

閉ループ化した磁壁位置変調型 GMR センサの基礎特性

小室虎祐, 大島大輝, 加藤剛志
(名古屋大学)

Fundamental properties of domain wall displacement GMR sensors with closed loop operation

K. Komuro, D. Oshima, T. Kato
(Nagoya Univ.)

はじめに

GMR (Giant Magnetic Resistance) センサは作製プロセスが比較的簡単であり、高感度かつ室温動作、集積化、低価格化が可能なセンサデバイスとして期待されている。これまで我々の研究グループでは、電流磁界フィードバックを用いた逆位相磁化変調型 GMR センサを提案しており、GMR センサの課題であった線形性、温度ドリフトが改善されることを示した。しかし、本方式は磁化困難軸方向の磁場を検出するため、GMR 素子の出力電圧が小さく、pT レベルの磁場検出には不利と考えられる。本研究ではセンサの高感度化を目的に、過去に我々の研究グループで検討した磁壁位置変調型センサ²⁾に対し、電流磁界フィードバック機構を組み合わせたことを検討した。磁壁位置変調型センサは磁化容易軸方向の磁場を検出することから、逆位相磁化変調型センサより1桁以上出力を上げることができ、文献²⁾では数 nT 程度の磁場検出を実証している。しかし、抵抗値の変化から磁場を検出するため、ヒステリシスの影響が大きく線形性の確保が課題であった。これに対し今回我々は、電流磁界フィードバックを導入することで出力のヒステリシス抑制に成功したので報告する。

実験手法

微細加工により、GMR 素子上にフィードバック磁場 H_f および変調磁界 H_{mod} 印加用のアルミワイヤを配置し、Fig. 1 に示す回路に挿入した。 H_{mod} は検出磁場 H_{det} の周波数に比べて十分高く、 H_{det} と共に磁化容易軸方向に印加される。したがって、ブリッジ回路の中間端子間で出力される信号には、 H_{det} のほか H_{mod} による高周波成分が重畳する。これを計装アンプで増幅させ、後段のローパスフィルタ (Low pass filter: LPF) で高周波成分をカットする。また、LPF 出力に比例した信号を Al ワイヤに流すことで H_{det} を H_f で補償する。これにより磁壁の状態を常に零点に保つことができ、ヒステリシスを抑制できる。

結果

提案した閉ループ磁壁位置変調型センサおよび、電流磁界フィードバックを用いない開ループ磁壁位置変調型センサに対し、周波数 1 Hz、振幅が $100 \mu T_{rms}$ の H_{det} を印加した。なお、 H_{mod} は周波数 100 kHz、振幅 $94.0 \mu T_{rms}$ であり、開ループの場合、センサ出力 V_{out} と Al ワイヤ間を切断している。Fig. 2 に、各モードにおける $H_{det}-V_{out}$ のリサージュ図形 (青) ならびにその線形近似直線 (オレンジ) を示す。(a) に示す従来型 (開ループ) では非線形性が 7.8% であるのに対し、閉ループでは 1.2% と大幅な線形性向上に成功した。なお発表では、変調磁場の周波数および振幅と線形性の関係についても報告する。

参考文献

- 1) K.Komuro, D. Oshima, T.Kato, IEEE Trans. Magn. (2023), DOI: 10.1109/TMAG.2023.3284398.
- 2) G. A. Wang *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **44**, 235003 (2011).

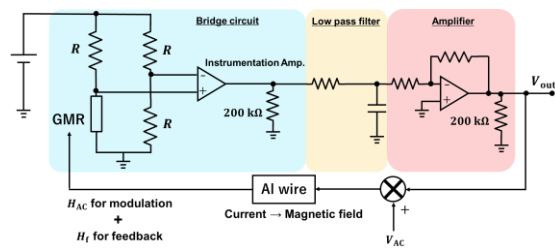


Fig.1. 検討した GMR センサ回路.

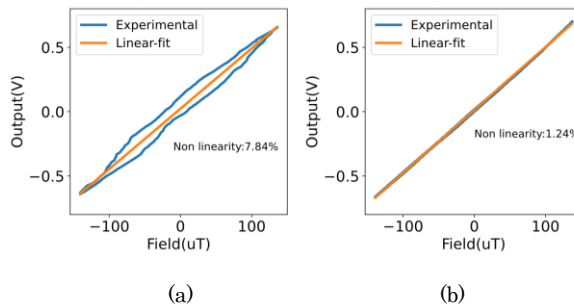


Fig. 2. (a) 開ループおよび (b) 閉ループ動作での $H_{det}-V_{out}$ のリサージュ図形.

高対称な偶関数抵抗-磁界特性を示すトンネル磁気抵抗センサ

中谷友也, 岩崎仁志
(物質・材料研究機構)

Tunnel magnetoresistive sensors exhibiting highly symmetric resistance-magnetic field response
Tomoya Nakatani, Hitoshi Iwasaki
(National Institute for Materials Science)

多くのトンネル磁気抵抗 (TMR) を用いた磁気センサは, 素子抵抗 (R) が磁界 (H) に対して線形に変化する, 奇関数 R - H 特性を利用する. その一方, 素子抵抗が磁界の符号に対して対称に変化する偶関数 R - H 特性も, 位置・回転センサ (エンコーダ) や高感度磁界センサとして重要である. 巨大磁気抵抗 (GMR) 素子の場合, 非磁性スペーサー層を介した強磁性層間の磁気結合を利用して, 偶関数 R - H 特性が容易に得られる. それに対して, TMR 素子において偶関数 R - H 特性を得るためには, 図 1(a) のように自由層の磁化に弱い一方向き磁気異方性を付与した, ソフトピン構造が必要である[1]. しかし, 図 1(a) のようなシングルソフトピン構造では, 自由層と参照層の直交磁化配列時が最小抵抗となり, TMR 比をロスすること, および印加磁界方向が自由層の困難軸からずれると R - H 曲線が非対称になることが欠点である. そこで図 1(b) のように, MgO バリアの上下にソフトピン自由層をもつ, デュアルソフトピン構造を考案した[2].

実験方法

マグネトロンスパッタリングにより, 図 1(b) のデュアルソフトピン TMR 構造を作製した. ソフトピン自由層は軟磁性に優れた CoFeBTa と CoFeB との積層であり, スペーサー層は Ag₉₀Sn₁₀, 固定層と参照層は Co₅₀Fe₅₀ を用いた (組成は at. %). 積層構造の詳細は文献[2]を参照されたい. フォトリソグラフィと Ar イオンミリングによる TMR 素子の微細加工後に, 300 °C にて 1 h の磁界中熱処理をおこなった.

結果

図 2(a) にデュアルソフトピン TMR 素子の R - H 曲線を示す. 容易軸に対しては台形の R - H 曲線を示し, H の正負領域における抵抗変化はそれぞれソフトピン自由層 1 および 2 の磁化反転による. 困難軸に対しては, 両方のソフトピン自由層の磁化が回転し, 偶関数 R - H 曲線を示す. 図 2(b) は, H の印加方向を困難軸から $\phi = 20^\circ$ ずらした場合の R - H 曲線である. デュアルソフトピン素子は依然, 対称性のよい R - H 曲線を示す. その一方, シングルソフトピン素子の R - H 曲線は, H の正負に対し著しく非対称となる. この違いは, Stoner-Wohlfarth モデルによる磁化角度の計算から, デュアルソフトピン素子の自由層磁化の相対角度が ϕ に大きくは依存しないためであることがわかった. これは磁気センサとしての実装時に利点となる特性である.

文献 [1] Nakatani *et al.* Appl. Phys. Lett. **121**, 192406 (2022). [2] Nakatani & Iwasaki, J. Appl. Phys. **132**, 223904 (2022).

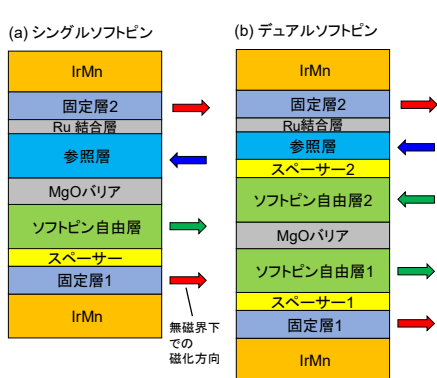


図 1 (a) シングルおよび, (b) デュアルソフトピン TMR 構造.

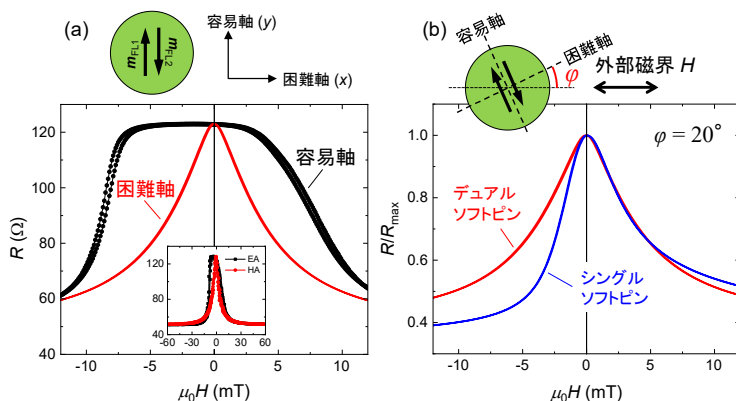


図 2 (a) デュアルソフトピン TMR センサの R - H 曲線, (b) 磁界方向が困難軸から 20° ずれた場合の R - H 曲線.

高感度 GMR センサの磁場顕微鏡応用時の MFC ゲイン

喜々津哲、東祥弘、黒崎義成、白鳥聡志、*鈴木一博、*照井裕二
(株)東芝、*東芝ナノアナリシス(株)

MFC Gain of High-Sensitive GMR Sensor Used for a Magnetic Field Microscope

A. Kikitsu, Y. Higashi, Y. Kurosaki, S. Shirotori, *K. Suzuki, *Y. Terui
(Toshiba Corp., *Toshiba Nanoanalysis Corp.)

はじめに

偶関数 GMR を AC 磁界変調する高感度磁界センサを開発し、半導体チップなどにおける微弱な欠陥電流を磁界で可視化する磁場顕微鏡への適用を検討している²⁾。センサは GMR ラインの両端に矩形 MFC (Magnetic Field Concentrator) を設けたものを 4 組用いたフルブリッジ構成である。感度分布関数解析により、空間分解能は感度方向の 2 つの GMR ラインの間隔程度になることがわかった³⁾。サンプルからの磁界が MFC に均一に印加されないためであるが、そのような状況における MFC ゲインについても挙動を解析し、空間分解能を含めて実験との比較を行ったので報告する。

実験方法

解析手法はこれまでのもの³⁾と同様である。相反定理に基づき GMR の位置から発生する磁界を有限要素法によって計算し、磁界分布を感度分布とした。感度分布のピーク値をセンサ感度とみなし、MFC がある場合とない場合との感度比を MFC ゲインとした。Fig.1 に示す種々の MFC 形状に対して解析を行った。

結果および検討

Fig.1 に、均一磁界下での値で規格化した MFC ゲインを示す。MFC 形状によらずサンプルセンサ間距離と共に MFC ゲインは減少し、距離 1 mm では半分程度になることがわかる。サンプルを Cu 配線とし、そこから発生する電流磁界の MFC 直上 (0.1 mm) での分布を有限要素法で計算した結果を Fig.2 に示す。MFC 形状は Fig.1 の ref とした。サンプルセンサ間距離(z)が 1 mm の場合、磁界が MFC の全幅の 1/4 ほどに集中しているが、5 mm では半分ほどまでに広がっている。この磁界集中により MFC がフルに機能せずゲインが低下すると思われる。

これらの解析結果の確認のために、Cu 配線からの磁界を可視化する実験も行った。空間分解能や MFC ゲインの z 依存性は、上記の解析結果と定性的に同じであり、MFC 形状依存性も概ね再現することを確認した。

This work was supported by the Cabinet Office (CAO), Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program (SIP), "Intelligent Processing Infrastructure of Cyber and Physical Systems" (funding agency: NEDO).

参考文献

- 1) S. Shirotori et. al.: *IEEE Trans. Magn.*, **57**, 4000305 (2021)
- 2) A. Kikitsu et al.: *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 62, SB 1007, (2023)
- 3) 喜々津 他: 第 46 回日本磁気学会学術講演会 06pD-3 (2022), A. Kikitsu et al.: *Intermag 2023*, POC-08 (2023)

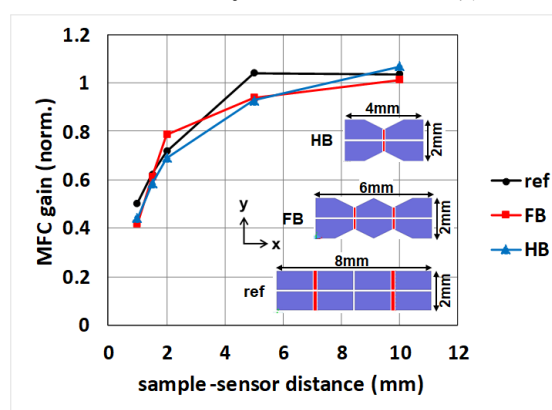


Fig.1 Normalized MFC gain as a function of sensor to sample distance, x.

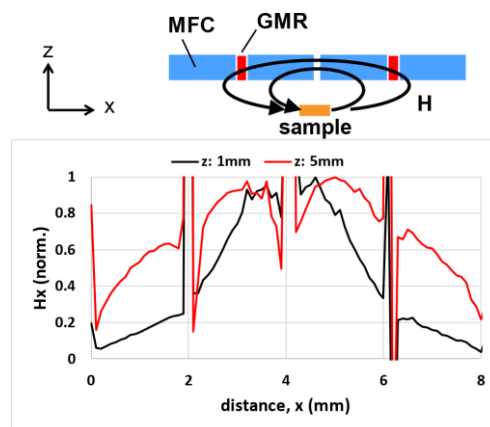


Fig.2 Distribution of magnetic field from a sample at the surface of MFCs.

Enhancing Leaked Magnetic Field Measurement with Thin Film Magnetic Field Sensor

Loi Tonthat¹, Ryota Suzuki¹, Junichi Honda¹, Kazuhiko Okita¹, Jerdvisanop Chakarothai², Katsumi Fujii²,
Shin Yabukami¹

¹Tohoku University, Miyagi 980-8579, Japan

²National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo 184-8795, Japan

The leaked magnetic field generated by wireless charging systems and RFID card readers has presented significant challenges in ensuring the reliable operation of sensitive electronic devices and systems across various industrial and residential environments. Accurate measurement and characterization of leaked magnetic field sources are crucial for devising effective mitigation strategies. While conventional evaluation methods utilizing antennas, such as loop antennas, have been employed in previous studies ⁽¹⁾, they suffer from limitations in terms of frequency bandwidth and spatial resolution. In response, this study introduces a novel approach by utilizing the potential of thin film magnetic field sensors to overcome these limitations. Our high-frequency-driven thin film magnetic field sensors offer superior capabilities in detecting magnetic fields in the pT range while achieving spatial resolutions below a few millimeters at room temperature ⁽²⁾. To validate the effectiveness of this approach, we constructed an experimental setup specifically designed for measuring leaked magnetic fields from wireless charging devices. The setup comprises a thin film magnetic field sensor, a signal generator, and a spectrum analyzer. Figure 1(a) depicts a circuit configuration where the leaked magnetic field is detected and analyzed in the spectrum analyzer. The AC magnetic field signal emitted by the wireless charging device is applied to the sensor, resulting in an AC modulated signal due to the change in sensor impedance. In this circuit, the sensor element is electrically connected to a microstrip line with a characteristic impedance of 50 ohms. Figure 1(b) illustrates an AM spectrum, where f_c represents the carrier frequency and f_s denotes the signal frequency. The intensity of the sideband is directly proportional to the impedance change of the sensor. Figure 1(c) shows preliminary experimental results, demonstrating a measured spectrum for a wireless charging device in the presence of a varying DC bias field applied along the longitudinal axis of the sensor. The internal noise floor was approximately -107 dBm, while the signal at a frequency of around 109 kHz reached a maximum value of approximately -83 dBm, corresponding to a DC bias field of 10 Oe. The outcomes show the efficacy of thin film magnetic field sensors in accurately capturing and analyzing leaked magnetic field. We are currently conducting detailed experiments to compare the results obtained with conventional antennas.

- (1) Fujii, K., “Basic characteristics of magnetic field antenna factor of loop antennas for EMI measurements”, *IEICE Communications Express*, 11(10), pp.643-648 (2022).
 (2) 村山芳隆, 小澤哲也, 藪上信, 石山和志, 荒井賢一, “10-13T 台の磁界検出分解能を有する高周波伝送線路型薄膜磁界センサ”, *日本応用磁気学会誌*, 31(1), pp.17-22 (2007).

Acknowledgements: This research was supported by Matching Research Support Project 2023 of Tohoku University and National Institute of Information and Communications Technology.

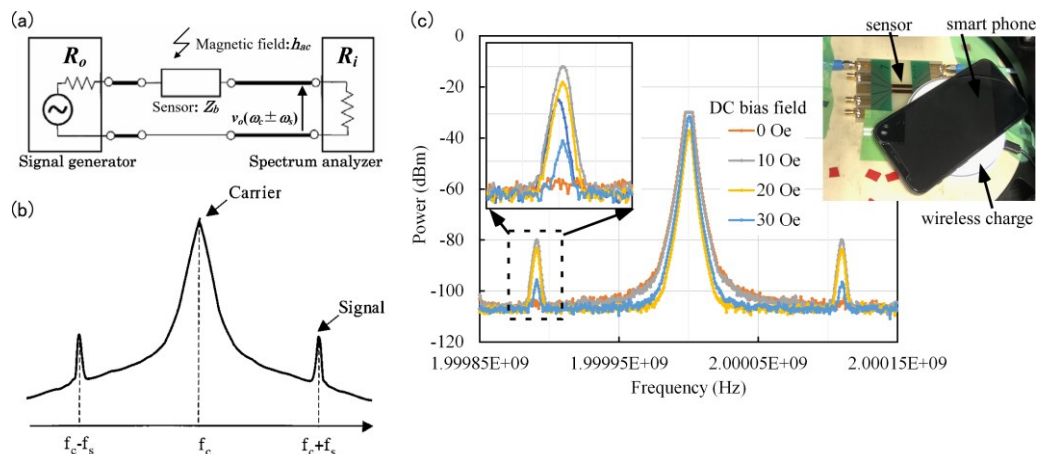


Fig. 1. (a) Equivalent circuit, (b) amplitude modulation spectrum, and (c) power spectrum for wireless charge.