

コイル一体・差動駆動型薄膜MIセンサヘッドを用いた磁気センサの感度特性

Field Detection Characteristics of Differential Magnetic Sensor Using Integrated Thin-film MI Sensor Heads

高山昭夫・梅原多美雄・湯口昭代・加藤英樹・毛利佳年雄*・内山剛*

ミネベア(株) 浜松製作所 R&D センター, 静岡県磐田郡浅羽町浅名1743-1 (〒437-1193)

*名古屋大学 工学研究科 電気工学専攻, 名古屋市千種区不老町 (〒464-8603)

A. Takayama, T. Umehara, A. Yuguchi, H. Kato, K. Mohri* and T. Uchiyama*

R&D Center, Minebea Co., Ltd., 1743-1 Asana, Asaba-cho, Iwata-gun, Shizuoka-ken, 437-1193 Japan

*Department of Electrical Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603 Japan

(1999年10月29日受理、2000年1月25日採録)

A thin-film MI element made using thin-film integration technology is suitable to fabricate a very small, highly reliable MI sensor head. We developed an integrated thin-film MI sensor head constructed with a combination of a thin-film NiFe MI element and thin-film bias and negative feedback coils using micro-plating technology, in order to solve the problems of an amorphous wire MI head. We also fabricated a differential sensor module using a CMOS multivibrator and a pair of the thin-film MI sensor heads.

The differential sensor module using a pair of the thin-film MI heads showed a sensitivity of 25 mV/A/m (2.0V/Oe) with an amplifier having an amplification factor of 10 and good linearity without hysteresis. The sensor module has a thermal drift of less than 0.008%/FS°C at 0 A/m and 0.028%/FS°C at 80 A/m, at temperatures from -25°C to 75°C, and also has good stability in field detection characteristics.

Key words: MI, integrated thin-film MI sensor head, thin-film bias and negative feedback coils, micro-plating technology, differential magnetic sensor module

1. はじめに

アモルファスワイヤの磁気インピーダンス効果 (MI 効果) を利用した高感度の磁気センサが毛利らにより開発されており、このMIセンサは高感度・高分解能 (10^{-6} Oe; AC 磁界) などの良好な磁気センサ特性を示す^{1), 2), 3)}。しかし、アモルファスワイヤを用いたMIセンサはバイアスコイルや負帰還コイルのためのワイヤ巻き線が必要であること、アモルファスワイヤと端子を接続するための半田付けに問題があるなど小型化、量産性、信頼性に限界がある。

一方、外部磁界による透磁率の変化に起因した表皮効果による軟磁性膜のインピーダンスの変化を利用した薄膜MIセンサの開発がさかに行われている^{4) - 8)}。薄膜MI素子は薄膜集積化技術を用いて作製されるため、小型化、量産性、信頼性にすぐれたMIセンサを作製するのに適している。このため、我々は小型化、量産性、信頼性に優れ、製造コス

ト的に有利なマイクロめっき技術を用いて、NiFe 薄膜MI素子、薄膜バイアスコイル、薄膜負帰還コイルを組み合わせ集積化した薄膜MIセンサヘッドを開発してきた⁹⁾。

ところで、磁気センサとして安定した感度特性を得るためには、センサヘッドの特性のみならず、センサヘッドの形状やセンサを駆動する電子回路の検討も重要である。そこで、本研究において、差動駆動型薄膜MIセンサヘッドを新たに作製し、その構造、磁気的特性、および、薄膜MIセンサヘッドを用いた差動駆動型MIセンサモジュールの電子回路について検討したので報告する。

さらに、高感度磁気センサの用途として車載用、あるいは、屋外で使用する場合などでは、感度特性とともに温度安定性も重要となってくる。このため、MIセンサモジュールの温度特性についてもあわせて報告する。

2. 実験方法

マイクロめっき技術を用いてNiFe 薄膜MI素子、薄膜バイアスコイル、薄膜負帰還コイルを組み合わせた薄膜MIセンサヘッドが1チップ内に2本もつ構造の差動駆動型薄膜MIセンサヘッドを作製し、MI特性を評価した。また、CMOSを用いたパルス励磁回路を構成した差動駆動型MIセンサ回路にこのセンサヘッドを搭載し磁気センサ特性を評価した。

MI特性、磁気センサ特性の評価は磁気シールドされた恒温槽の中で行い、磁界の印加にはヘルムホルツコイルを用いた。

3. 実験結果と考察

3.1 薄膜MIセンサヘッドの構造

Fig.1に我々の作製した差動駆動型薄膜MIセンサヘッドの構造の写真を示す。この薄膜MIセンサヘッドは1チップの中にNiFe 薄膜MI素子、バイアス用薄膜コイル、負帰還用薄膜コイルを組み合わせた2本のMIセンサーヘッドを並列配置した構造である。Table1にその諸元を示す。NiFe 薄膜MI素子はフレームめっき法¹⁰⁾により作製した。実験に用いためっき浴はBurns-Warnerのめっき条件を基本とした硫酸

塩-塩化物浴であり、カソード表面の pH 調整のための緩衝剤としてのホウ酸や、応力緩和剤、潤滑剤などの添加物を用いている。また、MI 素子の幅方向に一軸誘導異方性を付与するために約 1kA/m の直流磁界を印加しながら成膜した。

この薄膜 MI 素子の上下にはフォトレジストを 270℃、10 時間の加熱により硬化させ作製した絶縁膜が形成されている。その絶縁膜を介してバイアス用薄膜コイル、負帰還用薄膜コイルが立体的に、かつ、交互に巻き回されている。ここで、バイアスコイルは磁気センサの動作点を MI 特性の最大感度のところに持ってくるためのバイアス磁界を印加するためのものであり、負帰還コイルはセンサ出力をフィードバックしセンサ出力の直線性や温度特性の改善のため薄膜磁気コアに負帰還磁界を与えるためのものである。また、それぞれの薄膜コイルも Cu めっきにより作製した⁹⁾。

さらに、MI センサ部を保護するためのフォトレジストを熱硬化して作製した保護層と、磁気センサの駆動回路との電気的接続を得るためのワイヤーボンド用のボンディングパッドが作製されている。ボンディングパッドは Au めっきにより作製した。

Table 1 Sensor dimensions.

Sensor chip size:	2.75 mm × 1.20 mm × 0.50 mm
NiFe MI element:	2500 μm × 20 μm × 3.3 μm
NiFe composition:	81.0 wt% Ni -19.0 wt% Fe
Magnetostriction:	-0.7 × 10 ⁻⁶
Bias coil:	52 turns, 7 Ω (dc)
Feedback coil:	52 turns, 7 Ω (dc)

3.2 薄膜 MI センサヘッドの温度特性

薄膜 MI センサヘッドの NiFe めっき膜の磁区構造は磁気特性に深く関係しており、センサ特性の安定性に大きな影響を持つ。とくに、高感度の MI 特性を得るためには磁化容易軸は素子の幅方向に誘起させることが必要である。Fig.2 に上部絶縁膜、および、上部コイルを作製する前の状態での薄膜 MI センサヘッドの NiFe 膜の磁区構造をビッター法で観察した様子を示す。このときの試料はフォトレジストを熱硬化して作製する上部絶縁膜の作製条件と同じ 270℃、10 時間の熱処理を行ったものを用いた。

この試料の磁区構造は NiFe めっき膜の幅方向に磁化容易軸が誘起されており、素子の幅方向に容易軸が向いた 180° 磁区と素子の長さ方向に容易軸が向いた 90° 磁区からなる還流磁区構造を形成している。

ところで、フォトレジスト絶縁膜を形成する 270℃-10 時間の熱処理プロセスにおいて NiFe 膜の歪みは除去され、その後、常温に戻したときに、基板として用いたガラス (#7059) の熱膨張率 ($\alpha = 4.2 \times 10^{-6}$) は NiFe 膜の熱膨張率 ($\alpha = 12.0 \times 10^{-6}$) に比べて小さいため、NiFe 膜は引っ張り応力を受ける。引っ張り応力を受けたときに、磁歪が負の試料は磁化容易軸が素子の幅方向に向くと考えられる。

Fig.2 に立ち上がり時間 12ns、40mA のパルス電流で励磁したときの MI 特性の温度特性を示す。インピーダンスが極大を示す磁界は 25℃ では 200A/m に対して -25℃ では 350A/m、75℃ では 150A/m と変化する。ところで、室温で引っ張り応力を受けているこの MI 素子は温度が上がると基板と NiFe 膜の熱膨張率の関係から、その引っ張り応力は緩和され、NiFe 膜

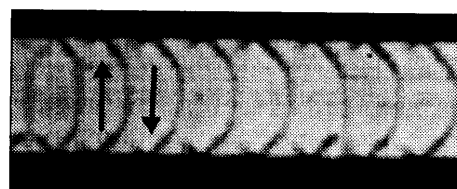


Fig. 2 Domain structure of thin-film MI sensor head.

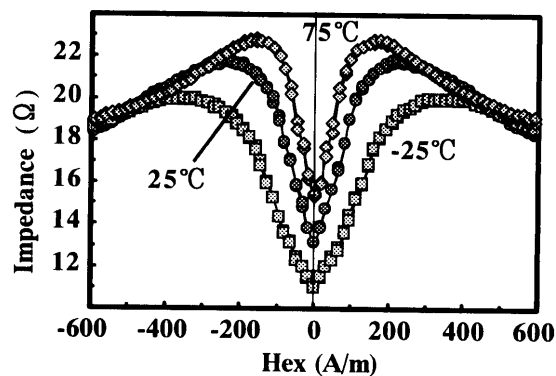


Fig. 3 MI characteristics of sensor head magnetized with pulse current at -25°C, 25°C, and 75°C.

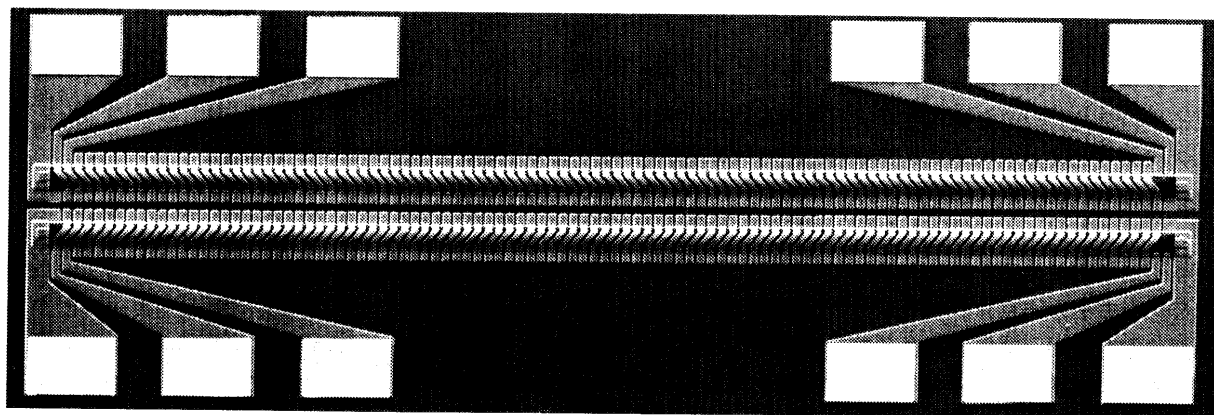


Fig. 1 Top view of differential thin-film MI sensor head chip.

の磁歪量が負であることから異方性磁界 H_k は小さくなる。一方、温度が下がると引っ張り応力は大きくなり H_k は大きくなると考えられる。

また、25°CのときのMI特性では0.41%/A/m(33%/Oe)の高い磁界感度を示し、外部磁界の変化に対するヒステリシスも非常に小さかった。

3.3 差動駆動型MIセンサの電子回路

Fig.4に2個のCMOSによりパルス励磁回路を構成した差動駆動型MIセンサ回路³⁾を示す。高周波電流としてCMOSを用いたRC発振によりFig.5(a)に示すような5MHzの方形波電流を発生させ、微分回路を通してFig.5(b)に示すような振幅が40mA、半値幅が12nsのパルス電流に変換され、それぞれのMIセンサヘッドに通電される。

薄膜MIセンサヘッドへのバイアス磁界の印加には薄膜コイルを用い、一方のセンサヘッドには正のバイアス磁界を、もう一方のセンサヘッドには負のバイアス磁界が印加されるようにバイアス電流を通電する。このときのそれぞれのコイルに流すバイアス電流は4.4mAであり、約100A/mのバイアス磁界を得ている。

外部磁界を受けたときに表皮効果によりMI素子のインピーダンスが変化する。このため、MI素子の電圧は変化する。この変化したパルス電圧は4個のショットキーバリアダイオード(SBD)をブリッジ結合した整流回路で整流され、その後、ピークホールド回路でDC電圧に変換される。ところで、センサの零点ドリフト ($H_{ex}=0$ に対する E_{out} の時間変動) の主要原因であるセンサの温度特性は負帰還によっても十分に安定させることは困難であり、特にSBDの温度安定性が不十分であるため零点ドリフトは室温から80°Cまでの温度範囲でフルスケールの数%発生する¹¹⁾。このため、今回の実験に用いたFig.4の回路では4個のSBDをブリッジ結合することによりSBDの温度補償をすることを試みた。Fig.6は20MHz、20mA0-pの正弦波を、ひとつのSBDで整流した場合と4個のSBDでブリッジ結合を構成し整流した場合の整流電圧の温度変化を25°Cの整流電圧からの変化 ΔE_{out} であらわしたものである。4個のSBDをブリッジ結合し整流することにより、単独のSBDで整流するときと比べその温度変化は室温より低温側で約1/6、低温側でも約1/2に低減できた。

つぎに、差動検波することにより、Fig.3に示すような薄膜MI素子の温度特性は同相成分であるのでキャンセルされ、かつ、差動成分である外部磁界によるMI素子のインピーダンス変化を検出する。さらに、10倍のアンプを用いて増幅しセンサ出力 E_{out} を得ている。

また、出力 E_{out} の一部を負帰還抵抗 R_f 、および、負帰還用薄膜コイルにより負帰還磁界としてフィードバックしている。この負帰還作用により直線性が良く、ヒステリシスが無く、かつ、感度が R_f により調整できる感度特性が得られる¹²⁾。今回の実験では80A/mの印加磁界で2.0Vの出力が得られるように出力の78%を負帰還させている。

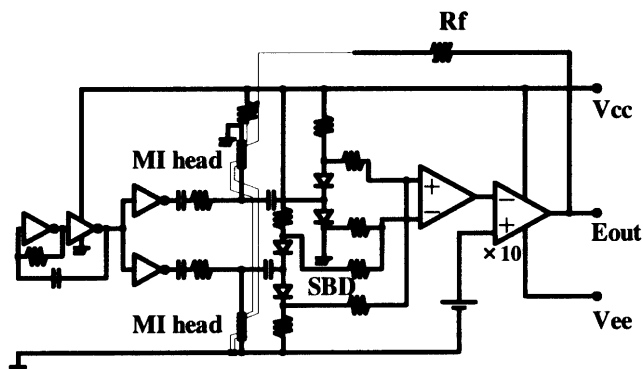


Fig. 4 CMOS differential MI sensor circuit using a pair of the thin-film MI sensor heads.

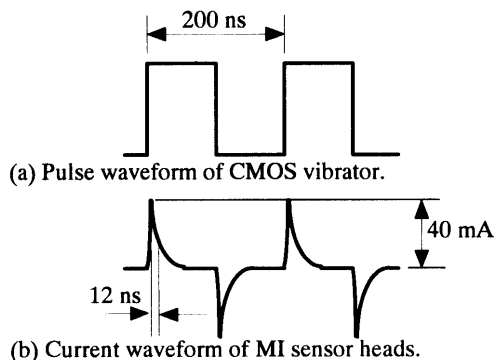


Fig. 5 Pulse wave form of CMOS multivibrator and MI sensor heads.

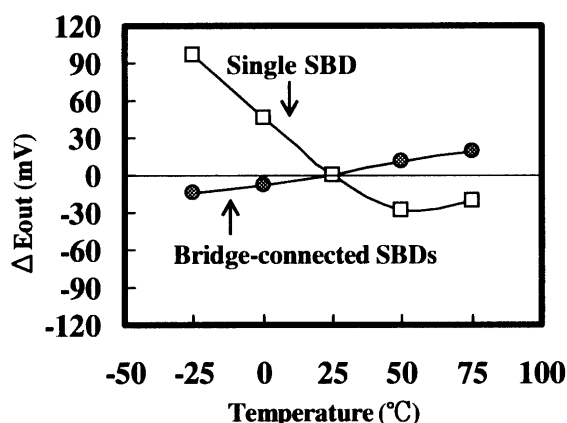


Fig. 6 Thermal characteristics of a wave detector using bridge-connected Schottky barrier diodes (SBDs).

3.4 磁気センサ特性

Fig.7に磁気センサモジュールの25°Cにおける印加磁界と出力の関係を示す。出力はFig.4に示す負帰還抵抗 R_f を調節することにより印加磁界 ± 80 A/mで ± 2.0 Vとなるようにした。Fig.7でわかるように印加磁界と出力の関係は良好な直線性を示し、その傾きからのずれはフルスケールの1%以内であった。また、ヒステリシスは見られなかった。

磁気センサモジュールの温度特性は-25°C~75°Cの間で評価した。Fig.8にそれぞれの温度での印加磁界0のときと印加磁界80A/mのときの出力の変動を示す。印加磁界0のときの温度による変動は0.008%/FS°Cであり、DC磁界を測定するための磁気センサとして非常に良好な特性を示した。ま

た、印加磁界80A/mのときの出力の温度変動も高温側で若干悪くなるが、それでも0.028%/FS°Cの値であり小さな温度変動であった。

Fig.9に磁気センサモジュールの零点ドリフト (Hex=0に対するEoutの時間変動) 特性を示す。25°Cの恒温槽内で60分間の測定を行った。磁気センサモジュールへの電源投入

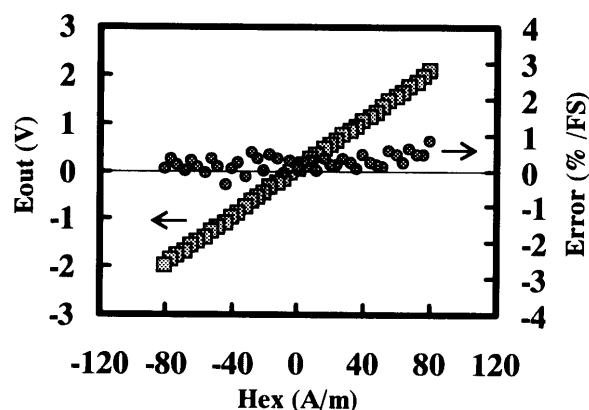


Fig.7 Field detection characteristics of the differential MI sensor with negative feedback.

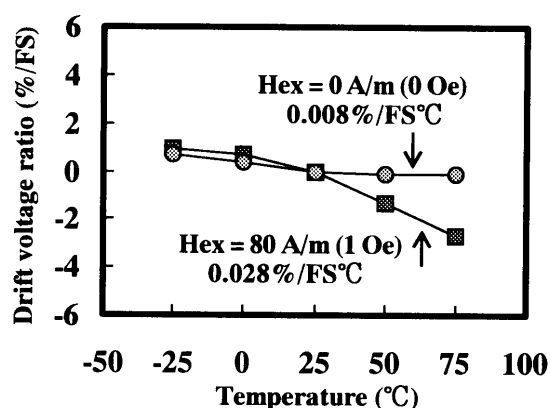


Fig.8 Temperature stability of the differential MI sensor when Hex = 0A/m and Hex = 80A/m.

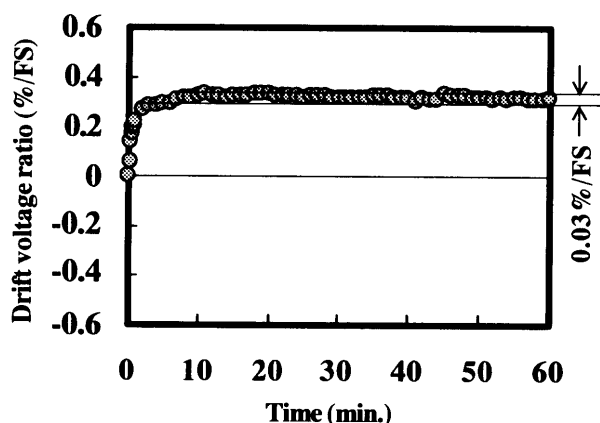


Fig.9 Zero point drift stability of the differential MI sensor when Hex = 0A/m.

時から30秒の間にフルスケールの約0.3%のドリフトが見られたが、その後安定し、60分間の0点ドリフトはフルスケールの0.03%以内であった。この値を磁界換算すると30nT以内となり安定した感度特性を示した。

また、この磁気センサモジュールの消費電力は100mWであった。

4. まとめ

マイクロめっき技術を用いてNiFe薄膜MI素子、薄膜バイアスコイル、薄膜負帰還コイルを集積化した薄膜MIセンサヘッドが1チップ内に2本もつ構造のコイル一体・差動駆動型薄膜MIセンサヘッドを作製した。

この薄膜MIセンサヘッドを用いて、CMOSによりパルス励磁回路を構成した差動駆動型MIセンサ回路を組み合わせた磁気センサモジュールを作製した。このセンサの出力電圧は10倍のアンプを用いたとき25mV/A/m (2.0V/Oe)を示し、ヒステリシスの無い直線性の良好な磁気センサ特性を示した。

また、4個のSBDをブリッジ結合することによりSBDの温度補償が可能となり、良好なセンサ感度の温度特性を得た。とくに0磁界のときの温度特性は非常に良好な特性を示した。さらに、0点ドリフトは小さく安定した磁界感度特性を示した。

参考文献

- 1) L.V.Panina, K.Mohri, K.Bushida, and M.Noda, *J. Appl. Phys.*, **76**, 6198 (1994)
- 2) M.Noda, L.V.Panina, and K.Mohri, *IEEE Trans. Magn.*, **31**, 3167 (1995)
- 3) T.Kanno, K.Mohri, T.Yagi, T.Uchiyama and L.P.Shen, *IEEE Trans. Magn.*, **33**, 3358 (1997)
- 4) T.Uchiyama, K.Mohri, L.V.Panina, and K.Furuno, *IEEE Trans. Magn.*, **31**, 3182 (1995)
- 5) K.Hika, L.V.Panina, and K.Mohri, *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 4594 (1996)
- 6) M.Senda, O. Ishii, Y.Koshimoto, and T.Toshima, *IEEE Trans. Magn.*, **30**, 4611 (1994)
- 7) T.Morikawa, Y.Nishibe, H.Yamadera, Y.Nonomura, and M.Takeuchi, *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 4965 (1996)
- 8) M.Takezawa, H.Kikuchi, K.Suezawa, M. Yamaguchi, K.Ishiyama, and K.I.Arai, *IEEE Trans. Magn.*, **34**, 1321 (1998)
- 9) A.Takayama, T.Umehara, A.Yuguchi, H.kato, K.Mohri, and T.Uchiyama, *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 3643 (1999)
- 10) L.T.Romankiw, I.M.Croll, and M.Hatzkis, *IEEE Trans., Magn.*, **6**, 597 (1970)
- 11) 毛利佳年雄 : 日本応用磁気学会誌, **23**, 1887 (1999)
- 12) 毛利佳年雄 : 磁気センサ理工学, p40 (コロナ社, 1998)