

# 微小磁場下におけるアモルファス CoFeSiB 電極

## 強磁性トンネル接合の磁気抵抗特性

加藤 大樹, 大兼 幹彦, 藤原 耕輔, 荒井 雄貴, 城野 純一\*, 永沼 博, 土田 匡章\*, 安藤 康夫  
(東北大院工, コニカミノルタ\*)

Tunnel Magneto-resistance Properties in Magnetic Tunnel Junctions with Amorphous CoFeSiB Electrode  
in Low Magnetic Field

D. Kato, M. Oogane, K. Fujiwara, Y. Arai, J. Jono\*, H. Naganuma, M. Tsuchida\*, and Y. Ando  
(Tohoku Univ., Konicaminolta\*)

### 背景

微小な生体磁場 ( $< 10^{-6}$  Oe) を計測することにより、病気の早期診断や高次機能解明が可能になる。近年、強磁性トンネル接合 (MTJ) 素子の高感度化により、室温で生体磁場計測が可能な MTJ センサの開発が積極的に行われている<sup>1)</sup>。これまでにアモルファス CoFeSiB をフリー層に用いた MTJ 素子において、115%/Oe の世界最高の磁場感度(=TMR 比/ $2H_k$ ,  $H_k$ : 異方性磁場)が得られているが<sup>2)</sup>、詳細なセンサ特性評価は行われていなかった。本研究では、CoFeSiB 電極 MTJ 素子の微小磁場下における磁気抵抗特性の評価を行った。

### 実験方法

超高真空マグネトロンスパッタ装置を用い、熱酸化膜付シリコン基板上に MTJ 薄膜を作製した。MTJ の膜構成は Si, SiO<sub>2</sub> subs./Buffer/Co<sub>70.5</sub>Fe<sub>4.5</sub>Si<sub>15</sub>B<sub>10</sub> (100)/Ru (0.4)/Co<sub>40</sub>Fe<sub>40</sub>B<sub>20</sub> (3)/MgO (1.45, 2.5)/Co<sub>40</sub>Fe<sub>40</sub>B<sub>20</sub> (3)/Pin/Cap (in nm) である。フォトリソグラフィ法により 4 端子 MTJ 素子を形成した。二度の磁場中熱処理により磁化容易軸が直交した磁場センサ型 MTJ を作製した。直流磁場下における磁気抵抗特性を四端子法により測定した。3.3Hz の交流磁場下におけるシグナル電圧、および、0.1 – 10 Hz の低周波領域のノイズ特性評価をブリッジ回路により測定した。

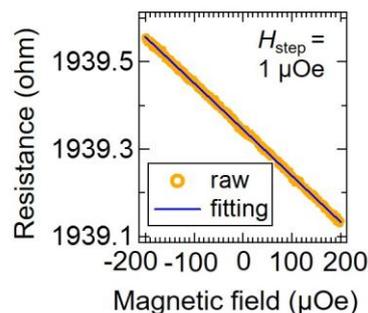


Fig.1 Magneto-resistance curve in low field region

### 実験結果

Fig. 1 に直流磁場範囲 200  $\mu$ Oe の磁気抵抗曲線を示す。ヒステリシスは観測されず、外部磁場に対してリニアな特性を有していることが分かる。Fig. 2 にシグナル電圧の交流磁場振幅依存性を示す。振幅に対してリニアに出力が変化している領域が磁場を検出できていることを示している。直線とノイズ電圧の交点である、最小検出可能磁場は  $2 \times 10^{-4}$  Oe であった。この値は  $100 \times 100$  個程度の MTJ 素子の集積化により、心臓磁場を検出可能な性能である。本講演では、シグナル電圧およびノイズ特性の外部磁場依存性についても議論する予定である。

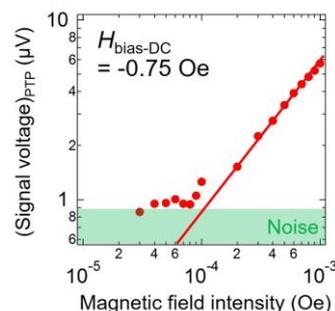


Fig. 2 External magnetic field dependence of signal voltage

### 謝辞

本研究は JST 戦略イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)、東北大学国際集積エレクトロニクス研究開発センター、JSPS 特別研究員奨励費(課題番号:15J02067)の支援を受けて行われた。

### 参考文献

1) 東北大学プレスリリース、2015年7月23日、 2) D. Kato *et al.*, 第39回日本磁気学会学術講演会 (2015)

# 強磁性トンネル接合における室温巨大磁気キャパシタンス効果

海住英生、武井将志、三澤貴浩、長浜太郎\*、西井準治、Gang Xiao\*\*  
(北大電子研、\*北大工、\*\*ブラウン大学)

Room temperature large magnetocapacitance effect in magnetic tunnel junctions

H. Kaiju, M. Takei, T. Misawa, T. Nagahama\*, J. Nishii and G. Xiao\*\*  
(Hokkaido Univ. RIES, \*Hokkaido Univ. Eng., \*\*Brown Univ. Rhys.)

## はじめに

近年、スピントロニクス材料・デバイスにおける磁気キャパシタンス (MC) 効果は、交流スピンドイナミクスに関する新たな学術的知見を与えられる一方、高感度磁気センサー、高周波磁気インピーダンス素子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[1-5]。中でも、強磁性トンネル接合 (MTJ) は、興味深い交流スピンドイナミクスを示すと同時に、室温にて 50% 程度の大きなトンネル磁気キャパシタンス (TMC) 効果を示す。しかしながら、TMC 効果のメカニズムには不明な点が多く、また、TMC 比は、トンネル磁気抵抗 (TMR) 比の最大値 (~600%) と比較しても、一桁程度小さい。そこで、本研究では、TMC 効果のメカニズムを明らかにするとともに、TMC 比の向上を目指すことを目的とした。

## 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 基板の上に 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 3 nm、絶縁層 MgO の膜厚は 2 nm 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 μm<sup>2</sup> 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。測定周波数帯域は 80–1MHz、交流振幅電圧は 0.26 mV<sub>rms</sub>、最大印加磁場は 1.4 kOe とした。

## 実験結果

図 1 に TMC 効果の周波数依存性を示す。200 Hz 付近で TMC 比が最大値 (=155%) を示す。これは TMC 比の従来値 (~50%) を大きく超える。また、TMR 比は周波数に依存せず 108% であったため、TMC 比は TMR 比よりも大きくなることも明らかになった。図 2 に TMC 比と磁化平行・反平行状態でのキャパシタンス C<sub>P(AP)</sub> の周波数特性を示す。実験結果は Debye-Fröhlich モデルを用いた計算結果 (実線) と良い一致を示した。すなわち、磁場により MTJ の磁化配置が変化すると、絶縁層をトンネルするキャリアの緩和時間が変化し、これにより動的誘電分極が変化する。この誘電分極の変化がキャパシタンスの変化となる[6]。講演ではより詳細な実験・計算結果を報告する。

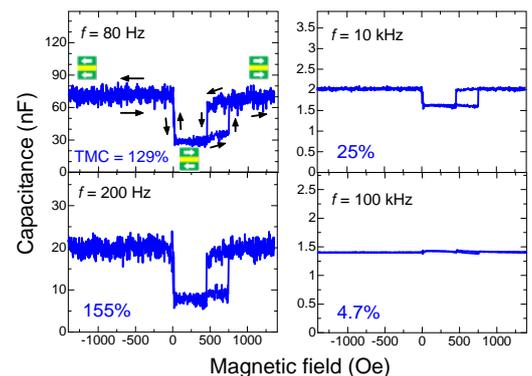


図 1: MTJ における TMC 効果

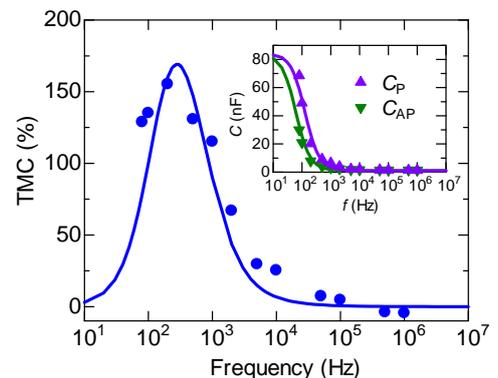


図 2: TMC 比と C<sub>P(AP)</sub> の周波数特性

## 参考文献

- [1] H. Kaiju *et al.*: *J. Appl. Phys.* **91**, 7430 (2002). [2] P. Padhan *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **90**, 142105 (2007).  
[3] N. Kobayashi *et al.*: *Nat. Commun.* **5**, 4417 (2014). [4] J.-Y. Hong *et al.*: *SPIN* **4**, 1440015 (2014).  
[5] T.-H. Lee *et al.*: *Sci. Rep.* **5**, 13704 (2015). [6] H. Kaiju *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **107**, 132405 (2015).

# Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 電極と MgO バリアを用いたトンネル磁気抵抗素子の作製

山本雄太、佐々木駿、柳瀬隆\*、島田敏宏\*、長浜太郎\*

(北大院総合化学院、\*北大院工学研究院)

Fabrication of tunnel magnetoresistance devices using Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> electrode  
and MgO barrier

Y. Yamamoto, S. Sasaki, T. Yanase\*, T. Shimada\*, T. Nagahama\*

(Hokkaido Univ. of Graduate School of Chemical Science and Engineering,

\*Hokkaido Univ. of Graduate Faculty of Engineering)

## はじめに

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>は、理論的にフェルミ面近傍で-100%のスピンの分極率を示すハーフメタルという性質を持つと予測されており、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>を電極材料として用いたトンネル接合において大きな負の TMR 効果を得ることが期待されている。しかし、今のところ、期待されたほど大きな TMR 効果が得られていない。過去に Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 電極と Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> バリアを用いた接合において-12%の TMR 比が得られたという報告<sup>1)</sup>があるが、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>のスピンの分極率から考えると、十分大きな値とは言えない。一方で Fe(100)電極を用いた接合においてバリアを Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> から MgO に変えることで飛躍的な TMR 比の増大がなされている。そこで本研究では、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/MgO/Fe のトンネル磁気抵抗素子を作製し、電氣的、磁氣的の評価を試みた。

## 実験方法

本研究では、到達真空度  $1.0 \times 10^{-7}$  Pa の超高真空中で MBE 法を用いて製膜を行った。作製した接合の構造は、MgO(100)基板/MgO/NiO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/MgO/Fe/Au とした。製膜後の結晶性の評価には RHEED を用いた。電氣的、磁氣的の特性の評価をするために、フォトリソグラフィ、Ar イオンミリング、スパッタを用いて微細加工を行い、素子を作製した。作製した素子を用いて I-V 測定や磁気抵抗効果の測定を行った。

## 実験結果

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>層は基板温度 300°C、O<sub>2</sub>雰囲気下で反応性蒸着を行い、600°C、O<sub>2</sub>雰囲気下で 30 分間アニールを行った。MgO バリア層は室温、O<sub>2</sub>雰囲気下で反応性蒸着を行い、その後、150°C で 30 分間アニールを行った。RHEED からは、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、MgO ともにストリークを示しており、平坦性の良い膜が得られた。微細加工後の素子の磁気抵抗効果の測定から 80K において-47%の TMR 効果が得られた (Fig.1)。また、TMR 比の温度依存性から低温になるにつれて、TMR 比の増大が確認された (Fig.2)。

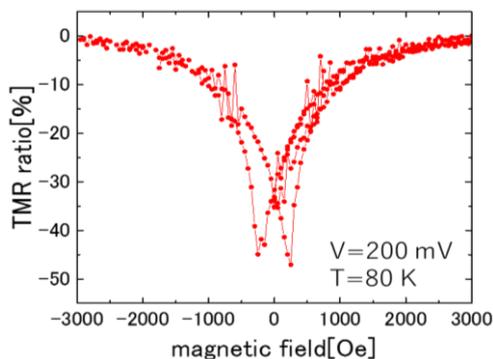


Fig.1 TMR observed for Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> MTJs

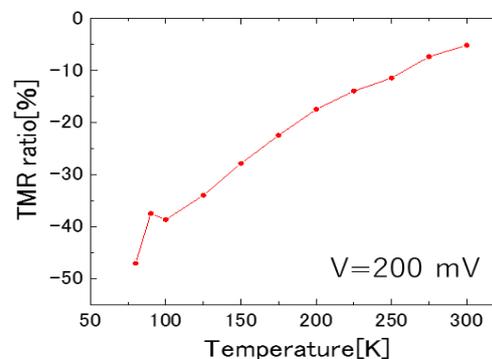


Fig.2 Temperature dependence of TMR ratio

## 参考文献

- 1) T. Nagahama et al., Appl. Phys. Lett. **105** (2014) 102410

## 強磁性絶縁体を用いた MTJ における MR 効果

左手宏毅, 本多周太, 伊藤博介  
(関西大学システム理工学部)

MR effect in MTJ with ferromagnetic insulator

K. Sate, S. Honda, and H. Itoh

(Department of Pure and Applied Physics, Kansai University)

### はじめに

現在 MR 素子に使われている強磁性金属(FM)/非磁性絶縁体(NI)/強磁性金属(FM)の3層構造では、高密度化すなわち微細化の際に書き込み電流が増加してしまうという問題点を抱えている。この解決策の一つとして強磁性絶縁体によるスピフィルター効果を利用した素子が提案されている。本研究では強磁性金属(FM)/非磁性金属(NM)/強磁性絶縁体(FI)/非磁性金属(NM)の4層構造を考える。この素子においても MR 効果が発現することを示し、応用上有利となる材料や構造の条件を明らかにすることを本研究の目的とする。

### モデルと計算方法

本研究ではエピタキシャルに接合されている、すなわち乱れが無い4層構造 FM/NM/FI/NM を考える。この構造に対して3次元量子井戸型ポテンシャルのモデルを適応する。今回は FM と NM 部分が Fe/Cr の特徴を再現するようにポテンシャルを設定した。このモデルにおいて3次元シュレディンガー方程式を解析的に解くことで透過率に対する表式を求め、ランダウアー公式を用いて FM と FI の磁化が平行と反平行の場合のコンダクタンス  $G_p, G_{ap}$  を求めた。この際必要となる波数についての積分はコンピュータで数値計算した。また、MR 比を  $MR=1-G_{ap}/G_p$  と定義した。

### 計算結果

NM 膜厚と MR 比の関係を Fig.1 に示す。MR 効果が発現し、NM 膜厚の増加とともに MR 比が振動している。その振動周期は NM のフェルミ波長の2分の1になっており、MR 比の振動は NM 内での干渉効果によって生じていると考えられる。次に従来の3層構造 FM/NI/FM 及び本研究の4層構造における絶縁体膜厚と MR 比の関係を Fig.2 に示す。ここで4層構造の NM 膜厚は各 FI 膜厚に対して MR 比が最大となる膜厚を選択した。4層構造においては FI の膜厚の増加とともに MR 比の最大値が増加した。また、FI 膜厚が 1nm 以上では MR 比の最大値は従来の3層構造 FM/NI/FM の MR 比より大きくなることが明らかとなった。

以上の結果から、今回の4層構造で FI および NM の膜厚を適切に選択することで、従来の3層構造を超える MR 比が得られると結論付けることが出来る。さらに、NM の材料としてフェルミ波長の長い物質を用いることで、NM 膜厚のばらつきによる MR 比のばらつきを抑制できると考えられる。

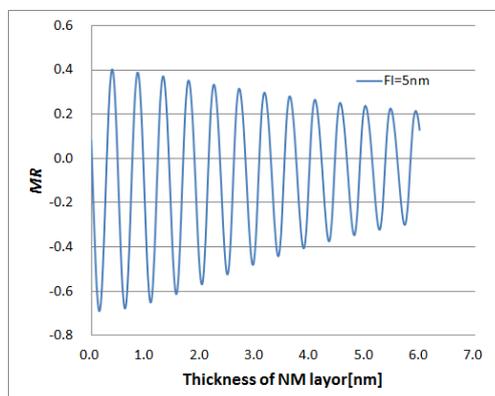


Fig.1 MR ratio vs NM thickness

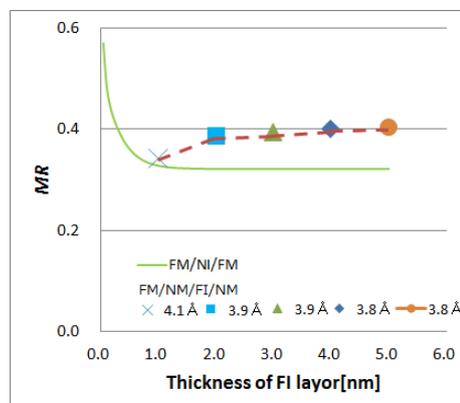


Fig.2 MR ratio vs FI thickness  
calculated for various NM thickness