薄膜直交フラックスゲート磁界センサの作製とその評価

Fabrication and Characterization of Thin-Film Orthogonal Fluxgate Magnetic Sensors

及川亨・山岡英彦・篠浦治

TDK (株) 開発研究所, 千葉県市川市東和田 2-15-7 (〒272-8558)

T. Oikawa, H. Yamaoka, and O. Shinoura

R&D Center TDK Corp., 2-15-7 Higashi-Owada, Chiba 272-8558, Japan

(2000 年 10 月 5 日受理、2001 年 1 月 24 日採録)

Thin-film orthogonal fluxgate magnetic sensors with dimensions of 4 mm × 1.2 mm were fabricated by using micro-plating technology. Electro-plated 4- μ m-thick NiFe films were utilized as the core material, and 100-turn Cu coils were wound around the magnetic core as sensing coils. The greatest magnetic sensitivity was obtained when weak magnetic anisotropy was induced with its easy axis in the transverse direction of the magnetic core. The low-field sensitivity also showed a strong dependence on the core width due to the shape magnetic anisotropy, and became maximum for a width of 100 μ m. The optimized sensor elements were used to investigate the output characteristics with a negative feedback loop for the terrestrial magnetic flux, and a magnetic sensitivity of 16500 V/T was obtained. The output linearity to the external field was 1.4%, and showed an offset of 50mV.

Key words: fluxgate magnetic sensor, orthogonal fluxgate sensor, thin-film magnetic field sensor, permalloy film, micro-plating, negative feedback

1. はじめに

近年の携帯機器の普及に伴い小型磁気センサの要求が高まっている。信号処理回路である IC チップとの一体化を目標とした薄膜プロセスを用いた磁気センサの開発が盛んに行われている。

地磁気を検出する磁界センサとしてフラックスゲート (FG) センサは数十年の歴史がある¹⁾。FG センサの基本構成は軟磁性体コア、励磁コイル、検出コイルからなり、励磁磁界と非検出外部磁界の方向が平行に構成される平行 FG センサ²⁾と直交関係に構成される直交 FG センサ³⁾の 2 種類に分類される。これまで広く用いられてきたものは平行型であり、動作原理の解明の多くは平行型に基づいてなされており、第 2 高調波検出モデル^{1) 2)}で説明されている。平行型ではコア長さ方向に常に磁化されるため B-H 特性に基づき出力の考察が容易に行えるが、直交型では励磁方向と検出外部磁界の方向が異なるため磁気異方性の効果をあらわに考慮する必要がある。外部磁界により磁化安定方向が磁化容易軸から傾き、励磁磁界によってその周りで磁化ベクトルが回転するという磁化回転機構によって説明されている³⁾。

磁性体コアとコイルを薄膜プロセスで作製した薄膜 FG センサが最近報告されている^{4) 5)}。これらはいずれも平行型に属している。

直接第 2 高調波成分を検出するリングコア形状の場合コア径が mm サイズとなり、インピーダンスが大きいため動作周波数は数百 kHz 以下となっている。直交 FG センサは励磁方向の反磁界がないため短冊コア形状による小型化が可能で、低励磁インピーダンスによる高周波化によって高い出力が期待できる。励磁電流の大きさをえることで出力も制御できると考えられる。

我々は、以上のような観点から直交 FG センサが平行型より薄膜化に適していると考え、試作を行い、出力特性を評価した。また IC 制御回路を用いた負帰還動作による評価も実施した。本稿ではこれらの結果について報告する。

2. 素子作製および実験方法

作製したセンサ素子の基本構造を Fig. 1 に示す。サイズは 4.0 mm × 1.2 mm である。基本構造は磁性体コア層を絶縁層を介して上下に Cu コイルで挟んだもので、磁性体通電用及び Cu コイルに発生した電圧を検出するための 4 個のパッドが設けられている。基板はガラス基板を用いた。上下 Cu コイル層はめっき法で作製し、厚さ 4 μ m、幅 15 μ m、間隔 10 μ m のピッチで 100 ターンとした。上下絶縁層の厚さは 5 μ m でありフォトリソを熱硬化し作製した。上部絶縁層の熱硬化は磁性体コアの磁化容易方向に印加された磁場中で行った。下部絶縁層は Cu コイル層の線間スペースを埋めるように作製されるが、その上部に作製される磁性体コアへの影響を小さくするため段差 0.2 μ m 以下の平坦度と

Fig. 1 Structure of the sensor element.

した。磁性体コア層は厚さ $4\text{ }\mu\text{m}$ の NiFe をマイクロめっき法により磁場中で作製した。磁歪による応力誘導磁気異方性と出力の関係調べるため NiFe の組成を Ni80% 付近で変化させた。また、形状磁気異方性と出力の関係調べるため磁性体コア幅が $70\sim 830\text{ }\mu\text{m}$ の範囲で種々のパターンを同一基板上に作製した。

センサ出力の評価は正弦波またはパルス励磁で行い、電流及び電圧の大きさは peak-to-peak 値で測定した。

3. センサ出力特性

正弦波励磁電流の周波数を f としたとき外部磁場, H_{ex} に応答した出力電圧は周波数, $2f$ の正弦波となった。磁性体の磁化容易軸が長手方向, 幅方向いずれでも出力の周波数は $2f$ であり, 長手方向に磁化ベクトルが向いた場合の励磁による磁化の振動モードとして磁化回転は $2f$, 磁壁移動は f の振動数を与えるので, 竹内らの磁化回転モデル⁷⁾ が適用できると考えられる。Primdahl のべき展開⁸⁾ によれば, 平行 FG センサで f 成分が出力に現れない原因は, 励磁磁界を H_m として $H_{\text{ex}} \pm H_m$ のべき級数で与えられる出力の寄与を同時に検出しているため H_m の奇数次が打ち消しあうことによる。平行 FG センサではリングコア, または 2 本のセンサ素子の差動結線によりそれを実現しているが, 薄膜直交 FG センサでは膜の上下側で H_m の方向が逆であり H_m の奇数次は自動的に打ち消されている。出力波形には周波数 f 成分による歪みもみられたが外部磁場に対してほとんど大きさが変化しないことから, 磁性体-検出コイル間の浮遊容量を通じた励磁電流の検出コイルへの漏洩などによるノイズと考えられる。

外部磁界に対する最大出力, V_{max} の励磁電流依存性を Fig. 2 に示す。この範囲で出力は電流におおむね比例し, 飽和傾向は見られない。すなわち, 直交 FG センサでは励磁電流を大きくすることで高い感度が得られる。この点において, 電気抵抗率の低いコア材料が好ましいといえる。作製した素子の励磁インピーダンスは 10MHz 以下では実効的に磁性体コアの DC 抵抗であり, $70\text{ }\mu\text{m}$ 幅の磁性体コアでも約 $2\text{ }\Omega$ である。従って数百 mA の通電は可能な範囲である。

出力, V_{max} の正弦波励磁周波数依存性を Fig. 3 に示す。5MHz で最大になっており, リングコアを用いた薄膜平行 FG センサ^{6), 6)} より高周波化が達成されている。出力正弦波において上記ピーク周波数を境に約 90 度の位相差が生じたことから LC 共振が関与していると考えられるが, 検出コイルで測定した無磁場での LC 共振周波数は 30 MHz であり一致しなかった。原因として関与している C が分布定数であるため, 測定対象に依存した実行定数, C_{eff} になっていることが考えられる。

出力 V_{max} の組成依存性を Fig. 4 に示す。Ni81.5% 組成付近でピークを示している。磁区観察の結果, ピークを示す組成では磁化容易軸は幅方向であった。これは高山ら⁹⁾ が報告している NiFe 膜の磁気異方性の組成依存性と一致しており, 磁歪による応力誘導磁気異方性が原因である。磁化容易軸の方向はめっき, あるいは熱処理時の磁界方向で変化しなかったが, 磁界を磁化困難軸方向に印加した場合, あるいは回転磁界を印加した場合は出力の低

Fig. 2 Dependence of the maximum output on the excitation current. Frequency $f = 1\text{ MHz}$.

Fig. 3 Frequency characteristics of the output. Excitation current $I = 300\text{ mA}$.

Fig. 4 NiFe composition dependence of the output. Excitation current $I = 300\text{ mA}$ (2 MHz). Magnetic core width = $150\text{ }\mu\text{m}$.

下がみられた。Fig. 4の結果は、直交FGセンサでは弱い磁気異方性の容易軸が幅方向にあるとき大きな出力が得られることを示している。これは異方性磁界 H_k が小さいとき磁化回転が起こりやすいという描像と一致している。Ni81%組成以下で磁化容易軸が長手方向の場合でも第2高調波として出力が得られたが相対的に小さいことがわかった。

このような出力に及ぼす磁気異方性の効果は、磁気インピーダンス(MI)効果における、インピーダンス変化に及ぼす磁気異方性の効果と類似している。MI効果は通電した高周波電流による磁化回転によって生じることが毛利らによって示されている¹⁰⁾。磁化回転による磁性体幅方向の磁化の振動を透磁率として表皮効果によって検出するのがMIセンサの原理であり、磁化回転による磁性体長手方向の磁化の振動を検出巻線の誘導起電力として検出しているのが直交FGセンサの原理と考えられる¹¹⁾。

磁性体コアの磁気異方性に及ぼす他の要因として磁性体コアの形状磁気異方性が考えられる。Fig. 5に磁性体コア幅の異なる素子の出力の外部磁界 H_{ex} 依存性を示す。励磁電流は2 MHz, 300 mA 共通とした。磁性体コア幅が小さいほど外部磁界に対する最大感度が小さな磁界で与えられていることがわかる。竹澤らはMI変化率の磁性体コア幅依存性において、外部磁界に対するインピーダンス変化の立ち上がりは磁性体幅が小さいほど小さな磁界で起こる¹¹⁾、という直交FGセンサ同様の形状磁気異方性の効果を報告している。Fig. 6に最大出力を与える外部磁界 H_{op} と磁性体コア幅の関係を示す。磁性体コア幅の増加につれ H_{op} も増加する傾向を示し、形状磁気異方性による反磁界の増加によると考えられる。Fig. 7は最大出力 V_{max} と磁性体コア幅の関係を示す。磁性体コア幅 300 μm 付近にピークを持つが、300 μm 以上での最大出力の低下はFig. 6のような形状磁気異方性を反映していると考えられる。磁性体コア幅 200 μm 以下での最大出力の低下原因は不明である。なお、Fig. 5~7の結果はNi81.8%の磁性体コア組成で同一の基板上に作製された、異なる磁性体コア幅を有する素子で測定したものである。

Fig. 5 External field dependence of the output.
Core width: (a) 150 μm , (b) 300 μm , (c) 450 μm .

Fig. 6 Core width dependence of the optimal external field, Hop, that gives the maximum output.

Fig. 7 Core width dependence of the maximum output V_{max} .

4. 負帰還出力評価

すでに商品化されている地磁気センサユニット(TDK 製品コード: TMS)のパイポーラICを用いた負帰還制御回路を使用し、試作した薄膜直交FGセンサ出力評価を行った。その負帰還回路ブロック図をFig. 8に示す。励磁電流は素子の磁性体コア幅によらず立ち上がり時間20 nsec, 波高300 mAのパルスとした。検出コイルには三角波電流が2 kHzで通電され ± 40 A/mの交流バイアスを与える。バイアス磁界において、パルス出力のピーク電圧が検出される。検出コイルは出力電圧を検出すると同時に、フィードバック系から外部磁場を打ち消すような電流が通電される。打ち消し電流の大きさと極性から外部磁界の大きさと方向が検出される。

負帰還制御を行わないときのセンサ素子単体のパルス出力の磁界依存性をFig. 9に示す。Fig. 5~7から予想されるように磁性体コア幅が減少するにつれ出力増加傾向を示し、コア幅100 μm において地磁気に相当する磁界(30 A/m)に対して最大5630 V/Tのフラックス感度が得られた。この素子を用いて負帰還制御を行ったときのセンサユニットとしての出力 V_{out} の外部磁界依存性を

Fig. 10に示す。外部磁界ゼロにおいて出力2.5 Vに調整されている。フラックス感度16500 V/T、磁界に対する出力の直線性(±48 A/m内の外部磁界に対する感度の変動率)1.4%が得られた。また、任意の方向から強い磁界が印加されたときの磁区の乱れに起因する、磁界ゼロにおける出力の変動で定義したオフセットは±50 mV(±2%)となった。これらの負帰還評価結果から、作製した薄膜素子は地磁気センサとして実用的な特性を有すると結論される。

Fig. 8 Block diagram of the negative feedback circuit.

Fig. 9 External field dependence of the output obtained by pulse excitation without negative feedback.

Fig. 10 External field dependence of the sensor unit output with negative feedback.

5. まとめ

NiFe 磁性体を磁性体コアとした薄膜直交 FG センサを作製し、出力特性を評価し以下の結果を得た。

- 1) 平行 FG センサ同様に出力は第2高調波となり、動作原理は磁化回転と考えられる。
- 2) 磁性体コア幅方向を磁化容易軸とした小さな磁気異方性が付与されているときに大きな出力が得られた。
- 3) 励磁電流を大きくすることにより高い出力が得られた。
- 4) 小型化により動作周波数は最高5MHzまで可能となった。
- 5) 磁性体コアの形状磁気異方性により磁性体コア幅が小さい程度動作磁場は小さくなった。
- 6) 負帰還制御による地磁気センサユニットとしての出力を評価し、素子単体感度5630 V/T、負帰還出力感度16500 V/Tを得た。

文献

- 1) P. Ripka : Sens. Actuators A, 33, 129 (1992).
- 2) 小松実 : Tokin Technical Review, 25, 9 (1996).
- 3) 竹内信次郎, 市岡敏, 原田耕介 : 電気学会論文誌, 93-C, 27 (1973).
- 4) S. Kawahito, H. Satoh, M. Sutoh, and Y. Tadokoro : Sens. Actuators A, 54, 612 (1996).
- 5) 務中達也, 吉見健一, 中西博昭, 飯島健二, 山田康晴 : 日本応用磁気学会誌, 20, 561 (1996).
- 6) T. M. Liakopoulos, C. H. Ahn : Sens. Actuators A, 77, 66 (1999).
- 7) 竹内信次郎, 酒井福夫 : 電気学会マグネティクス研究会資料, MAG-85-200 (1985).
- 8) F. Prindahl : IEEE Trans. Magn., 6, 376 (1970).
- 9) 高山昭夫, 湯口昭代, 梅原多美雄 : 電気学会マグネティクス研究会資料, MAG-00-24 (2000).
- 10) 内山剛, 毛利桂年雄, 神保睦子, 網島滋 : 日本応用磁気学会誌, 19, 481 (1995).
- 11) 竹澤昌晃, 網代紀行, 山口正洋, 荒井賢一, 若生直樹, 阿部岩男, 辻真哉, 板垣篤 : 日本応用磁気学会誌, 24, 727 (2000).