

銀/ビスマス界面を伴うパーマロイ薄膜の磁化ダイナミクス

富田知志, 妹尾駿一, 加藤剛志*, 大島大輝*, 岩田聡*, 細糸信好, 柳久雄
(奈良先端大, *名古屋大)

Magnetization dynamics of permalloy thin films with silver/bismuth interfaces
S. Tomita, S. Seno, T. Kato*, D. Oshima*, S. Iwata*, N. Hosoito, and H. Yanagi
(NAIST, *Nagoya Univ.)

1 はじめに

前回我々は銀 (Ag) /ビスマス (Bi) 二層膜上に形成されたパーマロイ (Py) 薄膜の縦 Kerr 効果が、近赤外領域で増強されることを報告した¹⁾。Ag/Bi 界面では大きな Rashba 型スピン軌道相互作用 (SOI) が期待される。そして Py 膜でのスピンポンピングによって生成されたスピン流が、Ag/Bi 界面での Rashba 型 SOI によって電荷流に変換される逆 Edelstein 効果も報告されている²⁾。このような Rashba 型 SOI が存在する系での Py の磁化ダイナミクスは興味深い³⁾が、実験的にはあまり調べられていない。そこで今回我々は時間分解磁気光学 Kerr 効果 (TRMOKE) 法を用いて、Py/Ag/Bi 三層膜での磁化のダイナミクスを調べる。特にギルバートダンピング (α) の Bi 膜厚依存性に着目する。

2 実験方法

多元パタリング法を用いて Si(100) 基板上に多層膜を作製する。Bi を x nm 成膜したのち、Ag を 5 nm、Py を 30 nm の順に成膜する。 x は 0-40nm の範囲で変化させる。最後に保護膜として窒化シリコンを 40 nm 堆積する。比較のために、Ag を抜いた Py/Bi 二層膜も作製する。ポンプ・プローブ法による TRMOKE 測定には、中心波長 1064 nm、繰り返し周波数 100 kHz、パルス幅 500 fs のファイバレーザをポンプ光源に用いる。プローブパルスには第二高調波を利用する。外部直流磁場は試料面直から 40° 傾けて、最大で 14 kOe を印加する。

TRMOKE 測定ではポンパルスによる消磁から、磁化が歳差運動とともに復元していく過程を時間領域で観測できる。時間波形を減衰振動 $\exp(-t/\tau)\sin 2\pi ft$ でフィッティングして、歳差運動の周波数 f と減衰時間 τ を得る。印加磁場の強度 (H_{ext}) を変えて、異なる f での歳差運動を調べる。そして H_{ext} に対する f のプロットから g 値が得られる。さらに f に対する $1/\tau$ のプロットから、異方性分散と α を実験的に見積もることができる。

3 結果および考察

Fig. 1 に α の Bi 膜厚依存性を示す。赤四角が Py/Ag/Bi での結果を、青丸が対照試料の Py/Bi での結果を表す。Py/Bi では、Bi 膜を 0nm から 40nm まで厚くすると、 α が徐々に増加する。これは元々 Bi 原子は SOI が大きく、Bi 膜がスピンシンクとして働く⁴⁾と考えると妥当である。すなわちポンプ光によって Py に誘起された磁化の歳差運動により、スピン流が生成され、それが Bi 膜に吸い込まれると考えれば良い。一方、赤四角で示すように Ag 層を挿入すると、 α は Bi 膜厚 20nm で極大を持ち、その後は減少に転ずる。Ag 層が無い場合に比べて、Py30nm/Ag5nm/Bi30nm では約半分の α しかない。これは通常のスピンポンピングのみでは説明できない。なお g 値と異方性分散は、Ag の有り/無しに関わらず同じような振る舞いをすることがわかっている。当日は Ag が挿入された Py/Ag/Bi 三層膜での α の変化のメカニズムについて議論する。本研究の一部は科研費 (16K04881) 及び名古屋大学微細加工 PF の支援を受けて行われた。

References

- 1) P. Riego, S. Tomita, K. Murakami, T. Kodama, N. Hosoito, H. Yanagi and A. Berger, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50**, 19LT01 (2017).
- 2) J. C. Rojas Sánchez, L. Vila, G. Desfonds, S. Gambarelli, J. P. Attané, J. M. De Teresa, C. Magén and A. Fert, *Nature Commun.* **4**, 2944 (2013).
- 3) M. B. Jungfleisch, W. Zhang, J. Sklenar, W. Jiang, J. E. Pearson, J. B. Ketterson and A. Hoffmann, *Phys. Rev. B.* **93**, 224419 (2016).
- 4) D. Hou, Z. Qiu, K. Harii, Y. Kajiwara, K. Uchida, Y. Fujikawa, H. Nakayama, T. Yoshino, T. An, K. Ando, X. Jin and E. Saitoh, *Appl. Phys. Lett.* **101** 042403 (2012).

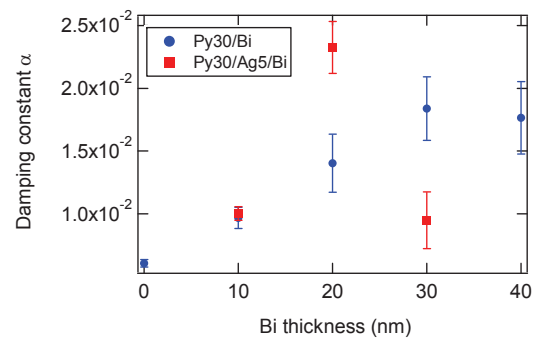


Fig. 1 Gilbert damping α is plotted as a function of Bi-layer thickness. Blue circles and red squares correspond to Py/Bi and Py/Ag/Bi samples, respectively.

新規磁化ダイナミクス計測法による 磁性薄膜におけるダンピング定数と磁気ひずみの評価

遠藤 恭¹, 森 修², 藪上 信¹, 内海 良一², 島田 寛²
(¹ 東北大, ² (株)東栄科学産業)

Estimation of Damping Constant and Saturation Magnetostriction in Magnetic Thin Films
Using New Magnetization Dynamics Measurement Method

Yasushi Endo¹, Osamu Mori², Shin Yabukami¹, Ryoichi Utsumi², Yutaka Shimada²
(¹ Tohoku Univ., ² Toei Scientific Industrial Co.,Ltd)

はじめに

MRAMや磁気ヘッドなどの磁気デバイスを開発していく上で、デバイスを構成する磁性薄膜の磁化ダイナミクスを検討することが重要である。この磁化ダイナミクスは一般に磁化の歳差トルクと制動（ダンピング）トルクからなり、制動トルクを決めるダンピング定数 (α) は磁化ダイナミクスの主要なパラメータのひとつである。我々はこれまでに Ni-Fe 膜や Ni-Fe-M 膜 (M: 添加元素) における α と磁気ひずみとの相関関係を明確にしてきた¹⁾。さらに、これらのパラメータの相関関係を詳細に検討するために、 α と磁気ひずみを同時に計測できる新規磁化ダイナミクス計測法を開発した。本研究では、本計測法を用いて、Fe-M (M=Ni, Si, Ga) 薄膜の α と磁気ひずみを評価した。また、磁気ひずみに関しては従来の計測法と比較検討した。

実験方法

Fe-M (M=Ni, Si, Ga) 薄膜は、0.15 mm もしくは 0.5 mm 厚のガラス基板上に DC マグネトロンスパッタを用いて作製した。作製した薄膜試料の α と磁気ひずみを、新規磁化ダイナミクス計測法を用いて評価した。この新規計測法は以下の通りである。信号検出用プローブにはインピーダンス整合を考慮した 2 ポート型マイクロストリップ線路 (Microstrip Line: MSL) プローブを用いた。作製した薄膜試料を湾曲した試料台に配置して引っ張り応力を付与すると、薄膜試料内部の異方性が変化する。この応力負荷された薄膜試料表面に MSL プローブを近接配置して強磁性共鳴周波数 (f_{res}) を計測する。応力負荷時と無負荷時の薄膜試料の f_{res} の違いから、その飽和磁気ひずみを求める。また、無負荷時の f_{r0} とその半値幅を用いて α を評価する。

結果および考察

図 1 は応力負荷の有無での 10 nm 厚の Fe₈₀Si₂₀ 膜における強磁性共鳴周波数 (f_{res} , f_{r0}) の外部磁界 (H_{ex}) による変化である。曲率半径は約 0.088 m と算出した。応力負荷無負荷に関わらず、 f_{res} および f_{r0} は H_{ex} の増加とともに高い周波数帯へと移動した。また、応力負荷時の f_{res} はいずれの H_{ex} においても f_{r0} よりも低い周波数帯側へ移動し、その差は H_{ex} の増加とともに -115 MHz から -80 MHz となった。これらの変化は、薄膜容易軸方向へ応力負荷により発生する誘導磁気異方性によるものである。これらの値を用いて飽和磁気ひずみを算出すると、-4.46 ppm であり、光てこ法により評価した値 (-11.8 ppm)¹⁾ と若干低くなった。また、 α に関しては、応力無負荷時には 255 Oe 以上の外部磁界ではほぼ一定となった。その値は 0.022 である。当日、他の Fe 系薄膜の結果について報告する。

謝辞

本研究の一部は、東北大学スピントロニクス学術連携研究教育センター、東北大学国際集積エレクトロニクス開発センターの支援のものと行われた。また、本研究の一部は、科研費基盤研究 (B) (No. 17H03226)、科研費特別研究員奨励費 (No. 17F17070) の補助のもとで行われた。

参考文献

1) Y. Endo et al., J. Appl. Phys., 109, 07D336 (2011), IEEE Trans. Magn., 47, 3324 (2011), IEEE Trans. Magn., 48, 3390 (2012).

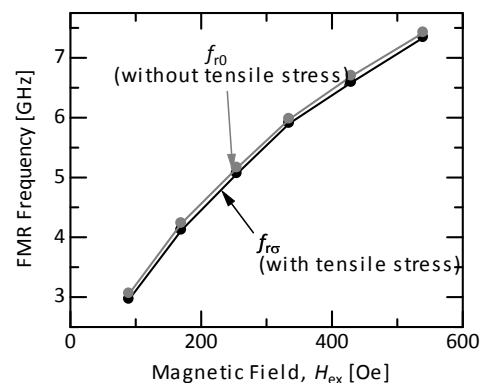


Fig. 1 Dependence of FMR frequencies on the magnetic field for 10-nm thick Fe₈₀Si₂₀ film with and without tensile stress.

反強磁性交換結合膜における共鳴特性の数値解析

福園舞桜, 牙暁瑞, 秋光果奈, 田中輝光, 松山公秀
(九州大学大学院システム情報科学府)

Numerical analysis on magnetic resonance property in a multilayer nanodot
with antiferromagnetic interlayer coupling

M. Fukuzono, X. Ya, R. Akimitsu, T. Tanaka, K. Matsuyama

(Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University)

はじめに

近年, 反強磁性的な結合を有する多層膜について様々な研究が報告されている^[1-3]. 反強磁性結合膜について, 磁化のダイナミクスや共鳴特性を解明していくことは応用上重要である. そこで本研究では, 反強磁性的な層間交換結合を有する2層構造の垂直磁化ナノドットにおける, 磁化のダイナミクスや共鳴特性をマイクロマグネティックシミュレーションによって解析した.

計算方法

計算モデルとして, 反強磁性的に結合している10 nm角の垂直磁化2層構造ナノドットを想定した. 各層の膜厚 t が2, 3, 4 nmについて, 各層の異方性磁界 H_k と層間の交換定数 A_{int} を変化させて磁気ヒステリシス曲線と強磁性共鳴(FMR)の共鳴周波数 f_r を求めた. 計算はLLG方程式による数値計算によって行い, 直線偏波磁界を用いてFMRを励起した. 各層の材料パラメータは, 飽和磁化を 1000 emu/cm^3 , ダンピング定数を0.01とし, A_{int} を負値とすることで反強磁性的な結合をモデル化した.

計算結果

膜面に対して垂直方向にバイアス磁界 H_b を掃引した際の磁気ヒステリシス曲線の一例をFig. 1に示す. 材料パラメータは $t=3 \text{ nm}$, $H_k=32 \text{ kOe}$, $A_{int}=-0.15 \text{ } \mu\text{erg/cm}$ である. A_{int} と H_k , t の組み合わせによって, 零バイアス時に各層の磁化の向きが平行な状態と反平行な状態の2種類の状態が実現できる. H_b の印加履歴によって磁化の状態は異なり, 各磁性層の磁化が平行か反平行かによって f_r の差 Δf_r が生じるという結果をFig. 2に示している. 両層の磁化の向きによって交換等価磁界や反磁界が変化するため Δf_r が生じている.

Fig. 3は $t=2 \text{ nm}$, $H_k=30 \text{ kOe}$ の場合について, A_{int} を $-0.105 \sim -0.120 \text{ } \mu\text{erg/cm}$ の範囲で, また, 励起磁界の周波数を70~87 GHzまで変化させ, 磁化の歳差運動振幅を計算した結果である. 上下層で磁化が平行の場合には A_{int} の値に依存せず $f_r=72.6 \text{ GHz}$ となったが, 反平行の場合には A_{int} の大きさに依存した顕著な共鳴周波数の増大が確認された.

参考文献

- [1] K. Yakushiji et al., Appl. Phys. Express 6, 113006 (2013).
- [2] T. Vemulkar et al., Appl. Phys. Letters 107, 012403 (2105).
- [3] W. Alayo et al., J. Appl. Phys. 106, 113903 (2009).

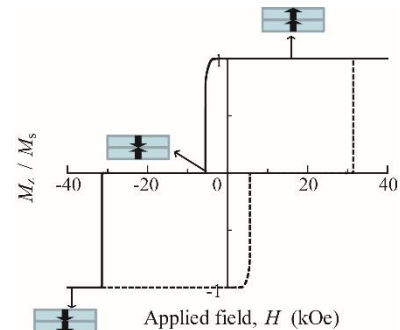


Fig.1. Magnetization configurations and normalized hysteresis curves for anti-ferromagnetic coupling layers.

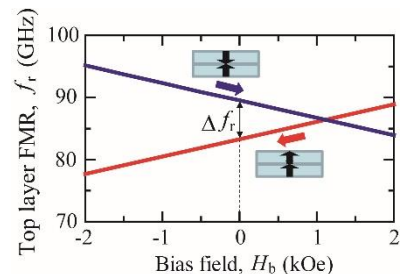


Fig.2. Bias field dependence of the resonance frequency for the top layer.

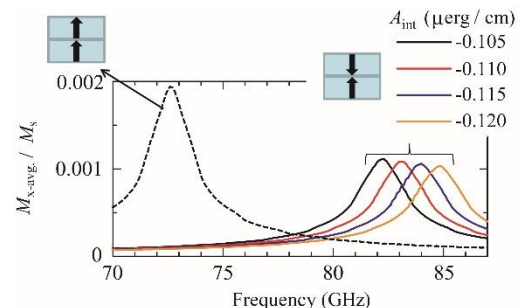


Fig.3. Magnetization precession amplitudes as a function of microwave frequency for bilayer with different magnetization configurations.

CoFeB 薄膜における 4 回対称磁気異方性とスピン波共鳴特性

秋光果奈, 牙暁瑞, 福園舞桜, 田中輝光, 松山公秀
(九州大学 大学院システム情報科学府)

Experimental study on four-fold anisotropy and spin wave resonance property of CoFeB thin films

R. Akimitsu, X. Ya, M. Fukuzono, T. Tanaka, and K. Matsuyama
(ISEE, Kyushu University)

はじめに

スピン波をより効率的に伝搬するためには、ダンピング定数が小さい強磁性材料が必要になる。また、面内 4 回対称磁気異方性の導入により面内 2 方向が磁化安定状態となるため、スピン波伝播の ON・OFF 機能や、素子設計の自由度向上が可能となる。本研究では、ダンピング定数の小さな $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ 薄膜に着目し、4 回対称磁気異方性の発現条件を調べると共に、同薄膜パターンを配したコプレーナ伝送線路によりスピン波共鳴特性を評価した。さらにマイクロマグネティクスシミュレーションにより測定結果の数値解析を行った。

実験方法

RF マグネトロンスパッタリングにより、MgO(100)基板上に 200°C, 300°C, 400°C の成膜温度 (T_s) で CoFeB 薄膜 (膜厚 40 nm) を作製した。成膜条件は、Ar ガス圧: 5 mTorr, 投入電力: 85 W, 成膜レート: 0.17 Å/sec とした。光学露光、及びイオンミリングにより CoFeB 薄膜を細線状 (幅 $L_x = 18 \mu\text{m}$, 細線長 $L_y = 1 \text{mm}$) に微細加工し、80 nm の SiO_2 スペーサ層を介してコプレーナ伝送線路を形成した。シグナルジェネレータからのマイクロ波を入力とし、スペクトルアナライザにより通過特性を評価した (Fig. 2(a))。マイクロマグネティクスシミュレーションは、磁性細線幅方向に計算要素分割し、LLG 方程式を有限差分法で数値的に解くことにより行った。

実験結果

Fig. 1 は VSM により測定した残留磁化比の磁界印加角依存性を示している。同図で 0° 方向は、MgO 基板の [100] 方向を示している。Fig. 1 より、 $T_s \geq 300^\circ\text{C}$ では、MgO <100> (100) 方向を容易方向とする面内 4 回対称磁気異方性が誘導されていることが分かる。XRD 解析結果からは、300°C 以上の成膜において、微結晶化した CoFe の形成が示唆されており、これが 4 回対称磁気異方性の発現要因と考えられる。 $T_s = 200^\circ\text{C}$ の場合、MgO [100] 方向を容易方向とする一軸磁気異方性が生じている。これは、 $T_s \geq 300^\circ\text{C}$ での成膜に比べ、より微細な結晶粒が形成されており、十分な結晶磁気異方性が誘導されていないためと推察している。

Fig. 2(b) はマイクロ波通過出力の吸収ディップから評価した共鳴周波数のバイアス磁界依存性を示している。実験と同一の素子設計及び CoFeB 薄膜の材料磁気定数を仮定して行ったシミュレーション結果の一例を Fig. 3 に示す。同図は細線幅方向に沿った磁化の歳差運動振幅の変化を表しており、励起周波数に応じて 1 次モードと 3 次モードの定在スピン波が励起されることが分かる。Fig. 2(b) には、各モードの定在スピン波共鳴周波数を実験結果と比較して示している。シミュレーションにおける 1 次モードと 3 次モードの共鳴周波数差が小さいため ($f_{\text{res,3rd}}/f_{\text{res,1st}} = 1.03 \sim 1.13$)、実験結果における励起モードの特定は困難であるが、共鳴周波数及びそのバイアス磁界依存性についてはシミュレーション結果と実験値とは概ね一致している。

参考文献

- 1) X. Ya, et al, *IEEE Trans. Magn.*, **51** (2015)

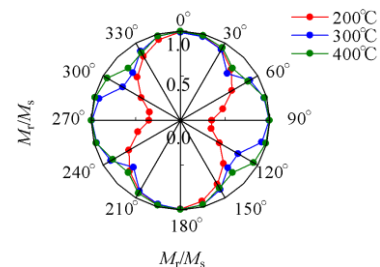


Fig. 1. Angular dependence of remanent magnetization ratio measured for CoFeB films fabricated with different sputtering temperature.

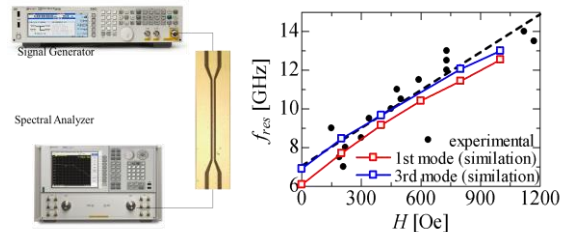


Fig. 2. (a) The schematic of designed measurement system. (b) The dependence of resonance frequency f_{res} on bias field H .

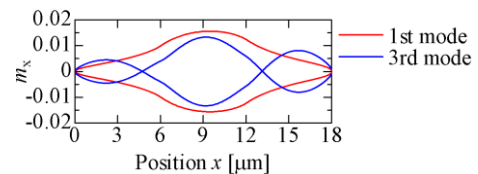


Fig. 3. The magnetization configuration of 1st and 3rd standing spin wave modes

垂直磁化細線における電圧励起スピン波の共鳴特性

牙暁瑞, 福園舞桜, 秋光果奈, 田中輝光, 松山公秀
(九州大学 大学院システム情報科学府)

Voltage-induced SW resonance properties in perpendicular nanowires

X. Ya, M. Fukuzono, R. Akimitsu, T. Tanaka, and K. Matsuyama
(ISEE, Kyushu University)

はじめに

近年, CoFeB 等の強磁性超薄膜に高周波電圧を印加し, 磁性薄膜の界面磁気異方性を変調することでスピン波を励起する研究報告がなされている^{1,2)}. 電圧による異方性制御 (VCMA) では, ナノサイズの局所領域におけるスピン波の励起が可能であり, 低消費電力でスピン波デバイスの小型化にも適している. 本研究では, 垂直磁気異方性を有するナノワイヤを対象とし, VCMA によるスピン波の局所励起と, そのスピン波共鳴特性について数値解析を行った. また, ナノワイヤのサイズ効果や, 異方性磁界の変調振幅とスピン波の励起強度との関係について調べた.

計算方法

CoFeB/MgO 界面における垂直磁気異方性と, 電圧印加による異方性変調を想定し, マイクロマグネティクスシミュレーションを行った. 材料定数と素子構造は以下のように設定した: 飽和磁化 $M_s = 1600 \text{ emu/cm}^3$, 垂直磁気異方性 $K_u = 1.58 \times 10^4 \text{ erg/cm}^3$, ダンピング定数 $\alpha = 0.01$, ワイヤ長 $L_x = 400 \text{ nm}$, 幅 $L_y = 20 \text{ nm}$, 膜厚 $t = 0.8 \text{ nm}$. ナノワイヤの中央に VCMA 制御用として幅 $L_g = 20 \text{ nm}$ のゲート導体を仮定し, 導体下部における磁気異方性磁界の正弦波状変調により ($H_k = 2 K_u / M_s + \Delta H_k \sin(2\pi f_{\text{exc}} t)$), ワイヤ長軸方向に伝播するスピン波を励起した.

計算結果

Fig. 1(a) に歳差運動振幅の励起周波数 (f_{exc}) 依存性を示す. バイアス磁界 (H_b) を印加しない場合, $f_{\text{exc}} = 4.26 \text{ GHz}$ で歳差振幅が最大となる. このときのスピン波の様態は, 細線長軸方向の端部を節とする 1 次モード定在波であった. また, 歳差運動周波数は励起周波数の 1/2 (=2.13 GHz) であり, パラメトリック励起となっている. $H_b = 200 \text{ Oe}$ をワイヤ長軸方向に印加した場合には, $f_{\text{exc}} = 2.09 \text{ GHz}$, 2.60 GHz , 3.4 GHz の各周波数では, 励起周波数と歳差運動周波数は一致しており (線形励起), 各々 1 次, 3 次, 5 次の定在スピン波共鳴が確認された. 一方, $f_{\text{exc}} = 4.17 \text{ GHz}$ ではパラメトリック励起が生じており, 歳差運動周波数は 2.09 GHz であった.

Fig. 2 は, 磁気異方性磁界の変調振幅 (ΔH_k) と共鳴時の歳差運動振幅との関係を示す. 線形励起 ($H_b = 200 \text{ Oe}$ @ $f = 2.09 \text{ GHz}$) においては, ΔH_k の増加に伴い, 歳差振幅が連続的に増大するが, パラメトリック励起の場合 ($H_b = 0 \text{ Oe}$ @ $f = 4.26 \text{ GHz}$, $H_b = 200 \text{ Oe}$ @ 4.17 GHz) には, ΔH_k が閾値を超えると, 磁化振幅が急激に増大することが分かる.

Fig. 3 にスピン波共鳴特性の L_x 依存性を示す. L_x の縮小に従い, 分散関係を反映した共鳴周波数の上昇と, 励起領域の狭小化による歳差振幅の増大がみてとれる.

参考文献

- [1] Yoichi Shiotani, Takayuki Nozaki, Frédéric Bonell, Shinichi Murakami, Teruya Shinjo and Yoshishige Suzuki, *Nat. Mater.*, **11**, 39-43 (2011).
- [2] Roman Verba, Vasil Tiberkevich, Ilya Krivorotov, and Andrei Slavin, *Phys. Rev. Applied*, **1**, 044006 (2014)

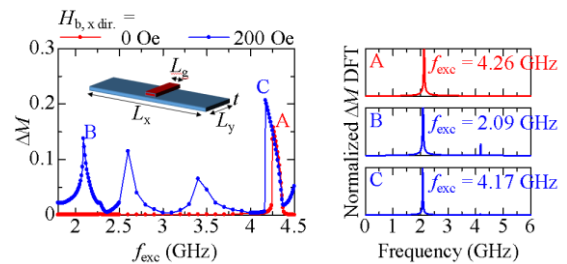


Fig. 1. (a) VCMA resonance property when $H_b = 0 \text{ Oe}$ and 200 Oe . (b) The resonance spectra of the micromagnetically calculated magnetization precession under the gate region.

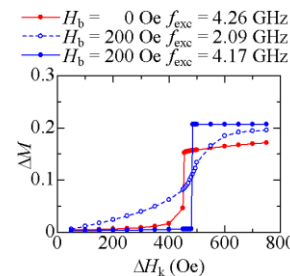


Fig. 2. The dependence of the precession amplitude on the excitation amplitude.

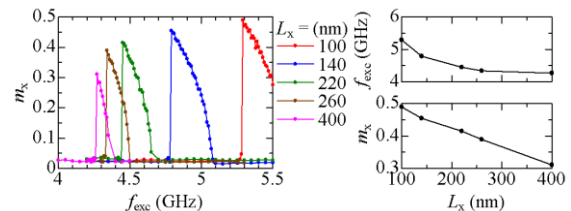


Fig. 3. The resonance properties of nanowires with various wire length L_x .