

FeSiB フリー層を有する GMR 素子を用いた歪みセンサ

山本直樹, 加藤剛志, 岩田 聡

(名古屋大学)

Magnetic strain sensor having FeSiB free layer using GMR element

N.Yamamoto, T.Kato, and S.Iwata

(Nagoya University)

はじめに

巨大磁気抵抗効果(GMR)を利用した磁気センサは、磁化自由層と磁化固定層の相対角度が外部磁界に対して変化したときの磁気抵抗変化を検出する。一方、磁性材料には、歪みを加えると磁気異方性が変化する磁歪の逆効果が存在し、歪みによる磁化自由層の磁気異方性の変化を磁化固定層との角度変化に結びつけることができれば歪みを検出することができる。本研究では、歪みによる磁化自由層の磁気異方性の変化を検出する GMR センサの開発を行った。

実験方法

超高真空スパッタ装置により直流磁界中で、GMR 多層膜 (Ta(5nm)/FeSiB(10nm)/CoFeB(1nm)/Cu(2.2nm)/CoFe(3nm)/MnIr(10nm)/Ta(2nm)) を成膜した。基板には、湾曲可能な厚さの異なる 3 種類のガラス(70 μm , 100 μm , 150 μm) を用いた。成膜した試料を両端に電極を配置した幅 100 μm 、長さ 1200 μm の細線状の構造にフォトリソグラフィにより加工した。素子の磁化容易軸が細線の幅方向となるよう加工し、歪みの検出には、以下の手法を用いた。GMR 素子細線を形成したガラスを Fig.1 に示すように片持ち梁構造となるように固定し、自由端に力を加えることで GMR 細線に歪み ϵ を与えた。Fig.1 の方向に印加した応力を正とした。GMR 素子をブリッジ回路に組み込んだ状態で GMR 素子の困難軸方向に 5~50Oe のバイアス磁界 H_{bias} を加えることで、磁化自由層の磁化を固定層に対して Fig.2 のように回転させた。GMR 細線に直流電流を流した状態において、歪みを印加することで自由層の磁気異方性が変化すると、GMR 素子の抵抗値が変化してブリッジ回路のバランスが崩れて電圧が生じる。生じた電圧を計装アンプ 300 倍に増幅した信号を出力電圧 V_{out} とした。

実験結果

Fig.3 は ϵ に対する出力電圧 V_{out} をプロットしたものである。FeSiB 層は負の磁歪定数を持つため、正の歪みを加えた場合には、磁気異方性が減少し、負の歪みを加えた場合には、磁気異方性が増加する。正負の歪み双方に対して H_{bias} が 20 Oe の場合には出力電圧がほぼ線形に変化していることがわかる。このことから、 H_{bias} が 20 Oe の場合に自由層の磁化の向きは容易軸方向に対して約 45 度の傾きであると考えられる。 H_{bias} が 20 Oe の場合に、歪み $\epsilon = \pm 1.2 \times 10^{-4}$ を GMR 細線に加えたとき、 $V_{out} = \pm 400\text{mv}$ 程度の出力電圧が得られた。

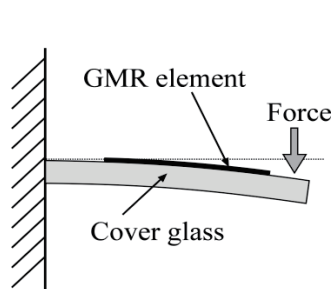


Fig.1 Schematic drawing of the experimental setup.

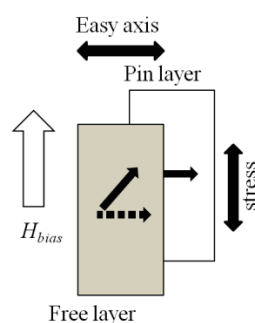


Fig.2 Top view of the GMR element showing directions of the easy axis, H_{bias} , magnetization of pin and free layer and stress.

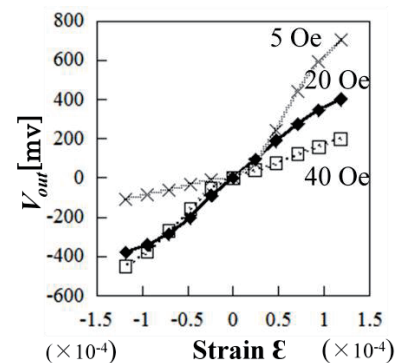


Fig.3 Output signal as the function of the strain. Cross, diamond and square symbol shows 5Oe, 20Oe, 40Oe dates, respectively.

参考文献

1)K.Ishiyama et al. , IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 46, NO. 2, FEBRUARY(2010)

ミアンダコプレーナ線路構造の薄膜磁界センサ素子

植竹宏明, 川上敏弥, 森谷健太, 藪上 信, 小澤哲也
(東北学院大学)

Development of meandering coplanar line type thin film magnetic field sensor

H. Uetake, T. Kawakami, K. Moriya, S. Yabukami, T. Ozawa
(Tohoku Gakuin University)

1. はじめに ミアンダ状コプレーナ線路とアモルファス CoNbZr 薄膜を組み合わせた伝送線路型薄膜磁界センサを試作し, 高感度化をはかった。

2. 実験方法 Fig. 1は試作したセンサ素子の写真を示したものである。センサ素子は, Cu 薄膜によるミアンダ型コプレーナ線路, SrTiO 薄膜, アモルファス CoNbZr 薄膜から構成される。磁界を検出する CoNbZr 薄膜の寸法は $1\text{ mm} \times 0.95\text{ mm}$ とし, 3本のコプレーナ線路をミアンダ状に配置した。センサ素子はガラス基板上にリフトオフプロセスにより積層した。CoNbZr 膜 ($1\text{ }\mu\text{m}$ 厚) は, RF スパッタを用いて 5 mTorr , 200 W で成膜した。CoNbZr 薄膜の一軸磁気異方性は回転磁界中 $300\text{ }^\circ\text{C}$, 2時間, 静磁界中 $200\text{ }^\circ\text{C}$, 1時間でコプレーナ線路の幅方向へ付与した。SrTiO 薄膜 ($0.5\text{ }\mu\text{m}$ 厚) は RF スパッタ装置を用いて 20 mTorr , 200 W , ヒータ部は $160\text{ }^\circ\text{C}$ に加熱して成膜した。ミアンダ型コプレーナ線路は RF スパッタ装置を用いて, 20 mTorr , 200 W で Cr を $0.1\text{ }\mu\text{m}$, Cu を $2\text{ }\mu\text{m}$ 成膜した。ミアンダ線路の導体幅は $110\text{ }\mu\text{m}$, 導体間隔は $20\text{ }\mu\text{m}$ とした。導体本数は3本とした。Cr 薄膜は SrTiO 薄膜と Cu 薄膜の密着性を高めるために成膜した。センサ素子は市販のウエハプローブ (GSG-40-150) により, 磁界を静的に変化させながら, ネットワークアナライザ (8722ES) による透過法測定 (S_{21} 評価) を行い, 周波数および磁界に対するキャリアの位相変化および振幅を評価した。

3. 実験結果 Fig. 2は静的な磁界変化に対するキャリアの位相変化を示したものである。3.15 GHz 付近で位相は急峻に変化し, 磁界に対する傾きは約 311 degree/Oe となった。心磁界計測等²⁾への応用の目安となる $\text{Gain} > -40\text{ dB}$ も満たした。

参考文献 1) H. Uetake, S. Yabukami, T. Ozawa, N. Kobayashi, and K. I. Arai, “Highly sensitive thin film sensor using coplanar line”, *Journal of the Magnetics Society of Japan*, vol. 38, no. 2-2, pp. 83-86 (2014). 2) S. Yabukami, K. Kato, T. Ozawa, N. Kobayashi, K. I. Arai, “A coplanar line thin film sensor and measurement of MCG without magnetic shielding”, *Journal of the Magnetics Society of Japan*, vol. 38, no. 2-1, pp. 25-28 (2014).

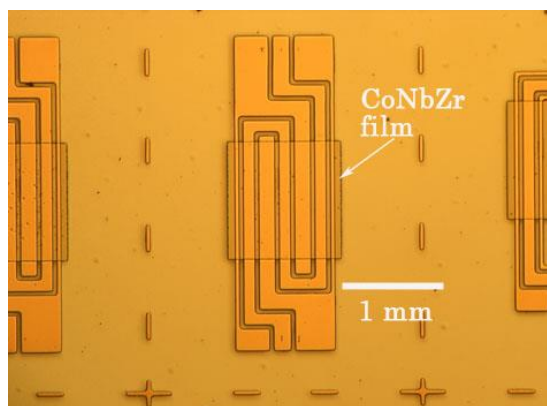


Fig. 1 Fabricated thin film sensor.

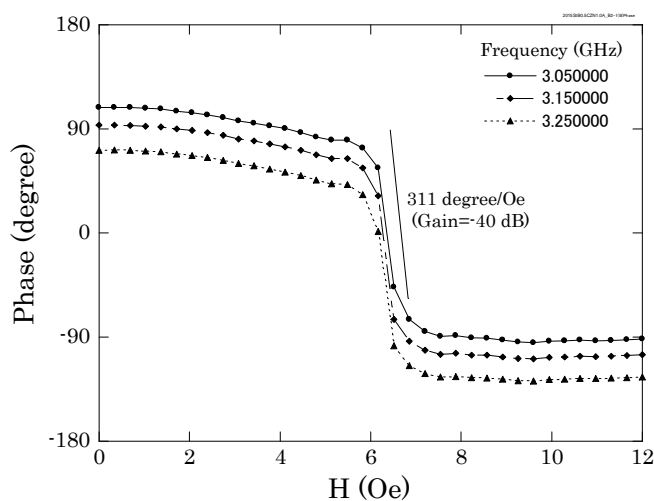


Fig. 2 Phase change.

誘導磁気異方性の付与によるアモルファス磁性ワイヤ直交フラックスゲートの温度ドリフト抑制

加呂光, 長谷友視, 笹田一郎
(九州大学)

Temperature drift suppression of amorphous magnetic wire orthogonal fluxgate
by imparting induced magnetic anisotropy

H. Karo, T. Nagatani, and I. Sasada
(Kyushu University.)

1 はじめに

基本波型直交フラックスゲート (FM-OFG)⁽¹⁾ は、励磁振幅より大きな直流電流の恩恵によりバルクハウゼン雑音が低減され、 $3\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$ 以下のノイズレベルを達成できる⁽²⁾ が、出力のオフセットや、温度ドリフトが大きい問題がある。通電磁場中熱処理によって磁性コアとして用いるアモルファスワイヤに、円周方向の磁気異方性を誘導することでオフセットの抑制および、低雑音化した報告がある⁽³⁾。本研究では、この通電磁場中熱処理法を簡略化した方法でアモルファスワイヤを熱処理し、温度ドリフト抑制効果を調査した。

2 オフセット抑制方法と温度ドリフト測定結果

Fig.1 はアモルファス磁性ワイヤに内在する磁化 J_s の回転磁化モデルを表す。アモルファス磁性ワイヤに直接通電励磁電流によって励磁磁界 H を与える。ワイヤ内の磁気異方性 K_u を一軸性と仮定する。 J_s は、 K_u 、測定したい外部磁界 H_{ex} 、交流磁界とそれより大きな直流バイアス磁界からなる H の作用を受け、常にこれらのエネルギーを最小とする様な方向を向く。Fig.1(a) の様に K_u の円周方向からの角度が大きい時、 $H_{ex} = 0$ でも J_s は励磁磁界 H の交流成分によって振動し、大きな誘起電圧が生じる。Fig.1(b) の様に K_u の円周方向からの角度が小さい時、 J_s はわずかにしか振動しないため小さな誘起電圧となる。誘起電圧は同期検波されたセンサの出力となるので、(b) の方が低オフセットなセンサとなる。磁界中熱処理により K_u を円周方向へ誘導することができればオフセットが低減可能である。

温度ドリフト測定に用いた試料は、Co 基アモルファスワイヤ (長さ 10 cm, 直径 $120\mu\text{m}$) であり、検出コイル (長さ 4.5 cm, 640 turn) を巻きつけた耐熱性セラミックチューブに U 字状に曲げ挿入した。同一試料で温度ドリフトを測定するため、室温から 80C° の範囲では、ワイヤを 40 mA 直流と 9 mA_{rms} 交流の電流を重畳したものを直接通電し、検出コイルに現れた誘起電圧の交流実効値をセンサ出力の目安として評価をおこなった。次に、 200C° で、200 mA 直流を通電し、円周磁界方向を容易軸とするよう K_u を誘導する。この時ワイヤ長手方向に磁場がかからないよう、磁気シールドによって地磁気を遮断した。また、3 mA 程度の交流電流により検出コイルに現れる誘起電圧を観測し、これが最小となるように同検出コイルへ手動調節で電流を流すことでキャンセル磁界を発生させている。熱処理後は、室温まで温度が下がったセンサを再度最初の励磁条件で加熱および、室温に戻るまでの温度ドリフトを評価した。

温度ドリフト測定結果を Fig.2 に示す。それぞれの測定結果からは室温時のオフセットを引いている。 30C° から 50C° の区間で温度ドリフト抑制比 13 が得られた。また、熱処理後のワイヤの再度の加熱実験の結果では、温度ドリフトする振幅に再現性もみられた。今後は、熱処理温度、処理時間、通電電流強度等について最適な条件を探し、さらなる温度ドリフト低減を目指す。

References

- 1) I. Sasada: *Journal of Applied Physics*, VOL. 91, NO. 10, (2002)
- 2) E. Paperno: *Sensors and Actuators*, A 116, (2004)
- 3) M. Butta et al: *Sensor Letters*, VOL 12, NO. 8, (2015)

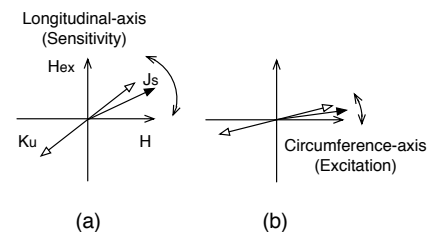


Fig. 1 Rotation magnetization model

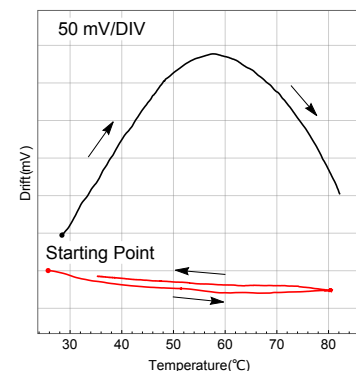


Fig. 2 Comparison of temperature drift between an as-received wire and an annealed wire. The drifts were measured by subtracting offsets measured at room-temperature. The as-received wire had 520 mV and, the annealed wire had 169 mV offset.

Reduction of fluxgate gradiometer susceptibility to uniform magnetic fields using permalloy shielding disk

Ahmed Lotfy Elrefai, Ichiro Sasada

Applied Science for Electronics and Materials, Kyushu University, Kasuga 816-8580, Japan,

A new method for constructing fluxgate gradiometer has been previously introduced¹. The developed gradiometer uses a pair of fluxgate sensor heads connected in counter series in order to detect the difference in magnetic field. The sensor heads are operated in the fundamental mode orthogonal fluxgate (FM-OFG) mechanism which provides very low noise measurement capability. The developed gradiometer has been proven to be efficient in detection of tiny magnetic particle contaminations down to the size of $50 \mu\text{m}^2$. The parasitic susceptibility of the FM-OFG gradiometer to the uniform magnetic field is, however, in need of reduction when the gradiometer is used in magnetically noisy environments. In this work, in order to reduce the parasitic susceptibility of the gradiometer to the uniform magnetic field, the efficiency of a small permalloy disk plate placed underneath the gradiometer sensor heads is investigated. The efficiency of the method is estimated numerically and confirmed experimentally.

Figure 1 shows an illustration of the sensor configuration with the shielding disk. The two heads of the FM-OFG gradiometer are configured parallel to each other with a baseline separation distance between the centers of the two heads. The sensor heads are centered above the shielding disk with a separation distance of 5 mm. Experiments were conducted using two permalloy disks of thickness 1 mm having diameters of 10 cm and 12 cm. To evaluate the shielding disk effectiveness; a quasi-static uniform field is applied parallel to the sensor heads axis. It is noted that, the effect of adding the shielding disk to the sensor on the amplitude of the sensor output signal has been evaluated and found to be of minor relevance (less than 10 % reduction). The recorded experimental results are shown in Fig. 2, for the measured gradiometer susceptibility to uniform field vs. the separation baseline between the sensor heads. From the graph, we can see the gradiometer uniform field susceptibility with the shielding disk is reduced to around a fifth of its value for the individual sensor. The shielding performance is improved as the baseline separation is reduced, where the sensor heads grow closer to the center of the shielding disk.

The proposed sensor configuration achieved a significant reduction to the FM-OFG gradiometer susceptibility to uniform fields. The improved configuration has several prospective applications to be used in, such as; magnetic contaminant detection in lithium ion battery manufacturing, and magnetic nanoparticles detection for biomedical applications.

References

¹ I. Sasada and S. Harada, "Fundamental mode orthogonal fluxgate gradiometer," IEEE Trans. On Magn., Vol. 50, 4007404 (2014).

² A. L. Elrefai and I. Sasada, "Magnetic particle detection in unshielded environment using orthogonal fluxgate gradiometer," Journal of Applied Physics., 117, 17C114 (2015).

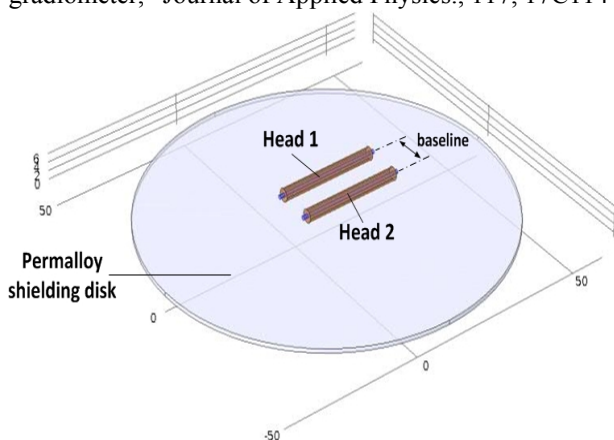


Fig. 1: Illustration of the sensor placement over the shielding disk. The sensor heads plane is 5 mm above the shielding disk plane.

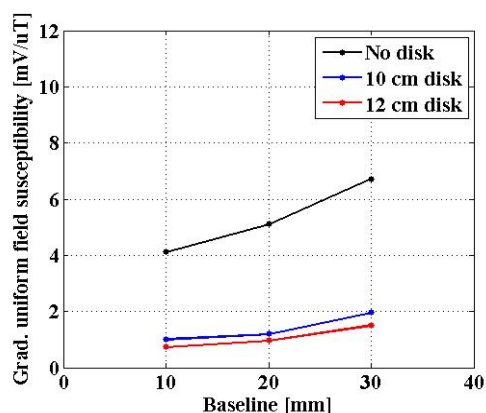


Fig. 2: gradiometer uniform field susceptibility [mV/μT] vs. baseline separation distance [mm] without shielding disk and with shielding disk of diameters 10 and 12 cm.

Fe-Si-B-C アモルファス薄帯の磁区構造制御による

フラックスゲートセンサの小型化

宮田大史^{***}、山本竜馬^{**}、森本祐治^{**}、竹澤昌晃^{**}

(*株エムティアイ、**九工大)

Miniaturization of fluxgate sensors by magnetic domain structure control of Fe-Si-B-C amorphous ribbons

H. Miyata^{***}, R. Yamamoto^{**}, Y. Morimoto^{**}, M. Takezawa^{**}

(*MTI, **Kyushu Inst. Tech.)

目的

我々は、フラックスゲート磁気センサの感度を、そのコア材料の磁区構造を制御することにより改善できることを報告している¹⁾。本研究では、Fe-Si-B-C アモルファス薄帯を用いた小型センサに、応力印加による磁区構造制御を適用し、10 mm 以下に小型化したセンサでも磁区構造制御が有効であるかを調べた。また、磁性材料の磁区を観察することにより、磁性材料の端部、中心付近など場所の違いによる磁化過程の違いを調べたので報告する。

実験方法

Fe-Si-B-C アモルファス薄帯を用いて Fig.1 に示すフラックスゲートセンサを構成し、励磁コイルで交流励磁し、外部から 1 Oe の磁界を印加したとき検出コイルに誘導される交流電圧を電圧計を用いて直接測定した。使用したコア材料は、Metglas 社製アモルファス磁性薄帯の 2605SC である。また、小型化が磁化過程に及ぼす影響を調べるため、Kerr 効果顕微鏡を用いて、アモルファス薄帯表面の磁区を観察した。

結果と考察

Fig.2 にセンサ出力の周波数依存性を示す。■がセンサ長 20 mm、▲がセンサ長 10 mm で磁区構造を制御していないもの、●がセンサ長 10 mm で、15 MPa の張力を印加することで磁区構造を制御したものであり、それぞれ外部から 1 Oe の磁界を印加した場合の出力電圧の変化分をプロットしたものである。いずれのセンサにおいても励磁周波数の増加とともに、感度が上昇している。また、同じ長さで比較すると磁区構造を制御したものの方が感度が高い。長さとお出力の関係性を比べた場合、磁区構造を制御せずに長さを半分にした場合、センサ出力は 50% 程度低下していることがわかる。しかし、センサ長が 10 mm の場合でも、磁区構造を制御したものは、出力が増加しており、10 mm に小型化したセンサにおいても、磁区構造制御によるセンサ出力の改善が有効であることが分かった。

Fig.3 はアモルファス薄帯に 9 Oe の交流磁界を印加した際に磁壁移動が起こった領域を観察した結果であり、左が試料の端部、右が中心付近を観察したものである。中心付近の方が磁壁移動している面積が大きくなっており、端部よりも中心付近の方が磁壁移動しやすいことがわかる。試料の長さを短くした場合、全体の面積に占める端部の面積が相対的に大きくなるので、センサ出力の低下の原因になっているものと考えられる。今後、センサ長をさらに短くした場合のセンサ出力の変化と、磁化過程の変化を調査する予定である。

参考文献 1) H.Miyata et. al., *IEEE Trans. Magn.*, **50**, 4005804 (2014).

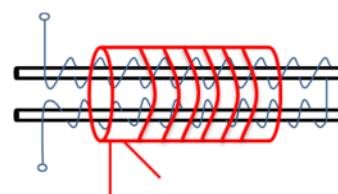


Fig.1 A schematic view of a sensor head.

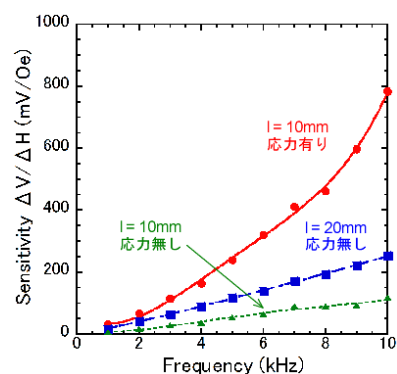


Fig.2 Frequency dependence of sensitivities.

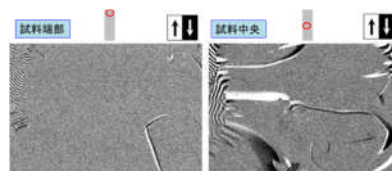


Fig.3 Area of magnetic domain change at $H_{ac} = 9$ Oe.