

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

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

Magnetometer Based on Inductance Modulation in Coils Made of High-T_c Superconductor
Keiji Enpuku, Yujiro Yoshida, Shigeeya Yamashita, Masaaki Matsuo, Teruyoshi Sasayama, Takashi Yoshida
Kyushu Univ.

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充分に開発されていない。このため、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を開発している。[1] Fig. 1(a) 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($R_c=27 \mu\Omega$)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。この閉ループの時定数は $\tau=(L_p+L_m)/R_c$ で与えられるため、 $L_p+L_m=115 \mu\text{H}$ の場合には $\tau=4.26 \text{ s}$ となり 1 Hz 程度の低周波磁束を伝達できる。また、変調コイルを励起磁界の外に設置すれば励起磁界中での動作が可能となる。

変調コイルに伝達された磁束を電気信号に変換するため、コイルのインダクタンス L_m を時間的に変調する方式を用いた。この方式の原理は直交型基本波フラックスゲートと同様である。すなわち、変調コイル内に磁性ワイヤを挿入し、磁性ワイヤに変調電流 $I_m=I_{DC}+I_{AC}\sin(2\pi f_m t)$ を流すことにより、磁性ワイヤの透磁率を時間的に変化させる。この結果、変調コイルのインダクタンスが $L_m(t)$ と時間的に変調され、センサの端子 (P-Q) には $V_s = I_s \times (dL_m/dt)$ の出力電圧が得られる。

検出コイルと変調コイルは高温超伝導テープ線材 (SuperPower 社 SF2050) を用いて作製した。検出コイルのパラメータは平均直径 $D_p=25 \text{ mm}$ 、巻数 $N_p=50$ 、 $L_p=65 \mu\text{H}$ である。また、変調コイルのパラメータは $D_m=20 \text{ mm}$ 、 $N_m=60$ 、 $L_m=50 \mu\text{H}$ である。コイルは液体窒素を用いて冷却して超伝導状態とした。磁性ワイヤは幅 $500 \mu\text{m}$ 、厚さ $35 \mu\text{m}$ の物 (愛知製鋼: 120FC20) を用いた。磁性ワイヤには $I_{DC}=70 \text{ mA}$ 、 $I_{AC}=35 \text{ mA}$ 、 $f_m=400 \text{ kHz}$ の変調電流 I_m を流してインダクタンス L_m を時間的に変調した。この時の磁気センサの電圧感度 (電圧/磁界変換係数) は $K_{VB}=885 \text{ V/T}$ となった。

Fig. 1(b)にセンサの磁界雑音スペクトルを示す。センサの電圧雑音スペクトル $\sqrt{S_V}$ の測定値と電圧感度 K_{VB} を用いて計算した結果($\sqrt{S_B}=\sqrt{S_V}/K_{VB}$)であり、磁界雑音 $\sqrt{S_B}$ は 20 Hz 以上の周波数帯ではほぼ白色雑音となり、 $1.3 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ となった。20 Hz 以下の低周波数帯では磁界雑音は周波数の低下とともに増加する $1/f$ 雑音となり、1 Hz では $5.6 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ となった。

参考文献

1. K. Enpuku et al, Appl. Phys. Express 10, 113101 (2017).

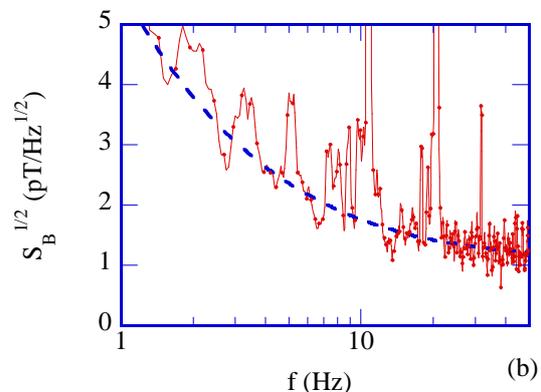
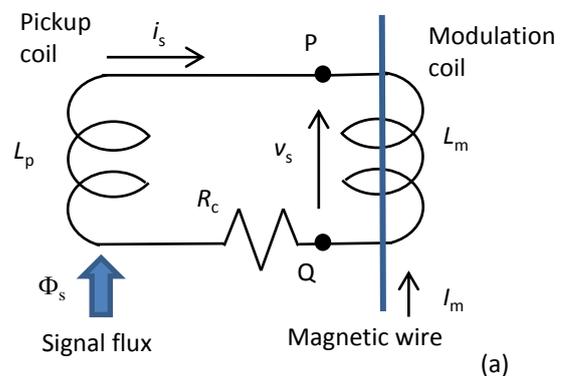


Fig.1. (a) Equivalent circuit of the magnetometer.
(b) Noise spectrum of the magnetometer

Investigation of serial magnetic tunnel junction sensors for high signal-to-noise ratio in eddy current testing

Zhenhu Jin, Muhamad Arif Ihsan, Mikihiko Oogane, Kosuke Fujiwara and Yasuo Ando
Department of Applied Physics, Tohoku University, Sendai, Miyagi, Japan

In recent years, magnetic tunnel junctions (MTJs) based on MgO barrier have been attracted considerable interest due to high tunnel magneto-resistance (TMR). An earlier study reported that TMR sensor based on MTJ can detect small field change, which indicated these devices can be used in eddy current nondestructive testing (ECT) field [1]. However, it is still required to develop a sensor for detection of different defects. Considering that adding serial MTJ number in the sensor can improve sensitivity [2], an optimized serial TMR sensor can provide a high signal-to-noise ratio (SNR) during ECT. Therefore, for achieving high SNR, we fabricated sensor with 4, 16, 28, and 40 serial MTJs in 1, 4, 7, and 10 rows, respectively. Furthermore, we investigated their detectivity and analyzed their output signals to determine the maximum SNR for detection of different defects in ECT.

The magnetic film structure of MTJ was $\text{SiO}_2\text{-sub.}/\text{Ta}(5)/\text{Ru}(10)/\text{Ta}(5)/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(70)/\text{Ru}(0.9)/\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}(3)/\text{MgO}(2)/\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}(3)/\text{Ru}(0.9)/\text{Co}_{75}\text{Fe}_{25}(5)/\text{Ir}_{22}\text{Mn}_{78}(10)/\text{Ta}(8)$ (in nm). These series of 4, 16, 28, and 40 MTJs with $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ top pinned layers and $15 \times 60 \mu\text{m}^2$ bottom free layers were fabricated with photolithography and ion milling processes. After fabrication, for achieving excellent R-H curve, the fabricated MTJs were annealed twice in a vacuum chamber using different directions and temperatures [3]. Furthermore, automatic ECT system was composed of an excitation unit with a function generator which delivers excited signal and sensing probe with the prepared MTJ device. The surface and back-side pits with various regimes in aluminum and copper specimens were inspected by using ECT probe with TMR sensors.

Figure 1 showed the dependence of detectivity of the sensor on serial MTJ number N . It is indicated that the TMR sensor with a large MTJ number can offer small detectivity. However, since the inhomogeneous secondary field induced from eddy currents in the specimen, the disturbance of field strongly affected by the distance between individual MTJ and test specimen during defect detection. As shown in Figure 2, the ECT result when different sensors were used to detect a surface crack, the noise amplitude increases with the number of serial MTJs, which indicates the dependence of noise on their number. On the other hand, due to the distribution of secondary field, the crack signal reached a saturation for $N=28$, and highest SNR can be obtained. Although the inner defects of the copper specimen were inspected, the probe with TMR sensor ($N=28$) offered considerable high SNR. This study suggested that the optimized TMR sensors can play an important role in achieving high SNRs during ECT.

Reference

- 1) J. Lenz and A. S. Edelstein, IEEE Sens. J. **6**, 631 (2006).
- 2) R. Guerrero, M. Pannetier-Lecoer, C. Fermon, S. Cardoso, R. Ferreira, and P. P. Freitas, J. Appl. Phys. **105**, 113922 (2009).
- 3) K. Fujiwara, M. Oogane, F. Kou, D. Watanabe, H. Naganuma, and Y. Ando, Jpn. J. Appl. Phys. **50**, 013001 (2011).

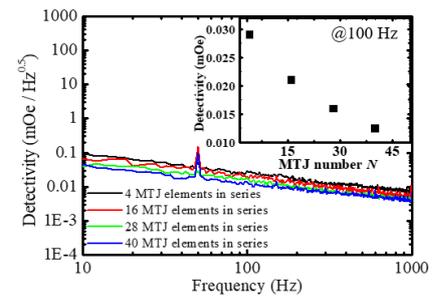


Fig.1 Detectivity for different sensors at different frequencies. Inset: dependence of detectivities on serial MTJ number N at excitation frequency of 100 Hz.

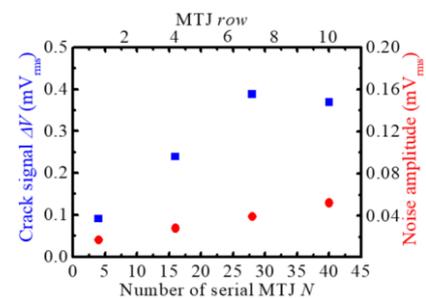


Fig.2 The relationship between amplitude of the crack-free signal and noise during surface inspection with different sensors.

CPW 伝送線路型磁気センサモジュール

早坂淳一, 菅原和幸, 植竹宏明, 藪上 信*, 荒井賢一
(電磁材料研究所, *東北大学)

CPW transmission line type magnetic sensor module

J. Hayasaka, K. Sugawara, H. Uetake, S. Yabukami*, K. I. Arai,
(Research Institute for Electromagnetic Materials, *Tohoku University)

1. はじめに

リチウムイオン二次電池等の高品位な品質検査を目的として、高感度、且つ低ノイズな CPW (Coplanar Waveguide) 伝送線路型磁気センサモジュールを開発した。

2. 実験方法

磁界センサ素子には、心磁図等の生体情報検出素子として期待されている CPW 伝送線路型磁気センサ¹⁾を使用した。線路長, 信号線幅, 信号線-グラウンド間隔は, 各々 $2,000\ \mu\text{m}$, $300\ \mu\text{m}$, $50\ \mu\text{m}$ である。材質は, Cr/Cu/Cr/Au (厚み $0.1/3.0/0.1/0.3\ \mu\text{m}$) である。下層部には, 感磁膜としての CoNbZr アモルファス膜 (厚さ $5\ \mu\text{m}$) を配した。CoNbZr 膜と CPW 線路の絶縁膜には, SrTiO₃ (STO, $3\ \mu\text{m}$) を用いた。素子単体の共振周波数は, $1,600\text{MHz}$ であったが, 実装時の寄生容量により 500MHz 帯に低下した。

信号処理基板としては, 4層 FR-4 多層 PCB 板 (外形寸法 $150\text{mm} \times 100\text{mm}$) 上に, RF 増幅回路, 周波数変換回路, PSD 回路, フィルタ回路等を搭載した信号処理ボード (周波数帯 $500 \pm 50\text{MHz}$) を製作した。キャリアの発生源には, Agilent N9310A を使用した。

最後に, ヘルムホルツコイルを利用し, 製作したセンサモジュールの基本性能を評価した。また, 磁気感度が最大になるように, 同コイルにより 0.5mT の直流磁気バイアスを付与した。

3. 実験結果

Fig. 1 は, 製作した CPW 伝送線路型磁気センサモジュールの磁気感度特性 (交流励磁 100Hz , キャリア周波数 500MHz) である。磁界強度 100nT 付近の線形領域において, 磁気感度は, 0.3mV/nT (Ich_0deg.) であった。また, 磁気シールドが施されていない一般実験室における検出限界は, 約 5nT であった。ノイズは, 主として, 都市雑音のような外的要因によるものである。

Fig. 2 は, 出力信号, および位相の高周波キャリ

ア周波数依存性である。キャリア周波数 500MHz 付近で最大値を示し, 出力値は 0.20V (Ich), 0.38V (Qch) (磁場強度 $1\ \mu\text{T}$) であった。また, 位相は, Ich, Qch とともに約 -20° であった。素子と信号処理ボード間の接続ケーブルによる影響と考えられる。

今後は, センサ素子, および信号処理回路の最適化による更なる高感度化, および外乱の影響低減と多チャンネル化が課題として挙げられる。

参考文献

- 1) 藪上, 他 第 41 回日本磁気学会学術講演概要集 21aD-2 (2017)

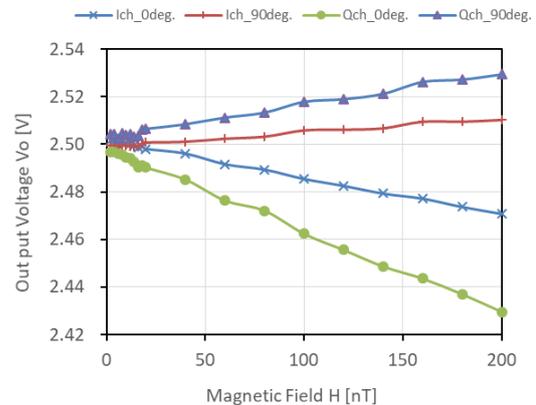


Fig. 1 Magnetic field characteristic

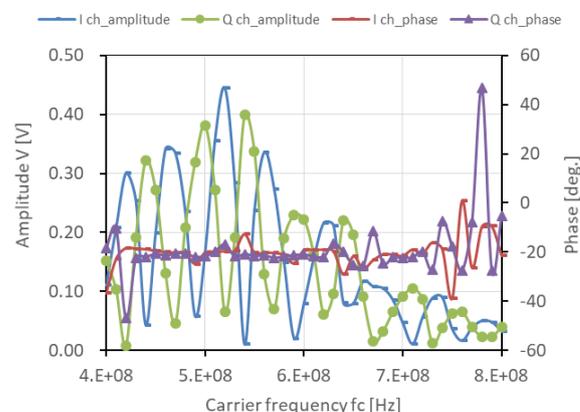


Fig. 2 Carrier frequency dependence of V and phase.

Faraday効果利用型光プローブ電流センサ用磁気ヨーク形状の検討

山崎 健太, 藤城 佑太, 塩田 健太, 岩見 晃希, 曾根原 誠, 佐藤 敏郎
(信州大学)

Study on shape of magnetic-yoke for Faraday-effect optical probe current sensor

K. Yamazaki, Y. Fujishiro, K. Shiota, K. Iwami, M. Sonehara, T. Sato
(Shinshu University)

はじめに

電流センサは、パワーエレクトロニクスにおいて「制御」「監視」「管理」の役割を果たしており、高性能化が求められている。筆者らは、既に小型で電磁ノイズに強く高周波数帯域でも測定可能な電流センサの実現を目指し、強磁性薄膜の 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⁾。また本電流センサの感度増大のためセンサヘッドに磁性微粒子複合材料 (透磁率 $\mu_r' = 20$)²⁾を用いた磁気ヨークを提案した。本稿では、その磁気ヨークの形状を検討し、結果について述べる。

解析方法

Fig. 1 に示すように、磁気ヨークに光ファイバを通過させるための溝を作り、磁性膜をサンドイッチするように、二つの磁気ヨークを対向して配置し、磁性膜に印加される磁界をエンハンスする構成とした。電磁界解析ソフト JMAG を用いて磁気ヨークの下底 a および磁気ヨーク間のギャップ長 L_g を変化させた場合での磁性膜に印加される磁界 H を解析した。なお、解析では磁気ヨークに光の進行方向と同方向に 8.0 kA/m の磁界を印加させた。

解析結果

Fig. 2 に磁気ヨークの下底 a を変化させた場合の磁性膜に印加される磁界 H の関係を示す。同図より、 a が長くなるに伴い磁気ヨークによりエンハンスされる H は約 6 倍まで高められるが、やがて飽和する傾向が示された。これは、 a を長くすることでヨークの面積が増加し、磁極も増加するため、 H が大きくなるがヨークによって集磁できる磁束には上限があるため H が飽和すると考えられる。したがって、磁気ヨークを台形形状にすることにより、磁性膜に加わる H を高められるが、 $a > 5.0 \text{ [mm]}$ は大きな効果が無いことが分かり、また小型化の観点からも $a = 5.0 \text{ [mm]}$ が妥当である。

Fig. 3 (a) に台形磁気ヨークにおけるギャップ長 L_g に対する磁性膜に印加される磁界 H の関係を示す。同図より、 $L_g \approx 0.225 \text{ [mm]}$ で H が極大値を取ることが分かった。Fig. 3 (b) に磁性膜を装荷する磁気ヨーク間付近の磁束密度ベクトルをプロットしたものを示すが、センサ感度の増大に寄与するのは同図で赤丸の箇所、 $L_g \approx 0.225 \text{ [mm]}$ の場合に磁束密度が最も高く、本解析条件では最適であることが分かった。

発表当日は、詳細な解析結果と、試作したヨークの測定結果も述べる。

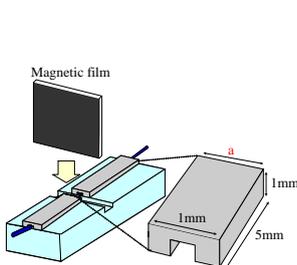


Fig.1 Model of sensor head with yoke.

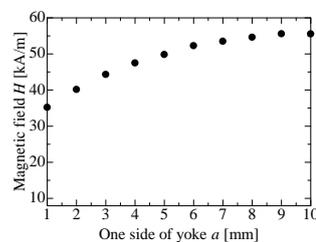
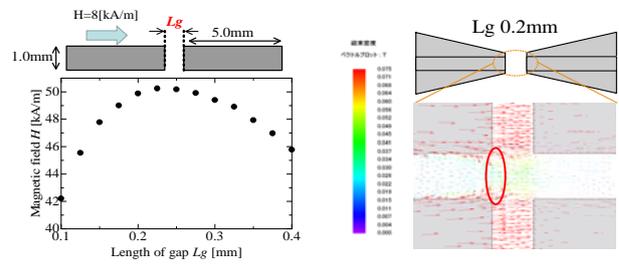


Fig.2 Analysis result in H vs. a



(a) H vs. L_g (b) Magnetic flux density
Fig.3 Analysis results of trapezoidal shape yoke.

参考文献

- 1) M. Miyamoto, et al.: *INTERMAG 2018*, CW-14 (2018).
- 2) N. Yabu, et al.: *The Papers of Tech. Meeting on "Magn."*, IEEJ, MAG-17-156 (2017).

FeCo-MgF ナノグラニューラー薄膜を用いた光磁界センサ

大場裕行、小林伸聖、池田賢司、荒井賢一
(電磁研)

Optical magnetic field sensors using FeCo-MgF nanogranular films

H.Ohba, N.Kobayashi, K.Ikeda, K.I.Arai

(Research Institute for Electromagnetic Materials, DENJIKEN)

はじめに

ナノメートルサイズの強磁性金属粒子が、フッ化物などの絶縁体マトリックスに分散した構造を持つナノグラニューラー薄膜は、光透過性を有すると共に、大きな磁気光学効果（ファラデー効果）を示す¹⁾。またこれらナノグラニューラー薄膜は、超常磁性を有するので、ヒステリシスを持たない磁化特性を示す。本稿では、上述の特徴を有するナノグラニューラー薄膜を、光磁界センサに応用する際に最適な FeCo 組成を求めるため、光吸収係数当たりのベルデ定数を性能指数として評価し、ナノグラニューラー薄膜の FeCo 組成との関係について調べた結果を報告する。

実験方法

ナノグラニューラー薄膜は、厚さ 0.5mm のガラス基板の上に、RF スパッタ装置を用いたタンデム法で作製した。Fig.1 に、光磁界センサの構成を示す。光源には波長 1.55 μm の LD（レーザダイオード）を用いた。光源からのレーザ光は、偏光子によって偏光方向を規定し、ビームスプリッターを経由してナノグラニューラー薄膜に入射する、その後全反射ミラーにて反射され、偏光ビームスプリッターにて互いに直交する 2 つの偏光成分に分離され、それぞれ PD（フォトダイオード）で電気信号に変換される。ファラデー回転角の測定は、試料をヘルムホルツコイル中に置き、直流磁界を加えて行った。

実験結果

Fig.2 は、FeCo 組成が 20mol% 試料のファラデー回転角の外部磁界依存性を示す。外部磁界に対して直線的なファラデー回転角の変化が得られている。ベルデ定数は $1.6 \times 10^{-4} \text{deg}/\mu\text{mOe}$ 、光吸収係数 β は $0.53 \mu\text{m}^{-1}$ である。

Fig.3 に FeCo 組成が 14mol% から 54mol% までの試料の性能指数を示す。性能指数は FeCo 組成が 20mol% で最大値 $3.1 \times 10^{-4} \text{deg}/\text{Oe}$ が得られた。FeCo 組成が 20mol% 以下の試料では、超常磁性を有するので、ファラデー回転角の外部磁界依存性にヒステリシスは見られない。

参考文献

- 1) N.Kobayashi, K.Ikeda, BoGu, S.Takahashi, H.Masumoto, S.Maekawa, Scientific Reports, 8, 4978 (2018)

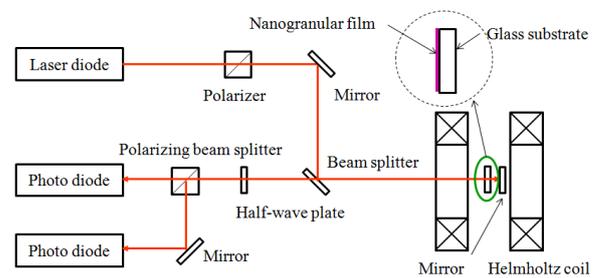


Fig.1 Schematic of the optical magnetic field sensors

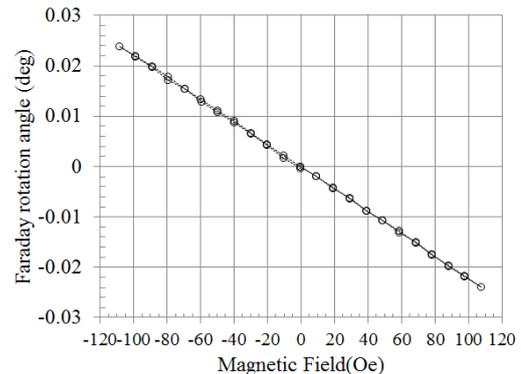


Fig.2 Measured Faraday rotation angle of the $\text{Fe}_{11}\text{Co}_9\text{Mg}_{29}\text{F}_{51}$ nanogranular film under the static magnetic field perpendicular to the film surface

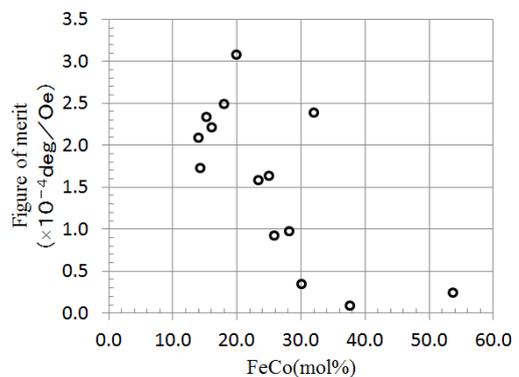


Fig.3. Figure of merit vs. FeCo concentration of the FeCo-MgF nanogranular films

基本波型FGへの適用性から見たアモルファス磁性リボンの評価

笹田一郎

(笹田磁気計測研究所)

Evaluation method of amorphous magnetic ribbons for the FM-OFG magnetometer

Ichiro Sasada

(Sasada Magnetic Instruments Laboratory)

はじめに 基本波型直交フラックスゲート(FM-OFG)は、筆者が2001年の本学会学術講演会で初めて報告したが⁽¹⁾、その後大きく進歩し、36チャンネルで心磁界計測ができるようになった⁽²⁾。ところで、センサのコアに新たな磁性体を用いようとする場合、FM-OFGに適しているかどうか事前に評価できる方法が望ましい。本稿ではセンサヘッドを試作しそのオフセット対直流バイアス電流の関係から適否のみならず動作条件の決定も可能となる1つの方法を示す。また、新たに探索したアモルファス磁性薄帯によって製作したセンサの雑音特性を報告する。

方法 細長いアモルファス磁性リボンを1本、あるいは中央で折り曲げてVの字型にしたものをコアとし、数百ターン～1千ターンの中空ソレノイドコイル型ピックアップコイルを用いてセンサヘッドを試作する。このセンサヘッドを磁気シールド内に置き、コアには交流電流 i_{ac} に直流バイアス電流 i_{dc} を重畳した励磁電流を通電する。このとき発生する誘起電圧の大きさから、コア内に存在する磁気異性のリボン幅方向からの傾きの程度を知ることができる。また、 i_{dc} に対する誘起電圧振幅の変化から、磁気異方性の大きさに関する情報を得ることができる。

結果 広幅Metglas2714Aリボンから幅1 mmにスリットしたもの(熱処理無し)と、これと異なるアモルファスリボンの幅1 mmスリット材に熱処理を施したサンプルについて計測した例をそれぞれFig. 1 (a)および(b)に示す。Fig. 1(a)では $i_{ac}=19.4$ mAとし、同(b)では同17.7 mAとしている。周波数は前者で20 kHz、後者で100 kHzである。両者間で条件が同じでないため、電圧の比較はあまり意味が無いが形に着目する。中央左右2つの縦の破線は $i_{ac}=|i_{dc}|$ の点を示す。Fig. 1(a)の ± 0.1 Aの内側では跳躍的磁化変化のためにノコギリのようになっており、実際この範囲の i_{dc} ではセンサの雑音が大きいの一方(b)では跳躍的磁化回転は i_{dc} の小さい範囲でのみ生じている。また、オフセットは速やかに小さくなることから磁気異方性は小さい。

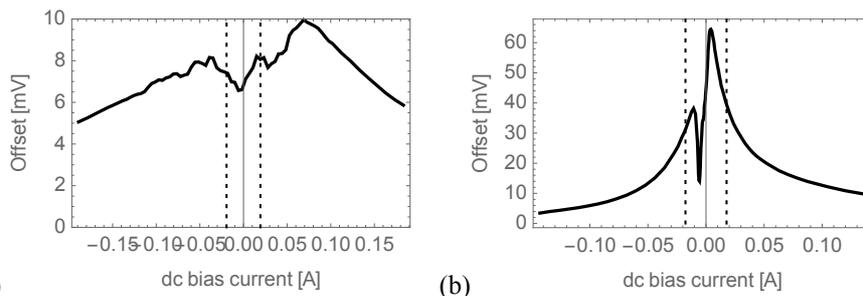


Fig. 1 Offset vs. dc bias current. (a) as slit Metglass 2714A, (b) annealed Co-based amorphous sample.

紙面の都合でセンサの雑音スペクトル密度の結果の図は省くが、Fig. 1(a)のサンプルでは $i_{dc} \approx 0.2$ Aとすることで、1 Hzで5 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 以下、10 Hzで2 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 以下となる結果が得られている⁽³⁾。(b)については、 $i_{dc}=35$ mAで、1 Hzで5 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、10 Hzで2 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ と大幅に小さな励磁電流で優れた結果を得た。

参考文献

- 1) 笹田一郎, 基本波型直交フラックスゲート, 日本応用磁気学会学術講演会, 26pD-3, 2001
- 2) 加呂光他, 36チャンネルフラックスゲートセンサを用いた心磁界計測, 電気学会論文誌E Vol. 136 No. 6 pp. 224-228 (2016)
- 3) Ichiro Sasada, Low noise fundamental mode orthogonal fluxgate (FM-OFG) magnetometer built with an amorphous ribbon core, IEEE Trans Magn, 掲載予定, DOI 10.1109/TMAG.2018.2840500