

第30回青葉工学研究奨励賞



薄膜材料およびそれを用いた多層膜構造の開発による トンネル磁気抵抗センサの高性能化

東北大学大学院工学研究科
応用物理学専攻
助教 中野 貴文

わたしは近年、ウェアラブルな脳磁計の実現に向けて、トンネル磁気抵抗 (TMR) センサの開発を推進してきました。TMRセンサは、室温動作・小型・低消費電力などの利点を持つ、磁気センサの一種です。強磁性層/絶縁層/強磁性層の三層からなる磁気トンネル接合がその基本構造であり、二つの強磁性層の磁化の相対角度によって電気抵抗が変化する、TMR効果を利用します。一方の強磁性層(固定層)の磁化は固定され、もう一方の強磁性層(自由層)の磁化が外部磁場を追随して回転することで、磁場に比例する出力(抵抗変化)を示します(図1)。自由層には、微小な磁場でも磁化が回転する、軟磁性材料を用います。最近ではfT級の磁場分解能を達成し、脳磁場の検出にも成功しました[1, 2]。しかし、競合技術である超伝導量子干渉計(SQUID)と同等の測定精度を得るには、磁場分解能をさらに1桁向上する必要があります。そのためには、感度(磁気抵抗曲線の傾きに相当)の向上、すなわち「抵抗変化率の増大」および「自由層の異方性磁界(磁化回転に必要な磁場の大きさ)の低減」が不可欠です。

本研究では、自由層に用いる新たな多層膜構造を開発することで、トップデータから約3倍の感度向上を狙いました。TMRセンサ向けの自由層は、軟磁性層/非磁性層/強磁性層という多層膜構造(たとえばCo-Fe-Si-B/Ta/Co-Fe-B)を有しています。これは、大きな抵抗変化率を示す強磁性層(Co-Fe-B)に、結晶性を分断するための非磁性層(Ta)を介して、異方性磁界が小さな軟磁性層(Co-Fe-Si-B)を磁氣的に結合させることで、高い感度が得られるため

す。一般に、磁気トンネル接合の抵抗変化率を最大化するには400℃を超える高温の熱処理が不可欠ですが、この多層膜構造では、①非磁性層の膜厚が1原子層ほどに限られるため抵抗変化率の伸びが鈍い、②Co-Fe-Si-Bに代表されるアモルファスの軟磁性材料は高温の熱処理を施すと結晶化により軟磁性を失って(異方性磁界が増大して)しまう、という欠点があり、これらが感度の上限を決めるボトルネックとなっています。

そこで本研究では、①層間交換結合エネルギーが大きく厚膜化が可能な非磁性層の開発、および、②結晶化温度と軟磁気特性を同時に向上させたアモルファス軟磁性層の開発をおこない、上記の問題を解決しました。はじめに、これまで非磁性層に用いてきたTaにFeを20-50 at.%ほど添加した合金薄膜を作製し、数原子層程度の膜厚でも十分に大きな層間交換結合エネルギーを得ました。この材料を自由層に組み込むことで、抵抗変化率を数10%ほど増大させることに成功しました[3]。つづいて、Co-Fe-Si-Bに非磁性元素を2-6 at.%ほど添加した合金薄膜を作製し、400℃を超える結晶化温度と従来の半分以下となる異方性磁界(<0.5 mT)を得ました。この材料を用いることで、従来の3倍以上となる500%/mTの感度を達成しました[4]。

これらの成果を基に、SQUIDに比肩する磁場分解能を近く実現することが期待できます。なお、TMRセンサの磁場分解能は感度とノイズの比で決まりますが、本研究では感度向上に焦点を絞りました。今後、本研究とは別のアプローチでノイズを約1/3に低減し、合わせて磁場分解能を約1桁向上する計画です。TMRセンサは、現在普及している半導体の製造工程と親和性がよいため、量産体制を迅速に確保することができます。また、生体磁場の検出に限らず、大電流の高精度なモニタリングやインフラの非破壊検査にも応用可能であることから、世界の磁気センサ市場(2025年予測値32億ドル)を席捲し、あらゆる領域のスマート化・省エネ化に貢献することが期待できます。

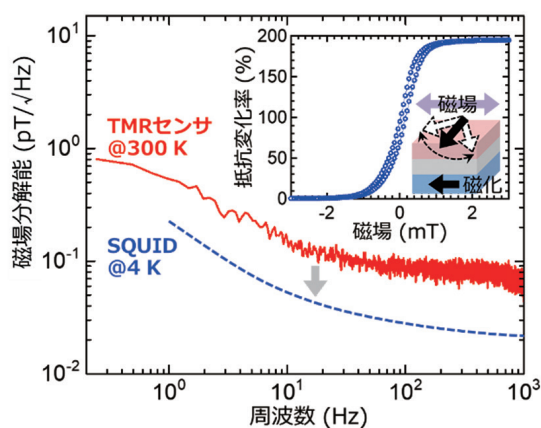


図1 TMRセンサの磁場分解能と磁気抵抗曲線

- [1] M. Oogane et al., Appl. Phys. Express 14, 123002 (2021).
- [2] A. Kanno et al., Sci. Rep. 12, 6106 (2022).
- [3] T. Nakano et al., Appl. Phys. Lett. 122, 072405 (2023).
- [4] T. Nakano et al., Appl. Phys. Lett. 123, 072404 (2023).