

## 磁気渦構造を応用した強磁性トンネル接合磁場センサ

遠藤基、大兼幹彦、永沼博、安藤康夫  
(東北大院工)

Magnetic tunnel junction sensor applying magnetic vortex state

M. Endo, M. Oogane, H. Naganuma and Y. Ando  
(Tohoku Univ.)

### はじめに

近年、強磁性トンネル接合 (Magnetic Tunnel Junction, MTJ) を応用した磁場センサが注目を集めている<sup>1)</sup>。他方、ディスク状の強磁性体は特定のアスペクト比 (厚さ/半径) の条件下で、磁化がディスクを中心として渦巻くような磁化構造をとることが知られている。これは磁気渦構造 (Magnetic Vortex State, MVS) と呼ばれており、磁化曲線の一部に線形な領域が現れる。MVS の様な非一様な磁化構造を用いることで、MTJ 形状の工夫によりセンサ特性の線形性や感度の向上が期待できる。本研究ではディスク径 100  $\mu\text{m}$  程度の MVS 層を有する MTJ 磁場センサの作製・評価を目的とした。

### 実験方法

成膜は超高真空マグネトロンスパッタ法を用いて行った。膜構成は Si/SiO<sub>2</sub>/Ta (5)/Ru (20)/Ta (5)/CoFeB (80)/MgO (2.0)/CoFeB (3)/Ru (0.85)/CoFe (5)/IrMn (10)/Ta (5)/Ru (8) (膜厚:nm) とした。MTJ はフォトリソグラフィプロセス及び Ar<sup>+</sup>ミリングによりディスク状に加工した。MTJ の直径はそれぞれ 10, 20, 30, 50, 70, 100  $\mu\text{m}$  とした。素子の特性評価は直流四端子法により行った。

### 実験結果

Fig. 1 にディスク状の MTJ の磁気抵抗曲線を示す。MTJ 飽和状態から磁場を減少させると、磁気渦コア生成による磁気抵抗曲線の変化が観測された。また、100  $\mu\text{m}$  以下のディスク径で MTJ はセンサ型の特性を有することがわかった。Fig. 2 に MTJ の直径とゼロ磁場近傍の MTJ 磁場センサ感度の関係を示す。膜厚を一定とした場合、センサの飽和磁場減少に伴って MTJ 磁場センサの感度は増加することが確認できた。この結果は、ディスク径が厚さに対して十分に大きい場合に MVS の初期帯磁率がディスク径に比例することと対応している。従って、MTJ の自由層において MVS が実現しており、その性能はディスク径に比例するといえる。

### 謝辞

本研究の一部は JST 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)」、及び東北大学国際高等研究教育院の支援により行われた。

### 参考文献

- 1) D. Kato *et al.*, Appl. Phys. Express **6**, 103004 (2013).

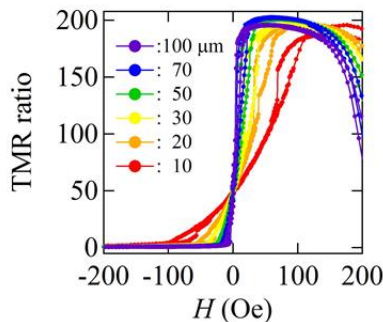


Fig. 1 Magnetoresistance curves of disk-shaped MTJ.

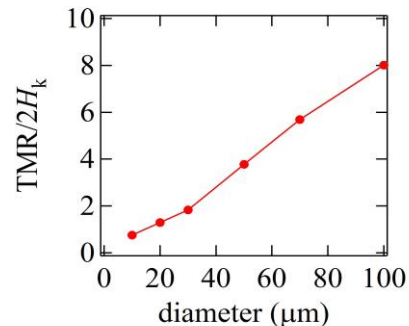


Fig. 2 Sensitivity of disk-shaped MTJ in the vicinity of zero field.

# ピン層からの漏れ磁場が磁気センサ型強磁性トンネル接合の リニアリティに与える影響

中野貴文, 佐野豊, 大兼幹彦, \*矢野敏史, \*青建一, 永沼博, 安藤康夫  
(東北大, \* (株) デンソー)

Influence of stray field from pinned layer on linearity in magnetic tunnel junctions for magnetic sensor

T. Nakano, Y. Sano, M. Oogane, \*T. Yano, \*K. Ao, H. Naganuma, and Y. Ando  
(Tohoku Univ., \*DENSO CORP.)

## はじめに

強磁性トンネル接合 (MTJ) の磁気センサ応用を目指した研究が盛んにおこなわれている。磁気センサに必要な磁場に対する線形な抵抗変化 (MR) を得る方法として、垂直磁化膜をセンシング層に利用することが挙げられる。我々は垂直磁化 CoFeB センシング層を有する MTJ における線形な MR カーブ, ならびに感度とリニアリティの関係性を報告した<sup>1)</sup>。これまで報告した MTJ におけるリニアリティは、単純な磁化回転モデルから予想される値と一致しておらず、その原因としてピン層端部からの漏れ磁場の影響が考えられる。本研究では、微細加工プロセスのイオンミリング深さを変化させ、リニアリティに対する影響を調査した。

## 実験方法

DC/RF マグネトロンスパッタにより、次の試料を作製した：Si substrate / Ta (5) / Ru (10) / Ir<sub>22</sub>Mn<sub>78</sub> (10) / Co<sub>75</sub>Fe<sub>25</sub> (2) / Ru (0.85) / Co<sub>40</sub>Fe<sub>40</sub>B<sub>20</sub> (3) / MgO (2) / Co<sub>40</sub>Fe<sub>40</sub>B<sub>20</sub> (1.4) / Ta (5) / Ru (8) (nm)。フォトリソグラフィ法により 80 × 40 μm<sup>2</sup> の素子に微細加工した。このとき、Ar イオンミリングのストップ位置を次の 3 通りに変化させた：(1) MgO バリア中、(2) CoFeB ピン層中、(3) Ru 下部電極中。ミリング深さの検出には、四重極質量分析計を内蔵するイオンミリングプローブを用いた。微細加工した素子は、真空中において面内磁場 1 T を印加しながら、300°C で 1 h 熱処理をおこなった。MR 測定には面内磁場下における直流 4 端子法を用いた。

## 実験結果

Fig.1 にミリング深さを変えた各 MTJ の代表的な MR カーブを示す。いずれの MTJ においてもゼロ磁場近傍で線形な MR カーブが得られた。一方、それぞれの MR カーブが極大値をとる磁場、すなわち積層フェリ (SyF) 構造中の反平行な磁化配列が崩れ始める spin-flop 磁場の大きさはミリング深さによって異なる。これはミリングにより SyF 構造中の強磁性層の体積が減少し、ゼーマンエネルギーの大きさが変化したためだと考えられる。得られた MR カーブからリニアリティ (±100 Oe の範囲で抵抗の実験値とその近似直線の差をフルスケールで規格化した値 [%FS]) を算出した。素子間のバラつきはあるが、MgO バリアでミリングを止めた MTJ が最も良いリニアリティを示した (0.48 %FS)。ミリング深さを最適化することにより、ピン層からの漏れ磁場を低減し、リニアリティを改善できることが明らかになった。

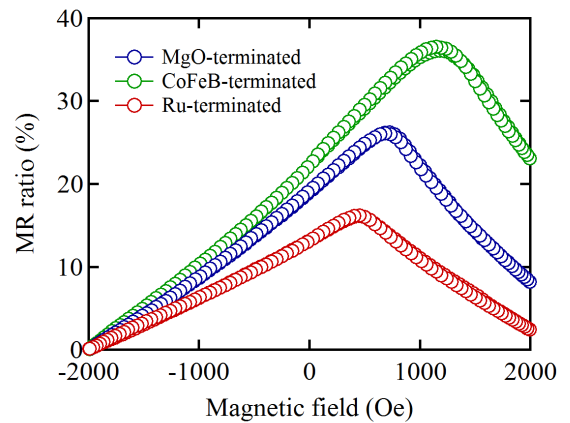


Fig. 1. MR curves for the MTJs with the different milling depths.

## 謝辞

本研究は東北大学国際集積エレクトロニクス研究開発センター (CIES) による支援を受けた。

## 参考文献

- 1) T. Nakano, *et al.*, submitted to IEEE Trans. Magn.

# 追酸化処理 MgO バリア MTJ の TMR 特性と界面元素拡散

吉田 親子, 能代 英之, 山崎 裕一, 杉井 寿博  
(富士通株式会社)

Tunnel magnetoresistance properties and interface diffusion of MTJs with post-oxidized MgO barriers  
Chikako Yoshida, Hideyuki Noshiro, Yuichi Yamazaki, Toshihiro Sugii  
(Fujitsu Limited)

## はじめに

CoFeB/MgO/CoFeB を基本構造とする垂直磁化方式の磁気トンネル接合(MTJ)は、超低消費電力不揮発性メモリの有力な候補として、活発に研究開発が行われている。メモリの微細化が進むとともに MgO バリアを薄膜化する必要があり、それに伴いリークスポットの発生率が增大することが問題となっている(1)。MgO バリア薄膜は、MgO 焼結体ターゲットを直接スパッタにより形成するのが一般的である。我々は、MTJ ショートの原因を、未酸化の Mg が粒界等に存在することに起因すると考えた。そこで、成膜後に酸素を導入して酸化することで、未酸化の Mg が酸化されショート素子が減少するのではないかと考えた。本報告では、追酸化処理を行った MgO バリアを持つ MTJ を作製しその特性を調べた。また、走査型透過電子顕微鏡(STEM)を用いた電子エネルギー損失分光(EELS)により、界面の元素拡散を調べたので報告する。

## 実験方法および結果

MgOバリアは面積抵抗RAを約  $7 \Omega \cdot \mu m^2$  になるように、以下の条件で作製した。

後酸化処理なし：膜厚0.93 nm

後酸化処理あり：膜厚0.86 nm+酸素導入5 s

これらのMgOバリアを用い、図1(a)示す構造のMTJを作製し、そのMRループを測定した。

図1(b)(c)に抵抗-MR比の関係を示す。後酸化処理をすると、平均のMR比は約78%から約94%に向上し、また、ショート素子の割合も約11%から1%未満に減少することがわかった。

次に後酸化処理により MTJ の特性が改善した理由を探るため、TEM-EELS 深さ方向分析を行い、界面における元素拡散を調べた。その結果、後酸化処理を行った MgO の場合、表面側の MgO/CoFeB 界面近傍で Fe が酸化している可能性があることがわかった。一方、Fe が酸化されたためか、MgO 中への Fe の拡散は低減していることがわかった。ショート

素子低減は、MgO バリア中への Fe の拡散と関係があるかもしれない。また、MR 比の改善は、後酸化処理により局所的なリークスポットが減少し、TMR に寄与しない電流が抑制されことによると思われる。この後酸化処理を行った MgO バリアは大容量微細化メモリ材料として有望であると思われる。

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進(ImPACT)プログラムにより、科学技術振興機構を通して委託されたものです。また、本研究の一部は、経済産業省と NEDO の「低炭素社会を実現する超低電圧デバイスプロジェクト」に係わる業務委託として実施した。

## 参考文献

(1) K. M. Bhutta, et al., J. Magn. Magn. Mater. 321 (2009) 3284.

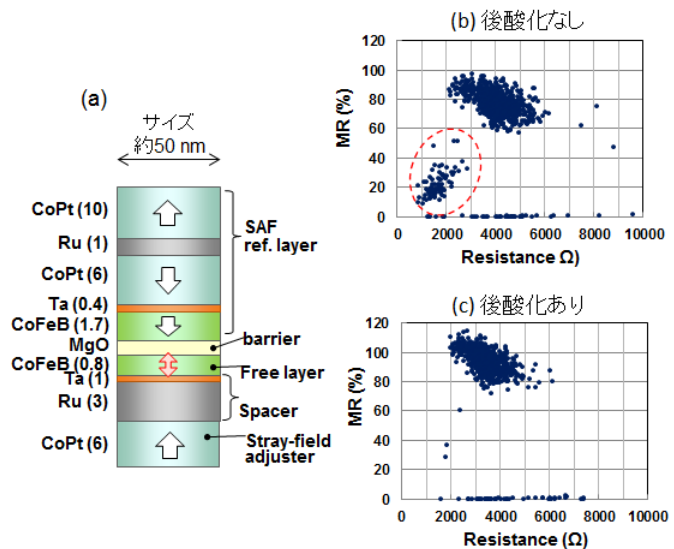


図1 (a) MTJ の構造、抵抗-MR 比分布：(b)後酸化なしの場合、(c)後酸化ありの場合。

# 逆磁歪効果を用いた STT-MTJ のスイッチング電流削減

高村陽太<sup>1</sup>, 中川茂樹<sup>1</sup>, 菅原聡<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>東京工業大学大学院理工学研究科電子物理工学専攻, <sup>2</sup>東京工業大学像情報工学研究所)

Inverse-magnetostriction-induced switching current reduction for spin-transfer torque MTJs

Yota Takamura<sup>1</sup>, Shigeki Nakagawa<sup>1</sup>, and Satoshi Sugahara<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Dept. of Physical Electronics, Tokyo Tech, <sup>2</sup>Imaging Science and Engineering Lab., Tokyo Tech)

## はじめに

スピントランスファトルク強磁性トンネル接合 (STT-MTJ; 以下, MTJ と略記) は, 磁気抵抗メモリ (STT-MRAM) や不揮発性を利用したロジックシステムなどの不揮発性メモリ素子として研究・開発が進められている。しかし, MTJ のスピン注入磁化反転 (CIMS) に必要な電流密度  $J_c$  は小さくなく, 垂直磁化膜を用いた新型 MTJ や, デバイスサイズの微細化などによって MTJ への書き込み電流の削減が試みられているが十分ではない。

$J_c$  の低減方法の一つとして, CIMS 時の磁化反転のエネルギーバリア  $\Delta$  を低減させる手法がある。Saito らは, 逆磁歪効果を利用することで磁化反転磁界を低減させる技術を磁場書換型 MTJ に応用することを提案した<sup>1)</sup>。このような圧力印加による逆磁歪効果は, CIMS における  $J_c$  低減にも有効であると考えられる。MTJ のフリー層に磁歪係数が大きな強磁性材料を用い, 圧電体等により圧力を印加すれば  $J_c$  を低減できる可能性がある。近年の圧電材料の高性能化により, 集積回路の動作電圧程度で数百 MPa の圧力が駆動できる。本研究では, 逆磁歪効果と CIMS に援用する手法を提案し, その効果を解析した。

## 計算方法

計算は, STT を含む LLG (Landau-Lifshits-Gilbert) 方程式<sup>2)</sup>を用いて行った。逆磁歪効果は, 磁化の内部エネルギーに磁気弾性エネルギーを導入することで, LLG 方程式に組み込んだ。温度は考慮せず, コヒーレントな磁化反転のみを対象とした。<sup>2)</sup>

MTJ の直径は 20nm, フリー層の厚さは 2 nm とした。フリー層の物性値は, 超磁歪材料である SmFe<sub>2</sub> のバルク値<sup>3)</sup>を参考にし, 単位体積当たりの飽和磁気モーメントを 0.6 T, 磁歪係数を -1258 とした。また, 垂直方向の結晶磁気異方性定数は  $\Delta$  が室温において  $56k_B T$  となるように  $0.53 \text{ MJ/m}^3$ , ダンピング定数  $\alpha$  は, 0.005 とした。

## 計算結果

図 1 にフリー層の面内に圧縮方向に圧力を印加した場合における磁化の内部エネルギーの角度依存性を示す。圧力の印加により磁気異方性が変化する逆磁歪効果がよく再現された。また, 圧力を印加するにつれ  $\Delta$  が減少することが分かる。図 2 に  $J_c$  の圧力依存性を示す。圧力を強めると,  $J_c$  はほぼ線形に減少する。特に 190MPa 程度の圧力を印加したとき,  $J_c$  は, 圧力を印加しない場合, コヒーレントモデルでも  $J_c$  に比べて 50% 程度の削減も可能であることがわかった。有限温度では  $J_c$  ははるかに低減する。当日は温度・エラーレート等も考慮し, 議論を行う。

## 参考文献

- 1) N. Saito, M. Yamada, and S. Nakagawa, J. Appl. Phys. **103**, 07A706 (2008).
- 2) J. Z. Sun, Phys. Rev. B **62**, 570 (2000).
- 3) H. Samata, N. Fujiwara, Y. Nagata, T. Uchida, and M. D. Lan, Jpn. J. Appl. Phys. **37**, 5544 (1998).

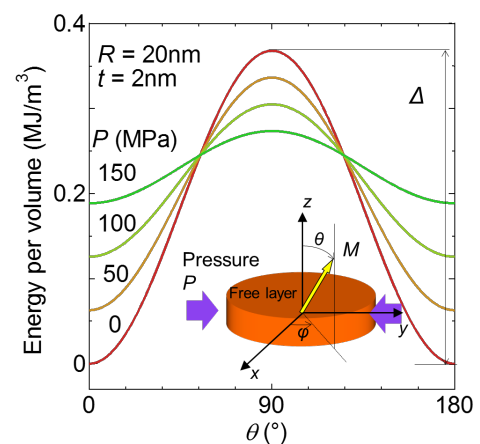


Fig. 1 Energy in magnetostrictive free layers

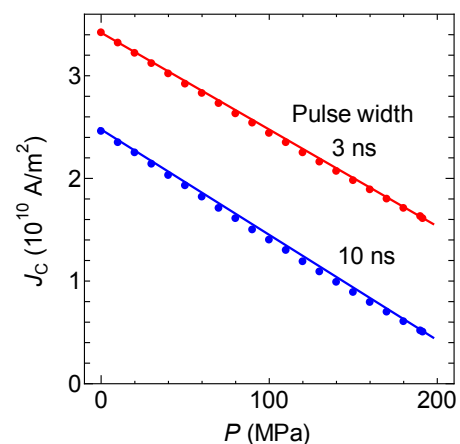


Fig. 2  $J_c$  versus  $P$

# 熱揺らぎを考慮したスピン注入磁化反転における 反転電流の損失定数依存性

山田啓介、仲谷栄伸

電気通信大学 情報理工学研究科

Effect of the Gilbert damping constant on the switching current in the spin-transfer switching with the thermal fluctuation interaction

Keisuke Yamada, and Yoshinobu Nakatani,

Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications,

## はじめに

近年、スピン注入磁化反転を利用した不揮発性磁気メモリの研究開発が盛んに行われている[1-5]。デバイスへの実用化に向けて、スピン注入磁化反転における反転電流( $I_{sw}$ )の低減が求められている。これまで反転電流の低減には、損失定数( $\alpha$ )の低減が有効であると考えられてきたが、以前我々は、マクロスピンモデルを用いてスピントルク注入磁化反転シミュレーションを行い、数 ns のパルス幅を持つパルス電流においては、損失定数がある閾値以下では、反転電流が低下しなくなることを示した[6]。この報告では、磁化反転が温度によって影響を受ける効果である“磁化の熱揺らぎ効果”を考慮した計算は行っていなかった。スピン注入磁化反転を利用した現実のデバイスは、有限温度で動作させるために、熱揺らぎの考慮が必要である。今回我々は、室温における熱揺らぎを考慮したスピン注入磁化反転における反転電流の損失定数依存性について、マクロスピンモデルにより調べた。さらに、それぞれの損失定数における反転電流に対する磁化反転確率の変化を調べ、熱揺らぎ効果による反転中の磁化の挙動について調べた。

## 実験方法

本計算では、マクロスピンモデルを用い、LLG 方程式の実効磁界に熱揺らぎ項( $T = 300$  K)を加えて計算した[7]。反転シミュレーションで用いた磁化の初期磁化状態は、熱平衡状態の計算より求めた。反転確率を求める計算では、各点で 10 万回の計算を行い、確率を求めた。計算条件と材料定数は、[6]と同様にした。

## 実験結果

図 1 に、各パルス幅( $t_p = 1, 10, 100$  ns)における反転電流の損失定数依存性について、 $T = 0$  K(点線)と 300 K(実線：反転確率=0.5 の電流値)の結果を示す。 $T = 300$  K の計算においても  $T = 0$  K の計算と同様に、数または数十 ns のパルス幅を持つパルス電流において、反転電流の低減がある損失定数の閾値より起こらなくなることが明らかになった。また熱揺らぎにより、 $T = 0$  K の計算より一割ほど反転電流が小さくなるのがわかった。

図 2 に、各損失定数における反転電流に対する磁化反転確率の変化を示す( $t_p = 1$  ns &  $T = 300$  K)。図 2 では、反転電流( $I/I_{sw}$ )は、反転確率=0.5 の反転電流値( $I_{sw}$ )で規格化した値を用いた。図 2 より、 $I/I_{sw} > 1$  では反転確率の変化は損失定数にあまり依存しないが、 $I/I_{sw} < 1$  では損失定数に依存して反転確率が変化することがわかった。 $\alpha \leq 0.1$  の場合、損失定数の減少に伴い、反転確率が急激に変化することがわかった。この結果は、損失定数が小さいほど、熱揺らぎ効果による磁化反転中における磁化振動が減少することを示している。

本研究は NEDO により助成を受けて行われた。

## 参考文献

[1] J. Z. Sun, *Phys. Rev. B*, **62**, 570 (2000). [2] J. A. Katine, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 3149 (2000). [3] J. Miltat, *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **89**, 6982 (2001). [4] S. Mangin, *et al.*, *Nature Mater.* **5**, 210 (2006). [5] H. Tomita, *et al.*, *IEEE. Trans. Magn.*, **47**, 6, 1599-1602 (2011). [6] K. Yamada, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **106**, 042402 (2015). [7] Y. Nakatani, *et al.*, *J. Magn. Mater.* **168**, 347 (1996).

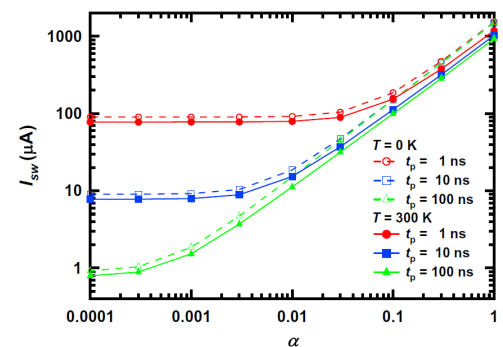


Fig.1 Effects of  $\alpha$  and  $t_p$  on  $I_{sw}$  at  $T=0, 300$  K.

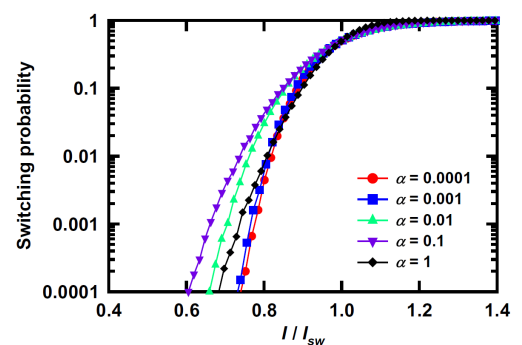


Fig.2 Effects of  $I/I_{sw}$  on the switching probability at  $t_p = 1$  ns and  $T = 300$  K.

# Numerical study on microwave assisted spin transfer torque switching in a multilayer with perpendicular anisotropy

Hailun Yu<sup>1</sup>, Xiaorui Ya<sup>1</sup>, Terumitsu Tanaka<sup>1</sup>, Kimihide Matsuyama<sup>1</sup>

Graduate School of Information Science and Electrical Engineering,  
Kyushu University, Fukuoka, 819-0395, Japan

Current information devices will be confronted with a serious physical limit in the lateral downsizing in the future. An alternative approach for continuous progress in the device performance is intensively demanded. An integration of multi functionality, such as memory and logic components, is a promising solution for an increasing requirement in various system applications<sup>1,2</sup>). In the present study, an exchange coupled multilayer stack, was proposed as a quarterly state logic-in-memory structure, and fundamental device operations have been numerically demonstrated with micromagnetic simulations.

Figure 1 shows a schematic of designed device structure, which consists of ferromagnetic tri-layers with different perpendicular (layer M1, M3) and in-plane anisotropy (M2), embedded in the outside two fixed layers (F1, F2) used as spin injectors. The following magnetic parameters and structural design (noted in the figure) were optimized with preliminary simulations;  $M_{s1}=M_{s3}=770$  emu/cm<sup>3</sup>,  $M_{s2}= 800$  emu/cm<sup>3</sup>,  $H_{k1}=10$  kOe (perpendicular),  $H_{k2}=4$  Oe (in-plane),  $H_{k3}=20$  kOe (perpendicular), damping constant  $\alpha = 0.01$ . Spin diffusion length in the magnetic multilayer was assumed to be 10 nm, considering the previously reported standard values for metallic ferromagnets.

Simulation results of data coding process are shown in Fig.1, that is, the perpendicular magnetization of the two layers (M1, M3) was selectively reversed with cooperative applications of a pulsed spin injection current and an alternative magnetic field, which frequency was adjusted as the individual resonance frequency of 22.5 GHz and 52.5 GHz, respectively. The magnetization direction of the M1 and M3 corresponds to the binary information. The coded data can be read out utilizing the difference of resonance profiles for quarterly states, as presented in the figure. The identical micromagnetic configurations for the data "10" and "01" ("00" and "11") enables a coincident logic, such as an exclusive-or operation.

Fig. 2 compares the selective switching property for various values of  $H_{k3}$ . The results present the current density margin for the selective switching of M1 and M3, performed with different rf frequencies of 22.5 GHz and 52.5 GHz, respectively. The operation margin for the smaller  $H_{k3}$  of 15 kOe was significantly reduced compared with that for  $H_{k3} = 20$  kOe. While, the increase of  $H_{k3}$  results in the increase of current density for both of the two layers.

## References

- 1) S. Sugahara et al., Appl. Phys. Lett., 84, 2307 (2004).
- 2) Y. Urazuka et al., IEEE trans. Magn.,52, Art. No. 3401303 (2014).
- 3) Jack Bass and William P Pratt Jr, J. Phys.: Condens. Matter 19 183201 (2007).

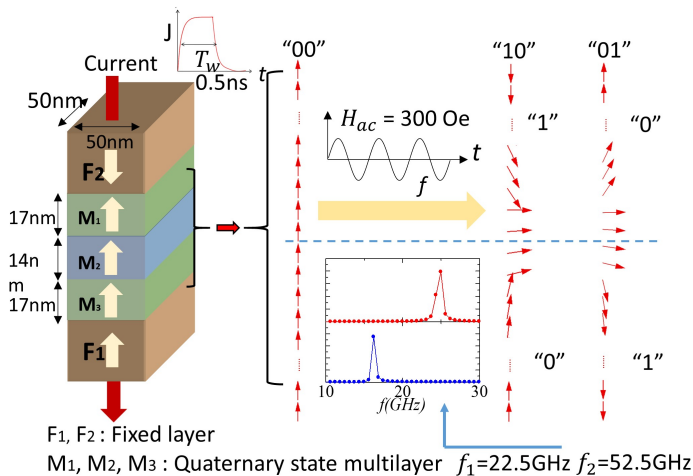


Fig. 1. Schematic of a designed vertically integrated logic-in-memory consisted of exchange coupled multilayer with different anisotropy. Fundamental exclusive or operation for the stored two bit binary data is also presented.

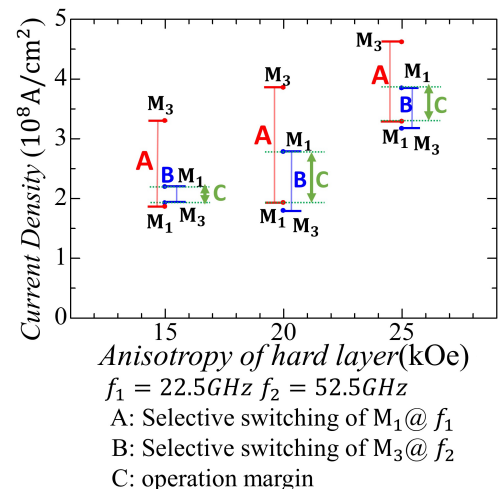


Fig. 2. Current density margin for the selective switching of the individual dot, conducted with various values of the perpendicular anisotropy of M3.