

トンネル磁気抵抗素子の $1/f$ ノイズの温度特性評価

大学院工学研究科 大兼 幹彦 (mikihiko.ogane.e4@tohoku.ac.jp)
大学院工学研究科 王 育鵬 (wang.yupeng.r6@dc.tohoku.ac.jp)

1. 研究の背景

スピントロニクスは、電子の電荷とスピンの二つの自由度を活用することで、従来のエレクトロニクスでは実現できなかった高機能・高効率デバイスを実現する学際的研究分野である。その中核となる物理現象が、トンネル磁気抵抗 (TMR) 効果である。1995 年に室温で約 20% の TMR 効果が発見された後 [1, 2]、2001 年に Fe/MgO/Fe 構造を持つ磁気トンネル接合 (MTJ) において極めて大きな TMR 効果が発現するという理論予測がなされた [3, 4]。その数年後に、MgO トンネルバリア層を用いた MTJ において室温で約 200% という非常に大きな TMR 効果が観測されるに至った [5, 6]。また、製品応用上重要な Si 基板上に CoFeB/MgO/CoFeB 構造を有する MTJ が、230% という大きな TMR 比を示すことが報告され、この技術の社会実装が大きく加速された [7]。また、この CoFeB/MgO/CoFeB-MTJ 素子における巨大 TMR 効果が、高感度トンネル磁気抵抗センサ (TMR センサ) の技術的な基盤となっている。

CoFeB/MgO/CoFeB 構造の MTJ 素子は、大規模な Si 基板上に比較的簡便なプロセスで形成可能であることから、磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) や TMR センサ等に応用がなされている。MRAM では高・低抵抗の 2 値状態が必要であるため、記憶保持のための磁性材料には、硬磁性体がいられる。一方、TMR センサでは低磁場領域で抵抗が敏感に変化することが求められ、感度向上のために、非常に軟らかい磁性材料が利用される。近年では、高 TMR 効果と軟磁性層の両特性を併せ持つ CoFeB/MgO/CoFeB ベースの MTJ 素子が開発されており、室温において生体磁場などの微弱磁

場を検出するに至っている [8]。また、TMR センサは室温動作に加えて、デバイスサイズ・消費電力ともに小さい特徴を有することから、生体磁場応用以外にも、インフラ構造物の非破壊検査や電気自動車バッテリーの電流監視など、幅広い用途での研究や社会実装が進んでいる [9, 10]。

TMR センサの最終検出ターゲットである生体磁場は非常に微弱であり、これを検出するためには、低周波領域におけるノイズ低減が課題である。MTJ 素子の低周波ノイズは $1/f$ 特性を示し、その起源の一つとしてトンネルバリア内の欠陥や界面状態に起因する電子トラップ・デトラップ過程が知られているが、その詳細な物理機構は未解明である [11]。本研究では、このトンネルバリアおよび界面に起因する電気的 $1/f$ ノイズの起源解明を目的として、以下の研究を行った。

- (1) 温度変化可能な低システムノイズを有する MTJ 素子ノイズ評価系の構築
- (2) $1/f$ ノイズの MgO トンネルバリア層膜厚、および、測定温度依存性の評価

2. MTJ 素子ノイズ評価装置の構築

本研究で構築したノイズ測定システムを図 1 に示す。カンタムデザイン社の物理特性測定システム (PPMS) を用いることで、温度および印加磁場を可変なノイズ測定システムである。実験室にはノイズを遮蔽するための特別な磁気シールド室等の設備はなく、PPMS に付属のシールドに加え、システムノイズおよび環境ノイズの影響を低減するため、以下の(1)～(3)の工夫を行った。また、PPMS のサンプルホルダーにホールセンサを取り付けることで、印加磁場を正確に測定可能にした。

- (1) 交流電源を用いる測定機器は使用せず、バッテリー駆動の低ノイズアンプ（Stanford Research Systems 社製 SR560）、および、デジタル・アナログ変換器でデータを取得した。また、MTJ 素子への電源供給にもバッテリーを用いた。
- (2) 銅箔シールドで覆ったツイストケーブルを採用し、環境ノイズの影響を可能な限り回避した。
- (3) PPMS、および、測定回路および機器に対して共通接地を施し、システムノイズの影響を最大限除去した。

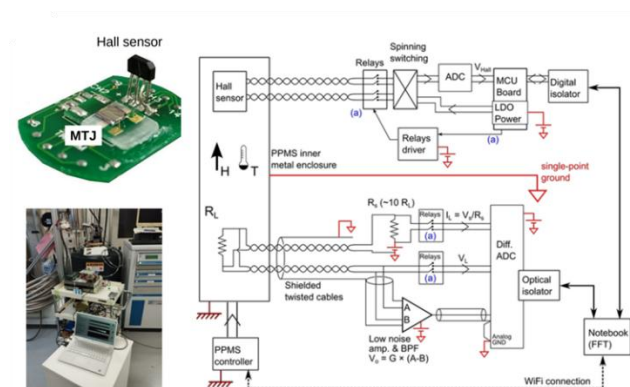


図 1 PPMS を利用して構築した温度変化可能な MTJ 素子の低ノイズ測定システムの概要

構築した測定システムを用いて、アンプのゲインを 50,000 倍とした場合のノイズ測定の一例を図 2 に示す。測定した MTJ 素子の多層膜構造は、SiO₂ 基板 /Ta(5)/Ru(10)/IrMn(10)/CoFe(2)/Ru(0.9)/CoFeB(3)/MgO(1.4)/CoFeB(3)/Ta(5)/Ru(10)（単位：nm）で、典型的な CoFeB/MgO/CoFeB-MTJ 素子の構造である。図 2 は、この MTJ 素子に対し、0.1 V の電圧を印加して測定した場合の結果である。比較として、レアメタル総合棟に設置されている磁気シールドルーム内で行った測定の結果、素子部をショートした場合のバックグラウンドノイズ、および、アンプの公称ノイズを図中に示している。図 2 から、構築システムでの測定結果は、磁気シールドルームでの測定と同等のノイズレベルであることが分かる。また、バックグラウンドノイズの

測定結果から、50 Hz の商用電源起因のノイズレベルはシールドルームに比べて大きいものの、ベースのノイズレベルはシールドルームの 2 倍程度に抑えられており、MTJ 素子のノイズに比べて十分に小さいことが分かる。さらに、高周波領域におけるホワイトノイズレベルはアンプの公称値に近づいており、構築したノイズ測定システムが良好な性能を有していることが確認できた。以上のことから、特殊な磁気シールドルーム無しで、温度変化（2 K～400 K）、および、磁場印加（± 9 T）可能な非常に低ノイズのノイズ測定システムが構築できたといえる。

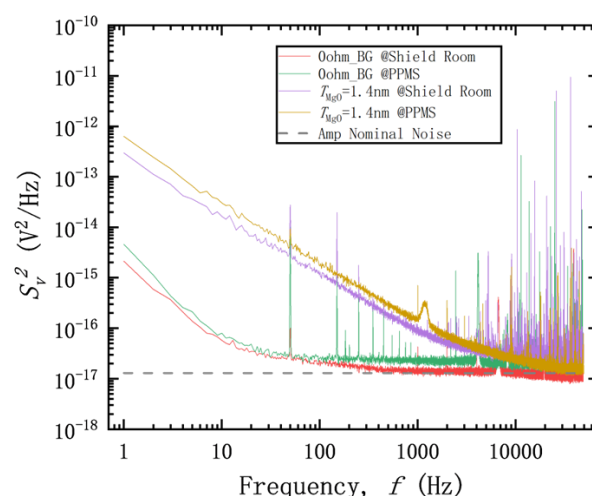


図 2 構築した測定系を用いて測定した典型的な CoFeB/MgO/CoFeB-MTJ 素子の $1/f$ ノイズスペクトル（比較として磁気シールドルーム内での測定結果、ショート時の測定結果、アンプノイズの公称値を示した）

3. MTJ 素子における電気 $1/f$ ノイズの測定

MTJ 素子におけるノイズは、周波数に依存しないホワイトノイズと周波数に依存する $1/f$ ノイズに大別できる。主なホワイトノイズの起源は、熱ノイズとショットノイズである。高温領域では熱ノイズが支配的であり、低温極限ではショットノイズが支配的になる。一方、周波数の逆数に比例する $1/f$ ノイズ S_v^2 (V²/Hz) は、以下の式で表される。

$$S_v^2 = \frac{\alpha V^2}{A f} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで V (V)はバイアス電圧、 $A(\mu\text{m}^2)$ は素子面積、 α は Hooge パラメータと呼ばれる $1/f$ ノイズの比例項であり、面積の次元を持つ。 $1/f$ ノイズの発生機構は 2 値の離散化された値を持つランダムテレグラフノイズの重ね合わせによって発生すると考えられている。このランダムテレグラフノイズの発現機構として、主に 2 つが考えられる。一つの原因は、磁化や磁壁の揺らぎに起因する磁気的ノイズである。磁性層中に磁化の運動をピンニングするような格子欠陥や不純物がある場合、磁化は欠陥や不純物のポテンシャルを超えて二つの位置間で揺らぎを生じてノイズとなる。もう一つは、絶縁障壁層内部や絶縁障壁層/強磁性体界面での電子トラップである。電子線蒸着を用いて MgO 障壁層を作製すると、スパッタリング法で作製した MgO 障壁層を有する TMR 素子と比べて電気 $1/f$ ノイズが低下するという報告がある[12]。本研究では、二つの磁性層の磁化が平行状態での測定を行い、磁気ノイズは小さく、電気 $1/f$ ノイズが支配的な条件下で実験を行った。

本研究で作製した MTJ 素子の膜構成を図 3 に示す。MgO 絶縁層の膜厚が電気 $1/f$ ノイズに影響すると考え、その膜厚を 1.0~2.0 nm で変化させた。MTJ 多層膜を超高真空スパッタ法で成膜後、フォトリソグラフィと Ar イオンミリングによって $40\mu\text{m} \times 80\mu\text{m}$ の素子に形成し、 350°C , 1T の印加磁場下で熱処理した。熱処理後、 $1/f$ ノイズの測定に加え、磁気抵抗特性およびトンネルコンダクタンスを 4 端子法により測定した。

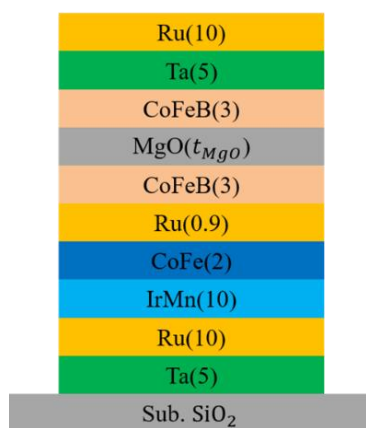


図 3 作製した MTJ 素子の膜構成

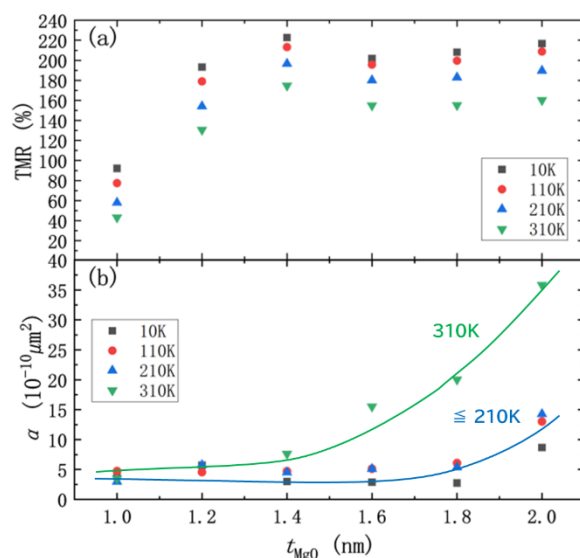


図 4 各測定温度における (a) TMR 効果、および (b) Hooge パラメータ α の MgO 膜厚依存性

図 4 (a)に作製した MTJ 素子の各測定温度における、TMR 効果の MgO 膜厚依存性を示す。MgO 膜厚が 1.0 nm 付近では TMR 比は低い値であったが、膜厚の増加に伴って向上し、1.4 nm 以上で飽和する傾向が見られた。MgO 膜厚が 1.4 nm より薄い領域では、MgO 膜中にピンホールが生じ、TMR 効果が減少したと考えられる。一方、1.4 nm 以上の領域では TMR 比は室温下においても 160% を超える値を示し、良質な素子が形成できたといえる。また、いずれの MgO 膜厚の試料についても、低温になるにつれて TMR 効果が単調に増大した。

これらの MTJ 素子について、構築した測定系を用いて $1/f$ ノイズの温度依存性を測定した。測定した $1/f$ ノイズスペクトルを (1) 式でフィッティングすることで、電気 $1/f$ のノイズの大きさを示す Hooge パラメータ α を見積もった。図 4 (b)に見積もった α の MgO 膜厚依存性を示す。210 K 以下の低温領域では、 α の温度依存性は比較的小さく、MgO 膜厚の増加によってノイズの増大が観測された。一方、310 K では、特に 1.6 nm 以上の MgO 膜厚において、温度の増加による大きな α の増大が観測された。特に、1.8 nm, 2.0 nm の素子では 310 K における α の増大が顕著であり、デバイス応用上、深刻な課題となりうる。

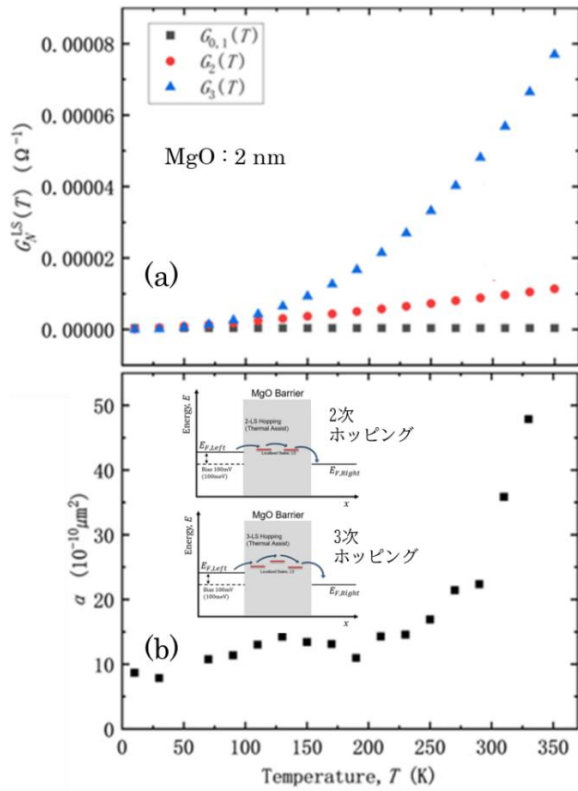


図5 MgO膜厚が2.0 nmの素子における
(a) コンダクタンス、(b) α の温度依存性

電気 $1/f$ ノイズ増大の原因を考察するために、トンネルコンダクタンスの温度依存性との比較を行った。図5に、MgO膜厚が2.0 nmと厚い素子における、トンネルコンダクタンスおよび α の温度依存性を示す。トンネルコンダクタンスは、以下のモデル式(2)を用いて解析した[13]。

$$G_{\text{tot}}(T) = G_{0,1} + G_2 T^{4/3} + G_3 T^{5/2} \dots (2)$$

ここで、 G_{tot} はトータルのコンダクタンス、 G_0 , G_1 , G_2 , G_3 は、それぞれ弾性トンネリング、および、1, 2, 3 次のホッピングトンネリングによるコンダクタンスである(図5(b)の挿入図)。測定したコンダクタンスの温度依存性を(2)式でフィッティングし、 $G_{0,1}$, G_2 , G_3 をそれぞれ求めた(G_0 と G_1 はともに温度依存性が小さいため、温度に依存しない $G_{0,1}$ とした)。図5(a)から、200 K以上で3次のホッピング項である G_3 が、 $G_{0,1}$, G_2 に対して非常に大きくなっていることが分かる。この傾向は、MgO膜厚が厚い素子において顕著であり、絶縁層が厚くなるほど欠陥を介したトンネル過程が増えることを意味している。また、図5(b)との比較から、200

K以上における G_3 の増加と、電気 $1/f$ ノイズの急激な増加に相関が見られる。つまり、電気 $1/f$ ノイズの室温近傍における増大は、3次のホッピングトンネリングが原因であることが示唆されている。今後、高次のホッピングトンネリングと電気 $1/f$ ノイズとの関係を明確にするためには、MgO絶縁層および界面状態の詳細な分析等が必要と考えられるが、本研究で得られた知見は、今後のTMRセンサの低ノイズ化に対して極めて重要である。

謝辞

本研究は、SIPプロジェクト、BRIDGEプロジェクト、X-nics、科研費基盤研究(B)、および、東北大学CSIS、CIESの支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] T. Miyazaki and N. Tezuka, J. Magn. Magn. Mat. 139, L231 (1995)
- [2] J. S. Moodera *et al.*, Phys. Rev. Lett. 74, 3273 (1995)
- [3] W. H. Butler *et al.*, Phys. Rev. B 63, 054416 (2001)
- [4] J. Mathon, and A. Umerski, Phys. Rev. B 63, 220403 (2001)
- [5] S. Yuasa *et al.*, Nat. Mater., 3, 868 (2004)
- [6] S. S. P. Parkin *et al.*, Nat. Mater., 3, 862 (2004)
- [7] D. D. Djayaprawira *et al.*, Appl. Phys. Lett., 86, 092502 (2005)
- [8] T. Nakano, K. Fujiwara, and M. Oogane, Appl. Phys. Lett. 126, 160503 (2025)
- [9] T. Nakano, M. Oogane, T. Furuichi, and Y. Ando, Appl. Phys. Lett. 110, 012401 (2017)
- [10] MAI Mohd Noor Sam, Z. Jin, M. Oogane, and Y. Ando, Sensors 19, 4718 (2019)
- [11] Z. Q. Lei *et al.*, IEEE Transactions on Magnetics 47, 602 (2011)
- [12] Z. Diao *et al.*, Appl. Phys. Lett. 96, 202506 (2010)
- [13] A. A. Khan *et al.*, Phys. Rev. B 82, 064416 (2010).