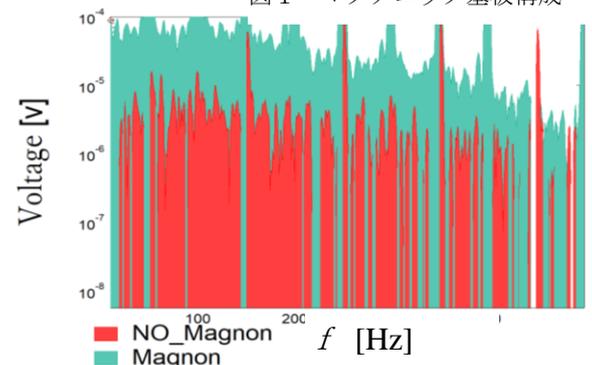


図2 マグノンの低周波ノイズ