混合ブリッジ接続した高周波キャリア型薄膜磁界センサ

Non-Uniform Bridge Connection of a High-Frequency Carrier-Type Thin-Film Magnetic Field Sensor

竹澤昌晃・大平祐史*・馬場誠・山口正洋・荒井賢一・芳賀昭*

若生直樹**・佐藤尚之**・阿部岩男**

東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

* 東北学院大学工学部, 多賀城市中央 1-13-1 (〒985-8537)

** (株) トーキン, 仙台市太白区郡山 6-7-1 (〒982-0003)

M. Takezawa, H. Ohdaira*, M. Baba, M. Yamaguchi, K. I. Arai, A. Haga*,

N. Wako**, N. Sato**, and I. Abe**

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku Univ., 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577

*Dept. of Electrical Engineering, Tohoku Gakuin Univ., 13-1 Chuo 1-chome, Tagajo 985-8537

**Tokin Corp., 6-7-1 Koriyama, Taihaku-ku, Sendai 982-0003

(1998年10月15日受理, 1999年1月21日採録)

A non-uniform bridge connection of a high-frequency carrier-type thin-film magnetic field sensor was examined, using CoNbZr magnetic legs and Cu conductive legs in order to avoid cross-talk of the magnetic flux in adjacent legs of the bridge. A linearity of 0.70% was obtained with an external magnetic field of -4 to $+4$ Oe when feedback was provided with a feedback coil. The gain of the sensor was as high as 7.5 V/Oe when the gain of the differential amplifier of the feedback circuitry was 100.

Key words: bridge-connected sensor, Cu conductive legs, cross-talk, negative feedback, high-frequency carrier-type thin-film magnetic field sensor

1. はじめに

磁性体に高周波キャリア電流を直接通電し, その表皮効果^{1),2)}を利用した高感度な磁界センサの研究が盛んに行われている³⁾⁻⁹⁾. このセンサ素子を薄膜で構成した場合の問題点として薄膜ではリアクタンス分と比較して抵抗分が大きく, インピーダンス変化率がマスクされてしまうことが挙げられる. 抵抗分を下げるには膜厚を厚くすればよいが, スパッタプロセスでは現実的に数 μm が限界である. そこで著者らはCoNbZr短冊状磁性薄膜よりなる高周波キャリア型薄膜磁界センサ素子をブリッジ接続して抵抗分によるオフセット出力を低減することで, センサ素子を単体で用いた場合と比較して感度向上が可能であることを報告した¹⁰⁾. しかし, ブリッジ4辺が全て磁性辺よりなるフルブリッジ構成では隣接した磁性辺を渡る磁束によるクロストークが発生し, センサの指向性を鋭くすることや, 材料設計ならびに素子形状の最適化を行う上で問題となる.

このため, 本稿では先に著者らが提案したフルブリッジ構成の素子¹⁰⁾の4辺のうち, 磁界に対してインピーダンスがほとんど変化しない2辺をCu導体薄膜による非磁性辺に置き換えて混合ブリッジ構成とした. 更に, 10 MHzの励振・検出回路とセンサにバイアス磁界を印加する負帰還回路を含む磁界センサモジュールを試作し, ± 4 Oeの入力に対して0.70%の直線性を有するセンサ出力が得られるとともに, 最大で7.5 V/Oeのセンサ利得が得られたので報告する.

2. 磁界シミュレーション

Fig. 1(a)は長さ5 mm, 幅100 μm のCoNbZr薄膜をブリッジ接続した場合を想定し, 薄膜の磁化困難軸方向に一樣な静磁界を印加した場合の磁束線図を有限積分法(MAGNA/FIM Ver. 3.1)でシミュレーションした結果を示したものである. 図中, 静磁界の印加方向が各磁性辺の磁化困難軸方向であり,

Fig. 1 Magnetic flux distribution of the bridge-connected sensor.

困難軸方向の比透磁率を 2000、容易軸方向の比透磁率を 300 とし、磁化飽和は生じないものとして計算した。磁性膜に高周波キャリア電流は通電されていない。同図より、隣接した磁性辺を渡る磁束が認められることが明らかであり、これは薄膜磁性辺間にクロストークが発生することを示している。

ここで、4 辺の磁性辺のうち磁化容易軸方向が長手方向となるような 2 辺では磁界に対するインピーダンス変化が極めて小さいことが知られている³⁾。これら 2 辺を Cu 薄膜による非磁性辺と置換し、混合ブリッジ構成としても、特に感度は低下しないと考えられ、かつ Fig. 1(b) に示すように、非磁性辺と磁性辺間にはクロストークがないことが明らかであり、隣接するブリッジ辺間の渡り磁束を除去できることが分かった。

3. 実験方法

Co_{84.85}Nb₁₂Zr_{3.15} 合金ターゲットを用い、rf スパッタ法により、ガラス基板上に厚さ 5 μm のアモルファス CoNbZr 薄膜を成膜した。成膜時に導入された異方性を 5×10^{-6} Torr 以下、500 Oe の真空回転磁界中で 400°C、2 hour の熱処理により緩和した後、同条件の真空静磁界中で 400°C、1 hour 熱処理を行って一軸異方性を導入した。静磁界中熱処理後の異方性磁界 H_k は 5 ~ 6 Oe であった。その後、CoNbZr 磁性膜をイオンミリングにより微細加工して短冊の幅方向が磁化容易軸方向となるような、2 辺の平行な短冊状の磁性辺を構成した。短冊の長さは 5 mm、幅は 100 μm で、磁性辺の間隔は 0.5 mm である。微細加工時に磁気特性が劣化する可能性が考えられるので、微細加工後に再度磁界中熱処理を行った。続いて膜厚 0.1 μm の Cu 薄膜を rf マグネトロンスパッタ法で成膜し、リフトオフによりブリッジの非磁性辺と電極部を形成し Fig. 2 に示した混合ブリッジ構成の磁界センサ素子を得た。

磁性辺の長手方向に直流磁界を印加した場合のインピーダンス変化は磁性膜の異方性磁界の値に近い磁界強度で最大に

Fig. 2 Schematic diagram of the non-uniform bridge-connected thin-film sensor element.

Fig. 3 Block diagram of the measurement system of the bridge-connected sensor element.

なることが知られている³⁾。本センサ素子においては、10 MHz のキャリア電流を通電した場合、約 5 ~ 6 Oe であった。この条件下でブリッジ 4 辺の抵抗分のバランスがとれるように非磁性辺の寸法を設計しており、長さは 0.5 mm、幅は 10 μm である。この素子に周波数 10 MHz、1 V_{p-p} の正弦波を発振器より入力し、ブリッジのセンサ出力¹⁰⁾をオシロスコープで測定し素子単体での磁界検出動作の評価を行った。出力電圧はピーク-ピークの値とし、外部磁界はヘルムホルツコイルにより印加した。この測定系のブロック線図を Fig. 3 に示す。

さらに、10 MHz、1 V_{p-p} の矩形高周波キャリア電圧をセンサ素子に印加し、得られたブリッジ出力を整流後、差動増幅する構成の磁界センサモジュール回路を試作した。本回路はセンサ素子を周回するコイルを有しており、センサの磁界検出方向と同じ磁性膜の磁化困難軸方向にバイアス磁界を印加することでセンサ出力の直線性を向上できる。この磁界センサモジュール回路のブロック線図を Fig. 4 に示した。この回路を用いて、ブリッジ形磁界センサの磁界検出特性を測定した。

4. 実験結果

Fig. 5 に Fig. 3 に示した測定系を用いて測定した、センサ素子単体の出力電圧の外部磁界依存性を示す。今回検討した混合ブリッジ構成の素子の結果を ○ で、従来のフルブリッジ構成の素子¹⁰⁾の結果を □ で示した。どちらの場合もセンサ出力電圧は外部磁界 5 ~ 6 Oe 付近で最大となった。出力電圧変化の最大値は約 60 mV であり、混合ブリッジ接続したブリッジ形センサ素子で、従来と同様の外部磁界に対するセンサ出力変化が得られることが分かった。

Fig. 6, 7 は磁界センサモジュール回路を用いた混合ブリッジ構成のセンサ素子における出力電圧の外部磁界依存性を示しており Fig. 6 は負帰還によるバイアス磁界の制御を行わなかった場合、Fig. 7 は負帰還を行った結果である。差動増幅器の利得は 5 とした。負帰還を行わなかった場合、センサ出力は外部磁界 0 から磁界の増加とともにゆるやかに上昇した後、4 ~ 6 Oe の間で急激に上昇し、8 Oe 付近で最大値をとった後減少した。出力電圧変化が最大となる 4 ~ 6 Oe の範囲で

Fig. 4 Block diagram of the bridge-connected sensor module.

直線性は 8.5% であった。一方, Fig. 7 に示す負帰還によるバイアス磁界の制御を行った場合は -4 Oe から $+4 \text{ Oe}$ の外部磁界の増加に対して出力電圧は 1 V から 4 V まで比例して上昇した。 $V_{out} (\text{mV}) = 0.375 H_{dc} (\text{Oe})$ で表わされる直線特性と実測値とのずれは 0.70% 以内であった。これより出力直線性として 0.70% が得られ, 負帰還制御を行わなかった場合と比較して直線性を 12 倍に向上できた。

Fig. 8 は差動増幅器の利得を変化させた場合の, 外部磁界に対するセンサモジュールの出力を示したものである。差動増幅利得 5 の場合に 0.38 V/Oe であったセンサ利得を, 差動増幅利得を 20 に増加させ 1.5 V/Oe に向上させた場合の直線

性として 2.8% が得られた。さらに差動増幅利得を 100 とし、センサ利得を 7.5 V/Oe とした場合でも直線性は 4.7% であり, 負帰還を行わなかった場合と比較して良好な直線性を維持したまま, 従来のブリッジ形磁界センサ¹⁰⁾ の約 4 倍のセンサ利得が得られた。差動増幅利得 20, 100 の場合にセンサ出力電圧が 4.5 V 付近で飽和するのは出力回路の内部電源の飽和によるものである。

Fig. 5 Applied dc field dependence of the output voltage of the bridge-connected sensor.

Fig. 6 Applied dc field dependence of the output voltage of the sensor module without the feedback circuit.

Fig. 7 Applied dc field dependence of the output voltage of the sensor module with the feedback circuit.

Fig. 8 Applied dc field dependence of the output voltage of the sensor module when the gain of the differential amplifier of the feedback circuitry was changed.

5. まとめ

1. アモルファス CoNbZr 薄膜磁性辺と Cu 薄膜導体辺による混合ブリッジ構成の高周波キャリア型薄膜磁界センサをはじめて作製した。
2. 磁束線図のシミュレーションより、混合ブリッジ構成では隣接辺間の磁束のクロストークを除去できることを明らかにした。
3. 負帰還によりセンサ素子へのバイアス磁界を制御する回路を含む磁界センサモジュールを試作し、 ± 4 Oe の磁界入力に対して 0.70% と良好な直線性を有する出力を得ることができた。
4. センサモジュールの差動増幅器の利得を 100 とした場合、良好な直線性を維持したまま 7.5 V/Oe と従来の 4 倍程度のセンサ利得を得ることができた。

本研究の一部は、医薬品副作用被害救済・研究振興調査機構の「保健医療分野における基礎研究推進事業」、ならびに科学技術振興事業団の宮城県地域結集型共同研究事業「生体機能再建と近未来生活支援技術—最先端リハ・福祉システムの構築と新産業の創出—」によるものである。

謝辞 本研究の遂行に御協力いただいた凌和電子株式会社の皆様に感謝いたします。

文 献

- 1) 沼沢 茂, 村上 孝一, 北條 博行: 日本応用磁気学会誌, 9, 263(1985).
- 2) 加茂 芳邦, 島田 寛: 第 13 回日本応用磁気学会学術講演概要集, 23aD-6 (1989).
- 3) 菊池 弘昭, 竹澤 昌晃, 山口 正洋, 荒井 賢一: 日本応用磁気学会誌, 21, 789(1997).
- 4) K. Mohri, T. Kohzawa, K. Kawashima, H. Yoshida, and L. V. Panina: *IEEE Trans. Magn.*, 28, 3150(1992).
- 5) 比嘉 孝治, 内山 剛, R. Shin, 毛利 佳年雄, 宇ノ木 保元, 菊池 和政: 日本応用磁気学会誌, 21, 649(1997).
- 6) M. Senda, O. Ishii, Y. Koshimoto, and T. Toshima: *IEEE Trans. Magn.*, 30, 4611(1994).
- 7) M. Senda and Y. Koshimoto: *IEEE Trans. Magn.*, 33, 4367(1997).
- 8) 森川 健志, 西部 裕司, 山寺 秀哉, 野々村 裕, 竹内 正治, 多賀 康訓: 日本応用磁気学会誌, 20, 553(1996).
- 9) T. Morikawa, Y. Nishibe, H. Yamadera, Y. Nonomura, M. Takeuchi, and Y. Taga: *IEEE Trans. Magn.*, 33, 4367(1997).
- 10) M. Takezawa, H. Kikuchi, K. Suezawa, K. Ishiyama, M. Yamaguchi, and K. I. Arai: *IEEE Trans. Magn.*, 34, 1321(1998).