

## 8 インチ Si ウェーハ上へのフルエピタキシャル MTJ の形成

薬師寺啓、杉原敦、湯浅新治  
(産総研)

Development of fully-epitaxial MTJs on an 8-inch Si wafer

K. Yakushiji, A. Sugihara and S. Yuasa  
(AIST)

### はじめに

既存の STT-MRAM は MTJ が多結晶ベースで形成されており、メモリサイズの縮小を行う際には多結晶 MTJ の膜質バラツキやラフネスがメモリ特性のバラツキとして顕在化してしまい、それが開発障壁のひとつとなっている。もし MTJ の単結晶化が実現すれば、薄膜中に結晶粒が存在しないために膜質バラツキは究極的に小さく、また平坦性は原子層レベルにフラットであり、さらに単結晶ベースの高性能材料の利用が視野に入ってくるなど、ブレークスルーがもたらされると期待される。しかしながら、これまでは研究室レベルの数 cm の小片基板上への報告があるものの、量産時に用いる大径 Si ウェーハ上へのエピタキシャル MTJ の形成は誰も為し得ていなかった。本研究では、大径 Si ウェーハ上へのエピタキシャル MTJ 形成を試みた。

### 実験方法

ウェーハには 8 インチ径の単結晶(100)配向 Si を用いた。1%DHF (希釈フッ酸) 自動洗浄機により表面の自然酸化膜を除去し、すみやかに成膜装置 (キャノンアネルバ C-7100) に導入した後、550°C でフラッシングすることで清浄表面を得た。バリア材料としてはスピネル系 Mg-Al-O<sup>1)</sup>を用いた。

### 実験結果

図 1 に Mg-Al-O バリア表面の RHEED 像を示す。明瞭なストリークが現れており、高品位なエピタキシャル成長がなされていることが示唆される。MR 比は最大で 230% であり、RA=10 Ωum<sup>2</sup> の低 RA でも 140% 程度の高い値を示した。今回、Ni-Al シード層<sup>2)</sup>の最適チューニングと Mg-Al-O 開発が鍵となり、汎用性の高い技術で世界で初めて大径 Si ウェーハ上にエピタキシャル MTJ (面内系) の形成を実現するに至った。今後は垂直系への展開と、3次元積層技術<sup>3)</sup>を用いたエピタキシャル MTJ と CMOS 回路とのインテグレート技術開発を進めていく。

本研究は ImPACT プログラム「電圧駆動 MRAM のプロセス技術およびメモリアレイの開発」の一環で行われた。

### 参考文献

- 1) H. Sukegawa et al., Appl. Phys. Lett. 96 (2010) 212505.
- 2) J. Chen et al., APL Mater. 4 (2016) 056104.
- 3) K. Yakushiji et al., Appl. Phys. Exp. 10 (2017) 063002.

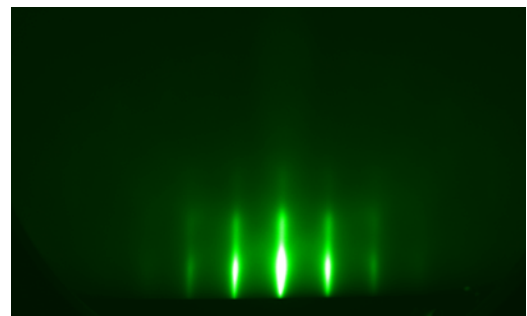


図 1 Mg-Al-O バリア表面の[100]方向 RHEED 像

# 多結晶 CoFeB/MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/CoFeB 型強磁性トンネル接合における 大きなトンネル磁気抵抗効果

Ikhtiar, °介川裕章, Xiandong Xu, Mohamed Belmoubarik, Hwachol Lee, 葛西伸哉, 宝野和博  
(物材機構)

Large tunnel magnetoresistance effect in polycrystalline CoFeB/MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/CoFeB magnetic tunnel junctions  
Ikhtiar, °H. Sukegawa, X. Xu, M. Belmoubarik, H. Lee, S. Kasai, and K. Hono  
(NIMS)

## はじめに

スピネルは MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> で表される立方晶の複合酸化物であり、強磁性トンネル接合 (MTJ) のトンネルバリアとして用いることで室温において 300% を超える大きなトンネル磁気抵抗 (TMR) 比が報告されている<sup>1,2)</sup>。とりわけ、Mg-Al 組成調整されたスピネルバリア (Mg-Al-O) では、CoFe やホイスラー合金等と格子整合性が良く、高品位の界面構造を実現できる。このため、良好な TMR のバイアス電圧依存性が得られることから高い素子出力が得られるという利点がある。しかし、高品位な MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 結晶バリアを得るためには単結晶基板上にエピタキシャル成長が必要であるため、下地の制約なしに作製可能な多結晶素子化が望まれる。本研究では CoFeB 電極とスピネルバリアの間に薄い MgO テンプレート層を導入することで、CoFeB/MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/CoFeB 型の高配向多結晶 MTJ を実現し、同時に大きな TMR 比が観測されたことを報告する<sup>3)</sup>。

## 実験方法

超高真空マグネトロンスパッタ装置を用いて、熱酸化膜付 Si 基板上に Ta (5)/Ru (10)/Ta (5)/Co<sub>20</sub>Fe<sub>60</sub>B<sub>20</sub> (CoFeB) (5)/Co<sub>75</sub>Fe<sub>25</sub> (CoFe) (1)/MgO (0-0.7)/Mg-Al-O (1.2)/CoFeB (3)/Ta (5)/Ru (5)、(厚さ nm) を室温で成膜した。Mg-Al-O 層は組成が異なる焼結体ターゲット (Mg<sub>2</sub>Al-O<sub>x</sub> および MgAl<sub>2</sub>-O<sub>x</sub>) を用いて高周波スパッタによって作製した。成膜した多層膜は電子線リソグラフィを用い 200×400 nm<sup>2</sup> サイズの楕円状に微細加工した後、真空中で 5 kOe の磁場中において 500°C で熱処理を行った。

## 実験結果

MgO 挿入が非常に薄い (< 0.1 nm) 場合、TMR 比は数十%程度と小さく、結晶バリアが得られないことがわかった。一方、MgO 膜厚の増大と共に TMR 比が向上し 150% 以上の TMR 比がいずれの組成においても安定に得られた。MgO (0.5 nm)/Mg<sub>2</sub>Al-O<sub>x</sub> 構造において、最大 260% の TMR 比が実現された。これは、MgO 挿入層が Mg-Al-O バリア結晶化のためのテンプレートとして有効に働いたためと考えられる。また、単結晶スピネル MTJ と同様に良好な TMR 比のバイアス依存性も観察された。断面 STEM 像 (Fig. 1) から (001) 配向した CoFeB/Mg-Al-O/CoFeB 構造が得られていることが確認され、バリア界面の格子不整合も非常に小さいことがわかった。以上の結果から、極薄 MgO 挿入層の利用によって、高出力のスピネル MTJ を実用に適した多結晶素子として得られることがわかった。本研究の一部は革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) により科学技術振興機構を通じた委託により、また JSPS 科研費 (16H03852) の助成により行われた。

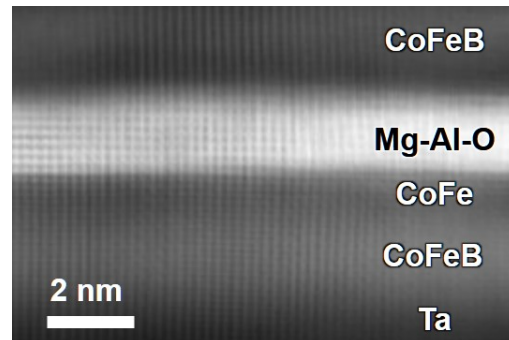


Fig. 1. Cross-sectional STEM image of a CoFeB/CoFe/MgO (0.7 nm)/MgAl<sub>2</sub>-O<sub>x</sub> (1.2 nm)/CoFeB MTJ.

## 参考文献

- 1) H. Sukegawa *et al.*, Phys. Rev. B **86**, 184401 (2012). 2) T. Scheike *et al.*, Appl. Phys. Express **9**, 053004 (2016).
- 3) Ikhtiar *et al.*, Appl. Phys. Lett. **112**, 022408 (2018).

磁気トンネル接合  $\text{Fe/MgAl}_2\text{O}_4/\text{Fe}$  における磁気抵抗効果の印加電圧依存性  
: 第一原理計算によるアプローチ

増田啓介, 三浦良雄  
(物材機構)

Bias voltage dependence of magnetoresistance ratio in  $\text{Fe/MgAl}_2\text{O}_4/\text{Fe}$  junction  
: First-principles theoretical approach  
Keisuke Masuda and Yoshio Miura  
(NIMS)

2004年の巨大磁気抵抗比の報告 [1,2] 以来,  $\text{MgO}$  トンネルバリア層を用いた磁気トンネル接合 (MTJ) について数多くの研究がなされてきた. その一方,  $\text{MgO}$  と格子不整合が大きい強磁性体について,  $\text{MgO}$  以外のトンネルバリア層を用いて同様の高い磁気抵抗比 (MR 比) を得ようとする試みが精力的に進められている. スピネルバリア  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  を用いた MTJ,  $\text{Fe/MgAl}_2\text{O}_4/\text{Fe}$  に関する研究はそのような試みの 1 つであり, これまでに室温で 300% 程度の高い MR 比が得られている [3]. この MTJ には, 界面での格子不整合が非常に小さい (0.1% 程度) ことや, MR 比が良好な電圧依存性を持つことなど様々なメリットが存在する.  $\text{Fe/MgAl}_2\text{O}_4/\text{Fe}$  と  $\text{Fe/MgO}/\text{Fe}$  の相違点を詳細に比較検討することは MTJ の磁気伝導特性をより深く理解する上で重要である.

本研究では, 第一原理計算を用い  $\text{Fe/MgAl}_2\text{O}_4/\text{Fe}$  の MR 比の印加電圧依存性について解析し,  $\text{Fe/MgO}/\text{Fe}$  の場合との差について考察を行った. 我々は構造を最適化した  $\text{Fe/MgAl}_2\text{O}_4/\text{Fe}$  と  $\text{Fe/MgO}/\text{Fe}$  の超格子に対し密度汎関数法と非平衡 Green 関数法を適用することで, それぞれの系の MR 比の電圧依存性を計算した. まず  $\text{Fe/MgAl}_2\text{O}_4/\text{Fe}$ ,  $\text{Fe/MgO}/\text{Fe}$  の場合に共通した結果として, MR 比が印加電圧とともに単調に減少しある臨界電圧  $V_c$  で 0 となる振る舞いが得られた. さらにこの臨界電圧  $V_c$  について,  $\text{Fe/MgAl}_2\text{O}_4/\text{Fe}$  の  $V_c$  が  $\text{Fe/MgO}/\text{Fe}$  のそれに比べ顕著に大きいことがわかった. このような臨界電圧  $V_c$  の差の起源を明らかにするため, 我々は両 MTJ について透過率のエネルギー依存性及び電極のバンド構造の詳細な解析を行った. スピネル構造を持つ  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  バリアの面内格子定数は  $\text{bcc Fe}$  の面内格子定数の 2 倍であるため,  $\text{Fe/MgAl}_2\text{O}_4/\text{Fe}$  においては電極のバンド構造が単純な  $\text{bcc Fe}$  のバンド構造を面内で折りたたみ構造を持つ (バンド折りたたみ効果) [4,5]. 我々の解析の結果, このようなバンド折りたたみ効果によって生み出される Fe の付加的な多数スピンバンドが  $\text{Fe/MgAl}_2\text{O}_4/\text{Fe}$  における大きな臨界電圧  $V_c$  の起源であることがわかった [6].

本研究の一部は TDK 株式会社, 科研費基盤 S (16H06332), 基盤 B (16H03852), 革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の援助を受け行われたものである.

- 1) S. S. P. Parkin *et al.*, Nat. Mater. **3**, 862 (2004).
- 2) S. Yuasa *et al.*, Nat. Mater. **3**, 868 (2004).
- 3) M. Belmoubarik *et al.*, Appl. Phys. Lett. **108**, 132404 (2016).
- 4) Y. Miura *et al.*, Phys. Rev. B **86**, 024426 (2012).
- 5) H. Sukegawa *et al.*, Phys. Rev. B **86**, 184401 (2012).
- 6) K. Masuda and Y. Miura, Phys. Rev. B **96**, 054428 (2017).

# 強磁性トンネル接合における電圧誘起磁気キャパシタンス効果

海住英生、三澤貴浩、長浜太郎\*、小峰啓史\*\*、北上 修\*\*\*、  
藤岡正弥、西井準治、Gang Xiao\*\*\*\*

(北大電子研、\*北大工、\*\*茨大工、\*\*\*東北大多元研、\*\*\*\*ブラウン大学)

Voltage-induced Magnetocapacitance Effect in Magnetic Tunnel Junctions

H. Kaiju, T. Misawa, T. Nagahama\*, T. Komine\*\*, O. Kitakami\*\*\*,  
M. Fujioka, J. Nishii and G. Xiao\*\*\*\*

(Hokkaido Univ. RIES, \*Hokkaido Univ. Eng., \*\*Ibaraki Univ. Eng.,  
\*\*\*Tohoku Univ. IMRAM, \*\*\*\*Brown Univ. Rhys.)

## はじめに

近年、強磁性トンネル接合(MTJ)におけるトンネル磁気キャパシタンス(TMC)効果は、静的なスピン蓄積や動的なスピンドायナミクスに関する新たな学術的知見を与える一方、高感度磁気センサや磁気メモリへの応用も期待されていることから国内外で大きな注目を集めている[1-4]。TMC効果の興味深い特徴の一つとして、電圧に対するロバスト性が挙げられる。例えば、TMCの $V_{1/2}$ (=ゼロバイアス付近のTMC比が半分になるときの電圧)はトンネル磁気抵抗(TMR)と比較して2倍程度大きいことが報告されている[5]。このようなロバスト性に関連して、本研究では、電圧に対してTMCが増大する新しい現象を見出したので報告する。

## 実験方法

超高真空マグネトロンスパッタ装置を用いて、熱酸化Si基板上にTa/Co<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub>/IrMn/Co<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub>/Ru/Co<sub>40</sub>Fe<sub>40</sub>B<sub>20</sub>/MgO/Co<sub>40</sub>Fe<sub>40</sub>B<sub>20</sub>/Ta/Ruから構成されるMTJを作製した。強磁性層Co<sub>40</sub>Fe<sub>40</sub>B<sub>20</sub>の膜厚は3nm、絶縁層MgOの膜厚は2nmとした。微細加工にはフォトリソグラフィとイオンリング法を用いた。接合面積は1800 $\mu\text{m}^2$ とした。TMCおよびTMR効果の測定には、室温磁場中交流4端子法を用いた。

## 実験結果

図1にTMRとTMCのバイアス依存性を示す。TMR比はバイアス電圧の上昇とともに減少することがわかる。一方、TMC比については低バイアスにおいてやや減少するが、高バイアスでは増大する興味深い現象が観測された。これらの実験結果を説明するため、理論計算による解析を行った。TMRの計算にはZhangモデルを用いた[6]。TMCの計算には4次関数バリア近似(QBA)とスピン依存ドリフト拡散(SDD)モデル[2]を取り入れたDebye-Fröhlichモデルを用いた。その結果、図2に示すように、実験結果と計算結果が良い一致を示すことがわかった。これはスピンキャパシタンスが電圧誘起TMC効果に大きな影響を及ぼすことを意味する。講演ではより詳細な実験・計算結果について報告する。

## 参考文献

- [1] H. Kaiju *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **107**, 132405 (2015). [2] T.-H. Lee *et al.*: *Sci. Rep.* **5**, 13704 (2015).  
[3] S. Parui *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **109**, 052401 (2016). [4] H. Kaiju *et al.*: *Sci. Rep.* **7**, 2682 (2017).  
[5] A. M. Sahadevan *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **101**, 162404 (2012). [6] S. Zhang *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **79**, 3744 (1997).

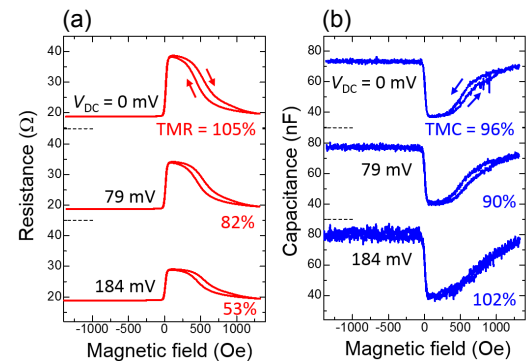


図1: (a) TMRと(b)TMCのバイアス電圧依存性

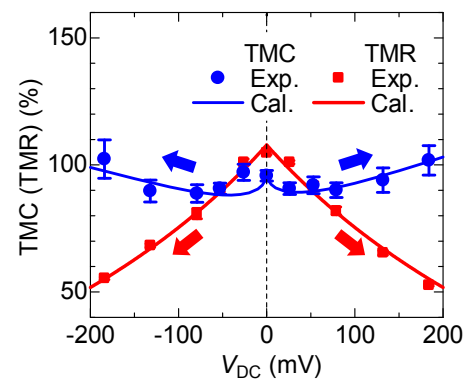


図2: TMR比とTMC比のバイアス電圧依存性

## スピントルク発振素子のパルス電圧応答

鈴木大貴<sup>1,2</sup>, 常木澄人<sup>2</sup>, 薬師寺啓<sup>2</sup>, 福島章雄<sup>2</sup>, 湯浅新治<sup>2</sup>, 安川雪子<sup>1</sup>, 久保田均<sup>2</sup>  
(千葉工大 1, 産総研 2)

Response of pulse input in spin torque oscillator

Daiki Suzuki<sup>1,2</sup>, Sumito Tsunegi<sup>2</sup>, Kay Yakushiji<sup>2</sup>, Akio Fukushima<sup>2</sup>, Shinji Yuasa<sup>2</sup>,  
Yukiko Yasukawa<sup>1</sup>, Hitoshi Kubota<sup>2</sup>  
(ChibaTech1, AIST2)

### はじめに

スピンドYNAMIXの高速性を利用した磁気メモリやスピントルク発振素子は、次世代の機能性デバイスとして注目されている。これらのデバイスに加えて、近年ではスピンドYNAMIXの過渡的な振る舞いを利用した演算器<sup>1)</sup>にも注目が集まっている。スピンドYNAMIXの過渡的な振る舞いに関しては、磁化反転において反転が始まらない付帯時間があること<sup>2)</sup>などが議論されているが、その実験的な検証はまだ少ないのが現状である。特に、パルス電圧の入力に対するダイナミクスの実時間測定はほぼ未踏の領域である。本研究では、スピンドYNAMIXの過渡的な振る舞いを調べるために、スピントルク発振素子にパルス電圧を入力しその応答を調べた。

### 実験

実験に用いたスピントルク発振素子は FeB を自由層とした磁気渦型スピントルク発振素子<sup>3)</sup> Si/SiO<sub>2</sub>-sub./buffer/CoFe(2.5)/Ru(0.86)/CoFeB(3)/MgO(~1)/FeB(5.0)/Ta/Ru (nm) である。自励発振を励起させるために、素子に直流磁界 550 mT を膜面垂直方向に入力し、パルス電圧を入力した。入力信号源として任意波形発生器 (Keysight 33622A) を用いた。パルスの立ち上がり(下がり)時間は 5 ns とし、パルス幅は 500 ns とした。バイアスティーの低周波ポートからパルス電圧を入力し、高周波ポートからスピントルク発振素子の出力信号をリアルタイムオシロスコープ (Keysight DSOS804A) により観測した。

### 結果

図 1 (a), (b) にスピントルク発振素子に印加した矩形波信号(off 時 0 mV, on 時 400 mV) と、この時のスピントルク発振素子の出力波形を示す。スピントルク発振素子に電圧が印加されるパルスの立ち上がりでは、20 ns 以上の待機時間が生じてから、徐々に信号強度が増大する様子が観察された。発振状態での振動周期は 2 ns であり、信号増大から飽和するまでに要した緩和時間は 20 ns 以上であることがわかった。一方、パルスの立ち下りでは、入力されている電圧とほぼ同じ包絡線が得られた。発表では、印加電圧依存性など、より詳細にスピンドYNAMIXの議論を行う。

### 参考文献

- 1) J. Torejon et al., Nature 547, 428 (2017)
- 2) H. Tomita et al., Appl. Phys. Express 1, 061303 (2008)
- 3) S. Tsunegi et al., Appl. Phys. Express 7, 063009 (2014)

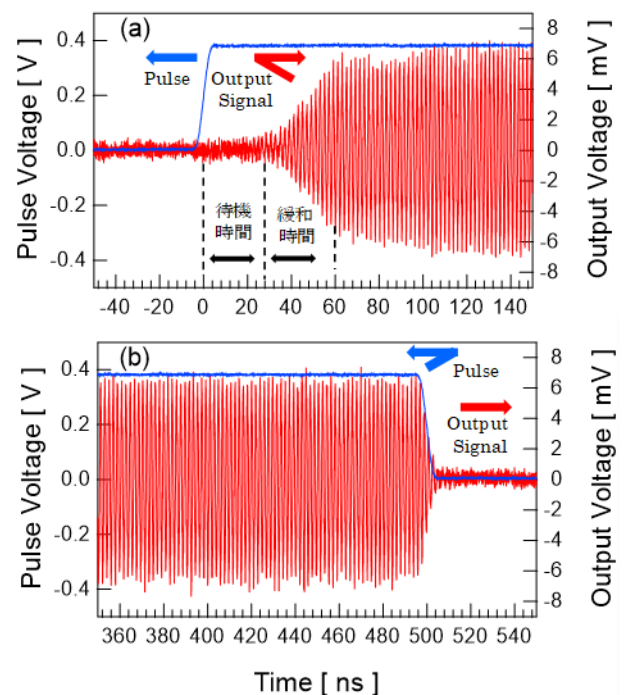


図 1 スピントルク発振素子に入力した矩形波とスピントルク発振素子の出力信号の実時間測定結果。(a)立ち上がり。(b)立ち下り。

# FeB 自由層を持つ磁気渦スピントルク発振素子の同期現象

安藤拓己<sup>1,2</sup>, 鈴木大貴<sup>1,2</sup>, 常木澄人<sup>2</sup>, 薬師寺啓<sup>2</sup>, 福島章雄<sup>2</sup>, 湯浅新治<sup>2</sup>, 安川雪子<sup>1</sup>, 久保田均<sup>2</sup>  
(千葉工大<sup>1</sup>, 産総研<sup>2</sup>)

Effect of interface modification on electrical synchronization in spin torque oscillator

°Takumi Ando<sup>1,2</sup>, Daiki Suzuki<sup>1,2</sup>, Sumito Tsunegi<sup>2</sup>, Kay Yakushiji<sup>2</sup>, Akio Fukushima<sup>2</sup>, Shinji Yuasa<sup>2</sup>,  
Yukiko Yasukawa<sup>1</sup>, Hitoshi Kubota<sup>2</sup>  
(Chiba Institute of Technology<sup>1</sup>, AIST<sup>2</sup>)

## 背景

スピントルク発振素子(STO)のダイナミクスの理解や高周波特性の改善を目指した研究が行われてきた。近年では、高周波特性の改善<sup>1,2</sup>や連想記憶装置<sup>3</sup>などの新しい応用に向けて、STOの同期現象に注目が集まっている。STOの同期現象は磁氣的<sup>1</sup>または電氣的<sup>2</sup>な相互作用により発現する。電氣的な相互作用を利用した同期現象は発振素子間距離に相互作用の強度が依存しないため、回路の冗長性が高い特徴がある。一方で、磁氣的な相互作用に比べて電氣的な相互作用は弱く、振動子間の周波数差が数 MHz 離れるだけで同期状態が解消されてしまうという課題がある。<sup>2</sup>この同期が維持できる周波数差(同期幅)に関しては、発振条件および材料依存性など関して系統的な実験が少なく、応用上の課題となっている。本研究では、優れた高周波特性を持つ FeB を自由層とする磁気渦型 STO<sup>4</sup>を基本構造として、その同期幅の系統的な評価を行った。

## 実験方法

本研究で用いた磁気渦型 STO の膜構成を図 1(a)に示す。自由層膜厚は 10 nm とし、直径 300 nm の STO を EB リソグラフィおよび Ar イオンミリングにより作製した。膜面垂直方向の磁界  $H$  および直流電圧  $V_{DC}$  を印加し自励発振を励起した。また、同期幅を評価するために基準信号源を用いた強制同期の実験を行った。この時、基準信号と STO の出力信号を完全に区別するために、基準信号の周波数  $f_{AC}$  は STO の発振周波数  $f_{STO}$  の 2 通倍近辺 ( $f_{AC} \sim 2f_{STO}$ ) を用いた。STO に注入される基準信号強度  $P_{AC}$  が -20 dBm となるように、基準信号源の出力強度を調整し実験を行った。

## 実験結果

図 1(b)に直流電圧 400 mV, 磁界 300 mT における STO の発振周波数  $f_{STO}$  の基準周波数  $f_{AC}$  依存性を示す。この直流バイアスにおける STO の発振周波数はおおよそ 512 MHz 程度である。 $f_{AC}/2$  が 511 MHz 以下および 513 MHz 以上において基準信号の周波数に依らず STO の発振周波数は 512 MHz 程度で一定となり、この基準周波数領域では STO は信号源に対して非同期状態であることがわかった。一方で、 $f_{AC}/2$  が 511.5 MHz から 512.8 MHz においては  $f_{AC}/2 = f_{STO}$  と周波数が一致していることから、STO と信号源が同期している様子が観測された。この実験から、FeB 自由層を持つ磁気渦型 STO では 1.3 MHz の同期幅を持つことがわかった。発表では、同期幅の発振条件や材料依存性についても議論を行う。

## 参考文献

- (1) S. Kaka, *et al.*, Nature **437**, 389 (2005).
- (2) R. Lebrun, *et al.*, Nat. Commun. **8**, 15825 (2017).
- (3) A. Kumar, *et al.*, Sci. Rep. **7**, 411 (2017).
- (4) S. Tsunegi, *et al.*, Appl. Phys. Express **7**, 063009 (2014).

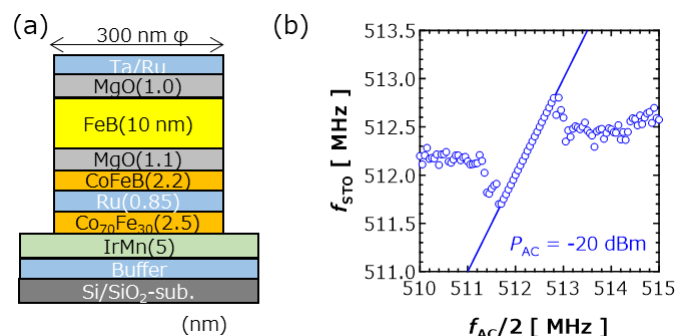


図 1(a)スピントルク発振素子(STO)の素子構造。(b)STO の発振周波数  $f_{STO}$  の基準信号周波数  $f_{AC}$  依存性。

# Energy Harvesting Based on Stress Induced Domain Wall Motion in Soft Magnetic Microwires

**S.N. Piramanayagam,<sup>1</sup> S. Bhatti,<sup>1</sup> C. Ma<sup>2</sup> and X.X. Liu<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>School of Physical and Mathematical Sciences, Nanyang Technological University, Singapore

<sup>2</sup>Department of Electrical and Computer Engineering, Shinshu University, Nagano, Japan.

Energy harvesting is getting significant interest due to the requirement of devices for the emerging internet-of-things (IoT) technology and their requirement of self-generation of power. As a supplement to solar energy based energy harvesting, generation of energy based on magnetic principles is useful. Domain wall propagation in ferromagnetic materials, as induced by stress and a pick-up voltage using coils has been investigated as an alternate form of energy harvesting. We have recently shown that power can be generated from mechanical vibrations in purely ferromagnetic structures. In this talk, we will highlight the details of micromagnetic simulation and experimental work.

For this work, we deposited soft magnetic FeCo films using facing targets sputtering (FTS). The fringing magnetic field from FTS was used to achieve a field-induced anisotropy. The use of suitable underlayers helped to reduce the coercivity of the films and to set the magnetization along the fringing field direction. Lithography was carried out in such a way to achieve microwires with an anisotropy in the orthogonal direction. Stress was applied and the change in the domain pattern was observed using bitter-pattern technique.

Figure 1 shows the changes in the domain pattern as a function of the applied stress. It can be noticed that the domains are densely packed when there was no stress applied. When the stress was increased slightly, the domains expanded. For higher values of stress, the domains disappeared completely. For practical applications, the stress could come from the bending of the substrates due to the picking up of ambient vibrations. For energy harvesting, the resultant change in the domain wall motion could lead to a change in flux and hence a voltage in the pick-up coil. We have made a prototype device with pick-up coil and have obtained voltage pulses of the order of 1 mV in a resistive load of 50 ohms.

In summary, the use of flexible substrates with low Young's modulus and a special magnetic stack enabled us to achieve significant magnetization rotation or domain wall motion even from ambient vibrations. We have exploited the rotation of magnetization or domain wall motion to induce voltages in the pickup coils.

## References

1. Bryan, M. T., Dean, J. & Allwood, D. A. Dynamics of stress-induced domain wall motion. *Physical Review B* 85, doi:10.1103/PhysRevB.85.144411 (2012).

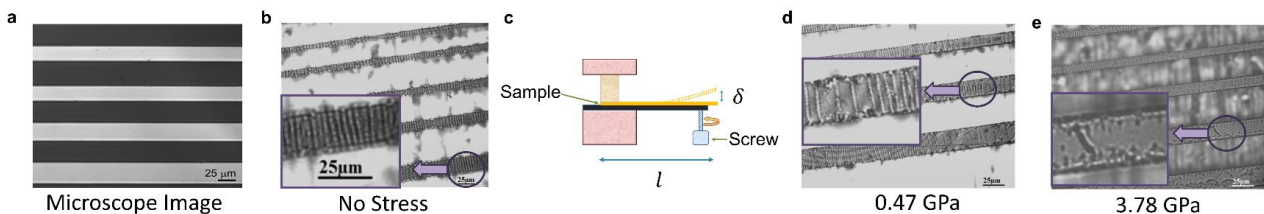


Fig 1. Domain wall images as observed by (a) optical microscope and (b,d,e) bitter-pattern technique (c) Illustration of application of stress, to induce domain wall motion.

# FePt 薄膜における異常エッティングスハウゼン効果の可視化

関剛斎<sup>1,2,3</sup>、井口亮<sup>3</sup>、高梨弘毅<sup>1,2</sup>、内田健一<sup>2,3</sup>  
(<sup>1</sup>東北大金研、<sup>2</sup>東北大 CSRN、<sup>3</sup>物材機構)

Visualization of Anomalous Ettingshausen Effect in an FePt thin film

T. Seki<sup>1,2,3</sup>, R. Iguchi<sup>3</sup>, K. Takashi<sup>1,2</sup>, and K. Uchida<sup>2,3</sup>  
(<sup>1</sup>IMR, Tohoku Univ., <sup>2</sup>CSRN, Tohoku Univ., <sup>3</sup>NIMS)

## はじめに

異常ネルンスト効果 (Anomalous Nernst Effect: ANE) と異常エッティングスハウゼン効果 (Anomalous Ettingshausen Effect: AEE) は、強磁性体における熱磁気効果として古くから知られている現象である<sup>1)</sup>。磁化 ( $M$ ) と温度勾配 ( $\nabla T$ ) の外積方向に電圧を生じさせる現象が ANE であり、AEE では電流 ( $J_c$ ) と  $M$  によって  $\nabla T$  が現れる。これら熱磁気効果はエネルギーハーベスティング技術としての応用可能性から注目を集めており、特に ANE はバルク、薄膜を問わず様々な物質において研究が進められている。一方で、AEE の研究報告はバルク強磁性体を対象としたものに限られており<sup>2,3)</sup>、強磁性薄膜における AEE の観測は皆無である。また、スピン流 ( $J_s$ ) と  $M$  の相互作用を起源としたスピンペルチェ効果 (Spin Peltier Effect: SPE)<sup>4,5)</sup> と AEE の対称性の違いについても実証はなされておらず、温度変調のメカニズムを理解するためにも両者の寄与を明確に区別することが重要である。そこで本研究では、ロックインサーモグラフィー法<sup>5-7)</sup>を用いることで、FePt 薄膜試料における AEE の可視化を行った<sup>8,9)</sup>。AEE と SPE の対称性の違いを明確にすることを目指し、さらに、AEE で誘起される温度変調のプロファイルを明らかにすることを目的とした。

## 実験結果

AEE を可視化するための薄膜試料として、SrTiO<sub>3</sub> (100) 基板上にエピタキシャル成長させた FePt (001) 薄膜を用いた。超高真空対応マグネトロンスパッタ装置により 10 nm 厚の FePt 層を 350°C で成長させた後、微細加工プロセスにより FePt 層を 500 μm 幅のコの字形状素子へと加工した。交流の  $J_c$  を素子に印加しながら赤外線カメラによる熱画像をロックイン検出することで、ジュール熱の寄与を取り除いた温度変化分の振幅および位相情報を得た。また、AEE と SPE の対称性を調べる目的で、参照試料としてイットリウム鉄ガーネット (YIG) 基板上に 10 nm 厚の Pt 層を成膜した YIG/Pt 素子も作製した。

素子面内方向に磁場を印加する IM 配置では、FePt 素子および YIG/Pt 素子ともに  $J_c$  の極性に依存した発熱および吸熱が観測され、類似のロックイン熱画像が得られた。一方で、面垂直方向に磁場印加した PM 配置では、FePt 素子でのみ明瞭な温度変調が観測された。PM 配置における熱画像の違いは、AEE と SPE の対称性の違いから理解することができ、FePt 素子では AEE が主要なメカニズムとなっており、YIG/Pt 素子における温度変化は SPE によって生じていることが実験的に示された。また、AEE の温度変調プロファイルを詳細に調べた結果、温度変調の空間分布が IM 配置と PM 配置で大きく異なっていることが明らかとなった。数値計算と比較した結果、熱源の分布と基板への放熱を考慮することで実験結果を再現できることがわかった<sup>8)</sup>。

## 参考文献

- 1) S. R. Boona *et al.*, *Energy Environ. Sci.* **7**, 885 (2014).
- 2) P. W. Bridgman, *Phys. Rev.* **24**, 644 (1924).
- 3) E. H. Hall, *Phys. Rev.* **26**, 820 (1925).
- 4) J. Flipse *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 027601 (2014).
- 5) S. Daimon *et al.*, *Nat. Commun.* **7**, 13754 (2016).
- 6) Y. Hirayama *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **111**, 163901 (2017).
- 7) K. Uchida *et al.*, *Nature* (2018) doi: 10.1038/s41586-018-0143-x.
- 8) T. Seki *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **112**, 152403 (2018).
- 9) T. Seki *et al.*, *J. Phys. D: Appl. Phys.* (accepted).



## レーストラックにおけるスカーミオン電流駆動のシミュレーション解析

右田 幸大<sup>1</sup>、山田 啓介<sup>2</sup>、仲谷 栄伸<sup>1</sup><sup>1</sup>電気通信大学 情報理工学研究科、<sup>2</sup>岐阜大学 工学部

Computer simulations of a Skyrmion motion in a racetrack

Koudai Migita<sup>1</sup>, Keisuke Yamada<sup>2</sup>, Yoshinobu Nakatani<sup>1</sup><sup>1</sup>Graduate school of Informatics and Engineering, University of Electro-Communications<sup>2</sup>Faculty of Engineering, Gifu University

## はじめに

スカーミオンはトポロジカルな安定性を持ったナノスケールの磁化構造であり、非常に小さな電流での駆動が可能であることからスカーミオンを用いたレーストラックメモリの研究が注目されている[1,2]。レーストラックメモリではスピン電流の注入などによってスカーミオンを駆動させながらデータの読み書きを行うため、スカーミオンが存在しやすいポジションをつくることで位置制御を行うことが重要である。本研究では、イオン照射によって垂直磁気異方性を変化[3]させた磁性細線におけるスカーミオンの駆動についてマイクロマグネティックシミュレーションを用いて調査した。

## 計算条件

材料定数は PtCo の値を用い、飽和磁化  $M_s=580 \text{ emu/cm}^3$ 、磁気回転比  $\gamma=1.76 \times 10^7 \text{ rad/(s} \cdot \text{Oe)}$ 、交換ステイフネス定数  $A=1.5 \mu \text{ erg/cm}$ 、損失定数  $\alpha=0.3$ 、非断熱項  $\beta=0.3$ 、DMI 定数  $D=3.0 \text{ erg/cm}^2$ 、磁気異方性定数は図 1 のように  $K_u=8.0$  または  $7.5 \text{ Merg/cm}^3$  とした[2]。磁性細線の大きさは  $490 \text{ nm} \times 100 \text{ nm} \times 0.4 \text{ nm}$  とした。このような磁性細線にスカーミオンを 1 つ配置し、スピン電流を印可して+x 方向に駆動させるシミュレーションを行った。スピン電流はパルス幅  $t_p \text{ ns}$  だけ流した後電流を切り、スカーミオンが停止する位置を調査した。

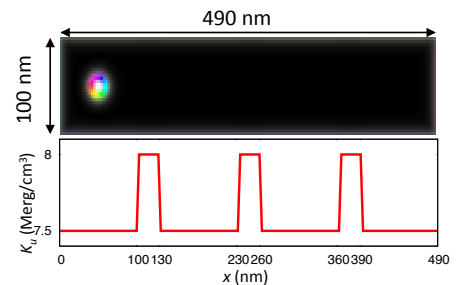


Fig.1 Schematic of the magnetic nanowire and anisotropy.

## 結果

図 2 に電流密度  $J=50 \text{ MA/cm}^2$ 、パルス幅  $t_p=2\sim 14 \text{ ns}$  におけるスカーミオンの中心位置の時間変化を示す。図 2 より、電流を切った後スカーミオンは  $K_u$  が高い領域を避けるように動き、 $K_u$  が低い領域の中心に移動してから静止していることがわかった。よって  $K_u$  が低い領域の中心をビットポジションとして定めることができる。図 3 に電流密度とパルス幅によるスカーミオンの静止位置の変化を示す。 $J=30 \text{ MA/cm}^2$  以下の場合、スカーミオンは  $K_u$  が高い領域がピンングサイトの役割を果たし移動できないことがわかった。 $J=50 \text{ MA/cm}^2$  以上の場合、スカーミオンはピンングされることがなく、パルス幅によって静止位置が変化していることがわかった。

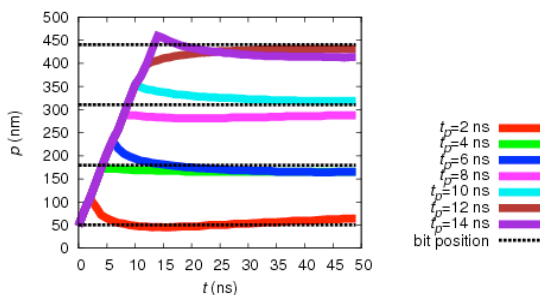


Fig.2 The trajectories of the Skyrmion at various pulse width for  $J=50 \text{ MA/cm}^2$

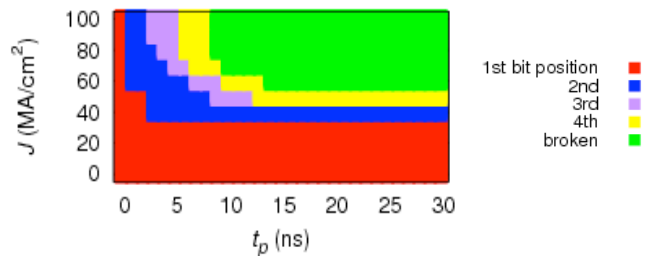


Fig.3 Stopped position of a Skyrmion at various current  $J$  and pulse width  $t_p$

## 参考文献

- [1] T. H. R. Skyrme, Proc. Roy. Soc. Lond. A 31, 556(1962) [2] J. Sampaio, et. al., Nat. Nano. 8, 839 (2013)  
 [3] C.T.Rettner, et.al., Appl.Phys. Lett., 80, 279 (2002)

## ナノマグネット・リカレントニューラルネットワークにおける 短期記憶能力と非線形演算能力

鎌開雄規, 野村 光, 古田大志, 鈴木義茂, 中谷亮一

(阪大)

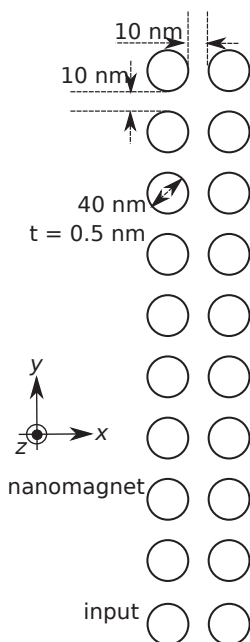
Short term memory and non-linearity in nanomagnet recurrent neural network

Y. Kuwabiraki, H. Nomura, T. Furuta, Y. Suzuki, R. Nakatani

(Osaka Univ.)

近年、ニューラルネットワークを用いた人工知能は目覚ましい成果を上げている。ディープラーニングなどの現在の人工知能の多くは、recurrent neural network (RNN)<sup>1)</sup> と呼ばれるニューラルネットワークを利用しており、計算機によりこの RNN の状態を計算している。RNN は、情報を保持する多数のノードから構成されており、ノード間には情報のやり取りを行うノード間非線形結合が定義されている。また、このノード間結合によりノード間にはクロズドループを持つ部分も存在する。このクロズドループにより、RNN は現在の情報だけでなく、過去の情報をも含んだ機械学習を可能としている。しかしながら、クロズドループを含む系の状態を計算機により計算する場合、多くの計算リソースを必要とする。現在、ディープラーニングにおける計算機の消費電力は無視できない程増大しており、その消費電力を低減させることが急務となっている。

RNN の消費電力を低減させることを目的にニューラルネットワークを何らかの物理現象で置き換える試みがなされている。これまでに RNN を拡張した reservoir computer (RC)<sup>2)</sup> を用い、光を利用した RC<sup>3)</sup>、磁性ドットのダイナミクスを使用した RC<sup>4)</sup> などが報告されている。いずれの手法も MHz から GHz 程度の周波数帯で動作する。このため、音声認識や異常振動検出といった低周波数での用途には周波数を変換して使用する必要があり、別途計算リソースを必要とする。そこで我々は、より低周波の信号を直接扱うことのできる磁性ドットアレイを用いた RNN, nanomagnet RNN (NM-RNN) を提案している<sup>5)</sup>。これまでに、NM-RNN は短期記憶能力ならびに非線形演算能力を有することが明らかとなっている。しかしながら、NM-RNN のノード数と短期記憶能力ならびに非線形演算能力との関係は未だ明らかとなっていない。そこで本研究では、マクロスピシミュレーションを用い、NM-RNN のノード数に依存した短期記憶能力と非線形演算能力との関係を明らかにすることを目的とする。



**Fig. 1** Schematic top view of typical nanomagnet recurrent neural network

図 1 に NM-RNN の一例を示す。本研究では、 $N$  行 2 列の NM-RNN を用いる。図 1 に示した NM-RNN は、 $10 \times 2$  個の磁性ドットから構成されている。それぞれの磁性ドットは、垂直磁化膜から構成され、磁性ドット間には静磁気相互作用が働く。この静磁気相互作用により、ノード間にはクロズドループが形成される。本研究では、静磁気相互作用として、磁気双極子相互作用を仮定した。また、 $z$  軸方向に磁化容易軸をもつとし、Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式を 4 次の Runge-Kutta 法にて解くことにより、各磁性体の磁化の安定状態を計算した。

本研究では、NM-RNN の性能を評価するためバイナリタスクを利用した。各磁性ドットの磁化の  $x$  成分を NM-RNN の各ノードの状態とした。情報の入力には NM-RNN の入力用ドットの磁化の向きを書き換えることにより行った。また入力情報には、ランダムに生成した“0”もしくは“1”の情報を使用した。NM-RNN の状態の更新には、情報が  $+y$  の向きへと流れる様、各磁性ドットの磁気異方性定数を変化させた。

その結果、磁性ドットの数  $+y$  方向に増加させると短期記憶能力を向上させることが明らかとなった。一方で、非線形演算能力の向上は、短期記憶能力の向上と比較し緩やかなものとなった。より高性能な NM-RNN の実現には、素子の構造を変更することにより非線形演算能力を向上させることが必要となる。

本研究は総務省による委託研究「次世代人工知能技術の研究開発 II 人間の脳の演算処理メカニズムに倣った脳型演算処理技術の研究開発」のもと実施されました。

### References

- 1) H. T. Siegelmann and E. D. Sontag: *Appl. Math. Lett.*, **4**, 77 (1991).
- 2) H. Jaeger: *techreport GMD – German National Research Institute for Computer Science*, 148 (2001).
- 3) K. Vandoorne, P. Mechet, T. V. Vaerenbergh, M. Fiers, G. Morthier, D. Verstraeten, B. Schrauwen, J. Dambre and P. Bienstman: *Nature Comm.*, **5**, 3541 (2014).
- 4) J. Torrejon, et al.: *Nature*, **547**, 428 (2017).
- 5) 野村光, 中谷亮一, ペーパー フェルディナンド, 田村英一, 三輪真嗣, 後藤稔, 鈴木義茂: 応用物理学会春季講演大会 18p-D104-4 (2018).