

GdFe 系合金薄膜を用いたホール素子作製への検討

森 敦司¹, 笠谷 雄一^{2,3}, 塚本 新²

(1 日本大学大学院理工学研究科, 2 日本大学理工学部, 3 日本学術振興会特別研究員-PD)

Examination of Hall element fabrication using GdFe alloy thin film

Atsushi Mori¹, Yuichi Kasatani², 3, Arata Tsukamoto²

(1 Graduate School of Science and Technology, Nihon Univ., 2 College of Science and Technology, Nihon Univ., 3JSPS Research Fellow)

はじめに 現在センサとして活用されている大部分のホール素子には半導体のホール効果が用いられている。金属磁性体において異常ホール効果が確認されているが、その大きさは半導体ホール効果に比べ極めて小さいと考えられてきた。一方、我々は希土類遷移金属フェリ磁性体である GdFe 合金薄膜において、単体 Fe 薄膜の約 70 倍の異常ホール効果が発現し得ることを報告している¹⁾。また、磁性合金薄膜を用いた場合、製膜と配線のみで素子作製が可能であると考えられ、従来の半導体の作製プロセス数の約 1/3 の工程に減らせる可能性があり、従来のホール素子が用いられている、マグネットスイッチや近接スイッチなどの S/N 比向上、および、素子の簡略化が期待される。そこで、本研究では希土類遷移金属合金薄膜の磁気センサ利用の提案とともに広範囲の分野での普及を目指し、ホール素子の柔軟性・性能向上に向けた検討を行う。

実験方法 試料は、厚さ 0.5 mm の Si 基板上及び、厚さ 0.1 mm の Resin 基板 (旭硝子カーボグラスフィルム) 上に SiN (5 nm) / Gd₂₀Fe₇₀Co₁₀ (200 nm) / SiN (5 nm), Si 基板上に SiN (5 nm) / Gd₂₀Fe₈₀ (20 nm) / SiN (5 nm) をマグネトロンスパッタリング法により作製した。室温において膜面垂直方向に外部磁場を印加し、膜面内方向に 0.1 mA の電流を印加した際の電流に対し面内垂直方向に生じる電圧を測定した。

実験結果 Fig. 1(a)に Si 基板上, Fig. 1(b) に Resin 基板上に SiN (5 nm) / Gd₂₀Fe₇₀Co₁₀ (200 nm) / SiN (5 nm) を製膜した試料におけるホール電圧の外部磁場依存性を示す。残留ホール電圧, 飽和磁界値等, Resin 基板上に製膜した試料においても Si 基板上製膜試料とほぼ同等の特性が得られる事を示した。

Fig. 2 に SiN (5 nm) / Gd₂₀Fe₈₀ (20 nm) / SiN (5 nm) / Si sub. におけるホール電圧の外部磁場依存性を示す。膜厚を 1/10 とすることでスイッチング領域におけるホール電圧値は約 10 倍の 0.53 mV が得られ、線形応答領域における外部磁場に対する電圧比は約 3.1 mV/T となった。外部磁場に対する電圧比は、InSb 半導体ホール素子 (旭化成電子 HW-101A) と比較し 1/10 程度であるがホール素子として用いるには十分な信号値の水準であると考えられる。また、外部磁場が印加されていない場合に発生するホール電圧が 0.0003 mV と InSb 半導体ホール素子の不平衡電圧に比べ約 10⁻⁵ である。これは、より微小な磁場範囲においてノイズレスにホール電圧が発現することを示唆している。さらに、消費電力は、1.2×10⁻⁶ W と InSb 半導体ホール素子の 1/4 となった。以上のことより希土類遷移金属フェリ磁性体である GdFe 合金薄膜を用いることにより、低消費電力で微小な磁場を検出するのに十分なホール電圧を発現するホール素子を作製することが可能であると考えられる。

謝辞 Resin 基板を提供いただいた日本大学理工学部芦沢好人准教授に感謝する。

参考文献 1) Hirose, Hachisuka *et al.*, Journal of the Magnetics Society of Japan, 14aC-1 (2018).

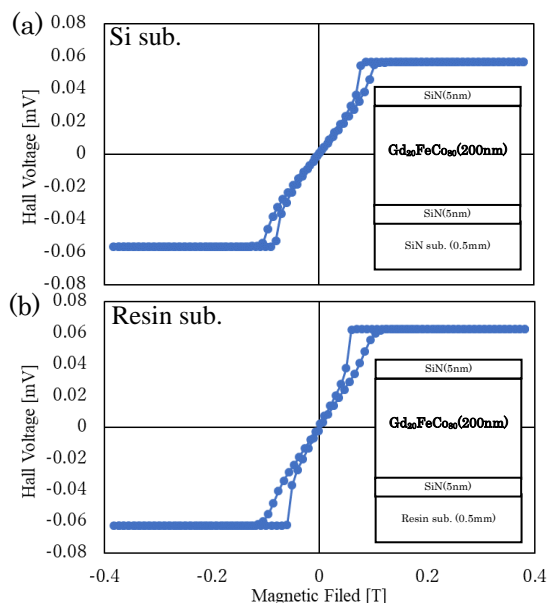


Fig. 1 Magnetic field dependence of hall voltage. (a) on Si sub. (b) on Resin sub.

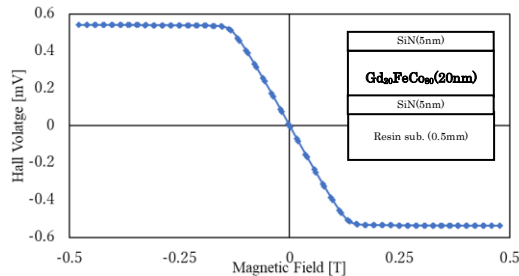


Fig. 2 Magnetic field dependence of hall voltage of Gd₃₀Fe₇₀ (20 nm)

Controlling nonlinearity for magnetic tunnel junction based sensors by second order magnetic anisotropy of CoFeB

Takahiro Ogasawara¹, Mikihiro Oogane^{1,2,3}, Masakiyo Tsunoda^{3,4}, and Yasuo Ando^{1,2,3}

¹Department of Applied Physics, Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan

²Center for Science and Innovation in Spintronics (Core Research Cluster) Organization for Advanced Studies, Tohoku University, Sendai 980-8577, Japan

³Center for Spintronics Research Network, Tohoku University, Sendai 980-8577, Japan

⁴Department of Electronic Engineering, Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan

An achievement of high tunnel magnetoresistance (TMR) ratio [1] has enabled to develop highly sensitive magnetic sensors using magnetic tunnel junctions (MTJs) [2]. On their electric vehicle applications for current monitoring, the linear output, *i.e.* low nonlinearity should be achieved for safe operations. However, previously, sensitivity and nonlinearity were reported to be in the trade-off relationship as a function of effective anisotropy field, H_k^{eff} , and it thus results in a lack of either of them by controlling H_k^{eff} [3]. Therefore, in order to break this restricted relationship, we focused on second order anisotropy field, H_{k2} and established a new approach for decreasing nonlinearity while achieving a high sensitivity simultaneously.

The MTJs with Ta/Ru/Pt/[Co/Pt]/Ru/[Co/Pt]/CoFeB(1)/MgO(2)/CoFeB(1.5-2.0)/Ta/Ru (thickness in nm) were deposited on SiO₂ substrate by dc/rf sputtering at room temperature. After patterning them into the circular junctions and post annealing at 300°C, TMR curves were measured by four-probe-method at 50 - 400 K using probe station and PPMS. For the magnetic characterization of the free CoFeB layer, Ta/MgO/CoFeB/Ta films were prepared separately by the same method. The effective and second anisotropy field, H_k^{eff} , H_{k2} and saturation magnetization, M_s were measured by angular-dependent FMR and SQUID, respectively.

Fig. 1 shows conductance ratio curve for the MTJ with 1.5-nm-thick CoFeB. The jump of the curve at ± 4 kOe corresponds to the large antiferromagnetic coupling field of [Co/Pt] via Ru. The linear output within ± 2 kOe is due to the rotation of in-plane magnetized free layer CoFeB, where its H_k^{eff} and H_{k2} were measured to be -1.7 kOe and 0.4 kOe, respectively by FMR. The nonlinearity was evaluated by the equation of $(G_{\text{exp}} - G_{\text{fit}}) / (G_{\text{exp}}^{\text{max}} - G_{\text{exp}}^{\text{min}}) \times 100$ (%), which quantifies the normalized differences between experimental and linear-fitted conductance, G_{exp} and G_{fit} . As shown in Fig. 2 summarizing the maximum nonlinearity against H_{k2}/H_k^{eff} , the experimental results coincide very well with the calculations using simultaneous rotation and Slonczewski's TMR model. Therefore, we succeeded in establishing the new approach to describe the nonlinearity quantitatively with second order magnetic anisotropy, which is greatly useful for diminishing nonlinearity of MTJ sensors.

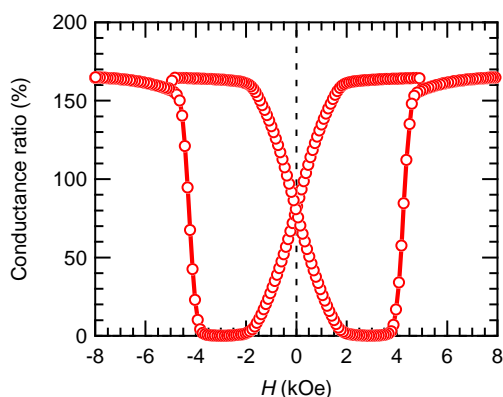


Fig. 1 Out-of-plane conductance ratio curve for MTJ with 1.5nm-thick-CoFeB free layer

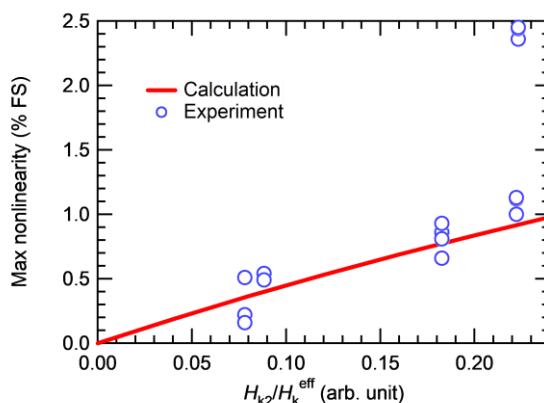


Fig. 2 Maximum nonlinearity dependence on H_{k2}/H_k^{eff}

Reference

[1] S. Yuasa, et al, Nat. Mater. 3, 868 (2004). [2] K. Fujiwara, M. Oogane, Y. Ando et al., Appl. Phys. Express 11 023001 (2018). [3] T. Nakano, M. Oogane, T. Furuichi, and Y. Ando. Appl. Phys. Lett. 110, 012401 (2017)

直流バイアス励磁法による平行フラックスゲートセンサの高感度化

小山大介¹, 足立善昭¹, 宮本政和¹, 小野長幸², 今村瑛², 渡邊大輔²

(1:金沢工業大学, 2:NEC ネットワーク・センサ株式会社)

Improvement of Sensitivity of a Parallel Fluxgate Sensor by DC-Biased Excitation

D.Oyama¹, Y. Adachi¹, M. Miyamoto¹, N. Ono², A. Imamura², and D. Watanabe²

(1:Kanazawa Institute of Technology, 2: NEC Network and Sensor Systems, Ltd.)

はじめに

フラックスゲート磁力計は直流から数 kHz までの周波数帯域において高感度な磁気計測が可能な磁気センサであり、地磁気計測や、電流センサなどの工業用途に広く用いられている。フラックスゲート磁力計には大きく分けて「直交型」と「平行型」があり、前者は笹田らによって基本波直交フラックスゲート磁力計が開発され、心磁図計測ができるほどに高感度化されてきたり。一方、平行型についても賀戸により直流バイアスを加えた励磁電流と基本波検波によるフラックスゲート磁力計の高感度化が提案され²⁾、著者らもこれまでに本手法による高感度化を試みてきたが³⁾、原理実証や有効性の確認、駆動条件の最適化までは実現できていなかった。そこで本研究では、市販の平行型フラックスゲート磁力計のセンサヘッドに対して直流バイアスを加えた励磁と基本波検波を適用し、高感度化に関する有効性を明らかにする。

方法

市販の平行型フラックスゲート磁力計として、APS520A(Applied Physics Systems 社)を実験に用いることにした。Fig.1 に試作した駆動回路のブロック図を示す。なお、実験では3軸分のセンサを構成したが、スペースの都合により、1チャンネル分しか描いていない。駆動回路の構成は直交型フラックスゲート磁力計と概ね同じである。励磁電流印加部は正弦波発振回路と直流バイアス回路から構成される。計測部はプリアンプと検波回路、積分回路、フィードバック用電圧-電流変換回路から構成される。発振回路の周波数は100 kHzとし、励磁と検波回路に使用した。励磁電流の振幅及びバイアス量はそれぞれ16.7 mA, 18.3 mA とした。

実験ではAPS520Aを2台用意し、片方のセンサプローブは従来どおり市販品の駆動回路を接続し、もう片方のセンサプローブには試作回路を接続した。双方のセンサプローブを磁気シールドルーム内に並べて置き、1時間の連続計測を実施した。なお、各信号は200 Hzのlow-pass filterを通して収録した。

結果及び結論

Fig. 2 に計測した周波数スペクトルを示す。交流パルス電流を用いた従来法の駆動回路では25.5 pT/Hz^{0.5} (10Hz, 3軸平均)であったが、製作した回路では6.0 pT/Hz^{0.5} (同)となり、約1/4にノイズを低減することができた。直流バイアス励磁と基本波検波による駆動は、平行型フラックスゲートにおいても有効であることを明らかにした。

参考文献

- 1) H. Karo, I. Sasada, "Magnetocardiogram measured by fundamental mode orthogonal fluxgate array", J. Appl. Phys., 117, 17B322 (2015).
- 2) 賀戸久, 磁気測定方法及び装置, 特許第3651268, 2005年3月4日登録
- 3) D. Oyama, et. al., "Magnetic Marker Localization System Using a Super-Low-Frequency Signal", IEEE Trans. Magn., 50, 5101604 (2014).

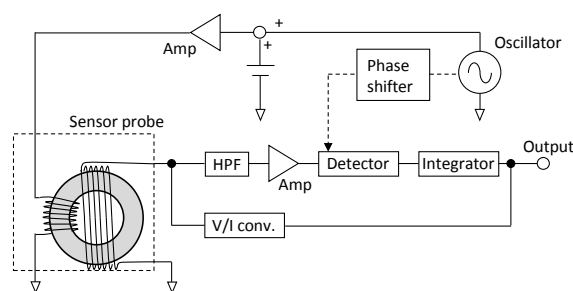


Fig. 1 Block diagram of a parallel fluxgate magnetometer with dc-biased excitation current.

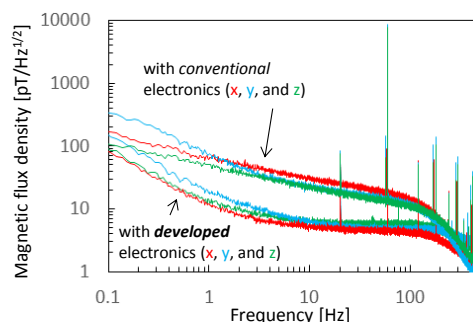


Fig. 2 Noise spectra measured with conventional and developed electronics

高温超伝導コイルとインダクタンス変調方式 を用いた磁気センサの開発(II)

山下 重弥*, 松尾 政明, 笹山 瑛由, 吉田 敬, 円福 敬二
九州大学システム情報科学研究所

Magnetometer Based on Inductance Modulation in Coils Made of High-T_c Superconductor (II)

Shigeya Yamashita, Masaaki Matsuo, Teruyoshi Sasayama, Takashi Yoshida, Keiji Enpuku
Kyushu Univ.

磁気センサは医療・バイオ検査、非破壊検査、材料物性解析などの幅広い分野で応用されている。しかしながら、励起磁場中での動作が可能であり、かつ、1 Hz 程度の低周波磁界を高感度に計測する磁気センサはこれまでほとんど開発されていない。本研究では、高温超伝導コイルとインダクタンス変調方式を用いることにより、これらの要求を満たす磁気センサの開発に取り組んでいる。

Fig. 1 にその等価回路を示す。検出コイル(L_p)と変調コイル(L_m)は高温超伝導体で作製し、低抵抗(R_c)で接続することにより、閉ループを形成している。信号磁束 Φ_s が検出コイルに鎖交した場合には、閉ループに電流 I_s が流れ磁束が変調コイルに伝達される。変調コイルに伝達された磁束はインダクタンス変調方式を用いることで、端子PQ間に発生する電圧信号 V_s に変換される。この閉ループの時定数は $\tau = (L_p + L_m)/R_c$ で与えられる。今回、接続抵抗 R_c の値を計測し、この閉ループが伝達できる信号周波数の下限を調べた。

Fig. 2 に、高温超伝導テープ線材(SuperPower 社 SF2050)を接続した時の接続抵抗 R_c の測定回路を示す。二つのテープ線材はハンダ付けにより接合した。ハンダ接合部は幅 2 mm、長さ 1 cm である。Fig. 2 においてバイアス電流 I_B を流し、液体窒素中の接合部に電圧 V_c が発生すると、室温に配置した検出コイル($L_i=8.8 \mu\text{H}$, $R_i=75 \text{ m}\Omega$, 内径 9 mm、長さ 30 mm、巻数 52)に電流 $I_i = V_c/R_i$ が流れ、この電流が作る磁界をフラックスゲートセンサ(Bartington 社 Mag-03)で測定する構成となっている。

計測した電流 I_i からハンダ接合部にかかる電圧 $V_c (= I_i \times R_i)$ が得られる。ハンダ接合部に流れる電流 $I_c (= I_B - I_i)$ と電圧 V_c を用いて接続抵抗を測定した結果を Fig. 3 に示す。図から $R_c = 325 \text{ n}\Omega$ であることが分かった。これにより、閉ループの時定数は $L_p + L_m = 115 \mu\text{H}$ の場合には $\tau = 354 \text{ s}$ となり、3 mHz 程度の低周波磁束を伝達できることが示された。

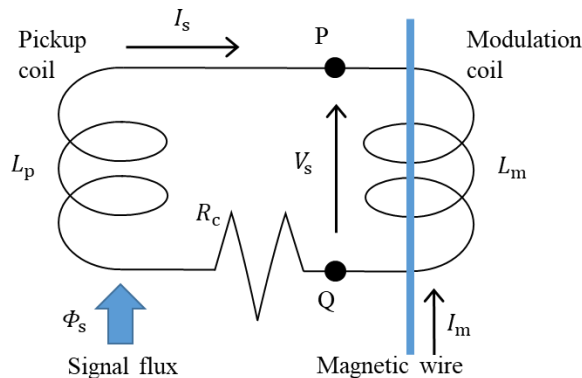


Fig.1 Equivalent circuit of the magnetometer

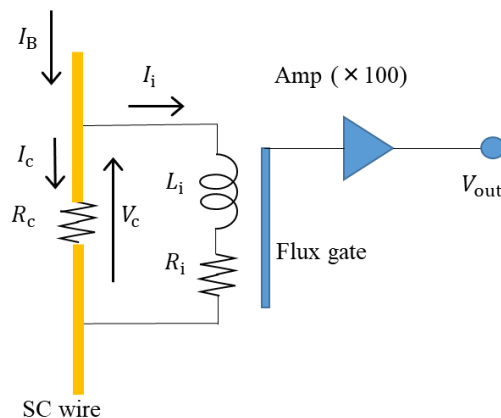


Fig.2 Measurement circuit for contact resistance

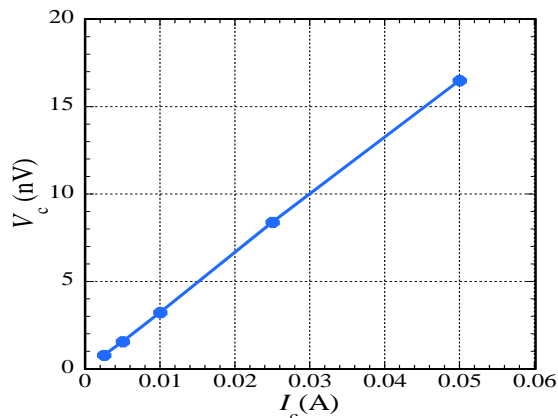


Fig.3 Current-voltage characteristic of contact resistance

勾配磁界センサによる異物検出におけるローパスフィルタのカットオフ周波数の検討

笹田一郎

(笹田磁気計測研究所)

Cutoff frequency of the low-pass filter in detecting traveling magnetic particle by using a gradiometer
Ichiro Sasada
(Sasada Magnetics and Sensors Laboratory)

はじめに

勾配磁界センサは一樣な磁界入力に対しては不感であるので、微小なサイズの異物検出に適している[1]。異物は勾配磁界センサの直下に置かれたシート上の物に付着しているとし、勾配磁界センサに対し相対速度 v でFig. 1に示す方向に移動する。センサは信号と同時に雑音を持つので、出力に低域カットおよび高域カットのフィルタで不要な雑音を除去するが、信号帯域をどのように設定するかが重要である。本稿ではセンサの雑音を白色雑音として高域遮断周波数の決定法について検討した。

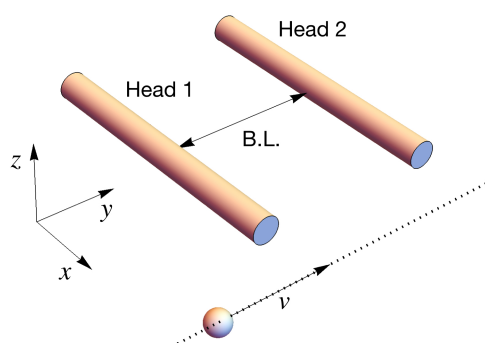


Fig. 1 Parallel gradiometer and magnetic particle traveling below it.

異物からの鎖交磁束

まずFig. 1に示す平行配置の勾配磁界センサに対して z 方向に帯磁した異物の磁界がその移動と共にどのような鎖交磁束を引き起こすのかを有限要素法(COMSOL)によって計算した。異物は直径 $50\ \mu\text{m}$ の球でその磁化は $\mu_0 M = 1\ \text{mT}$ とし、センサコアは直径 $120\ \mu\text{m}$ 、長さ $30\ \text{mm}$ 、比透磁率 $10,000$ 、センサヘッド間の離隔距離(B.L.)を $16\ \text{mm}$ 、その $2\ \text{mm}$ 下をコアの先端から x 軸方向 $-5\ \text{mm}$ の所を異物球が図示のように通過する。結果をFig. 2に示す。検出コイルがNターンであれば、鎖交磁束はN倍にする。勾配磁界センサは励磁による変調を用いた磁束応答型であるので出力波形もFig. 2に相似になる。

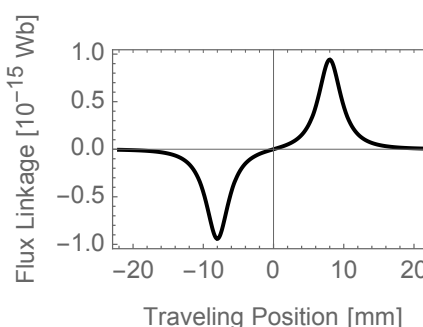


Fig. 2 Magnetic flux linkage to the sensor head cores when magnetic particle travels beneath cores.

検討および結果

Fig. 2の波形に相似な出力電圧波形を仮定する。波形の時間軸は異物の移動速度を与えると決定する。 $v=1\ \text{m/s}$ として解析した。球がB.L.距離を通過する時間 Δt の2倍を周期とする周波数を特性周波数とする。まず特性周波数の1/5でハイパスフィルタし、ローパスフィルタのカットオフを特性周波数の2~7倍の間で変化させ、波形のpeak-peak値を通過帯域幅 Δf の平方根で除して(雑音として白色雑音を仮定)SN比の指標とする。結果をFig. 3に示す。これからカットオフ周波数の最適値は特性周波数の3~4倍、好ましくは3.5倍である。

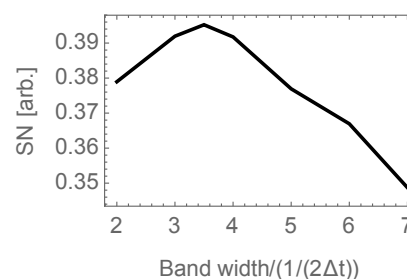


Fig. 3 SN ratio (arbitrary scale) vs. band width determined by the low-pass filter.

参考文献

1. Ahmed L. Elrefai, Ichiro Sasada, J. Appl. Phys. 117, 17C114 (2015); DOI: 10.1063/1.4913720

USBパワーで動作する可搬型FM-OFGマグネトメータ

笹田一郎

(笹田磁気計測研究所)

USB power operated portable FM-OFG magnetometer

Ichiro Sasada

(Sasada Magnetics and Sensors Laboratory)

はじめに

著者が2001年に本学会で発表した「基本波型直交フラックスゲート(Fundamental-mode orthogonal fluxgate=FM-OFG)」は、これまで多くの協力者に恵まれその低雑音化と応用展開が進められてきた。今回取り扱いが容易になるよう、6~7.5VのacアダプターやUSBパワーで動作するコンパクトなプロトタイプを開発した。本稿ではこのプロトタイプの概要と分解能および安定性について簡単に述べる。

1chFM-OFGシステム

Fig. 1にプロトタイプシステムの構成を示す。回路は入力磁界をキャンセルするフィードバック方式で動作する。単一の電源入力から回路内で $\pm 5V$ を生成する。基本波モードでセンサヘッドを駆動するための交流励磁電流と直流バイアス電流はArduino²⁾で生成した32kHz矩形波でトランジスタをドライブして生成する。同期整流には低電圧から動作するスイッチトキャパシタ回路を用いている。出力は増幅率1の直流結合、100倍および1000倍の交流結合出力を備えている。前者は地磁気などの環境磁界計測に、後者は生体磁気や異物の検出のために、変動磁界成分のみを高感度に計測するためである。消費電力は約0.5Wである。簡易的な波形の観測にはArduinoに実装されている10ビット~12ビットのAD変換結果をリアル送信してPC上で見ることができる。

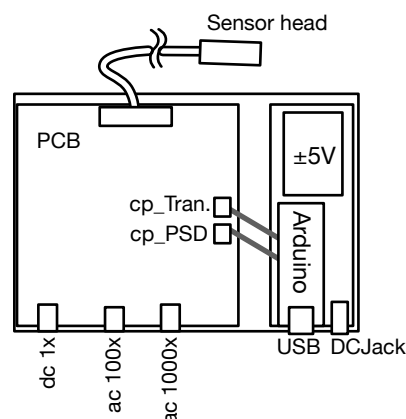


Fig. 1 Functional blocks in the portable FM-OFG magnetometer system.

基本性能

センサヘッドには長さ30mm、幅0.5mmのアモルファスリボンコアを用いている。ダイナミックレンジと感度は帰還抵抗 R_f とフィードバック巻線の巻線密度で決まるが、本システムでは $R_f=2\text{ k}\Omega$ とすることで、 $\pm 1\text{ mT}$ が計測でき、1000倍したときの感度は $55\text{ V}/\mu\text{T}$ である。センサヘッドを磁気シールド内に設置し、0.16Hz以上の変動分のみを取り出し1000倍したときの雑音スペクトル密度をFig. 2に示す。A)は6Vacアダプターで、B)はUSBで電力供給しているが、A)の方が雑音は少ない。ただ、B)の方でも大きな雑音増加は見られない。センサヘッドを磁気シールドに入れて、室温状態で4,000秒連続動作させたときのオフセットのドリフトは 1 nT 程度であった。

参考文献

- 1) 笹田一郎, 電気学会論文誌 A(基礎・材料・共通部門誌) IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials Vol.137 No.8 pp.448-453 (2017) DOI: 10.1541/ieejfms.137.448
- 2) <https://www.arduino.cc>

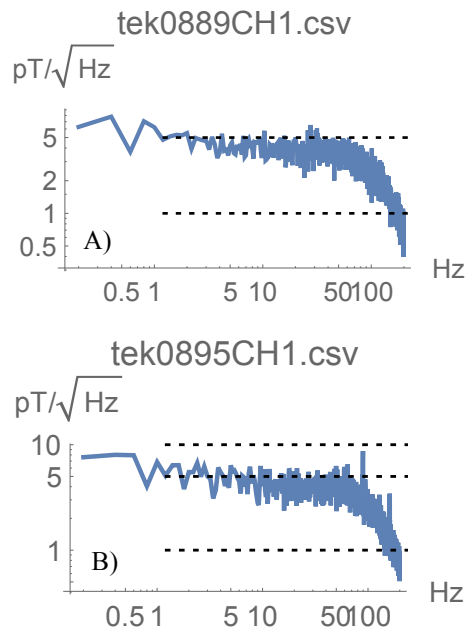


Fig. 2 Noise spectrum density: A) powered by ac adaptor, B) powered by USB from MacBookPro.

FPGA を用いた生体磁気計測用マルチチャンネル MI センサシステムの開発

楊 紫欽、馬 家駒、内山 剛

(名古屋大学)

Development of multi-channel MI sensor system for bio-magnetic measurement based on FPGA

Z. Yang, J. Ma, T. Uchiyama

(Nagoya University)

はじめに

MI センサは、磁気センサの一種として、科学計測、工業、生体磁気信号の検出など様々な領域に応用が検討されている。生体磁気計測方面は、例えば、心臓から発生した空間的な磁場を測るため、マルチチャンネルシステムの開発が求められている。FPGA (field-programmable gate array) とは、構成の設定ができ、用途に応じてプログラム可能なゲートアレイの集積回路である。そして、高性能の AD コンバータ LTC2500 を合わせて利用することにより、高いサンプリング周波数の場合でも低ノイズレベルが得られる。今回は Cyclone V Soc device 型の FPGA を用いて、MI センサの高精度低ノイズレベルのマルチチャンネル計測システムを構築することを目的として実験を行った。

実験方法

図 1 に示した MI グラジオメーター回路による、二つの MI センサのアナログ信号をサンプリングして、その電圧差を AD コンバータに入力する。FPGA のプログラムにより AD 変換とデータ処理を行って、得られた結果を PC に入力する。

実験結果

FPGA のプログラムにより、高性能の AD コンバータとデジタルフィルタを用いて、磁気シールドの中にサンプリング周波数が 1kHz の場合でセンサのノイズスペクトラムを測定した。図 2 に示されるように、1Hz の時はノイズレベルが約 2pT、10Hz の時はノイズレベルが 1pT 以下となる。続いては環境ノイズの抑制効果を検証した。図 3 に示されるように、磁気シールドなしの場合で時間領域に環境ノイズはほぼ 60Hz の電源ノイズである。デジタルフィルタを利用すると、サンプリング周波数が 100Hz の場合で環境ノイズがきれいに除去され、RMS ノイズが約 15pT である。結果として、磁気シールドがなくても高精度のサンプリングもできる可能性を示した。

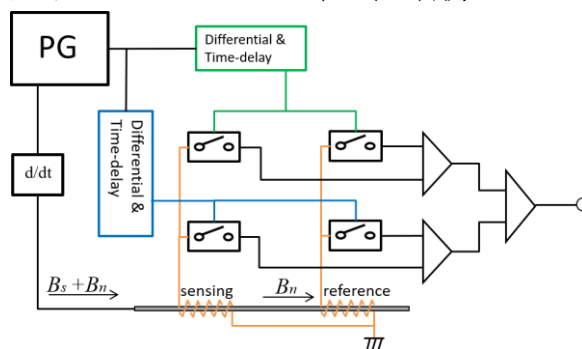


図 1. MI グラジオメーター回路

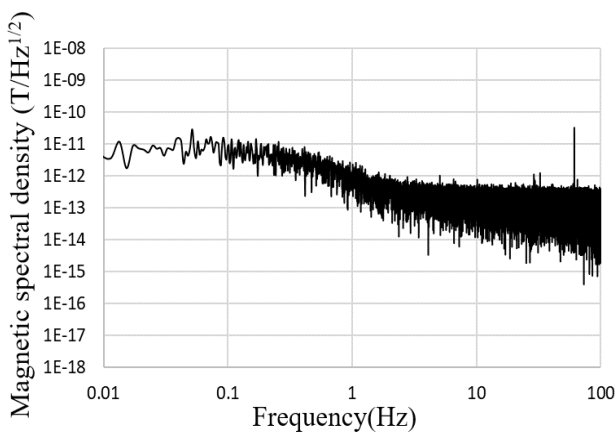


図 2. 出力信号のノイズスペクトラム

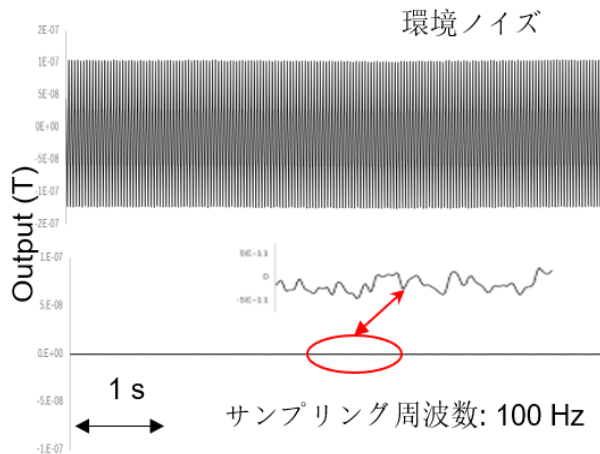


図 3. 環境ノイズの抑制効果

FPGA を用いた適応型 MI センサシステムの開発と AD コンバータの最適化

史 柯、内山 剛
(名古屋大学)

Optimize MI sensor circuit and ADC with FPGA

Shi Ke , T.Uchiyama
(Nagoya Univ.)

はじめに

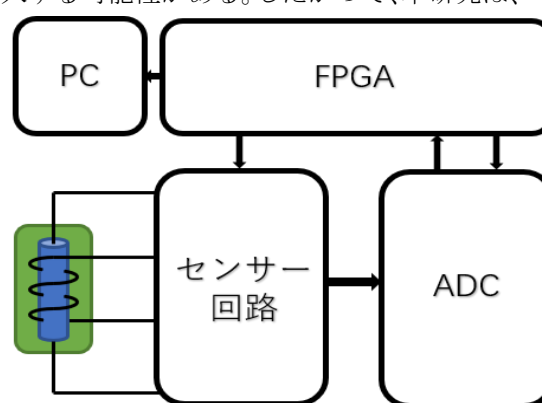
従来の MI センサ回路は S/H 回路によって、電圧信号を取り出しているが、AD コンバータに回路を接続する場合、AD コンバータの AD 変換動作とサンプリングスイッチの動作部分が重複し、サンプリングのタイミングによりノイズが混入する可能性がある。したがって、本研究は、FPGA を利用した MI センサー回路により、AD 変換動作のタイミングの調整およびアナログスイッチの動作のタイミングの調整をともに可能とした、適応型 MI センサシステムの最適化を目指している。

実験方法

FPGA を用いた、MI センサシステムの開発により、サンプリングスイッチ動作と AD コンバータ動作のタイミングをプログラミングにより調整可能とし、SNR を測定した。

実験結果

Fig. 1 はシステムの構成を示している。センサー回路は FPGA により制御され、ADC も FPGA にコントロールされている。Fig. 2 はセンサーに振幅 150 pT の 10Hz 正弦磁界を印加した場合の SNR を示している。実験結果によると、サンプリングスイッチ動作と AD コンバータ動作の重複を避けた場合に、ノイズレベルが低いことが明らかになった。



MI センサー

Fig.1 Schematics of the MI sensor systems.

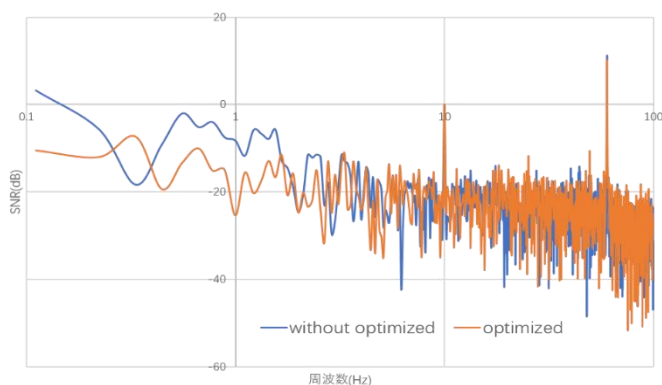


Fig.2 The S/N ratio of the system by frequency analysis.

- 1) Shingo Tajima, et al., "High Resolution Magneto-impedance Sensor with TAD for Low Noise Signal Processing," Proc. IEEE INTERMAG, 2014.

フリップチップボンディングによる高周波駆動薄膜磁界センサ

工藤春陽, 植竹宏明*, 小野寺英彦**, トンタット ロイ, 藪上 信, 早坂淳一*, 荒井賢一*
(東北大学, *電磁材料研究所, **東北学院大学)

Flip-chip bonded high-frequency thin-film magnetic field sensor

H. Kudo, H. Uetake*, H. Onodera**, L. Tonthat, S. Yabukami, J. Hayasaka*, K. I. Arai*
(Tohoku University, *Research Institute for Electromagnetic Materials, **Tohoku Gakuin University)

はじめに フリップチップボンディングにより実装したコプレーナ構造の高周波駆動薄膜センサを開発し, 磁性薄膜の膜厚と位相変化感度, および低周波磁界検出について検討した.

計測方法 Fig. 1 に直線コプレーナ線路により構成される薄膜センサの構造を示す。センサ素子はガラス基板上 (25 mm×25 mm, 1 mm 厚) にアモルファス CoNbZr 薄膜 (18.2 mm×1.15 mm) を RF スパッタにより成膜し, SrTiO₃ 薄膜を介して Cu 薄膜によるコプレーナ線路 (長さ 19.8 mm, 0.3 mm 幅, ギャップ 0.05 mm, 膜厚 4 μm) をそれぞれリフトオフにより加工した。コプレーナ端部の電極はフリップチップボンディングにより基板へ実装した。CoNbZr 薄膜は回転磁界中熱処理 (300 °C, 2 時間 0.3 T) の後, 静磁界中熱処理 (300 °C, 1 時間 0.3 T) を施し, コプレーナ幅方向に異方性を付与した。キャリア信号はコプレーナ導体の流れ, CoNbZr 薄膜に通電しない。センサの評価は磁界をコプレーナ長手方向へ, ヘルムホルツコイルで 0-10 Oe の範囲でゆっくり変化させ, ネットワークアナライザ (R3767CG) の透過法測定によりキャリアの位相変化を S₂₁ から求めた。周波数範囲は 0.3 MHz-4 GHz とし, バンド幅は 1 kHz, 平均化回数は 16 回とした。

計測結果 Fig. 2 に Fig. 1 のボンディング実装後のセンサについて, CoNbZr 薄膜の膜厚とキャリアの外部磁界に対する位相変化の傾き (感度) の関係を示す。センサ素子はそれぞれの膜厚で約 10 個試作した。キャリアのゲインは -40 dB 以上の範囲とした。位相変化感度は CoNbZr 膜厚が 1 μm のときに最も高かった。これは磁化が面内磁化回転を得られやすいことを反映していると考えられる。ウエハプローブを用いて測定したボンディング前の同センサにも同様の傾向が見られた。これはフリップチップボンディングによりインピーダンス整合がおおむね維持されるため高感度な周波数帯等の変化が小さかったためと考えられる。ボンディング後の最高感度は 295.8 deg/Oe で, キャリア周波数は 1670 MHz, 外部磁界は 4.5 Oe となった。次に, 高速 AD コンバータ (FPGA 搭載, NI 5734) を用いてデータを高速で処理し, センサに微弱磁界が加えられたときのキャリアの振幅変化を測定した。Fig. 3 にセンサへ 20 Hz, 2.7 × 10⁻⁹ T の微弱磁界を与えた時のセンサ出力のスペクトルを示す。ノイズレベ

ルは 20 Hz 付近でおおよそ 100 pT/√Hz 程度となった。

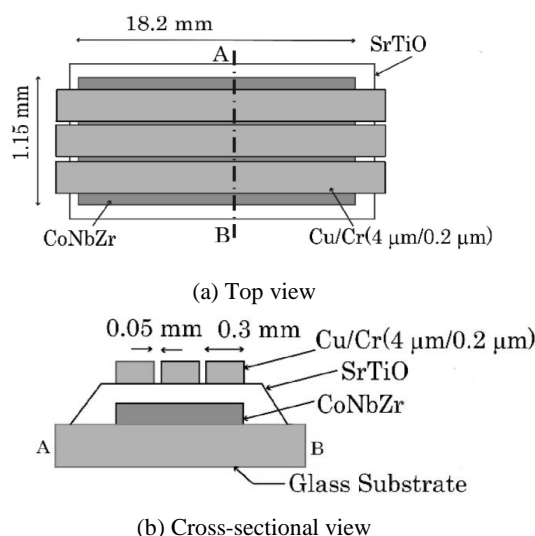


Fig. 1 Structure of the thin film sensor.

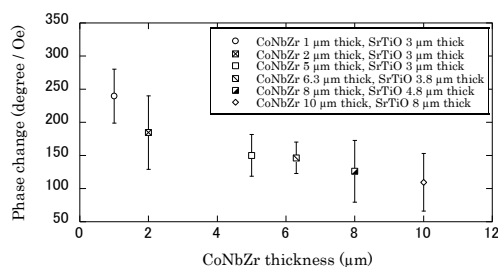


Fig. 2 Phase change as a function of thickness of CoNbZr film.

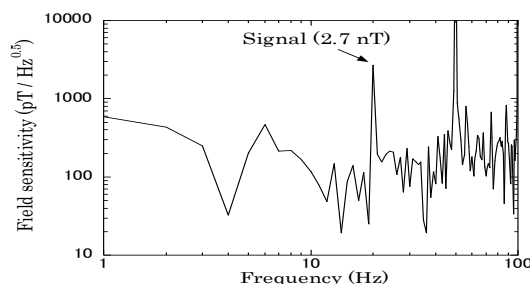


Fig. 3 Signal and noise of sensor when a small AC field (2.7 nT and 20 Hz) was applied.

参考文献 1) H. Uetake, S. Yabukami et al. *J. Magn. Soc. Jpn.*, 38 (3-1), pp. 83-86 (2014)

高周波近傍磁界測定における新しい同期手法の提案

立岡大青, 石田竜太, 栢修一郎, 石山和志

(東北大学電気通信研究所)

Proposal of new synchronization method in high frequency near magnetic field measurement

D. Tatsuoka, R. Ishida, S. Hashi, K. Ishiyama

(RIEC Tohoku University)

1. はじめに

高周波近傍磁界計測用プローブとして一般的にループコイルが用いられている¹⁾が、金属製のため本来の磁界分布を乱してしまう²⁾。そのため本研究では、金属プローブに比べ磁界を乱しにくい磁気光学結晶のガーネットとパルスレーザーを利用し、ストロボ法により交流磁界の位相情報を含めて低侵襲に測定可能な高周波近傍磁界計測システム³⁾について検討を行っている。ストロボ法を使う上ではレーザーのパルス発振と被測定信号の同期が必要である。先行研究では基準となる同期信号を準備しそれを用いて被測定磁界とレーザー発振を同期させていた。本研究では、被測定磁界を発生させるマイクロストリップライン(MSL)の通電信号をレーザー発振トリガ信号として用いる手法を試みる。先行研究³⁾のとおり被測定磁界周波数は数GHz帯であり、かつレーザーパルス周波数の整数倍であるため、分周器を用いて低周波数化するとともに増幅してレーザー発振のためのトリガ信号とした。

2. 実験方法

Fig.1 に本研究における磁界測定装置の概略を示す。被測定対象磁界を発生するMSLの近傍に配置したガーネットにレーザー光を垂直に照射し反射光を検出する。反射光はガーネットの磁気光学効果により、垂直磁界強度に依存した偏光状態の変化が起こるため、それを検出することで垂直方向成分の磁界強度が測定できる。今回は検証実験として信号発振器からの高周波信号を被測定対象より発生する信号と見立てレーザーに入力する。また、この信号をレーザーの発振可能周波数帯及び電圧レベルにするため、5.12GHzの信号を分周器にて1/64分周するとともに増幅し、80MHzのレーザーの発振トリガ信号を生成した。また、発生磁界の特定位相でレーザーを発振させるストロボ法では、レーザーの発振タイミングの時間的ずれであるジッターが、測定の正確性に大きく影響を及ぼす。今回は分周器、アンプによるジッターの増加が見込まれるため、作成したレーザーの発振トリガ信号のジッターに特に着目して測定を行った。

3. 実験結果

信号波形をオシロスコープにて観測した結果、波形のタイミングジッターはFig.3 より 50psであった。5.12GHzの周期が 200psであることから、本手法でもストロボ法での位相レベルの判断が可能であるため、レーザーの発振トリガ信号として使うに妥当であり、磁界計測が可能であると考えられる。この手法を用いた磁界計測結果については講演会で報告する。

参考文献

- 1) R. Paul: Introduction to Electromagnetic Compatibility 2nd edition, pp. 10-11, John Wiley, NewYork (2006).
- 2) M. Takahashi, K.Kawasaki1, H.Ohba, T.Ikenaga, H.Ota, T.Orikasa, N.Adachi, K.Ishiyama and K.I Arai J. Appl. Phys. 107, 09E711 (2010).
- 3) H. Nasuno, S. Hashi, and K. Ishiyama IEEE Trans . vol 47, NO. 10, Oct. 2011

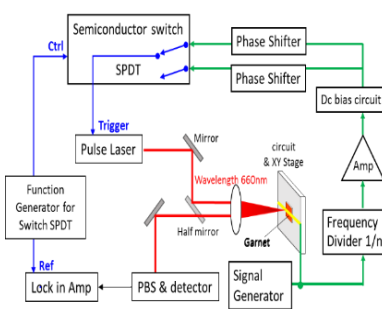


Fig.1 Schematic of magnetic field measuring system

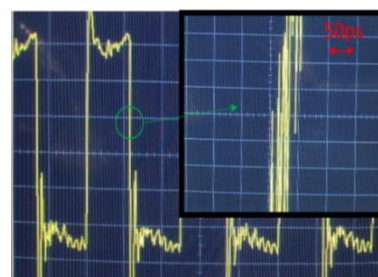


Fig.3 Waveform for laser trigger signal

フレキシブルマイクロストリップ線路型プローブによる磁性薄膜の 67 GHz までの高周波透磁率測定

能澤昂平, 沖田和彦, トンタットロイ, 藪上信, 遠藤恭, 島田寛*, 斉藤伸, 内海良一*
(東北大学, *東栄科学産業)

Permeability Measurements of Thin Film Using a Flexible Microstrip Line-Type Probe Up To 67 GHz

K. Nozawa, K. Okita, L. Tonthat, S. Yabukami, Y. Endo, Y. Shimada* S. Saito, R. Utsumi*

(Tohoku University, *Toei Scientific Industrial co., Ltd.)

はじめに

高周波透磁率の測定は磁性材料の高周波応用に不可欠である。著者らはフレキシブルマイクロストリップ線路型 (以下 MSL と略) プローブを開発し、磁性薄膜の 40 GHz までの透磁率計測方法を報告した¹⁾。今回プローブの小型化、強磁場印加等により 67 GHz までの広帯域化に成功したため報告する。

計測方法

測定対象には一軸異方性を付与した CoFeB 薄膜²⁾を用いた。ヘルムホルツコイルの磁場と試料の容易軸, MSL プローブの長さ方向がそれぞれ平行になるように設置し、試料と MSL は PET フィルム (100 μm) を介して近接配置した。Fig. 1 のようにネットワークアナライザで透過係数 S_{21} を測定し、等価インピーダンスを $100(1 - S_{21})/S_{21}$ とした。比透磁率は、強磁場 (2.00 T) 印加状態で校正し測定磁場との差分をとることでインピーダンス変化を求め、表皮効果を考慮し Newton-Raphson 法で最適化した¹⁾。

計測結果

Fig. 2 に直流磁界 14.0 kOe を磁化容易軸方向へ印加した時の磁化困難軸方向の比透磁率を示す。g 因子を 2.12 とすると、Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式の渦電流損を考慮した理論値と概ね一致した。Fig. 3 に共鳴周波数と直流磁界の関係を示す。ネットワークアナライザの測定限界である 67 GHz まで比較的良好的な共鳴周波数の一致が見られた。

謝辞

CoFeB 薄膜をご提供頂きました崇城大学の宗像誠教授に感謝致します。本研究の一部はビジネス・インキュベーション・プログラムの研究成果である。

参考文献

- 1) S. Yabukami et al., *J. Magn. Soc. Jpn.*, **41**, 25-28 (2017).
- 2) M. Namikawa et al., *J. Magn. Soc. Jpn.*, **27**, 371-374 (2003).

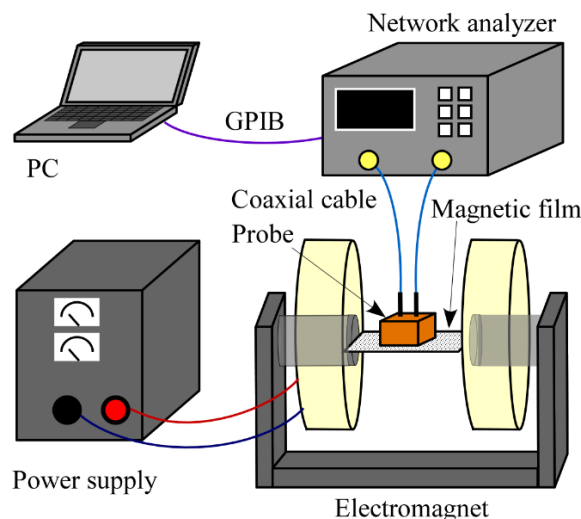


Fig. 1 Schematic diagram of permeability measurement system.

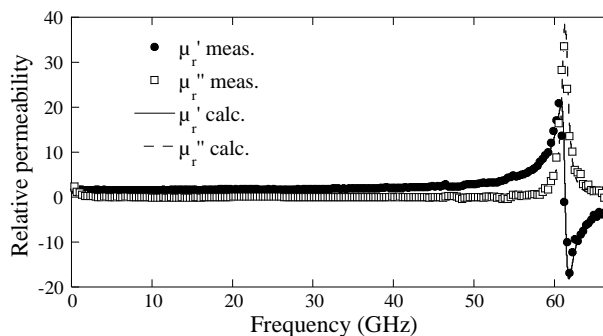


Fig. 2 Relative permeability of CoFeB film ($H_{dc}=14.0$ kOe)

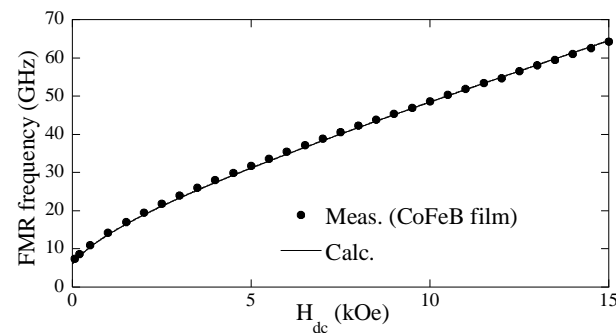


Fig. 3 Ferromagnetic resonance (FMR) frequency as a function of bias field.

異常ネルンスト効果を利用した フレキシブル熱流センサーの開発

周偉男, 中山裕康, 桜庭裕弥
(物材機構)

Development of flexible heat current sensor using anomalous Nernst effect

W. Zhou, H. Nakayama, Y. Sakuraba
(NIMS)

[背景]

熱流センサーは、熱の流入・流出をベクトル量として、極めて高い感度と応答性で観測できることから、熱の流れを可視化するセンサーとしてIoTでの活用されることが期待されている。しかしながら、現在市販されるゼーベック型熱流センサーは、センサー自体の熱抵抗が高い、フレキシビリティに限界がある、センサーの単価が高い、等の大きな課題がある。我々は、これらの課題を解決するため、磁性体に対し熱流を流した際に生じる熱電効果「異常ネルンスト効果」を利用した新しい熱流センサーを目指した研究を進めている。異常ネルンスト効果は、磁化と温度勾配の外積方向に電界を生じるさせるため、磁性線を面内方向で接続した極めて簡便な熱電対列で直列的に出力電圧を増大可能であり高い感度が期待できるとともに、延性のある磁性金属を低熱抵抗なフレキシブル基板上に成膜し利用すれば、高いフレキシビリティと低い熱抵抗の両立が期待される。その実現に向け、ネルンスト効果を発現する材料には、異常ネルンスト効果による $10\mu\text{V/K}$ 以上の高い熱電能、並びに材料自体の反磁場や外乱磁場の影響を受けにくい低い磁化と大きな保磁力を持つことが求められる。本講演では、近年の材料開拓の成果並びに異常ネルンスト型熱流センサーの性能評価の結果について言及する。

[実験方法]

異常ネルンスト型熱流センサーの試作品は、CoやFeをベースとした材料の磁性膜を、リソグラフィによって面内型熱電対列に加工することで作製し、図1に示すセッティングによって熱流への感度係数を評価した。磁性線幅は $50\text{-}400\mu\text{m}$ であり、 1cm^2 サイズによりこれを $10\text{-}100$ 本直列に連結させた。

[実験結果]

図1に示す通り、ヒーター出力を変えて異常ネルンスト電圧の磁場依存性を測定した結果、外部磁場ゼロでもネルンスト電圧出力が得られ、その出力はゼーベック熱流センサーで同時計測された熱流密度に対して線形的に応答することから、異常ネルンスト効果が熱流センサーとして、外部磁場ゼロでも利用できることが示された。試作品における感度は現行ゼーベック型より $1\text{-}2$ 桁小さいが、磁性線数を増やすことや今後の材料開拓で感度の改善は可能である。

参考文献

- [1] Sakuraba et al.,
APEX 6,033003
(2013),
[2] 桜庭裕弥, 日本熱
電学会 15, 36 (2018)
謝辞

この成果は、国立研究
開発法人新エネルギ
ー・産業技術総合開発
機構 (NEDO) の委
託業務の結果得られた。

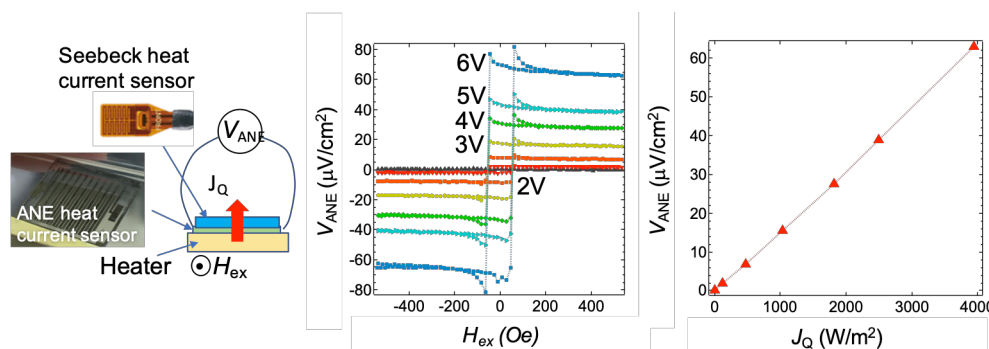


図1 試作した異常ネルンスト熱流センサー($400\mu\text{m}$ 線幅、10本直列接続)の電圧出力の磁場依存性と、ゼーベック熱流センサーで同時観測した熱流密度依存性。

強制振動による逆磁歪効果型歪みセンサの特性評価

曾良大輔*、久保結人、荒井薫、栢修一郎、石山和志(東北大学)

Characteristic evaluation of reverse magnetostrictive effect strain sensor by forced vibration

D. Sora, Y. Kubo, K. Arai, S. Hashi, K. Ishiyama (Tohoku Univ.)

はじめに

我々は、橋梁等の老朽化インフラの振動特性から健全性を診断可能な振動センサとして、軟磁性磁歪薄膜の逆磁歪効果を用いた高感度歪みセンサを振動センサへと応用する研究を行ってきた¹⁾。先行研究においてはセンサをカンチレバー構造とし、自由振動させることでその特性の評価を行っていたが、この方法ではカンチレバーの機械的共振周波数において大きく振動を検知してしまい、センサの特性を正しく測定することができていなかった。そこで別の歪み印加手法として、センサを接着した圧電素子を伸縮させ直接歪みをかける方法を提案する。自由振動では、振動の際センサに与える歪みを制御出来なかったが、この手法を用いれば歪みは制御可能である。また、自由振動の際はセンサにバイアス歪みをかけるために錘を乗せる必要があったが、圧電素子を用いる際はバイアス電圧を印加すればバイアス歪みをかけることが可能になる。強制振動のための予備実験として、磁性膜を成膜していない Si 基板を圧電素子に接着し、直流電圧を印加することで歪みを与えることを試みた。

実験方法

直径 50mm、厚さ 4mm の圧電素子上に厚さ 200 μm 、8.5mm \times 25mm の Si 基板を Fig. 1 に示すように接着した。圧電素子に -1000V~1000V の直流電圧を印加し、歪みゲージを用いて Fig. 1 に示す三ヶ所の歪みの測定を行った。

実験結果及び考察

電界に対する歪みの測定結果を Fig. 2 に示す。圧電素子上の歪みゲージは電界が 250V/mm の際、およそ 200ppm を検知し、Si 基板上の歪みゲージはおよそ 100ppm の歪みを検知した。以上の結果から、Si 基板には 100ppm 程度の歪みがかけており、特性測定の際にはセンサに十分な歪みを印加することができ、強制振動による測定が可能であると考えられる。実際の強制振動による特性測定の結果は講演の際に報告する。

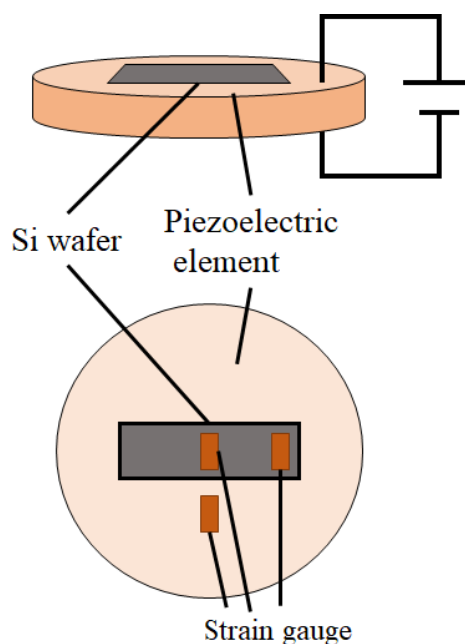


Fig. 1 Schematic diagram of the piezoelectric element.

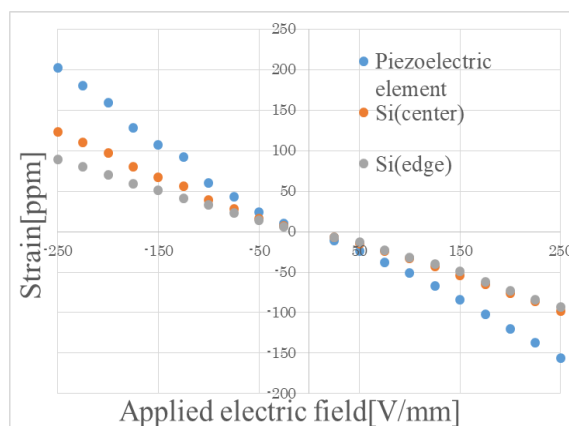


Fig. 2 Distortion characteristics for applied electric field

参考文献

- 1) 久保, 栢, 横井, 荒井, 石山, IEEJ Trans. SM, **138**, 4 (2018)

磁性ワイヤ・コイル分離型 Wiegand センサを用いた 振動発電と等価回路解析

飯島榛史、孫小雅、原和江、酒井貴史、山田努、竹村泰司
(横浜国立大学)

Vibration-type energy harvester using Wiegand sensor with separated wire/coil and
its equivalent circuit analysis

Haruchika Iijima, Xiaoya Sun, Kazue Hara, Takafumi Sakai, Tsutomu Yamada, Yasushi Takemura
(Yokohama National University)

はじめに

Wiegand ワイヤ¹⁾ (熱ひねり加工を施した FeCoV 磁性線) は、大バルクハウゼンジャンプと呼ばれる高速な磁壁移動によって急峻な磁化反転を生じ、検出コイルを設置することでこの磁化反転からパルス出力が得られる。この出力は無電源で得られることや外部磁界の時間変化に依存しないなどの特徴を有しており、エネルギー・ハーベスティング素子への応用が着目されている²⁾。本研究では、複合磁気ワイヤを振動させることにより生じるパルス出力のエネルギー量を測定した。

実験方法と結果

本研究では、長さ 13 mm、0.25 mm 径の Wiegand ワイヤを用いた。検出コイルと励磁用磁石をワイヤの近傍に置き、ワイヤの長手方向を励磁用磁石に対して垂直に振動させた(Fig.1)。ワイヤの磁壁移動により生じる漏れ磁束をコイルで検出し、正負それぞれのパルス出力の 1 振動 (1 パルス) 当たりのエネルギー量を求めた。エネルギーは、検出コイルに負荷抵抗を接続し、その消費電力を算出した。また Wiegand ワイヤに対する励磁磁石と検出コイルの相対位置を変えてエネルギー量の変化を検討した。

ワイヤの端を励磁し、検出したエネルギー量の測定結果を Fig.2 のようになる。励磁用磁石は NdFeB (4×4×5 mm³, 着磁方向)、検出コイルは (10×10 mm²の平面型, 500 turn) である。これまでに Wiegand ワイヤに検出コイルを巻いた従来型の Wiegand センサを用いた振動発電³⁾や、今回同様のワイヤ・コイル分離型での回転センサへの応用⁴⁾を報告してきたが、これらの既報と今回得られた微小振動ワイヤからの発電との差異や優位点などを考察した。

具体的な励磁方法や検出コイルの位置等の詳細、等価回路を用いた電力の解析は当日発表する。

参考文献

- 1) Wiegand and Velinsky, U.S. Patent 3,820,090, 1974.
- 2) Takemura *et al.*, *IEEE Trans. Magn.*, **53**, 4002706, 2017.
- 3) Takebuchi *et al.*, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **41**, 34, 2017.
- 4) 小原他, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **34**, 347, 2010.

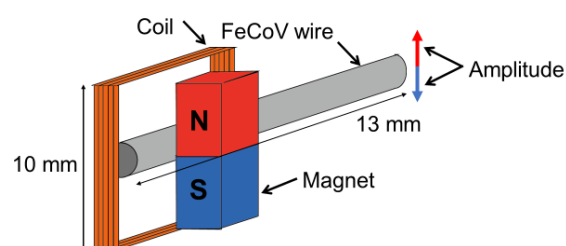


Fig. 1 Configuration of magnetic wire, magnet and detection coil.

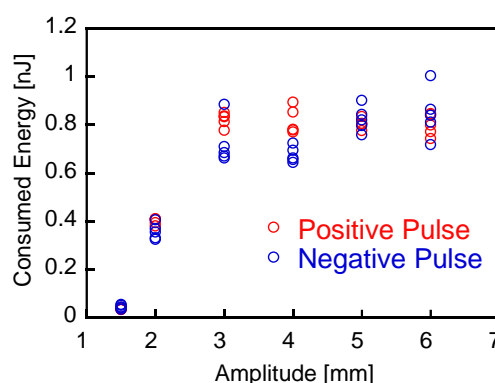


Fig. 2 Consumed energy in the load resistor connected to the Wiegand sensor depending on the vibration amplitude of the excitation coil.

Wiegand ワイヤを用いた小型ワイヤレス給電

川添駿平、和口修平、酒井貴史、山田努、竹村泰司
(横浜国立大学)

Wireless power transmission using a Wiegand wire

Shumpei Kawazoe, Shuhei Waguchi, Takafumi Sakai, Tsutomu Yamada, Yasushi Takemura
(Yokohama National University)

はじめに

熱ひねり加工を施した FeCoV 磁性ワイヤ(Wiegand ワイヤ)¹⁾は、励磁周波数に依らない高速な磁壁移動によって、大バルクハウゼンジャンプと呼ばれる急激な磁化反転を生じるため、この周りに検出コイルを設置することでこの磁化反転からパルス出力が得られる。励磁周波数が 10 kHz 程度以下の低周波帯では、MnZn フェライトコアによる誘導起電力の増幅より、大バルクハウゼンジャンプによる電力の増幅が優位であると報告されている²⁾。また、集積回路の低消費電力化などにより、例えば 100 μW 以下の電力であっても十分な用途性がある。よって本研究では Wiegand ワイヤをコアに用いることにより、筒状の電磁誘導型ワイヤレス給電の小型化を想定し、1 kHz 以下の交流磁界によりワイヤを励磁した場合に負荷で得られる電力を測定した。

実験方法

Fig.1 に示すように、Wiegand ワイヤ($\phi:0.25$ mm, length:11 mm)の周りに 3000 turn の給電用検出コイルを設置し³⁾、さらにその外側にはワイヤの中央部が励磁されるように励磁コイルを置き、正弦波交流磁界 ± 40 Oe で励磁させた。検出コイル側の回路には、ダイオードブリッジ及びコンデンサを接続し、正負双方のパルス出力の整流・平滑化を行い、負荷での消費電力を算出した。

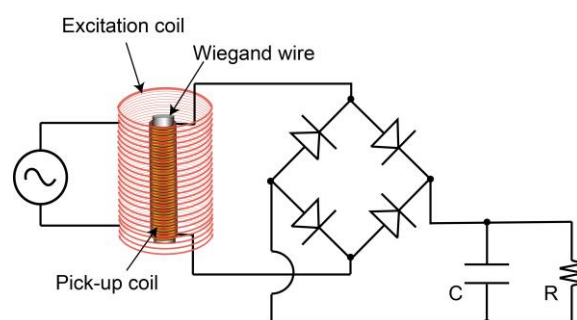


Fig. 1 Configuration of measurement.

実験結果

Fig. 2 に励磁周波数を $f = 1$ kHz, 800 Hz, 600 Hz, 400 Hz, 200 Hz とした場合における、負荷抵抗値 R と負荷での電力 P の関係を示す。 $f = 1$ kHz で $R = 3$ k Ω とした場合、この負荷で 100 μW 程度の電力が得られることを確認した。また、高周波ほど負荷抵抗依存が大きく、低周波ほど最大電力が得られる負荷抵抗値が大きいことが分かった。

我々は Fig.1 に示す回路の他に、倍電圧整流回路を用いた電力測定や、コンデンサ挿入による共振の影響について検討を行っている。回路パラメータの詳細や、最大電力を得るための検討について当日報告する。

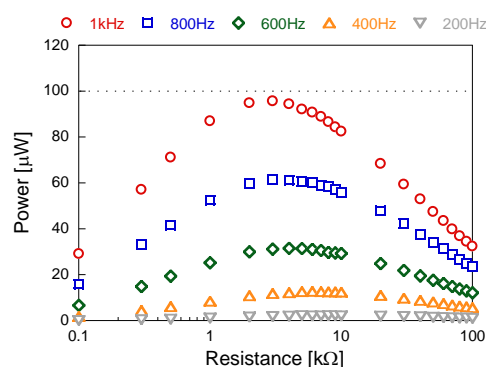


Fig. 2 Electrical power consumed in the load resistance.

参考文献

- 1) J. R. Wiegand and M. Velinsky, U.S. Patent 3, 820, 090, 1974.
- 2) Takahashi *et al.*, *J. Mag. Soc. Jpn.* **42**, 49, 2018.
- 3) Takemura *et al.*, *IEEE Trans. Magn.* **53**, 4002706, 2017.

コリメータレンズをセンサヘッドに用いた 高 S/N 比光プローブ電流センサの基礎検討

山崎 健太¹, 太田 柊都¹, 岩見 晃希¹, 古屋 一輝¹,
久保 俊哉², 宮本 光教², 曾根原 誠¹, 佐藤 敏郎¹
(¹信州大学, ²シチズンファインデバイス)

Fundamental study on high S/N ratio optical probe current sensor using sensor head with collimator lens
K. Yamazaki¹, S. Ota¹, K. Iwami¹, K. Furuya¹, T. Kubo², M. Miyamoto², M. Sonehara¹, T. Sato¹
(¹Shinshu University, ²Citizen Finedevice Co.,Ltd.)

はじめに

筆者らは、電磁ノイズの影響を受け難く、直流から高周波まで測定可能な電流センサの実現を目指し、Co-MgF₂ ナノグラニューラー磁性膜の Faraday 効果を利用した光プローブ電流センサの研究・開発を進めている¹⁾。本稿では、センサヘッドにコリメータレンズを利用し²⁾、磁性膜への入射光を集光させ、本電流センサの S/N 比を高くする手法を提案した。

実験方法

Fig. 1 に示すように、本センサヘッドは偏波保持ファイバ (PMF) から出射した直線偏光がコリメータレンズにより集光され、磁性膜を透過し、誘電体ミラーで反射、再び磁性膜を透過、再度コリメータレンズにより集光され PMF に入射する構成である。Fig. 2 に示す光プローブ電流センサのセンサヘッド部を Fig. 1 の構成とし、800 kA/m → -800 kA/m → 800 kA/m と磁界 H を印加した場合の各偏光強度 P_P , P_S を測定した。Faraday 素子には、Co-MgF₂ ナノグラニューラー薄膜 (Co:MgF₂ = 1:2, 厚さ 1.38 μm)¹⁾ を使用した。

測定結果

Fig. 3 にコリメータレンズの有無における光プローブ電流センサの磁界と各偏光強度の関係の測定結果を示す。Fig. 3 より、コリメータレンズを使用することで約 3 倍の光強度が得られた。本電流センサのセンサ出力は、偏光強度の最大値 P_{max} および Faraday 効果による偏光面の回転角 (単位磁界当たりの Faraday 回転角 θ_F [°/(A/m)]) の積で表され、S/N 比に依存する。前述の通りコリメータレンズの使用で P_{max} が約 3 倍増大したため、S/N 比が約 3 倍の高くなる可能性が示された。今後は、更に高 S/N 比化を図るため、集磁用小型磁気ヨークの併用も検討する³⁾。

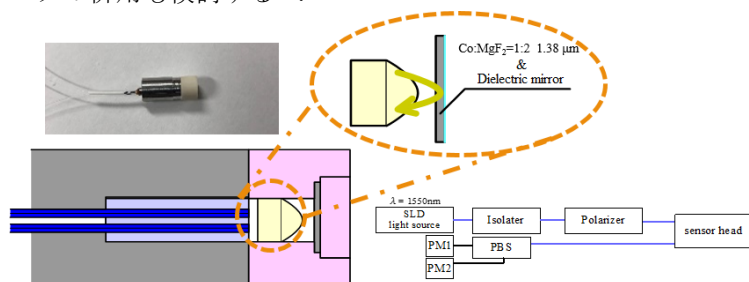


Fig. 1 Photograph and schematic view sensor head with collimator lens.

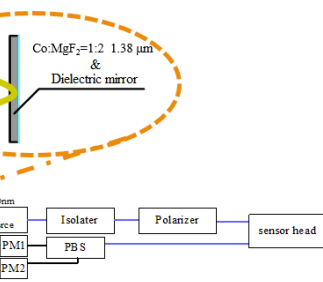


Fig. 2 Optical system for optical probe current sensor.

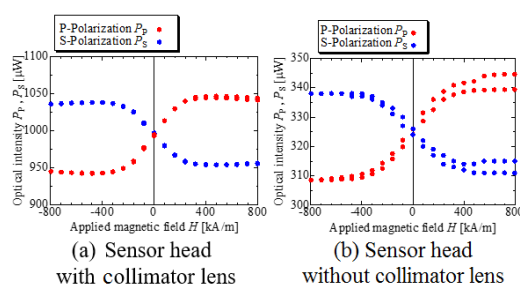


Fig. 3 Experiment results of relation between applied magnetic field H and optical intensities P_P , P_S .

参考文献

- 1) M. Miyamoto, T. Kubo, Y. Fujishiro, K. Shiota, M. Sonehara, T. Sato, "Fabrication of Ferromagnetic Co-MgF₂ Granular Film with High Transmittance and Large Faraday Effect for Optical Magnetic Field Sensor", *IEEE Trans. Magn.*, **54**, 11, #2501205, 2018.
- 2) T. Jitsuno, K. Tokumura, H. Tamamura, "Laser ablative shaping of collimator lens for single mode fiber", *OFC 2001, Tech. Digest Postconference Edition*, #7091585, 2001.
- 3) K. Yamazaki, Y. Fujishiro, K. Shiota, K. Iwami, M. Sonehara, T. Sato, "Study on shape of magnetic-yoke for Faraday-effect optical probe current sensor", *The 42nd Annual Conf. Magn. Jpn.*, 14aD-9, 2018.

高い温度安定性を有する リング干渉方式光プローブ電流センサの基礎検討

古屋 一輝¹, 岩見 晃希¹, 太田 柊都¹, 山崎 健太¹,
久保 俊哉², 宮本 光教², 曾根原 誠¹, 佐藤 敏郎¹
(¹信州大学, ²シチズンファインデバイス)

Fundamental study on ring interferometric optical probe current sensor with high temperature stability
K. Furuya¹, K. Iwami¹, S. Ota¹, K. Yamazaki¹, T. Kubo², M. Miyamoto², M. Sonehara¹, T. Sato¹
(¹Shinshu University, ²Citizen Finedevice Co.,Ltd.)

はじめに

筆者らは、電磁ノイズの影響を受け難く、直流から高周波まで測定可能な電流センサの実現を目指し、Co-MgF₂ ナノグラニューラー磁性膜の Faraday 効果を利用した光プローブ電流センサの研究・開発を進めている¹⁾。本稿では、高い温度安定性すなわち周囲温度特性に優れたセンサ実現のためにリング干渉計を応用したリング干渉方式光プローブ電流センサを検討し²⁾、その結果について述べる。

実験方法

Fig. 1 (a)に従来の透過型 Faraday 効果型光プローブ電流センサの光学系を示す。本電流センサは直線偏光を磁性膜に入射し、透過光を P 偏光と S 偏光に分光させ、これらの光強度差 ΔP [W]を電流値として換算する¹⁾。しかし、周囲温度に変化が生じた場合、使用している偏波保持ファイバ (PMF) の複屈折率と伝送損失に変化が生じて温度ドリフトが生じてしまう。複屈折に伴う温度ドリフトの補償、および伝送損失の温度変化に伴う光強度の変動には、それぞれ PMF の Slow 軸および Fast 軸の両軸を利用して光を伝搬させる方法、および P 偏光と S 偏光の光強度差 ΔP [W]をセンサ出力とすることが有効である。以上を踏まえて設計したリング干渉方式の光学系を Fig.1 (b)に示す。

測定結果

恒温槽 (ESPEC; SU-240) 中にセンサヘッド部を入れ、-40~85 [°C]の間で、P 偏光と S 偏光の光強度を測定し、それらの差分 ΔP を算出した。Fig. 2 に従来の透過型強度変調方式と本稿提案のリング干渉方式の温度 T [°C] に対する光出力の差 ΔP [W]を示す。Fig. 2 より、透過型強度変調方式では測定した温度範囲内で約 14 μ W の温度ドリフトが確認された。一方、リング干渉方式では温度ドリフトが 5 μ W 程度であり、前述の通り温度変化の補償ができたためと考えられる。40°C 以上で、温度ドリフトが悪化しているが、センサヘッド部で使用している QWP の温度特性が原因であると考えられる。

参考文献

- 1) M. Miyamoto, T. Kubo, Y. Fujishiro, K. Shiota, M. Sonehara, T. Sato, "Fabrication of Ferromagnetic Co-MgF₂ Granular Film with High Transmittance and Large Faraday Effect for Optical Magnetic Field Sensor", *IEEE Trans. Magn.*, **54**, 11, #2501205, 2018.
- 2) H. Tamura, H. Tozuka, T. Nakaya, O. Kamada, "Ring interferometric magnetic field optical sensor using a garnet single crystal", *J. Magn. Soc. Jpn.*, **34**, 4, pp. 537-542, 2010.

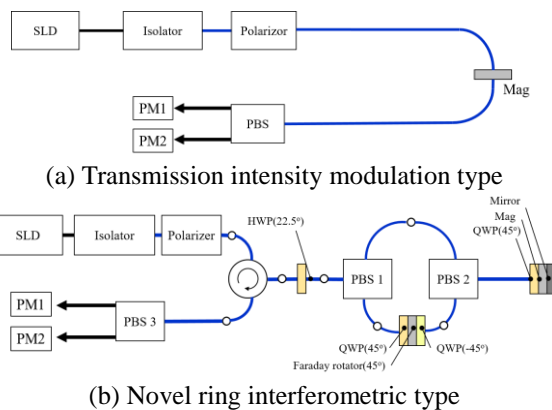


Fig. 1 Schematic view of two kinds of optical probe sensor system.

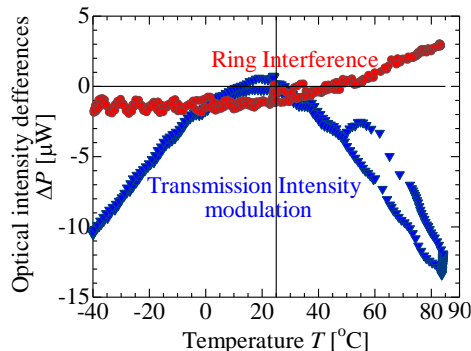


Fig. 2 Relation between optical intensity differences ΔP and temperature T .

部分励磁した Wiegand ワイヤの磁化過程評価

酒井貴史、山田努、竹村泰司
(横浜国立大学)

Evaluation of magnetization process of partially excited Wiegand wire

Takafumi Sakai, Tsutomu Yamada, Yasushi Takemura

(Yokohama National University)

はじめに

Wiegand ワイヤにおける大バルクハウゼンジャンプを伴う急峻な磁化反転は、検出コイルにパルス電圧を誘起する¹⁾。この出力は無電源で得られることや外部磁界の時間変化に依存しないなどの特徴を有しており、無電源センサなどへの応用が期待されている²⁾。本研究では、ホール効果を用いて Wiegand ワイヤから出る磁束から磁壁移動を測定した。

実験方法

ホール素子(ASAHI KASEI 社 HG-166A-2G)をワイヤ近傍に2つ設置し、励磁コイルによって磁化反転させた。励磁位置に対して片一方に2つのホール素子を設置し(Fig.1)、一方向の磁壁移動を測定した。また、ホール素子と同じ位置に検出コイルを2つ設置して磁壁移動に伴うパルス電圧も同時に測定し、ホール素子と検出コイルのそれぞれの距離と出力の時間差から磁壁移動を観測した。

実験結果

設置したホール素子から得た磁束と検出コイルから得たパルス波形を最大値で規格したものを Fig. 2 と Fig. 3 に示す。ホール素子と検出コイルどちらの場合においても励磁コイルからの距離に対応した波形に時間差が観測された。しかし、検出コイルから得られた時間差に比べ、ホール素子から得られた時間差が大きいことが分かった。これにより、ホール素子で観測される磁束の変化は Wiegand ワイヤ全体の磁化過程を示しており、ワイヤ内部の磁化過程の解明に有用であると考えられる。磁化過程の詳細については当日発表する。

参考文献

- 1) J. R. Wiegand and M. Velinsky, U.S. Patent 3,820,090, (1974).
- 2) Y. Takemura, N. Fujinaga, A. Takebuchi, and T. Yamada, *IEEE Trans. Magn.*, **53**, 4002706, (2017)

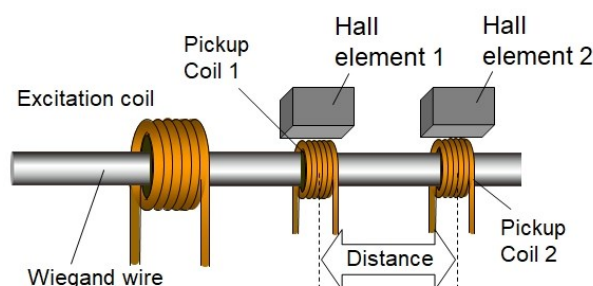


Fig. 1 Configuration of wire, coil and Hall element.

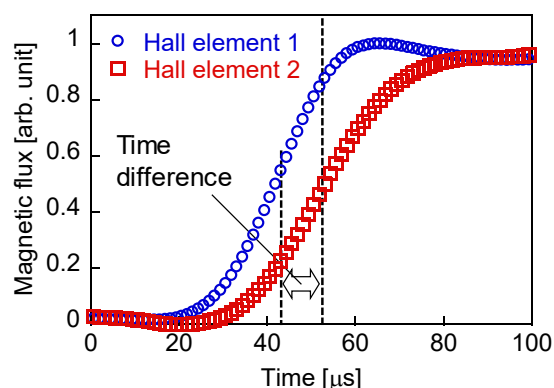


Fig. 2 The magnetic flux measured by Hall element.

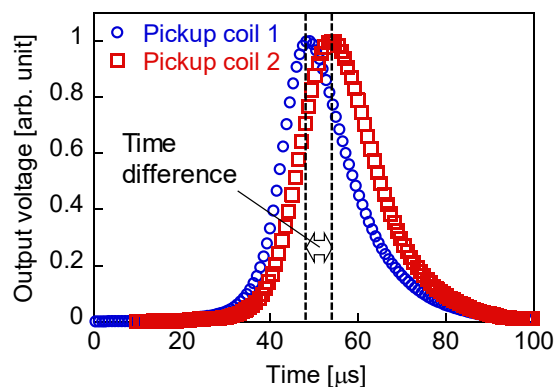


Fig. 3 The output voltage of pickup coil.

90度磁気結合膜の偏極中性子線反射率による微細磁気構造解析

鍾永師¹, 永島玄¹, 堀池周¹, 花島隆泰², 黒川雄一郎¹, 湯浅裕美¹

(¹九州大シス情,²CROSS)

The fine magnetic structure of magnetic multilayer with 90 degrees magnetic coupling layer by using Polarized Neutron Reflectivity analysis

Y. Zhong, G. Nagashima, S. Horiike, T. Hanashima, Y. Kurokawa, H. Yuasa

(¹ Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University, ² CROSS)

Recently antiferromagnetic (AFM) spintronics are drawing attention owing to the high resonance frequencies and zero stray fields. It has been theoretically reported that spin transfer torques (STT) in AFM materials can be obtained [1]. However, it is hard to directly observe spin torque oscillation (STO). Comparing to this, we fabricated the novel quasi-AFM layer which has multiple domains with alternatively antiparallel magnetization by using biquadratic magnetic coupling between two ferromagnetic (FM) layers through Fe-O layer. The magnetic property of the quasi-AFM layer is expected to have properties that are intermediate between AFM and FM. The macroscopic result of its magnetic property is shown in ref. [3], and the crystal structure was also reported in ref. [4]. And to analyze the magnetic structure, we carried out polarized neutron reflectivity (PNR) analysis by BL17 SHARAKU in MLF, J-PARC.

The Ta/Ru/IrMn/CoFe(A)/Fe-O/CoFe(B)/Cu/CoFe(C)/Cu/Ta films were sputtered on thermal oxidized Si wafers and annealed in a field to fix the magnetization of CoFe(A) in x direction by IrMn. We measured the polarized neutron reflectivity of this film and used the software named GenX to fit the data, from which we can find out the magnetization direction and magnetic moment of the film.

Fig.1 (a) shows the M-H curve of the film, which means the magnetization of CoFe(A) and CoFe(B) were coupled with angles of about ± 90 degrees through Fe-O and the CoFe(B) had become the quasi-AFM. The schematic magnetization images and fitting result is shown in Fig.1 (b). We can see that the magnetization of CoFe(A) was fixed in x direction and the magnetization of CoFe(C) had reversed in low field. The CoFe(B) is expected to be quasi-AFM and the x component of magnetization should be zero. However, the result indicates the CoFe(B) had magnetization of $1.35\mu_B$ in x direction, which means the biquadratic coupling was not strong enough and the magnetization of it was not completely antiparallel. The average angle between the magnetization of CoFe(A) and CoFe(B) was estimated as ± 42 degrees from $\cos^{-1}(1.35\mu_B/1.82\mu_B)$. In presentation, we will show the process how we fitted it and explain the result in detail.

This work was supported by The Canon Foundation.

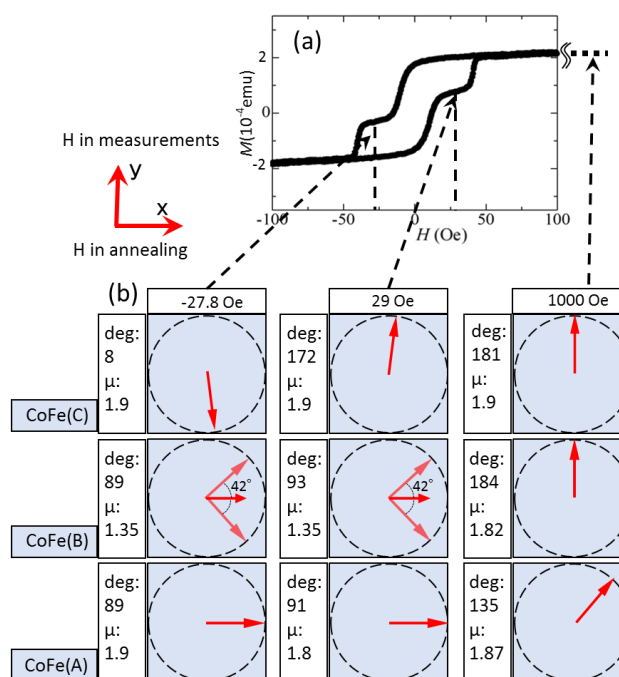


Fig. 1 (a) M-H curve, (b) schematic magnetization images in field of -27.8 Oe, 29 Oe and 1000 Oe.

- [1] A. S. Núñez *et al.*, Phys. Rev. B **73**, 214426 (2006).
- [2] T. Jungwirth *et al.*, Nature Nanotechnology, **11**, 231 (2016).
- [3] G. Nagashima *et al.*, JSAP Spring **65**, 17P-p10-17 (2018).
- [4] Y. Zhong *et al.*, JSAP Spring **66**, 9p-PB1-30 (2019.)

交番磁気力顕微鏡を用いた直流磁場と交流磁場の交差エネルギー項の検出による磁気記録ヘッドの局所磁化計測

P. Dubey, P. Kumar, 園部 博, 齊藤 準
(秋田大)

Local magnetization measurement of magnetic recording head by detecting energy cross term of DC and AC magnetic field by alternating magnetic force microscopy

P. Dubey, P. Kumar, H. Sonobe, H. Saito
(Akita Univ.)

はじめに 垂直磁気記録ヘッドでは記録磁場の高強度・高収束化が図られており、磁気ヘッドの更なる性能向上にはその微視的な磁気特性を把握することが重要となる。筆者らは、磁気力顕微鏡の分野で試料表面近傍の磁場の計測を可能にすることで空間分解能を大幅に向上させた交番磁気力顕微鏡 (Alternating Magnetic Force Microscopy; A-MFM)を開発し、さらに高磁化率の Co-GdO_x系超常磁性探針を開発することで、磁気ヘッドから発生する交流磁場に対してその2乗値に対応する磁場エネルギー計測を可能にし、さらなる空間分解能向上を実現している^{1,2)}。本研究では、磁気ヘッドに直流磁場を重畳させた交流磁場を発生させて、直流磁場と交流磁場との交差エネルギー項を解析することで磁気記録ヘッドの局所的な磁化測定を試みた。

方法 Co-GdO_x超常磁性探針 (磁性膜厚 100 nm) を用いて磁気ヘッドの A-MFM 観察を行った。超常磁性探針には磁気ヘッドからの交流磁場 $H \cos(\omega t)$ による交流磁化 $m^{ip} = \chi H \cos(\omega t)$ が発生するので探針の磁気力は $\chi(\partial^2 H^2 / \partial z^2) \cos^2(\omega t) \propto \cos(2\omega t)$ となり、磁場の2乗に対応する磁場エネルギー信号 (周波数 2ω) を検出することで交流磁場のエネルギーを画像化できる。ここで直流バイアスした電流 $I = I_{dc} + I_{ac}^0 \cos(\omega t)$ を磁気ヘッドに印加した場合、磁気ヘッド面に垂直方向の磁化 $M_{\perp} = M_0 \sin \theta$ (θ はヘッド磁化のヘッド面からの立上り角度) は、 I_{dc} と I_{ac} による直流磁場および交流磁場により、 $M_{\perp} = M_s \sin(\theta + \Delta\theta \sin(\omega t))$ で周期的に変化する。ここで交流磁場が直流磁場に対して小さい場合 ($\Delta\theta \ll \theta$) には、

$M_{\perp} \cong M_s (\sin \theta + \Delta\theta \cos \theta \sin(\omega t))$ となる。このとき磁気ヘッド面近傍では M_{\perp} によりヘッド面に垂直方向のヘッド磁場 $H_z = H_z^{dc} + H_z^{ac}$ が発生する。ここで H_z^2 において H_z^{dc} と H_z^{ac} の交差磁場エネルギー項が、 $H_z^{dc} H_z^{ac} \cong \Delta\theta M_s^2 \sin \theta \cos \theta \sin(\omega t) \propto \sin 2\theta$ となることに着目すると、交差エネルギー項 (周波数 ω) の信号強度 $S(\omega)$ は $\sin 2\theta$ に比例することになる。そこで I_{ac}^0 を固定して $S(\omega)$ の I_{dc} 依存性を解析することで磁気ヘッドの局所的な磁化計測を行った。

結果 図 1(a)に $I_{dc} = 3 \text{ mA}$ での磁気ヘッドの交流磁場エネルギー像とその中心部での直流磁場と交流磁場の交差エネルギー項 $S(\omega)$ (最大値を 1 で規格化) の I_{dc} 依存性を示す。 $S(\omega)$ は I_{dc} の増加に伴い急激に増加し、 $I_{dc} = 3 \text{ mA}$ 付近で最大値をとった後に徐々に減少することがわかる。図 1(b)に $S(\omega)$ が最大となるときの磁化の立上り角度 θ を 45° として、 $S(\omega)$ が $\sin 2\theta$ に従うとして求めた θ を用いて、ヘッド面に垂直方向の磁化曲線 (ヘッド磁化の飽和値で規格化) $M_{\perp} / M_s = \sin \theta$ を示す。磁化は I_{dc} の増加に伴い急激に増加しその後、飽和に近づいていくことがわかる。講演ではこの解析の詳細について述べる。

謝辞 磁気記録ヘッドの磁場エネルギーイメージングに関する議論に対して、(株)日立ハイテクファインシステムズ様に感謝いたします。

参考文献 1) Kumar et al., Appl. Phys. Lett., 111, 183105 (2017),
2) P. Kumar et al., J. Appl. Phys., 123, 214503 (2018)

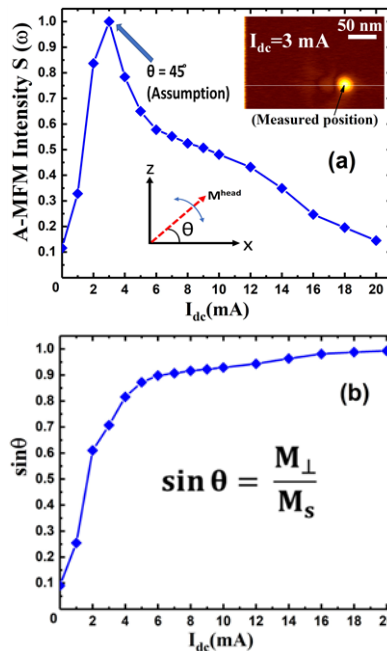


Fig. 1 (a) I_{dc} dependence of normalized $S(\omega)$, (b) I_{dc} dependence of normalized M_{\perp} .

交番磁気力顕微鏡を用いたパーマロイ・パターンド薄膜の磁壁移動の動的観察

大阪 飛翔¹, Jong-Ching Wu², 齊藤 準¹

(秋田大学, National Changhua University of Education)

Dynamic observation of domain wall movement of patterned permalloy thin films
by alternating magnetic force microscopy

T. Osaka¹, J. C. Wu², H. Saito¹

(¹Akita Univ., ²National Changhua University of Education)

はじめに 磁性材料の性能向上には磁区構造を観察し制御することが重要となる。近年、ソフト磁性薄膜では使用する磁気デバイスの微細化・高周波化により、磁区観察には高い空間分解能および時間分解能が求められている。ここで直流磁場を検出する従来の磁気力顕微鏡(MFM)は、強磁性探針から発生する漏洩磁場によりソフト磁性薄膜の磁壁位置を乱すので磁区観察に難がある。そこで本研究ではソフト磁性薄膜の磁区観察をMFMで実現することを目的として、研究グループが開発した交流磁場を検出できる交番磁気力顕微鏡¹⁾(A-MFM)と残留磁化がない超常磁性探針を用いてパーマロイ・パターンド薄膜の磁区観察を試みた結果を報告する。

実験方法 熱酸化Si基板上に作製したパーマロイ・パターンド薄膜(Taキャップ層2nm)について、MFM観察、A-MFM観察を大気中で行った。A-MFM観察ではフェライトコアを試料ステージ直下に配置し、膜面垂直方向に交流磁場($H_z^{ac} = H_{z0}^{ac} \cos(\omega t)$; $H_{z0}^{ac} = 0 \sim 250$ Oe, $\omega/2\pi = 89$ Hz)を印加した。MFM観察には市販のCoCrPt探針を、A-MFM観察には自作したCo-GdO_x系超常磁性探針を用いた。観察条件として、交流磁場強度、探針試料間距離、探針走査方向を種々変化させた。

実験結果 Fig.1に一例として4×4 μm角のパーマロイ・パターンド薄膜のMFM像およびA-MFM像を示す。

Fig.1(a)のMFM像では、90°磁壁からなる還流磁区が観察されるが、磁壁は曲線状であり探針磁場の影響による湾曲が懸念される。図(b)~(d)のA-MFM像では、90°磁壁の移動が最大位置として観察され、磁壁の移動は磁壁の湾曲なく起こり、移動幅は交流磁場の増加に伴い増加した。ここでフェライトコアからの交流磁場は試料面に概ね垂直であるが、わずかに残る弱い図中の上下方向の面内磁場により磁壁が移動しているものと推察される。

Fig.2 (a), (b)に磁壁の最大移動位置の模式図を示す。A-MFM像の像コントラストのシミュレーションによる解析により磁壁の最大移動位置は一方で暗く、他方で明るいことがわかった。この結果から磁壁は図の左右方向に移動していることがわかった。Fig.2 (a), (b)の紫色の点は磁壁が交流磁場を印加しても移動せずに拘束されており、磁壁のピンポイントと推察される。本手法はソフト磁性薄膜の磁壁を動的に観察するので、従来の静的観察と比較して、磁壁位置を少ない画素数で検出でき、その後倍率を上げて観察することが容易である。また、交流磁場による磁壁の移動距離を一度の観察で測定することができ、磁壁のピンポイントの評価も可能であることから、ソフト磁性薄膜の磁区構造や磁壁移動の評価に有用と考えている。講演では本手法の詳細について報告する。

参考文献 1) W. Lu, H. Saito et al., Appl. Phys. Lett., 96, 143104 (2010)

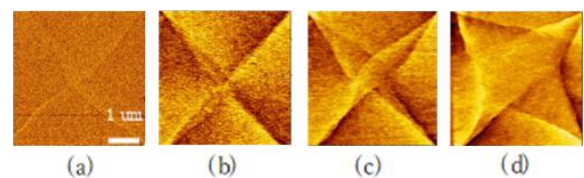


Fig.1 MFM image of permalloy patterned thin film (a) and A-MFM image (b)-(d) {(a) $H_{ac0} = 0$ Oe, (b) $H_{ac0} = 50$ Oe, (c) $H_{ac0} = 100$ Oe, (d) $H_{ac0} = 250$ Oe }.

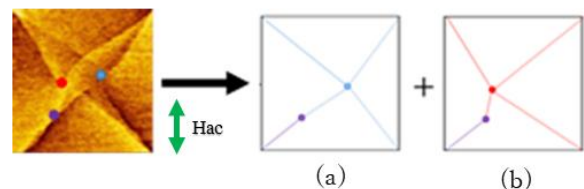


Fig.2 Schematic figure of domain wall movement. (a) Maximum movement position on the right side of the domain wall and (b) maximum movement position on the left side of the domain wall.

交番磁気力顕微鏡を用いた永久磁石の3次元磁場計測 — 探針伝達関数に基づいた計測磁場方向の変換 —

和田 真羽, Zhao Yue, 松村 透, 齊藤 準
秋田大学

Three-dimensional magnetic field measurement of permanent magnet by alternating magnetic force microscopy: Conversion of measuring magnetic field direction based on MFM tip transfer function

S. Wada, Y. Zhao, T. Matsumura, H. Saito
(Akita Univ.)

はじめに

我々は磁気力顕微鏡(MFM)において、非共振の磁気力が探針振動に誘起する周波数変調現象を利用して、試料面近傍の磁気力を高感度・高空間分解能で計測できる交番磁気力顕微鏡(A-MFM)を開発し、さらに超常磁性探針を用いることで計測磁場方向の精度の高い磁気イメージング手法を実現し、表面凹凸の大きな永久磁石においても試料ホルダーに垂直な磁場成分のみを計測することで、明瞭な磁区構造の観察に成功している。本研究ではこの高い計測磁場方向精度を活かして、探針伝達関数²⁾による計測磁場方向の変換処理を検討した結果、計測磁場方向を任意に設定することで3次元磁場解析が可能になったので報告する。

方法

MFMが検出する磁気力勾配信号は、 $\partial F_z / \partial z = m_x (\partial^2 H_x / \partial z^2) + m_y (\partial^2 H_y / \partial z^2) + m_z (\partial^2 H_z / \partial z^2)$ で表される。ここで (m_x, m_y, m_z) は直交座標系での探針磁化成分であり、 z 方向を試料面に垂直方向とする。本研究では、探針伝達関数を用いた計測磁場方向の変換用の測定データとして、Co-GdO_x超常磁性探針を用いたA-MFM観察により得た永久磁石試料の垂直磁場勾配信号 $\partial F_z / \partial z = m_z (\partial^2 H_z / \partial z^2)$ を用いた。計測磁場方向の変換は自作した信号処理プログラムを用いて行い、空間スペクトル上での空間周波数フィルター処理後、フーリエ逆変換により磁気像に戻すことで所望の計測磁場方向のA-MFM像を得た。

結果

図1に表面が平滑なNdFeB焼結磁石をA-MFM観察して得た探針磁化方向が試料面に垂直な m_z の場合の垂直磁場勾配像 $m_z (\partial^2 H_z / \partial z^2)$ [(a)] および信号変換により求めた探針磁化を試料面に平行方向の m_x および m_y とした場合の面内磁場勾配像 $m_x (\partial^2 H_x / \partial z^2)$ [(b)], $m_y (\partial^2 H_y / \partial z^2)$ [(c)]を示す。

図に見るように、計測磁場方向を変換した面内磁場像では探針磁化方向に垂直方向の磁場成分を検出できないので、概ね探針磁化方向に沿った像コントラストが得られていることがわかる。所望の計測磁場方向の像は、探針磁化 (m_x, m_y, m_z) が極座標系では

$(m_0 \sin \theta \cos \phi, m_0 \sin \theta \sin \phi, m_0 \cos \theta)$ で表されるので、 θ と ϕ を変化させて探針磁化成分の重み付けを変えることで得ることができる。さらに磁場勾配像の各画素で探針磁化方向を変化させて磁場勾配信号が最大となる方向を求めることで、磁場方向の可視化も可能になる。発表時にはこれらの詳細について述べる予定である。本研究で用いたNdFeB磁石は日立金属(株)様からご提供いただきました。

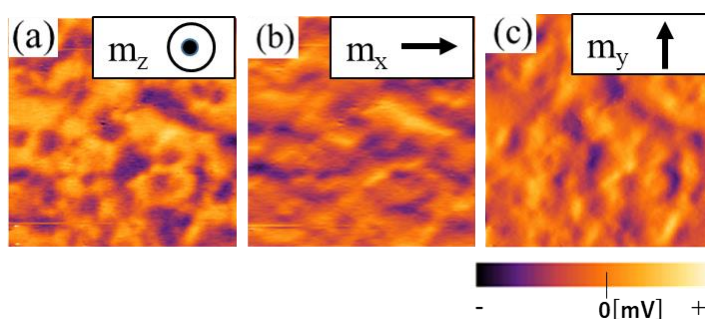


Fig.1 Measured $(\partial^2 H_z / \partial z^2)$ image [(a)], signal transformed $(\partial^2 H_x / \partial z^2)$ image [(b)] and signal transformed $(\partial^2 H_y / \partial z^2)$ image [(c)] of NdFeB sintered magnet.

参考文献

- 1) H. Saito et al., J. Magn. Magn. Mater., 191 (1999) 153
- 2) Y. Cao, H. Saito et al., J. Appl. Phys., 123 (2018) 224503

Co-GdO_x 超常磁性 MFM 探針の高周波磁場応答性の X バンド・導波管スロットアンテナを用いた評価

上村 拓, 園部 博, 松村 透, 伊藤 桂一, 齊藤 準
秋田大, 秋田高専

Evaluation of high frequency magnetic field response for Co-GdO_x superparamagnetic MFM tip by X-band waveguide slot antenna

T. Kamimura, H. Sonobe, T. Matsumura, K. Ito, H. Saito
(Akita Univ., National Institute of Technology, Akita College)

はじめに 磁気力顕微鏡(MFM)は様々な磁性材料・磁気デバイスの磁区観察に広く用いられており、近年、空間分解能や機能性の向上により計測対象が拡大している。我々は最近、磁気ヒステリシスがなく保磁力ゼロの Co-GdO_x系高磁化率・超常磁性探針を開発し、磁気記録ヘッドから発生する磁場の高分解能計測を実現している。本研究では、磁気力顕微鏡で高周波磁場計測が可能になれば更なる用途拡大がマイクロ波アシスト記録等で期待できると考え、高い強磁性共鳴周波数が予測される超常磁性探針について、高周波磁化率の評価を目的として X バンドの導波管スロットアンテナを用いてその高周波磁場応答性を検討した。

方法 自作した X バンドの導波管スロットアンテナを用いて、Co-GdO_x 超常磁性探針を含む種々の探針を MFM に装着して、振幅変調したマイクロ波を印加した。ここで超常磁性探針の磁化がマイクロ波磁場に追従する場合、マイクロ波磁場を H 、探針磁化を m^{ip} とし、超常磁性探針の磁化率を χ とすると、

$$H = H_0(1 + \alpha \cos(\omega_m t)) \cos(\omega_c t) = H_0 \cos(\omega_c t) + (\alpha H_0 / 2) \cos((\omega_c - \omega_m) t) + (\alpha H_0 / 2) \cos((\omega_c + \omega_m) t)$$

$$m^{ip} = \chi H_0(1 + \alpha \cos(\omega_m t)) \cos(\omega_c t) = \chi H_0 \cos(\omega_c t) + (\alpha \chi H_0 / 2) \cos((\omega_c - \omega_m) t) + (\alpha \chi H_0 / 2) \cos((\omega_c + \omega_m) t)$$

より、探針の磁気力 F_z^{ip} に、 $F_z^{ip} = \alpha \chi (\partial H_0^2 / \partial z) \cos(\omega_m t) + (\alpha^2 \chi / 2) (\partial H_0^2 / \partial z) \cos(2\omega_m t) + \dots$ で表される低周波の交番磁気力が発生する。この交番磁気力は探針振動の周波数変調現象を引き起こすので交番磁気力顕微鏡を用いることで画像化できる。本研究では探針振動の周波数変調を計測し探針の高周波磁場応答性を評価した。

結果 図 1 に、MFM 内の導波管スロットアンテナ上に設置した(a)ガラス基板、(b) Co-GdO_x 超常磁性薄膜(膜厚 100 nm)を、Co-GdO_x 超常磁性探針(膜厚 100 nm)を用いて走査したときの探針振動スペクトルの一例を示す。マイクロ波のキャリア周波数は 11 GHz、振幅変調周波数は 89 Hz、振幅変調率は 90%である。探針は共振周波数 ω_d 近傍で加振した。(a),(b)とも探針の加振スペクトル $S(\omega_d)$ の近傍に、矢印の周波数変調による 1 次側帯波スペクトル $S(\omega_d \pm \omega_m)$ が観察され、超常磁性薄膜を設置することで、 $S(\omega_d)$ と $S(\omega_d \pm \omega_m)$ の電力比 $S(\omega_d) / S(\omega_d \pm \omega_m)$ が基板の場合と比較して 3.8dB 増加した。側帯波は探針が導電性であればマイクロ波電場でも同様に発生するので、側帯波の起因を探るため、非磁性の Au 探針、ソフト磁性の FeCoB 非晶質探針を加えて測定した電力比 $S(\omega_d) / S(\omega_d \pm \omega_m)$ を表 1 に示す。表に見るように、ガラス基板と比較して超常磁性薄膜の場合に電力比が大きく増加するのは、超常磁性探針のみであることから、超常磁性薄膜がマイクロ波磁場により磁化することで薄膜から発生するマイクロ波磁場も合わせて超常磁性探針が検出しており、Co-GdO_x 超常磁性探針の比透磁率を電力比の増加率から見積もると 3 弱であった。講演では、マイクロ波周波数を変化させた結果も合わせて報告する予定である。

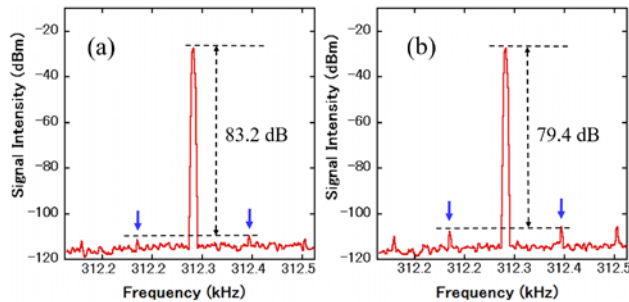


Fig.1 Oscillation spectrum of Co-GdO_x superparamagnetic tip on (a) glass substrate and (b) Co-GdO_x superparamagnetic film.

Table 1 Power ratio (dB) between the oscillation spectrum and the first side band spectra of frequency modulated tip oscillation on glass substrate and Co-GdO_x superparamagnetic film by various tips.

| Tip | Au tip | FeCoB tip | Co-GdO _x tip |
|--|--------|-----------|-------------------------|
| Sample | | | |
| Glass substrate(A) | 80.4 | 79.5 | 83.2 |
| Co-GdO _x Superpara magnetic film(B) | 80.3 | 84.9 | 79.4 |
| A-B | +0.1 | -5.5 | +3.8 |