

## TMR センサを用いたプロトン核磁気共鳴信号の検出

大兼 幹彦<sup>1</sup>, 我妻 宏<sup>1</sup>, 水上 成美<sup>2</sup>, 藤原 耕輔<sup>3</sup>, 熊谷 静似<sup>3</sup>, 安藤 康夫<sup>1</sup>  
 (<sup>1</sup>東北大学工学研究科, <sup>2</sup>東北大学材料科学高等研究所, <sup>3</sup>スピンセンシングファクトリー(株))

### Detection of NMR signal by TMR based sensors

M. Oogane<sup>1</sup>, H. Wagatsuma<sup>1</sup>, S. Mizukami<sup>2</sup>, K. Fujiwara<sup>3</sup>, S. Kumagai<sup>3</sup>, Y. Ando<sup>1</sup>  
 (<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Tohoku University, <sup>2</sup>AIMR, Tohoku University,  
<sup>3</sup>Spin Sensing Factory Corp.)

### はじめに

強磁性トンネル接合を用いた磁気センサ (TMR センサ) の高感度化が飛躍的に進んでおり, ヒトの心臓や脳から発生する微弱な生体磁場の検出が可能になっている<sup>1</sup>。本研究では, プロトンの核磁気共鳴 (NMR) 信号を TMR センサにより検出することを目的として研究を行った。プロトンの NMR 信号が, 地磁気程度の微弱な外部磁場下で検出可能になれば, 将来的にコンパクトな磁気共鳴画像診断装置 (MRI) への応用が期待できる。

### 実験方法

水を含んだペットボトルサイズの容器に, プロトン核磁化を励起するためのソレノイドコイルを巻き, 容器中央に TMR センサを配置した。また, コイル付き容器の外側に, 外部磁場印加用のヘルムホルツコイルを設置した (図 1)。ソレノイドコイルにパルス電流を印加して核磁化を励起した後, ヘルムホルツコイルにより発生させた直流外部磁場方向に核磁化が緩和する過程を TMR センサによって測定した。

### 実験結果

NMR 測定に用いた TMR センサの性能を評価した結果, その磁場分解能は 1 kHz において約 300 fT/Hz<sup>1/2</sup> と非常に小さいことが分かった。図 2 に直流外部磁場を約 40  $\mu$ T とした場合の, 核スピンの自由誘導減衰 (FID) 運動に起因する NMR 信号の一例を示す。明瞭な FID 信号が観測され, またその周波数は, プロトン核磁化の共鳴周波数と一致した。これらのことから, TMR センサにより, 明瞭な NMR 信号の観測に成功したと言える。

### 謝辞

本研究は JST-S イノベプロジェクト、東北大学先端スピントロニクス研究開発センター、および、スピントロニクス学術連携研究教育センターの支援を受けて行われた。

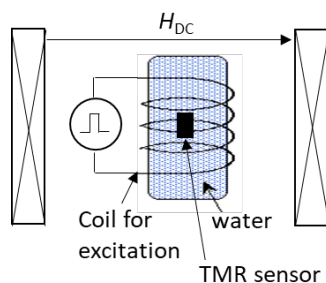


図 1 NMR 測定システム概略図

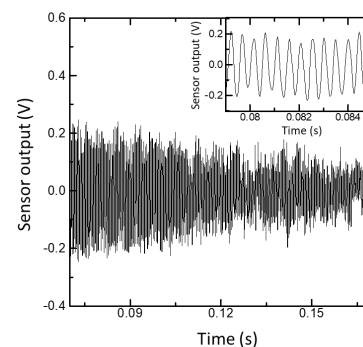


図 2 測定した NMR 信号 (挿入図は拡大図)

### 参考文献

- 1) K. Fujiwara *et al.*, Appl. Phys. Express, 11 023001 (2018).

# CoFeBTa アモルファス軟磁性層を用いた TMR センサ

Mahmoud Rasly, 中谷友也, 李 江南, Hossein Sepehri-Amin, 介川裕章, 桜庭裕弥  
(物質・材料研究機構)

TMR sensors with amorphous CoFeBTa soft magnetic layer

M. Rasly, T. Nakatani, Jiangnan Li, H. Sepehri-Amin, H. Sukegawa, Y. Sakuraba  
(National Institute for Materials Science)

## はじめに

トンネル磁気抵抗 (TMR) を用いた磁気センサにおいて、用途に応じてセンサの磁気特性を設計することが重要である。生体磁気や欠陥検査など微弱な磁界の検出には、軟磁性で高感度かつ、低ノイズのセンサが必要である。そのような TMR センサの自由層として、NiFe (パーマロイ) と CoFeB の積層構造が報告されているが[1]、一般に NiFe と結晶化 CoFeB の結晶対称性の違いにより TMR 比が低下することが問題である。CoFeSiB などアモルファス軟磁性材料も有効であるが[2]、300 °C 程度で結晶化して軟磁性が損なわれることが課題である[3]。そこで本研究では、CoFeB に Ta を添加することで結晶化を抑制した、CoFeBTa (CFBT) を自由層に用いた TMR 素子の磁気特性、TMR および低周波ノイズ特性を調査した。

## 実験方法

TMR 素子の積層構造は、下部電極/Ta (5)/CFBT (20)/Ta (0.3)/CoFeB (3)/MgO (1.8)/CoFeB(2.5)/CFBT (0.6)/CoFe (0.5)/Ru (0.8)/CoFe (3)/IrMn (8)/Ru (8) (膜厚は nm) の上部ピンのスピバルブである。CFBT は  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$  と Ta の同時スパッタにより成膜し、Ta 濃度は 9 at. % である。スピバルブ素子を磁界中で 2 度アニールすることで、固定層磁化と自由層の容易軸が直交した磁化配列[1]を実現した。単一素子およびフルブリッジの低周波ノイズ特性を、FFT アナライザにより測定した。

## 実験結果

図 1 に TMR-磁界特性を示す。2 度目のアニール温度 ( $T_{2nd}$ ) が 200 °C の場合、y 方向の自由層の磁気異方性と、x 方向のピン方向の直交関係により、ほとんどヒステリシスのない線形な TMR 曲線が得られ、磁気センサとして好ましい特性である。 $d\text{TMR}/dH (= dR/dH \cdot 1/R_{min})$  で定義される感度は最大 70 %/mT である。一方、 $T_{2nd} = 250$  および 280 °C の場合、TMR 曲線はヒステリシスを示す。これは、x 方向にも誘起された自由層の磁気異方性により、Stoner-Wohlfarth モデルで説明できる。

図 2 は 50  $\mu\text{m}$  径の単一素子の、中間磁化状態 (図 1 で  $\mu_0 H = +1$  mT) におけるノイズスペクトラムである。1 Hz–10 kHz の周波数帯域では  $1/f$  ノイズが支配的であり、その電圧密度 ( $\sqrt{S_v}$ ) はバイアス電圧 ( $V_b$ ) に比例して増大する。また、 $V_b = 60$  mV においてランダムテレグラフノイズが観測された。10 Hz における  $V_b$  で規格化したノイズレベル ( $\sqrt{S_v}/V_b$ ) は、中間磁化状態で 1.3 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ /mV、および平行磁化状態で 0.7 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ /mV であり、NiFe を用いた場合の 3.3 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ /mV (平行磁化状態) に比べ小さく、アモルファス CFBT の優位性が示された。また、最小検出磁界 (detectivity) は、10 Hz において 2.2 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  であった。

**参考文献** [1] Fujiwara et al. J. Appl. Phys. 111, 07C710 (2012), Jpn. J. Appl. Phys. 52, 04CM07 (2013). [2] Kato et al. Appl. Phys. Express 6, 103004 (2013). [3] Jimbo et al. J. Appl. Phys. 117, 17A313 (2015).

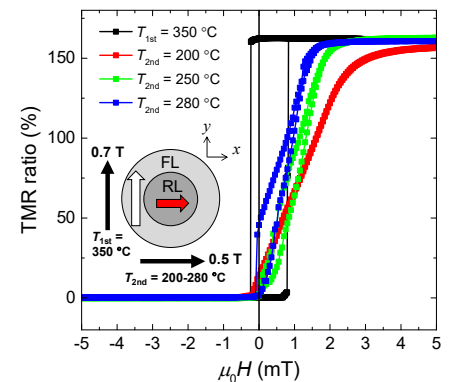


図 1 TMR 曲線のアニール温度依存性

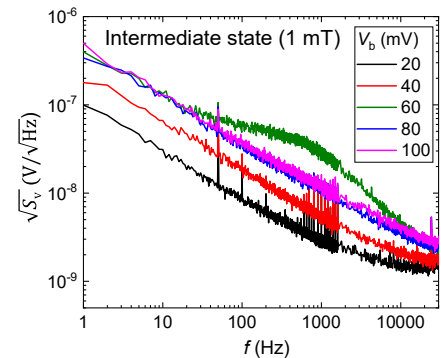


図 2 単一 TMR 素子のノイズ特性

# [CoPd/Pd]/[Co/Pd]ハイブリッドメモリ層の熱アシスト STT 磁化反転

趙望臻, 加藤剛志, 大島大輝, 園部義明\*, 高橋茂樹\*, 岩田聡

(名古屋大学, \*サムスン日本研究所)

Thermally assisted STT switching of hybrid memory layer using CoPd/Pd and Co/Pd multilayers

W. Zhao, T. Kato, D. Oshima, Y. Sonobe\*, S. Takahashi\*, S. Iwata

(Nagoya Univ., \*Samsung R&D Institute Japan)

## 1. はじめに

スピントランスファートルク (STT) 磁化反転方式は Gbit 級磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) の書き込み手段として利用されているが, 10 Gbit 級の大容量の MRAM を実現するには, 高い熱安定性( $\Delta$ )と低い臨界電流密度( $J_c$ )の両立が求められている。我々は低キュリー温度 ( $T_c$ ) の CoPd/Pd 多層膜 (ML) と高  $T_c$  の Co/Pd ML を用いたハイブリッドメモリを設計し, 熱アシストによる高効率な STT 磁化反転が実現できることを検証した [1-3]。今回, スピン偏極電流により磁化反転のトルクが加わる高  $T_c$  層の層厚比を変化させた  $[\text{Co}(x) / \text{Pd}(1.6-x)]_1 / [\text{CoPd} / \text{Pd}]_2$  ( $x = 0.4, 0.6, 0.8$ ) ハイブリッドメモリ層を用い, STT 磁化反転の  $\Delta$  と  $J_c$  の温度依存性を調べた。さらに, ハイブリッドメモリ層の実効磁気異方性定数( $K_{\text{eff}}$ )の温度依存性などと STT 磁化反転との関係を検討した。

## 2. 実験方法

熱酸化膜付 Si 基板上にマグネトロンスパッタ法により, Si Sub/ Ta(10) / Cu<sub>70</sub>Ta<sub>30</sub>(150) / Pt(5) / [Pt(1.0) / Co(0.6)]<sub>6</sub> ML / Cu(2.5) / [Co( $x$ ) / Pd(1.6- $x$ )]<sub>1</sub> ML / [Co<sub>48</sub>Pd<sub>52</sub>(0.4) / Pd(1.2)]<sub>2</sub> ML / Cu(5) / Ta(5) (層厚の単位は nm) という GMR 構造を作製した。光露光, EB 露光及び Ar<sup>+</sup>イオンエッチングにより, GMR 膜を微細加工し, 接合部の直径が 120 nm から 300 nm までの CPP-GMR 接合を作製した。STT 磁化反転は CPP-GMR 接合に電流パルス(パルス幅  $\tau = 10 \mu\text{s} - 100 \text{ms}$ )を印加した後の抵抗値を測定することで観測した。パルス幅依存性を  $\tau = 1 \text{ns}$  まで外挿し, 臨界反転電流密度  $J_{c0}$ , および  $\Delta$  を見積もった。試料を加熱ステージに置いて測定することで,  $J_{c0}$ ,  $\Delta$  の温度依存性を調べた。また, ハイブリッドメモリ層のみの Si Sub/ Ta(5) / [Co( $x$ ) / Pd(1.6- $x$ )]<sub>1</sub> ML / [Co<sub>48</sub>Pd<sub>52</sub>(0.4) / Pd(1.2)]<sub>2</sub> ML / Ta(2) を作製し, 実効垂直磁気異方性  $K_{\text{eff}}$  を測定した。

## 3. 実験結果

Fig. 1 は  $x = 0.4, 0.6, 0.8$  のハイブリッドメモリ層の  $J_{c0}$ ,  $\Delta$  の温度依存性を示している。 $J_{c0}$  と  $\Delta$  はともに温度上昇により減少し, 熱アシスト STT 磁化反転が確認される。 $x = 0.4, 0.6$  に対し,  $x = 0.8$  では  $J_{c0}$  が大きく減少している。一方,  $x = 0.8$  の  $\Delta$  は他の試料に対し, 大きく減少していない。Fig. 2 はハイブリッドメモリ層の  $K_{\text{eff}}$  の温度依存性を示している。 $x$  の増加により磁化が増大するため,  $K_{\text{eff}}$  と  $\Delta$  の温度依存性の差異は STT 磁化反転の反転核の大きさの差に起因すると考えられる。 $x = 0.8$  の  $\Delta$  が他の試料に対し大きく減少していないのに対し,  $J_{c0}$  は大きく減少している。この原因として,  $x = 0.8$  は  $x = 0.4, 0.6$  に対し, ダンピング定数が小さいためと考えられる [4]。これらの結果から, 界面に低ダンピング, 高  $T_c$  材料を用いることが, 室温での  $J_{c0}$  低減に寄与したと考えられる。また, 高温では, 低  $T_c$  の CoPd/Pd 多層膜の磁化が消失することで,  $\Delta$  が減少し,  $J_{c0}$  が低下するという熱アシスト効果が観測されている。

## 4. 参考文献

- [1] Machida et al., IEEE Trans. Magn., **53**, 2002205 (2017).
- [2] W. Zhao et al., IEEE Trans. Magn., **54**, 3450405 (2018).
- [3] W. Zhao et al., J. Magn. Magn. Mater., **493**, 165749 (2020).
- [4] T. Kimura et al., Jpn. J. Appl. Phys., **57**, 09TD01 (2018).

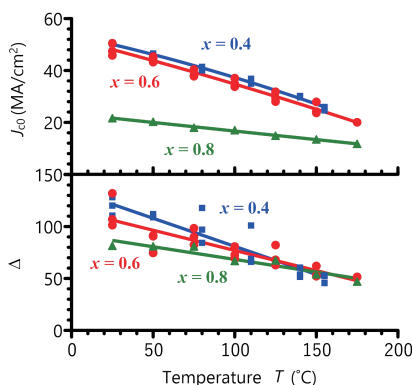


Fig. 1 Temperature dependence of intrinsic critical current density  $J_{c0}$  and thermal stability factor  $\Delta$  of the hybrid memory layer of  $[\text{Co}(x)/\text{Pd}(1.6-x)]_1 / [\text{CoPd}/\text{Pd}]_2$

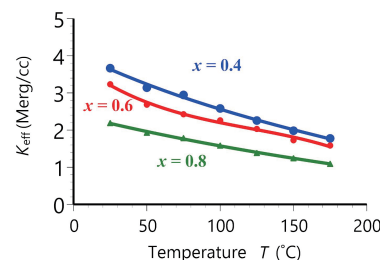


Fig. 2 Temperature dependence of effective anisotropy  $K_{\text{eff}}$  of  $[\text{Co}(x)/\text{Pd}(1.6-x)]_1 / [\text{CoPd}/\text{Pd}]_2$ .

# D0<sub>3</sub>-FeAlSi エピタキシャル電極を用いた MTJ 素子の作製

赤松昇馬、大兼幹彦、角田正清、安藤康夫  
(東北大学大学院 工学研究科)

Fabrication of MTJs using FeAlSi epitaxial electrode with low magnetic anisotropy

S. Akamatsu, M. Oogane, M. Tsunoda, Y. Ando  
(Graduate School of Engineering, Tohoku University)

## はじめに

強磁性トンネル接合 (MTJ) センサの感度向上のために、高トンネル磁気抵抗 (TMR) 比と軟磁気特性を両立するフリー層材料が求められている。本研究では D0<sub>3</sub> 規則構造を有し、良好な軟磁気特性を示す Fe<sub>85</sub>Al<sub>5</sub>Si<sub>9.6</sub> (センダスト、以下 FeAlSi) に着目した。優れた軟磁気特性に加えて、Fe 電極に類似した結晶構造を有することで、MgO 絶縁層を介した  $\Delta_1$  電子のコヒーレントトンネリングによる高 TMR 比が期待される[1]。先行研究により[2]、MgO 基板上で D0<sub>3</sub>-FeAlSi エピタキシャル薄膜の作製に成功し、良好な軟磁気特性も観測している。本研究の目的は、FeAlSi エピタキシャル電極を用いた MTJ 素子を作製し、その TMR 特性を評価することである。

## 実験方法

MgOsub./MgO(20)/FeAlSi(30)/MgO(2.0)/CoFe(5)/IrMn(10)/Ta(5)/Ru(10)(in nm)( $T_{\text{FeAlSi}}=400^\circ\text{C}$ ,  $T_a=300\text{-}425^\circ\text{C}$  w/1 T) 構造の MTJ 多層膜をマグネトロンスパッタ法で作製した。また、作製した多層膜をフォトリソグラフィおよび Ar イオンミリングを用いて MTJ 素子形状に微細加工した。作製した MTJ 素子について、直流 4 端子法により磁気抵抗特性を評価した。

## 実験結果

Fig. 1 に D0<sub>3</sub>-FeAlSi エピタキシャル電極を用いた MTJ 素子の磁気抵抗曲線の熱処理温度依存性を示す。300°C 以上の熱処理によって、D0<sub>3</sub>-FeAlSi を電極とした MTJ 素子において、初めて TMR 効果の観測に成功した。最大の TMR 比は熱処理温度が 325°C において、58.4% であった。さらに、D0<sub>3</sub>-FeAlSi の良好な軟磁気特性を反映した、比較的小さな反転磁場も確認できた。一方、350°C を超える熱処理によって、TMR 比の大きな減少が観測された。今後、FeAlSi 電極層、および、下地層の成膜条件のさらなる最適化を行い、熱処理温度耐性を改善することによって、TMR 比のさらなる向上が期待される。以上の結果より、D0<sub>3</sub>-FeAlSi は、MTJ センサの感度向上に有望な材料と考えられる。

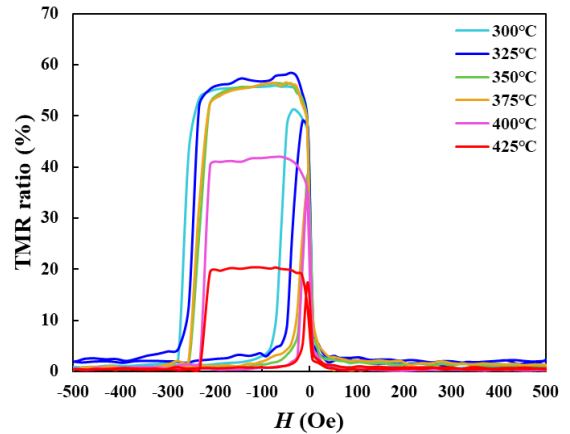


Fig.1 Magnetoresistance curve in epitaxial MTJ with FeAlSi electrode

## 謝辞

本研究は JST-S イノベプロジェクト、東北大学先端スピントロニクス研究開発センター、および、スピントロニクス学術連携研究教育センターの支援を受けて行われた。

## 参考文献

- [1] W. H. Butler *et al.*, Phys. Rev. B, 63, 054416 (2001).
- [2] S. Akamatsu *et al.*, AIP Advances, 10, 015302 (2020).