

スピバルブ構造を利用したスピントランスファートルクの検出

高橋真央、能崎幸雄
(慶大理工)

Detection of spin-transfer torque using spin-valve structures

M. Takahashi, Y. Nozaki
(Keio Univ.)

はじめに

スピン角運動量の流れであるスピン流は、電荷の流れを伴わずジュール熱が発生しないので、省エネルギーなデバイス実現が期待される。スピン流の生成方法には、ノンローカル手法やスピンホール効果、スピンポンピングなどが報告されている。特にスピンポンピングは効率よくスピン流を生成できるため、注目を集めている。今回、われわれはスピバルブ細線の巨大磁気抵抗効果を測定することにより、磁化反転磁場の変化を介してスピンポンピング由来のスピン流検出を試みた。

実験方法

試料はSi基板上に、超高真空蒸着法、スパッタ、レーザー描画装置を用いて作製した。スピバルブ細線の形状は幅1 μm 、長さ100 μm 、厚さ120 nm (NiFe10 nm/Cu10 nm/NiFe100 nm)とした。このスピバルブ細線の抵抗を直流4端子法により測定し、得られた巨大磁気抵抗効果より各磁性層の反転磁場を見積もった。スピンポンピング由来のスピン流によるスピントランスファートルクを検出するため、細線の下に作製したコプレーナストリップ線路を用いて交流磁場を印加した場合と印加しない場合において、反転磁場の周波数依存性を調べた。また、細線の強磁性共鳴スペクトルは、ベクトルネットワークアナライザを用いて測定した。

実験結果

Fig.1に10 GHzの交流磁場を印加した場合(上)と印加しない場合(下)の巨大磁気抵抗効果の測定結果を示す。Fig.1より、交流磁場なしの場合、-30 ~ -60 Oeの磁場領域で反平行磁化配置を実現している。形状磁気異方性を考慮すると、NiFe100 nmとNiFe10 nmの保磁力は、それぞれ60 Oeと30 Oeであると考えられる。また、NiFe10 nmの反転磁場-30 Oeにおける細線のFMRスペクトルを測定したところ、NiFe100 nmのFMR周波数が9.6 GHzであることがわかった。

次に、交流磁場を印加しながら巨大磁気抵抗効果を測定し、NiFe10 nmの反転磁場の周波数依存性を調べた。Fig.2は、NiFe10 nmの反転磁場の周波数依存性である。周波数が4 GHzよりも高周波化するにつれて保磁力が単調減少し、10 GHzで保磁力が最小となった後、保磁力が増加に転じた。このような共鳴的な保磁力減少は、マイクロ波アシスト磁化反転でよく見られる。しかし、NiFe10 nmのFMR周波数は4 GHz以下であり、マイクロ波アシスト効果では説明できない。一方、保磁力が最小となる周波数は、NiFe10 nmの反転磁場におけるNiFe100 nmの共鳴周波数とほぼ一致している。NiFe100 nmが共鳴すると、スピンポンピング効果によりCu層にスピン蓄積が生じ、磁化と逆向きのスピン流がNiFe10 nmに注入される。したがって、Fig.2の保磁力低下は、スピンポンピング由来のスピン流によるスピントランスファートルクが原因と考えられる。

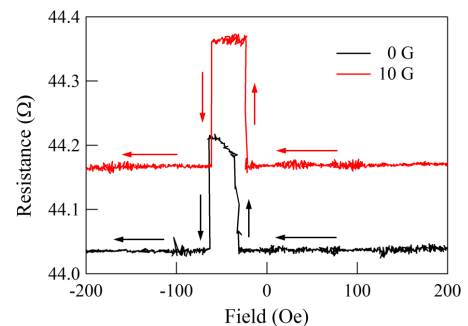


Fig.1 Giant magneto-resistive effect in spin-valve strip. Arrows show the direction of field sweep.

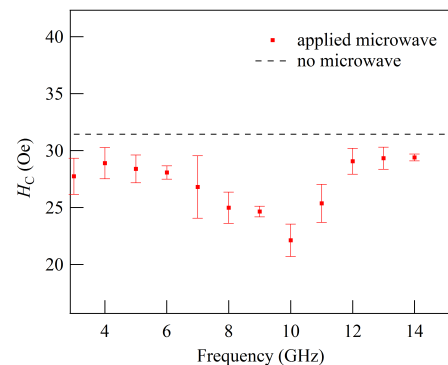


Fig.2 Frequency dependence of coercive fields.

スピン流が人工反強磁性体に及ぼす影響の研究

田中健勝, 森山貴広, 永田真己, 水野隼翔, 関剛斎*, 高梨弘毅*,
千葉貴裕*, 高橋三郎*, Gerrit E. W. Bauer****, 小野輝男
(京大化研, *東北大金研, **デルフト工科大カブリ・ナノ研)

Spin current in synthetic antiferromagnet

K. Tanaka, T. Moriyama, M. Nagata, H. Mizuno, T. Seki*, K. Takanashi*,
T. Chiba*, S. Takahashi*, Gerrit E. W. Bauer*** and T. Ono

(Institute for Chemical Research, Kyoto University, *Institute for Materials Research, Tohoku University
**Kavli Institute of Nanoscience, Delft University of Technology)

1. はじめに

反強磁性材料は、高い共鳴周波数のために高周波スピントロニクス材料として期待されている。我々は、反強磁性磁化ダイナミクスをスピン流で制御すべく、反強磁性結合した磁化にスピン流が与える影響を研究している。我々はこれまでに、人工反強磁性体である $\text{Fe}(2)/\text{Co}(1)/[\text{Cu}(1)/\text{Co}(1)]_{10}/\text{Pt}(4)$ 多層膜(単位 nm) を用いてスピントルク強磁性共鳴による実験を行い、隣り合う磁性層の歳差運動の位相差がゼロの音響モードと位相差が π の光学モードの2つのモードの内、光学モードの共鳴周波数が直流電流の印加によって大きく変化することを報告した(図1) [1]。この共鳴周波数変化は、直流電流が Pt 層に流れることによってスピン流が人工反強磁性体に注入され、層間結合強度が変化することによって起ると考えた。この考えを検証するため、巨大磁気抵抗効果(GMR)曲線の直流電流依存性について調査した。

2. 実験方法および結果

一般的に、共鳴周波数は外部磁場や反磁場などの磁化に作用する有効的な磁場によって決まる。今回、直流電流によって層間結合強度 J が変化したと仮定して行ったマイクロマグネティックシミュレーションによる計算結果を図2に示す。挿入図は、横軸を層間結合強度から飽和磁場(反平行の磁化を平行に揃えるために必要な磁場)に変換した図である。層間結合強度の変化によって図1のように共鳴周波数が変化する場合、層間結合強度の変化に伴って飽和磁場が 3000 Oe 以上変化する、という結果が得られた(図2)。しかしながら、GMR 測定の結果、飽和磁場は直流電流量によってほとんど変化しなかった。これらの結果は、直流電流によって有効磁場が変化するのは磁化が歳差運動している時のみであるという可能性を示唆している。

本講演では、実験結果とともにマイクロマグネティックシミュレーションによる計算結果も踏まえ人工反強磁性体の磁化が直流電流によって受ける影響について議論する。

参考文献

- 1) 田中他、日本物理学会 2014 年年次大会、28aAF-12

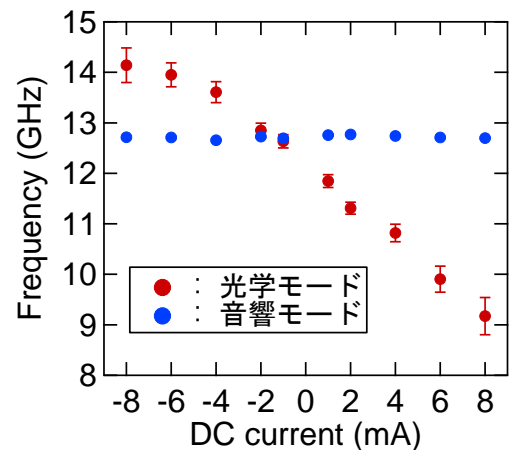


図1 音響モードと光学モードの共鳴周波数の直流電流依存性[1]。

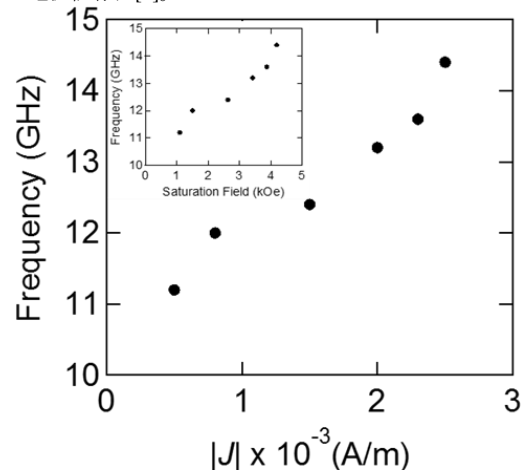


図2 光学モードの共鳴周波数の層間結合強度依存性。挿入図は横軸を層間結合強度から飽和磁場に変換した図。

TbFe/GdFeCo 二層膜の Gilbert ダンピング定数の層構成依存性

東出智寛, 代兵, 大島大輝, 加藤剛志, 岩田聡, 綱島滋*
(名古屋大学, *名古屋産業科学研究所)

Gilbert damping constant of TbFe/GdFeCo bilayers with various layer stacks

T. Higashide, B. Dai, D. Oshima, T. Kato, S. Iwata, S. Tsunashima*
(Nagoya Univ., *Nagoya Industrial Science Research Institute)

はじめに

スピン注入磁化反転は次世代の不揮発性メモリである MRAM の磁化反転手法として利用されている。スピン注入磁化反転は素子サイズの微少化に伴い、磁化の反転に必要な反転電流が減少するため高密度化に有効な手段であるが、10Gbit 級の MRAM 実現には更なる高効率磁化反転手法の開発が求められている。これまでに我々の研究グループは希土類-遷移金属である GdFeCo や GdFeCo/TbFe 二層膜をメモリー層とする垂直磁化型のスピン注入磁化反転素子を作成し、磁化反転臨界電流密度 J_c および J_c と密接な関係のある二層膜のダンピング定数 α を調べてきた^{1,2,3}。今回我々は様々な層構成の TbFe/GdFeCo 二層膜を作成し、そのダンピング定数 α を超短パルスレーザーを用いた pump-probe 法により評価した。

実験方法

超高真空マグネトロンスパッタリング装置により、熱酸化膜付き Si 基板上に substrate / Ta (5 nm) / CuAl (30 nm) / Ta (3 nm) / Tb₁₆Fe₈₄ (x nm) / Gd₂₁(FeCo)₇₉(10-x nm) / Ta (2 nm) 及び二層膜の層順を入れ替えた substrate / Ta (5 nm) / CuAl (30 nm) / Ta (3 nm) / Gd₂₁(FeCo)₇₉(10-x nm) / Tb₁₆Fe₈₄ (x nm) / Ta (2 nm) を成膜した。pump-probe 測定で S/N を向上させるため、この膜上に RF マグネトロンスパッタにより SiN (40 nm) を成膜した。試料の磁化ダイナミクスは、中心波長 1050nm, パルス幅 1 ps, 繰り返し周波数 100 kHz のファイバーレーザーを用いた pump-probe 法により測定した。測定時には膜面法線方向から 50 度傾けた方向に外部磁界を最大 12 kOe 印加した。

結果と考察

Fig. 1 は外部磁界 5 kOe を加えて、GdFeCo(10 nm) 単層膜及び GdFeCo(9 nm) / TbFe(1 nm) 二層膜、および層順の異なる TbFe(1 nm) / GdFeCo(9 nm) 二層膜の歳差運動を pump-probe 法により観察した結果を示している(黒丸)。磁化の歳差運動を減衰振動関数 $e^{-t/\tau} \sin \omega t$ によりフィッティング(実線)し、 ω と τ の外部磁界依存性からダンピング定数 α を求めた。GdFeCo 単層膜の α は 0.046 であったが、TbFe 層を 1 nm 挿入し GdFeCo(9 nm) / TbFe(1 nm) 二層膜とすることで $\alpha = 0.315$ と大幅に増加した。過去に報告した GdFeCo(9 nm) / TbFe(1 nm) 二層膜をメモリー層とするスピン注入素子では、TbFe(1 nm) を挿入することによる J_c の増加は 2 倍程度であった。この結果は、ダンピング定数と J_c の間の関係が単純な比例関係ではないことを示している。層順を逆にした TbFe(1 nm) / GdFeCo(9 nm) 二層膜においては $\alpha = 0.291$ となり、GdFeCo(9 nm) / TbFe(1 nm) 二層膜では GdFeCo 及び TbFe の層順がダンピング定数に与える影響は小さいという結果を得た。

参考文献

- 1) B. Dai et al., IEEE Transactions Magnetics, **49**, issue7, pp.4359-4362(2013)
- 2) B. Dai et al., The 37th Annual Conference on MAGNETICS in Japan(2013)
- 3) T. Higashide et al., IEEE International Magnetics Conference 2015, Beijing, China HP-07 (2015).

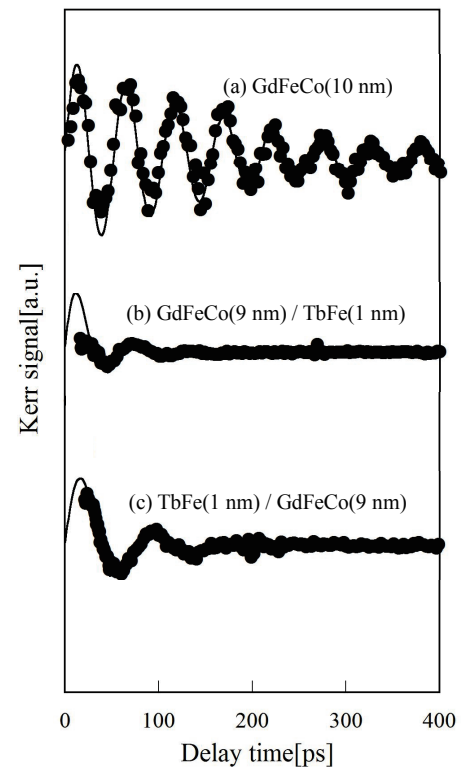


Fig1. TRMOKE waveforms of (a) GdFeCo(10 nm) single layer, (b) GdFeCo(9 nm) / TbFe(1 nm), and (c) TbFe(1 nm) / GdFeCo(9 nm) bilayer under an external field at $H_{ext} = 5$ kOe.

Ta/CoFeB/MgO 薄膜におけるレーザー励起磁化歳差ダイナミクス

○佐々木悠太¹、飯浜賢志¹、安藤康夫¹、水上成美²¹東北大院工、²東北大 WPI-AIMR)

Laser-induced spin precessional dynamics in Ta/CoFeB/MgO thin film

Y. Sasaki¹, S. Iihama¹, Y. Ando¹, and S. Mizukami²¹Dept. of Appl. Phys., Tohoku Univ., ²WPI-AIMR, Tohoku Univ.

はじめに

Ta/CoFeB/MgO 構造において、CoFeB の膜厚を薄くすると、界面磁気異方性によって垂直磁気異方性(PMA)を示す。我々はポンプ・プローブ法を用いた時間分解磁気光学カー効果(TRMOKE)により、Ta/CoFeB/MgO 薄膜の磁化ダイナミクスについて調査した。その結果、垂直磁化 CoFeB 薄膜が応用上重要な低いダンピング定数を示すことを報告したり。ところで、ポンプ・プローブ法はレーザーの加熱によって試料の磁気異方性を減少させ、磁化の歳差を誘起していると考えられている²⁾。レーザーを用いた加熱は、熱アシスト磁化反転への応用が期待されている。しかしながら、昇温に対する磁化ダイナミクスの報告は少ない。そこで、Ta/CoFeB/MgO 構造における磁化歳差ダイナミクスのレーザー強度依存性を調査した。

実験方法および結果

熱酸化膜付シリコン基板上に超高真空マグネトロンスパッタ法を用いて試料を作製した。薄膜構成は Ta(5.0) / CoFeB(1.0) / MgO(2.0) / Al(2.0) (膜厚単位 nm)である。中心波長 800 nm, パルス幅 150 fs の Ti-sapphire レーザーを用いて光学測定を行った。繰り返し周波数は 1 kHz であり、ポンプ光を 365 Hz に変調し、測定時のポンプ光強度 F_p を 0.3-3.8 mJ/cm² の範囲で変化させた。ウォラストンプリズムを用いた差動方式でプローブ光のカー回転角 θ_k を測定した。測定時には外部磁場を 20 kOe 印加し、磁場と膜面垂直方向のなす角度を変化させた。特に、磁場角度を 0° とした場合、加熱による磁化の減少およびその時間変化が測定できる。磁化の二乗に磁気異方性エネルギーが比例すると仮定し、磁化の変化に伴う磁気異方性の変化を LLG 方程式の実効的な磁場に反映させ、磁化の大きさも含めて歳差シグナルの再現を試みた。

Fig. 1 に種々の F_p で測定した歳差シグナルを再現結果(破線)と合わせて示す。ポンプ光が照射する直前(加熱前)のカー回転角 θ_{k0} で θ_k を規格化した。実験結果を再現結果と比較すると、歳差振幅の F_p 強度依存性をほぼ再現できているが、3.8 mJ/cm² における振幅の消失については再現ができていない。Fig. 2 に磁化歳差シグナルの磁場角度依存性を再現結果(実線、破線、点線)と合わせて示す。 F_p の増大に伴う磁場角度依存性の減少は、加熱による磁気異方性の減少に起因すると考えられる。以上の結果から、昇温に伴う磁化の減少により歳差周波数および歳差振幅が減少することが分かった。

本研究は、科研費新学術領域研究「ナノスピン変換科学」(No. 26103004)ならびに基盤研究 S (No. 24226001) の支援で行われた。

参考文献

- 1) S. Iihama, *et al.*, Phys. Rev. B 89, 174416 (2014)
- 2) M. van Kampen, *et al.*, J. Magn. Magn. Mater. **240** (2002) 291-293.

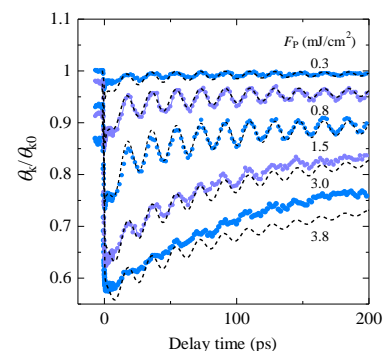


Fig. 1 TRMOKE results in Ta/CoFeB/MgO structure with various pump power (fluence). Solid lines show LLG calculation result.

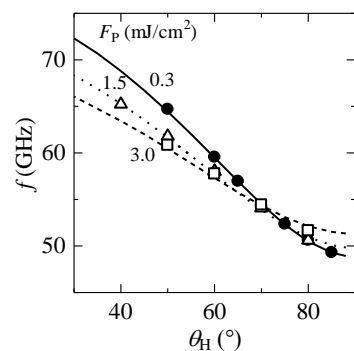


Fig. 2 Magnetic field angle dependence of precession frequency. Solid, dashed and dot line shows LLG calculation results.

Gd / FeCo 超格子膜における磁化ダイナミクスと磁気異方性の相関

佐藤哲也^{1,2}, 塚本新², 吉川大貴³, 若林敬造¹, 渡邊昭廣¹

(¹日本大学生産工学部,²日本大学理工学部,³日本大学大学院理工学研究科)

Correlation between Magnetization Dynamics and Magnetic Anisotropy in Gd / FeCo Superlattice Film

Tetsuya Sato^{1,2}, Arata Tsukamoto², Hiroki Yoshikawa³, Keizo Wakabayashi¹, Akihiro Watanabe¹

(¹College of Industrial Technology, Nihon University, ²College of Science and Technology, Nihon University, ³Graduate School of Science and Technology, Nihon University)

はじめに

近年、STT-RAM等の各種スピントロニクスデバイス実用化のため、磁化ダイナミクスの理解と制御手法確立への要求が増している。そのため、種々の磁性薄膜を対象に測定による探索と理論、双方のアプローチより起源の理解が進められているが、十分ではない。我々はこれまで、フェリ磁性 GdFeCo 合金薄膜において副格子間で角運動量補償現象が発現し、実効 Gilbert ダンピング定数 α_{eff} 及び歳差運動周波数 f が磁化補償温度 T_{CM} より 50 K 程度高温側で著しい増大傾向を示すことを報告している^{1), 2)}。本報告では、副格子間の磁氣的結合が界面のみに制限される垂直磁化 Gd / FeCo 超格子薄膜を対象とし、GdFeCo 合金との磁化ダイナミクスの差異について、磁気異方性との相関に着目し検討を行った。

実験方法・結果

測定試料はマグネトロンスパッタ法にて作製した SiN (60 nm) / [Gd (0.5 nm) / Fe_{87.5}Co_{12.5} (0.5 nm)]₂₀ / SiN (5 nm) / Al₉₀Ti₁₀ (10 nm) / glass sub.とした。中心波長 800 nm、パルス幅 90 fs (半値全幅) のレーザーを光源に用いたポンプ・プローブ法により磁化歳差運動を励起・測定した。測定温度は 80 K ~ 500 K とし、外部印加磁界 $H_{\text{ext}} = 278$ mT を膜面法線より 75° 傾けて印加した。Fig. 1 に、実効 Gilbert ダンピング定数 α_{eff} 及び歳差運動周波数 f の温度依存性を示す。測定温度範囲において α_{eff} : 0.03 ~ 0.47、 f : 9.4 ~ 31.5 GHz と、ともに大きな変化を示すが、最大となる温度域が T_{CM} 近傍であり、 $T_{\text{CM}} + 50$ K 程度で急峻に増大した GdFeCo 合金とは傾向が異なる。このとき、正味磁化 M_{net} と α_{eff} 、 f の相関係数はそれぞれ -0.947、-0.938 と、GdFeCo 合金と比べ強い相関を示した。

そこで、動特性の決定要因解明を目的に、SQUID-VSM にて測定した各温度の実効異方性磁界 (磁化困難軸方向の飽和磁界) H_k との相関を検討した (Fig. 2)。 α_{eff} 、 f と H_k の相関係数はそれぞれ 0.986、0.990 と、ともに強い正の相関を示した。これは M_{net} 及び一軸磁気異方性 K_u それぞれとの相関より強く、Gd / FeCo 超格子薄膜の磁化動特性が M_{net} と K_u の双方と強く関係することを意味する。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 (S1311020) の助成により行った。

参考文献

- 1) C. D. Stanciu, A. V. Kimel, F. Hansteen, A. Tsukamoto, A. Itoh, A. Kirilyuk, and Th. Rasing: *Phys. Rev. B* **73**, 220402(R) (2006).
- 2) A. Tsukamoto, T. Sato, S. Toriumi, and A. Itoh: *J. Appl. Phys.* **109**, 07D302 (2011).

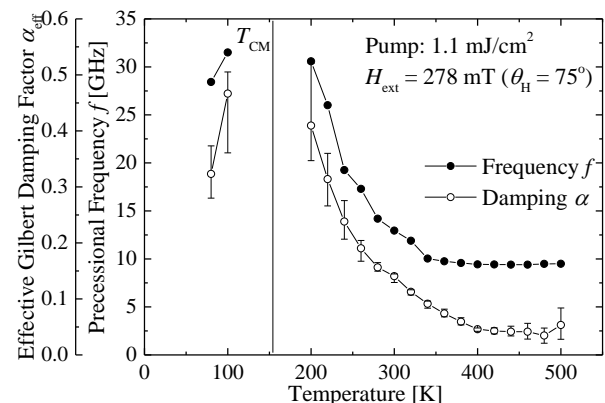


Fig. 1 Temperature dependence of effective Gilbert damping factor α_{eff} and precessional frequency f in [Gd (0.5 nm) / Fe_{87.5}Co_{12.5} (0.5 nm)]₂₀ superlattice film.

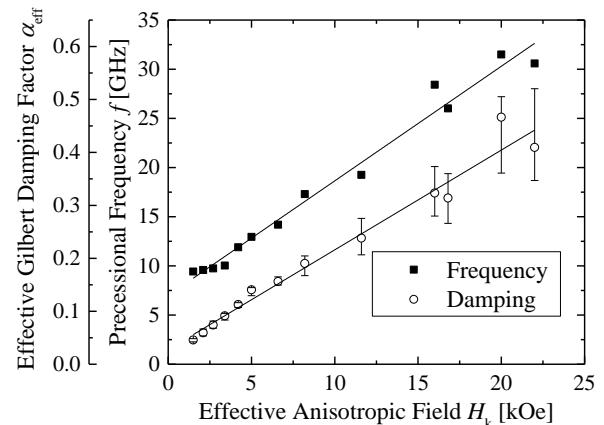


Fig. 2 Correlation between effective anisotropic field H_k and effective Gilbert damping factor α_{eff} / precessional frequency f in [Gd (0.5 nm) / Fe_{87.5}Co_{12.5} (0.5 nm)]₂₀ superlattice film.

スピン電流による backward volume wave の周波数シフト

佐藤奈々*, 関口康爾**,**

(* 慶大理工, **JST さきがけ)

Current-induced frequency shift of backward volume wave

N. Sato*, and K. Sekiguchi**,**

(*Keio Univ., **JST-PRESTO)

1. はじめに

近年、電流によるスピントランスファートルク (STT) を用いたスピン波の周波数や振幅の制御が注目されている^{1,2)}。群速度と位相速度の方向が逆転する異常分散を持つ系における STT の効果を調べるために、magnetostatic backward volume wave (MSBVW) を励起し、周波数の電流密度依存性を測定した。

2. 実験方法

Figure 1(a) に試料の走査型電子顕微鏡像を示す。Si 基板の上に膜厚 190 nm、線幅 $w = 2.0 \mu\text{m}$ の $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ 細線を電子線描画および Ar ミリングを用いて加工した。NiFe 細線に直流電流を印加するための端子と高周波印加用のアンテナを Ti (10 nm)/Au (100 nm) で作製した。高周波アンテナは fig. 1(a) に示すようなメアングラ型にし、励起されるスピン波の波数の分散 Δk を小さくする設計とした。高周波アンテナにベクトルネットワークアナライザ (VNA) を接続し、y 方向に 1 kOe の外部磁場を印加して、MSBVW を励起した。NiFe 細線中に直流電流を印加し、VNA を用いて相互インダクタンスの周波数スペクトルを測定し、伝搬した MSBVW の共鳴周波数を調べた。

3. 実験結果および考察

Figure 1(b) に測定した周波数スペクトルの一例を示す。電流密度 $j = +5 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ の場合の相互インダクタンス ΔL_{21} および ΔL_{12} の実部を示した。MSBVW の伝搬方向を k_{21} から k_{12} に逆転させると、共鳴周波数が $f(k_{21}) = 7.56 \text{ GHz}$ から $f(k_{12}) = 7.19 \text{ GHz}$ に変化した。STT による MSBVW の周波数のシフトを $\Delta f_{\text{STT}} = f(k_{21}) - f(k_{12})$ と定義すると、電流密度に対する Δf_{STT} の変化は fig. 1(c) のようになり、周波数シフトが電流密度に比例していることが分かった。電流密度 $j = +5 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ と $j = -5 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ の場合の周波数シフトを比較すると、800 MHz もの巨大な周波数シフトが得られた。

参考文献

- 1) V. Vlaminck and M. Bailleul, *Science* **322**, 410 (2008).
- 2) K. Sekiguchi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 017203 (2012).

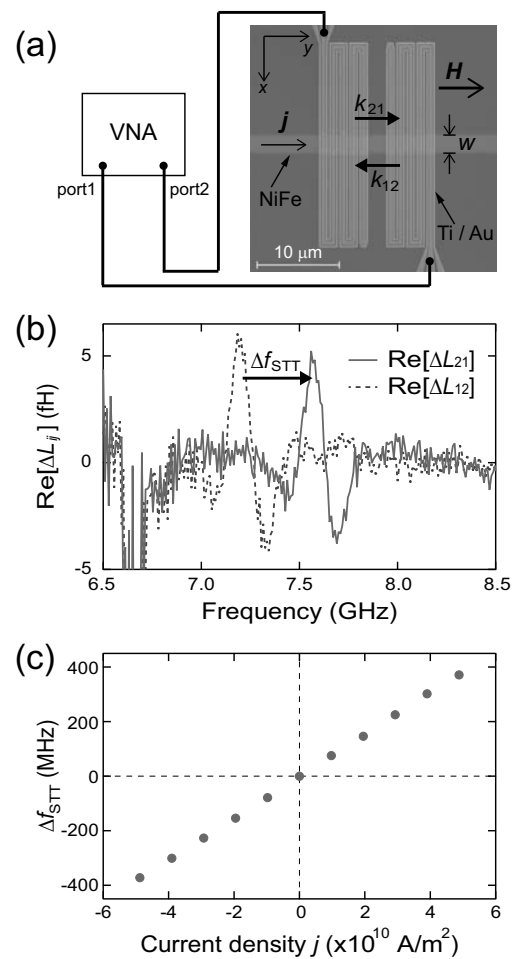


Fig. 1 (a) Scanning electron microscope image of the sample. The spin waves having wavevector k_{21} (k_{12}) propagate in $+y$ ($-y$) direction. (b) The spectra of the real part of the mutual inductance. (c) The current density dependence of the frequency shift Δf_{STT} .