

偶関数型 GMR の AC 変調下における出力解析

東 祥弘, 喜々津 哲, 黒崎 義成, 白鳥 聡志

(株式会社東芝 研究開発センター)

Investigation of output signal in symmetric response GMR under AC modulation
Yoshihiro HIGASHI, Akira KIKITSU, Yoshinari KUROSAKI and Satoshi SHIROTORI
Corporate Research and Development Center, Toshiba Corporation

はじめに

超高感度磁気センサは、2次電池や半導体回路のリーク電流検査、鋼材の微細欠陥検査などの応用に期待され、特に磁気抵抗効果 (MR) 素子は高密度実装や集積化が容易なため、高感度化の研究がなされている⁽¹⁾。さらなる高感度化のために、AC 変調が注目されており、偶関数形状の磁場-抵抗 (R-H) 特性をもつ GMR 素子に、近接して配置した銅配線より構成される磁場発生部から磁場を発生させ、AC 変調を行う小型化・低消費電力の磁気センサを作製した⁽²⁾⁽³⁾。本発表では、偶関数を用いた AC 変調動作把握のため、変調下での R-H 特性から求めた実験式の出力信号と、実測の出力信号を比較した。

変調信号の実験式と実測の比較

変調出力信号の実験式は、式 (1) の測定磁場 H_m (角速度 ω_m)、変調用 AC 磁場 H_{ac} (各速度 ω_{ac}) とバイアス磁場 H_b からなる磁場 H が、式 (2) の偶関数形状の GMR 素子に印可された場合、側帯波 $\omega_{ac} \pm \omega_m$ において式 (3) で表せる。

$$H = H_m * e^{-j\omega_m t} + H_{ac} * e^{-j\omega_{ac} t} + H_b \quad (1)$$

$$R(H) = C + a_4 H^4 + a_3 H^3 + a_2 H^2 + a_1 H \quad (2)$$

$$S = 2H_m H_{ac} \left\{ 6a_4 \left(H_b + \frac{a_3}{4a_4} \right)^2 + a_2 - \left(\frac{a_3}{4a_4} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

ここで、偶関数形状は実測の R-H 特性に近い 4 次関数を用いた。Fig. 1 に示した測定ブロック図により実測の出力信号を求めた。実験式の出力電圧は、変調用 AC 信号と出力電圧より R-H 特性を実測し、4 次関数でフィッティングを行い、各係数を求め、式 (3) を用いて算出した。

結果および検討

Fig.2(b)に出力電圧の H_b 依存性を示す。 $H_{ac} = 30.7$ A/m (青)では、計算値と実測値はよい一致が見られた。 $H_{ac} = 62.3$ A/m (赤)では、計算値と実測値では異なり、 H_b に応じて出力が減少している。この結果は、式 (3) の 4 次関数の係数の符号が反転していることで得られる。偶関数を用いた AC 変調では、R-H 特性が大きく出力電圧に影響することが分かった。

参考文献

- (1) K. Fujiwara et. al.: Appl. Phys. Express, vol. 11, no. 2, Feb. 2018, Art. no. 023001.
- (2) S. Shirotori et. al.: IEEE Trans. Magn., Vol.57, Iss.2, Part1, 4000305, 2021
- (3) Y. Higashi et. al.: Abstract of MSJ 2021

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)

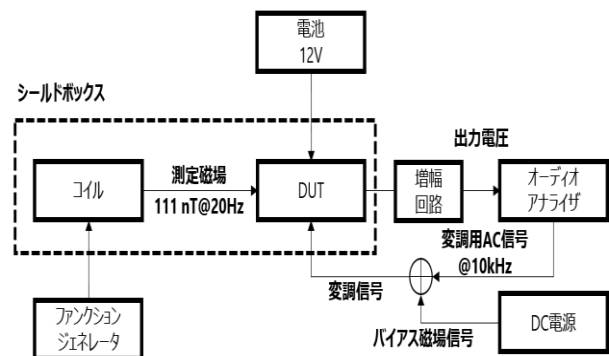


Fig.1 測定ブロック図

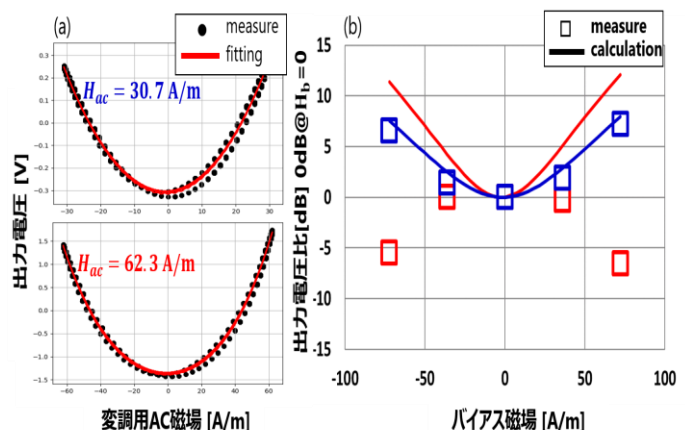


Fig.2 (a) 実測した RH 特性

(b) 出力電圧のバイアス磁場依存性

逆位相で磁化変調したフィードバック型 GMR センサの作製

小室虎祐, 大島大輝, 加藤剛志
(名古屋大学)

Fabrication of feedback-type GMR sensors using antiphase magnetization modulation

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, 低価格化が実現可能なセンサデバイスとして期待されている。これまでに筆者らの研究グループでは, 磁化変調フィードバック型 GMR センサを提案しており¹⁾, 数 nT 程度の最小検出感度を達成できることを確認している。また, 本方式を用いることで, ヒステリシスの影響や GMR 素子抵抗ドリフトの影響を受けなくなり, 磁性層のヒステリシスの影響を受けず, 高い線形性が担保されると考えられる。近年, 偶関数 GMR を逆位相で接続することで GMR センサの高感度化が報告されている²⁾。そこで, 磁化変調フィードバック型 GMR センサの高感度化を目的に, 2つの GMR 素子を逆位相で接続した磁化変調フィードバック型 GMR を試作し, その基礎特性を調べた。

実験手法

微細加工により, GMR 素子上にフィードバック磁界および変調磁界 H_{ac} (周波数 f) 印加用のアルミワイヤを配置し, 図 1 に示す回路に挿入した。本回路では, ブリッジ回路中の 2つの GMR 素子に, それぞれの素子の磁化を逆位相に変調されるよう H_{ac} を印加し, ブリッジ出力に $2f$ 成分が重畳しないようにする。次に, ブリッジ回路の中間端子間における電圧の差分を計装アンプで増幅させ, f 成分の信号をロックインアンプで検出する。また, ロックインアンプ出力に比例した信号を Al ワイヤに流すことで, 外部磁場 H_{ext} に対しフィードバックをかける。これにより外部磁場 H_{ext} に比例した出力電圧 V_{out} が得られる。なお, この比例定数は GMR 素子抵抗に依存しないため, 温度ドリフトの影響を抑制できる。

実験結果

10 Hz の検出磁場 $H_{ext} = 1.5 \mu\text{T}_{rms}$ を印加した際の, フィードバック型および開ループ型の任意の時間における出力波形をそれぞれ図 2, 図 3 に示す。なお, 開ループ型の測定は, 図 1 のロックインアンプの出力波形を観察しており, フィードバック電流供給用のオペアンプとは切断されている。図 2 においては, 波形の直流成分が大きく変化していることがわかる。これは, 開ループ型の出力は GMR 素子の抵抗値に大きく依存し, ブリッジ回路のバランスが崩れたことによって出現したものと考えられる。一方, 図 3 の波形の直流成分はオフセットである $3 \mu\text{T}$ を維持しており, フィードバックによるドリフト抑制の効果が得られたと考えられる。

参考文献

- 1) G A Wang *et al.*: J. Phys. D: Appl. Phys. **44**, 235003 (2011).
- 2) S. Shirotori *et al.*: IEEE Trans. Magn., **57**, 400305 (2021).

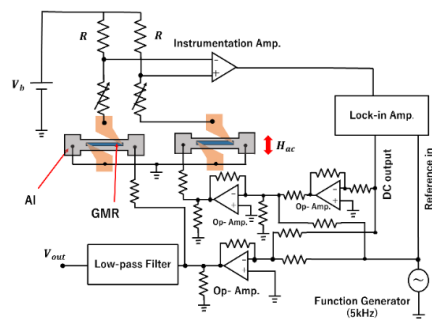


図 1. 検討中の回路

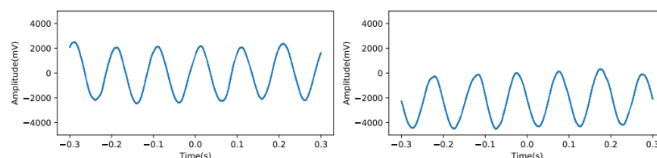


図 3. 開ループ型の出力波形

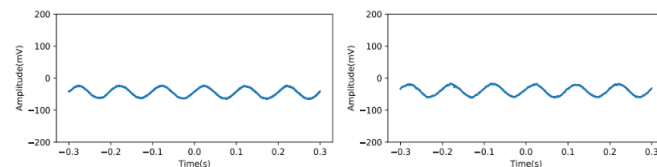


図 2. フィードバック型の出力波形

局所異方性測定による歪センサの動作解析

豊田恵伍^{1,2}, 後藤太一², 石山和志²

(¹東北大学大学院 工学研究科、²東北大学 電気通信研究所)

Analysis of strain sensor operation by local anisotropy measurement

K. Toyoda^{1,2}, T. Goto², K. Ishiyama²

(¹Graduate School of Engineering, Tohoku University, ²RIEC, Tohoku University)

1. はじめに

磁性膜と導体膜の積層構造からなる逆磁歪効果を用いた歪センサを高感度化するための手法として、異方性の均一化が挙げられる¹⁾。そこで、カー効果を利用して局所BHループを取得することにより、磁性膜の局所の異方性を測定して均一性を評価した。その際、センサに歪を与えることで逆磁歪効果による局所的な異方性の変化を測定し、センサの動作状態を詳細に見積もるとともに、感度特性への影響について検討した結果を報告する。

2. 実験方法

本研究において作製したセンサ素子の寸法は Fig.1に示す通りで、厚さ $150\mu\text{m}$ のカバーガラス上に1ターンミランダ形状に成膜したMo膜の導体層の上下に、短冊状の $\text{Fe}_{72}\text{Si}_{14}\text{B}_{14}$ 磁性膜を配置し3層積層構造となっている。このセンサを、Fig.1におけるB-C間を治具上に固定したカンチレバーとして、自由端をマイクロメータヘッドで変位させる。この際に、カー効果を用いて磁界をセンサ長手方向に印加した際の磁区コントラスト画像の平均輝度を局所的に測定した。横軸に印加磁界、縦軸に輝度をプロットすることで得られる局所BHループの、磁化が飽和に達する磁界強度を異方性磁界 H_k として場所ごとに求めた。また、同様にしてセンサを治具に固定して歪を加えたときの歪-インピーダンス特性をネットワークアナライザにより測定した。

3. 実験結果

歪-インピーダンス特性の結果を Fig.2 に示す。Fig.3は横軸に Fig.1における薄膜の先端AからB方向への距離、縦軸にその位置における異方性磁界 H_k を自由端変位ごとに示している。測定位置は Fig.1の太い矢印で示した部分である。自由端変位が $+200\mu\text{m}$ のとき、センサは長手方向に圧縮応力を受けており、いずれの位置でも幅方向を容易軸とする均一な異方性を持つことが分かる。また、 $-200\mu\text{m}$ でセンサ長手方向に引張応力を与えると、容易軸は長手方向となった。しかし、 $0\mu\text{m}$ 付近においては異方性に分布があり、歪印加による急峻な異方性変化が得られていないことが明らかとなった。以上のように、センサの感度特性を決める歪と局所異方性の関係を明確化することが可能となった。今後は、この測定を利用したセンサの高感度化に向けた検討を行う。

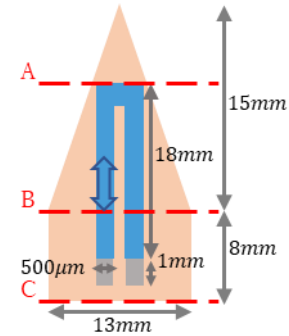


Fig. 1. Diagram of the sensor element

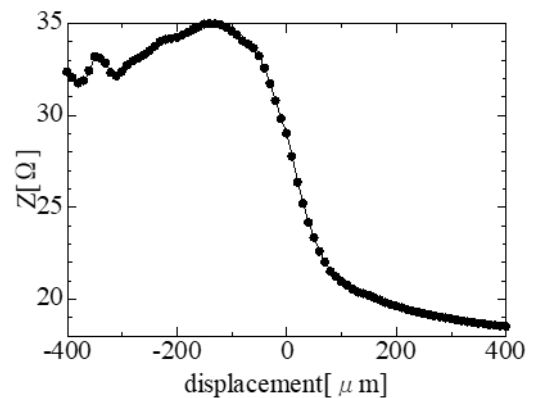


Fig. 2. Optical micrograph of Fe-Mn-Al-Ni alloy

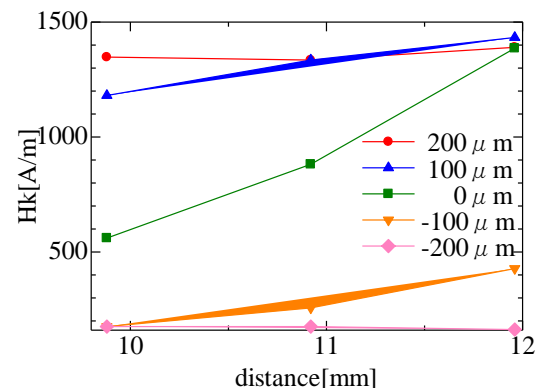


Fig. 3. Variation of H_k by distance

参考文献

- 1) 曾良, 柊, 石山, 日本磁気学会論文特集号, **4**, 41 (2020).

磁石と直接通電による簡便な磁性薄膜素子の異方性制御

上野明統, 谷井雅, 菊池弘昭
(岩手大学)

Magnetic anisotropy control using permanent magnets and applying direct current

A. Ueno, M. Tanii, H. Kikuchi
(Iwate Univ.)

1. はじめに

薄膜磁気デバイスにおいて異方性の制御が重要となる場合も多い。磁気異方性は成膜時に誘導する、もしくは、Co基アモルファス材料では、成膜後に磁界中熱処理により異方性制御できる。ただし、いずれの場合も基板における一方向への制御であり、磁界中熱処理では真空系を有する大型炉が必要となり、消費電力も大きく、長時間を要する。ここでは、リボンやワイヤにおいて主に作製時に導入された応力の緩和を目的として利用されるジュール加熱^{1), 2)}の薄膜への適用性を検討するとともに、永久磁石と組み合わせて簡便な方法により磁気異方性制御を試みたので報告する。

2. 実験方法

異方性制御は薄膜の磁気インピーダンス素子を例に行った。磁気インピーダンス素子は高感度磁界センサに利用されるが、高感度にするには素子の幅方向に異方性を制御する必要がある。Co₈₅Nb₁₂Zr₃アモルファス薄膜を用いてスパッタ・リフトオフ法により矩形素子を作製し、NdFeB磁石により磁界を印加しながら、直流電流を素子に直接通電し大気中で加熱を行った。その後、素子インピーダンスの外部磁界依存性をネットワークアナライザ、ヘルムホルツコイルを用いて測定した。

3. 実験結果

Fig. 1は幅40 μm、厚さ2 μm、長さ1 mmの素子におけるインピーダンスの外部磁界依存性を示した図である。素子作製後と120 mAでジュール加熱を行った後の結果を示している。通電時間は60秒とし、インピーダンスの測定周波数は100 MHzとした。素子作製後の場合、磁界0でインピーダンスは最大となりその後低下する変化を示している。これは、素子長手方向に磁界容易軸を有する場合の典型的な変化である。一方、120 mAの通電後には、ダブルピーク特性を示した。ダブルピーク特性は幅方向に容易軸を持つ場合の典型的な特性であり、磁区観察の結果からも幅方向に容易軸が誘導されていることも確認した。

Fig. 2は、120 mAと電流値は一定として、通電時間を変化させた場合のインピーダンス変化を示した図であり、時間は総加熱時間である。インピーダンス変化は最大印加磁界のインピーダンスとの差分で示しており、測定周波数は100 MHzである。1秒の加熱ですでにダブルピークを示しているが、異方性制御は不完全であるが、60秒の印加で幅方向に異方性は制御できているものと考えられる。

参考文献

- 1) T. Yanai, et al., *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 320, e833-e836, 2008.
- 2) R. Dost, et al., *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 499, Art no. 166276, 2020.

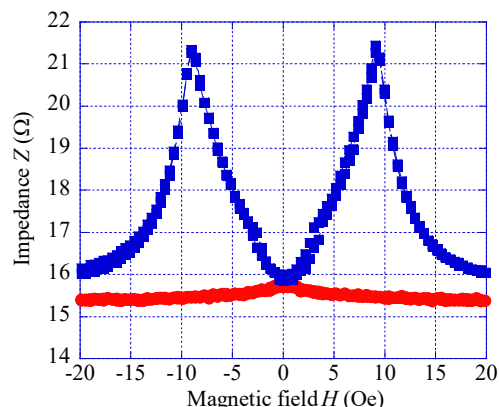


Fig. 1 Field dependence of impedance Z before and after Joule heating with magnets.

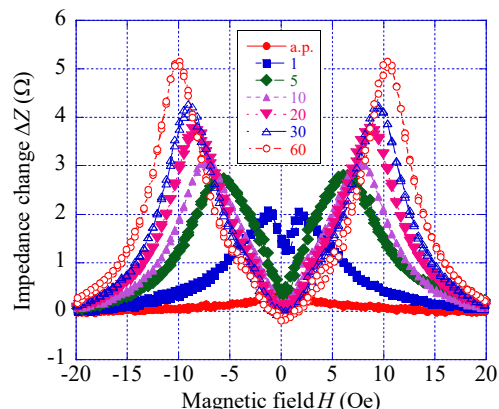


Fig. 2 Field dependence of impedance change ΔZ when heating time changes.

高周波駆動薄膜センサにおける磁性薄膜スリットの最適幅に関する検討

坂本 雅弥 鈴木 椋太 石原 知弥 本多 順一 藪上 信
(東北大学)

Considerations on Appropriate Slit Width of Line Type Thin Film Magnetic Field Sensor
Masaya Sakamoto, Ryota Suzuki, Tomoya Ishihara, Junichi Honda, Shin Yabukami
(Tohoku University)

はじめに これまで磁性薄膜を用いた直線コプレーナ線路を構成し, GHz 帯において表皮効果や強磁性共鳴を利用したセンサについて検討してきたが, 強磁性共鳴周波数におけるセンサシステムの感度が悪化することが課題であった. この原因はインピーダンス不整合による反射損失であることが示され⁽¹⁾, 磁性薄膜にスリットを設けることでインピーダンス整合が実現できることを予測した. 本稿では磁性薄膜のスリット幅を有するセンサ素子を作製し, 各スリット幅における磁界に対する透過係数の測定値から最適なスリット幅について考察したので報告する.

センサの動作原理及び実験方法 本センサは薄膜の幅方向を磁化容易軸となるように磁気異方性を制御した磁性薄膜と誘電薄膜を介して成膜された直線コプレーナ線路によって構成されている. Fig. 1 に示すように磁性薄膜スリット幅がそれぞれ 6.0, 10, 26, 36, 50 μm であるセンサ素子をガラス基板上に作製し, 電磁石を使用して -20 Oe ~ +20 Oe までの直流磁界を線路の長手方向(磁化困難軸)へ印加したときの透過係数(S_{21})の振幅及び位相をネットワークアナライザ(Advantest 社, R3767CG)を用いて測定した.

実験結果 Fig. 2 に印加磁界に対する透過係数の振幅の測定結果を示すが, スリット幅が狭いほど磁界に対する振幅の変化が大きい傾向が確認でき, これは位相についてもおおむね同様であった. センサ素子の感度は(1)式より磁界に対する振幅及び位相の変化の割合と高周波キャリアの振幅の積に比例する⁽²⁾と仮定して求めた.

$$|V_o(\omega_c \pm \omega_s)| = \frac{JS(Z_b + R_o)R_o h_{ac}}{2\{Z_b + R_o + R_i\}^2} \left(\frac{\Delta Z}{\Delta H} \right) \quad (1)$$

ただし, ω_c , ω_s はキャリア及び側波帯の角周波数, J はセンサに流れる電流密度, S は素子断面積, Z_b, R_o, R_i は素子の特性インピーダンスおよび測定器の入出力抵抗, $\Delta Z/\Delta H$ は外部磁界に対するインピーダンスの変化率である. Fig. 3 は測定値より求めた振幅および位相の磁界に対する最大の変化の割合から導出したスリット幅に対するセンサ感度を示している. 同図より振幅及び位相感度はスリット幅 10 μm 付近で最大値であることから, この高周波駆動薄膜センサにおける磁性薄膜スリットの最適幅は 10 μm 付近となった.

参考文献 (1) T. Ishihara et al, *Journal of Magnetic of Japan*, vol. 6 (2022). (2) N. Horikoshi et al, *Journal of Magnetic of Japan*, vol. 29, pp. 472 (2005).

謝辞 本研究は総務省「電波の高分解能計測・解析技術を活用したノイズ抑制技術の研究開発」(JPJ000254), NEDO Entrepreneurs Program (0329006), AMED (22ym0126802j0001)の支援を受けた.

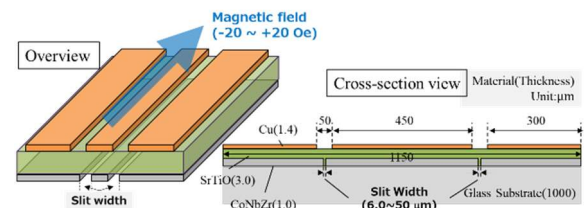


Fig. 1 Structure of proposed sensor.

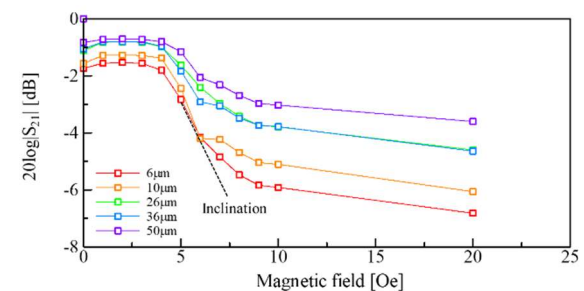


Fig. 2 Amplitude of transition coefficient versus magnetic field.

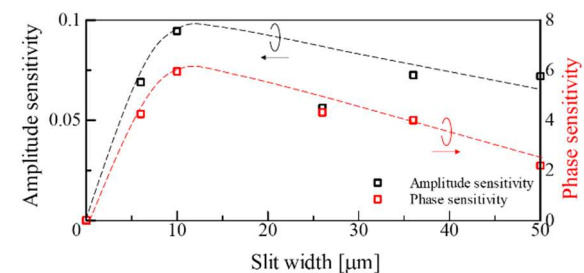


Fig. 3 Calculated amplitude and phase sensitivities.