## マイクロ波磁界印加下における熱活性磁化反転の理論

A theoretical study of thermally activated magnetization switching under microwave assistance

○首藤 浩文¹、工藤 究¹、永澤 鶴美¹、金尾 太郎¹、水島 公一¹、佐藤 利江¹、岡本 聡²、

菊池 伸明<sup>2</sup>、北上 修<sup>2</sup>、島津 武仁<sup>2</sup>(1 東芝研究開発センター、 2 東北大)

°Hirofumi Suto<sup>1</sup>, Kiwamu Kudo<sup>1</sup>, Tazumi Nagasawa<sup>1</sup>, Taro Kanao<sup>1</sup>, Koichi Mizushima<sup>1</sup>, Rie Sato<sup>1</sup>, Satoshi Okamoto<sup>2</sup>,

Nobuaki Kikuchi<sup>2</sup>, Osamu Kitakami<sup>2</sup>, and Takehito Shimatsu<sup>2</sup> (1 Corporate R&D Center, Toshiba; 2 Tohoku Univ.)

## E-mail: hirofumi.suto@toshiba.co.jp

磁性体にマイクロ波磁界を印加することにより磁化振動を励起し、反転磁界を低減するマイク ロ波アシスト磁化反転が、次世代の磁気記録に必要とされる高保磁力の媒体材料に対応した書き 込み手法、および3次元磁気記録における層選択の書き込み手法として注目されている[1-4].こ れらの技術の実用化のためには、マイクロ波磁界印加下における磁化励起を、磁化反転に至る大 振幅の領域まで理解することが必要である.また、有限温度における磁化反転は、反転障壁が存 在する条件でも熱による磁化揺らぎの影響で確率的におこるため、マイクロ波磁界下における反 転障壁高さを見積もる必要がある.

本研究では、z方向の一軸磁気異方性( $H_{ani}$ )を持つ単磁区の磁性体に対し、z方向の DC 磁界 ( $H_z$ )と、x-y面内を回転するマイクロ波磁界( $H_{rf}$ )とを印加した場合の磁化ダイナミクスを以 下の手法を用いて解析した.まず、このような系を扱うのに適している、マイクロ波磁界に同期 した回転座標を導入し[5,6]、回転座標における LLG 方程式から、 $H_z$ と $H_{rf}$ の効果を含んだポテン シャルである、有効エネルギーを計算した.次に、有効エネルギーから、2 種類の特異的な磁化 挙動、①回転座標系における磁化の固定点:マイクロ波磁界に同期した磁化運動に対応、および ②回転座標系におけるリミットサイクル:マイクロ波磁界に対して準周期的(quasi-periodic)な 磁化運動に対応、の有無と安定性を求めた.最後に、この結果にもとづき、磁化反転の経路を分 類し、それぞれの反転経路における障壁高さを計算した.

反転障壁の等高線(Fig. 1(a))から、マイクロ波磁界下における反転磁界は、マイクロ波磁界 の周波数が上昇するにつれ低下し、ある周波数で急激に上昇することがわかる.これは、実験的 に知られているマイクロ波アシスト磁化反転の挙動と一致する.この反転障壁の等高線は、磁化 の熱揺らぎを考慮したマクロスピンシミュレーションから見積もった反転確率(Fig. 1(b))の等確 率線と一致する.また、ある条件下においては、反転前の状態と反転後の状態の他にも安定な中 間状態が生じ、磁化反転が2段階で起こる.



Fig. 1.(a) Color map of barrier height for switching calculated for  $H_{\rm rf}/H_{\rm ani} = 0.05$ . Black lines are the boundaries between the conditions with different switching paths. Hatched region shows the condition in which two-step switching occurs. (b) Color map of switching probability obtained from finite-temperature macrospin simulations for a cylindrical magnet with a diameter of 50 nm and a thickness of 5 nm. The simulation parameters are as follows: saturation magnetization is 600 emu/cm<sup>3</sup>,  $H_{\rm ani} = 3600$  Oe,  $H_{\rm rf} = 180$  Oe, and T = 300 K. These values yield the intrinsic FMR frequency of approximately 10 GHz; the horizontal axis up to 10 GHz and the vertical axis up to 3.6 kOe are comparable to the respective axes in (a).

[1] C. Thirion et al., Nature Mater. 2, 524 (2003). [2] J.-G. Zhu et al., IEEE Trans. Magn. 44, 125 (2008). [3] S. Okamoto et al., Phys. Rev. Lett. 109, 237209 (2012). [4] H. Suto et al., Appl. Phys. Express 8, 023001 (2015). [5] G. Bertotti et al., Phys. Rev. Lett. 86, 724 (2001). [6] T. Taniguchi, Phys. Rev. B 90, 024424 (2014).

本研究は(独)科学技術振興機構(JST)の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の支援によっておこなわれた。