可飽和型リングコアを用いた薄膜電流センサの試作

Thin-Film Current Sensor Using a Flux-Saturable Ring Core

藤山陽一・山田康晴・菊地弘昭*・山口正洋*・荒井賢一*

(株)島津製作所基盤技術研究所, 京都府相楽郡精華町光台 3-9 (☎619-0237)

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

Y. Fujiyama, Y. Yamada, H. Kikuchi,* M. Yamaguchi,* and K. I. Arai*

Technology Research Laboratory, Shimadzu Corporation, 3-9 Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-0237

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

We developed a thin-film current sensor using a flux-saturable ring core. The sensor consists of a transformer unit composed of a saturable core, primary and secondary coils, and a load coil surrounding the transformer unit. The sensor is suitable for use in a fail-safe system. The chip size is 4 mm×4 mm. A transmission efficiency of 60% was obtained when the carrier signal was a 3 V_{pp}-1 MHz sine wave. The secondary voltage of the sensor dropped by 90% when a 100-mA load current was applied to a 20-turn load coil.

Key words: current sensor, thin film, flux-saturable core, fail-safe

1. はじめに

近年, 産業機器などの安全性対策に対する関心が高まってきており, 特にヨーロッパ諸国では安全性対策に関する規制を強化する動きもみられる。例えば ISO 12000 では, 産業機器などにもフェールセーフシステムが導入される予定である¹⁾。

フェールセーフな設計とは, どのアイテムに故障が生じても安全性が保持されるように配慮した設計をいうが, 従来の電流センサは故障を起こした場合に電流を見落とす, つまり危険側の故障が起こりうるものがほとんどである。このため, フェールセーフ機能を有する小型の電流センサの開発が望まれている。

我々は, 平行して開発を進めている薄膜フラックスゲート型磁気センサ作製技術を応用し²⁾, 下記の可飽和型リングコアを用いた電流センサを試作した^{3), 4)}。

このセンサは, 可飽和型のリングコアを用いたトランスと, チップの外に配した信号線 (Load line) を組み合わせた構造であり, フェールセーフ用途に用いることのできる高い安全性が得られることが大きな特長である。

この構造をもつセンサを作製するに当たっては, 高周波においてもリングの周囲方向に高い透磁率をもち, かつ外からの磁場によって容易に飽和させることのできる磁性膜が不可欠である。我々は Co アモルファス⁵⁾を採用することで, この問題を解決することができた。

従来よりバルクの Co アモルファスを用いたフェールセーフ対応のセンサ⁶⁾は報告されているが, 本研究によりフォトファブリケーション技術を用い薄膜の積層による小型の電流センサを開発することができたので報告する。

2. センサ設計と作製

2.1 センサの構造

Fig. 1 にフェールセーフ用の電流検出回路のブロック図を Fig. 2 に電流センサチップの構成図を示す。トランスチップは Co_{84.85}Zr_{3.15}Nb₁₂ 薄膜のリングコアと Cu 薄膜による一次, 二次コイルからなり, 電流センサはトランスチップの周りに信号線を巻きつけた構造になっている。

通常は一次コイルに導入された高周波のキャリア信号が二次コイルへと伝達されるが, 信号線にある程度以上の電流が流れるとその発生磁界によりコアの信号線が巻かれている部分が飽和し, その部分の実効的な透磁率が減少するため二次コイルへの伝達信号が減衰する⁷⁾。二次コイルの出力は半波整流, 積分され DC 出力へと変換される。この DC 出力が減少した場合には信号線に電流が流れていると判断でき, 危険信号を発するか, あるいはリレーに接続して他の電流を遮断するような用い方をする。本センサは, 構造上絶縁が確保されていれば, 流れている電流を見落とす方向 (危険側) の故障は起きない。万一素子にトラブルがあった場合でも二次信号が出力しない, つまり安全サイドの故障しか起こさないという特長をもち, この点で本センサはフェールセーフに適したセンサであるといえる。

Fig. 1 Block diagram of the fail-safe current sensor.

Fig. 2 Configuration of the current sensor chip.

2.2 素子設計

トランスのコア形状などのパラメータが、電流センサとしての性能に与える影響を調べるために、Table 1 に示した数種類のトランスチップを設計した。基本的にはコア幅は 0.5 mm とし、一次コイル:二次コイルの巻数比は二次出力電圧を大きくするために、2:3 にした。チップサイズはすべて 4 mm×4 mm である。

今回の素子設計は、トランスの一次二次間の伝達効率 50% 以上で、信号線からの電流により二次コイル出力が初期値の 1/10 以下に減衰することを目標とした。

2.3 CoZrNb 薄膜の特性

トランスのコア材として、コアの円周方向に高い透磁率と低い異方性が求められる。コアは、通常のキャリア信号による発生磁界では飽和せず、一定値以上の信号電流 (Load current) からの発生磁界により飽和する必要がある。我々はこれらの要求を満足する材料として CoZrNb を選んだ。CoZrNb 薄膜のアニール前後の特性を Table 2 に示す。また、Fig. 3 に回転磁場中アニール後の 1 μm 厚の薄膜の透磁率の周波数特性を示す。

これらから、アニール後には非常に低い異方性磁界 (H_k) と飽和磁界 (H_c) が得られていることがわかる。また、透磁率も

Table 1 Parameters of the transformer chip

Number of turns of primary coil	Number of turns of secondary coil	Core width (mm)	Inner diameter of the core (mm)
61	91	0.5	1.6
61	91	0.5	2.1
81	121	0.5	2.6
61	91	1.0	1.6

Table 2 Parameters of the CoZrNb thin film

	H_c (A/m)		H_k (A/m)
	Easy axis direction	Hard axis direction	
As depo.	5.6	11.9	987
Annealed	3.2	8.8	133

Fig. 3 Permeability of a 1- μm -thick CoZrNb film.

たとえば 1 MHz において、どの方向でも 1000~2000 であり、若干ばらつきはあるがこの目的には十分な値である。

アニール温度による M - H ループの違いを Fig. 4 に示す。

素子作製には絶縁膜としてポリイミドを用いているが、これには含まれた磁性膜は、325 $^{\circ}\text{C}$ より高温のアニールを行うと、 M - H ループに大きなヒステリシスが現れた。ガラス基板上で

a) Annealing temperature $T_a = 300^{\circ}\text{C}$

b) Annealing temperature $T_a = 325^{\circ}\text{C}$

c) Annealing temperature $T_a = 350^{\circ}\text{C}$

Fig. 4 M - H loop dependence of the annealing temperature.

a) As sputtered ($\times 330$)

b) Annealed in rotating field ($\times 170$)

Fig. 5 Domain patterns of the CoZrNb film.

はこのような現象は見られないことから、この原因はポリイミドの熱ストレスによる応力に起因するものと考えられる。また、これ以下のアニール温度では異方性が残る結果となった⁹⁾。

Co アモルファスのアニール前後の状態を確認する目的でリングコアにパターンニングした CoZrNb 薄膜の SEM による Type II 磁区観察を行った結果を Fig. 5 に示す⁹⁾。

この結果は、回転磁場中アニールにより磁区は細断化されているが、全体として一方向を向いていることから、現状ではかなり等方化されているものの異方性は残っていることを示しており、アニール後でも方向によって透磁率が若干異なっていることと一致している。

2.4 トランスチップ作製プロセス

以下に電流センサのためのトランスチップ作製プロセスを示す⁴⁾。このプロセスは我々が平行して開発しているフラックススト磁気センサの作製プロセスに基づいたものである。

基板はガラス基板を用い、一次、二次コイルの下層は電解メッキでパターンニングした。絶縁膜にはポリイミドを用いた。この表面は磁性膜の特性維持と後のプロセスを容易にする目的で平坦化を行った。次に、CoZrNb のリングコアの成膜およびパターンニングを行う。ここでは、リフトオフによるパターンニングを採用した。さらにポリイミドで絶縁膜を形成し、コンタクトホールのエッチングを酸素ガスによる反応性イオンエッチン

Fig. 6 Photograph of the completed transformer chip.

グ(RIE)により行う。一次、二次コイルの上部配線層は、下部と同様に Cu のパターンメッキにより形成した。電極パッド以外はポリイミドで覆い、素子の保護膜とした。この後基板を回転磁場中アニールし、コアの磁気特性改善を行う。この際に温度を 325℃ に上げるため、上層ポリイミド絶縁膜の十分なキュアが行える。以上のプロセスによりトランスチップが完成する。

この後チップに切り、信号線コイルを実装すると電流センサの形になる。Fig. 6 に試作したトランスチップの例を示す。

3. 実験結果と考察

3.1 トランスの伝達効率および周波数特性

試作したトランスチップの回転磁場中アニール後の二次出力のキャリア信号周波数依存性を Fig. 7 に示す。今回の実験では、キャリア周波数は 1 MHz とし、3V_{pp} のサイン波を用いた。

この図からわかるように 1 MHz 程度のキャリア周波数の場合に最も伝達効率が良くなり、目標の 50% 以上を十分満足している。また、コア内径が小さい方が伝達効率は良い傾向があり、コア幅に関しては 1 mm のものと 0.5 mm のもので大きな差は見られなかった。1 MHz 以上の周波数で伝達効率が悪くなる原因は、トランスの挿入損失や、より高い周波数ではそ

Fig. 7 Transmission efficiency dependence of the carrier signal frequency.

Fig. 8 Secondary voltage decrement dependence of the applied load current.

れに加え L-C の共振の影響も考えられる。

3.2 電流センサの特性

Fig. 8 に試作した素子に信号線を手巻きにした電流センサの入力信号 (Load current) による二次出力の減衰の様子を示す。一次入力のカリヤ信号は 1 MHz-3V_{pp} のサイン波であり、電流センサは Table 1 に示したコア幅 0.5 mm のリングコア 3 種類で作製した。図中 + 印以外のサンプルの信号線巻き数は 20 である。

この図から、測定可能な電流値は、リングコアの内径や信号線の巻き数によって調節でき、コア内径が大きい素子の方が電流に対する感度が良いことがわかる。

測定する電流値が大きい場合には信号線の巻き数を減らすことで容易に対応できるので、この方法で数十 mA～数 A 程度までの電流センサとして使用できる。

Fig. 9 に、電流センサの温度特性を示す。この出力電圧は信号処理回路からの DC 出力である。素子は、内径 2.1 mm のリングコアで、信号線はチップの外側に 20 ターン手巻きした。なお、ここに示したデータは電流センサ全体を恒温槽に入れて収集した。

図からわかるように -20～100℃ の温度範囲において大きな変動は見られない。-20℃ と 100℃ では、信号電流が 0 のときの出力電圧はかなり異なっているが、電流値が大きくなるに従って出力値が安定する傾向にある。このセンサをフェールセーフに用いることを考えると、出力電圧がある基準値より大きいのか、小さいかの判断しか必要でないため、実際の使用には

Fig. 9 Output signal dependence of the temperature.

設定電流に若干の余裕を取れば、温度変化は問題にならない。

4. ま と め

可飽和型のリングコアを用いたフェールセーフ用途に適した電流センサを開発した。フォトファブリケーション技術を用い、チップサイズを 4 mm×4 mm に小型化した。

適応する信号電流値は数十 mA～数 A であり、コアサイズなどのパラメータおよび信号線の巻き数などにより調整できる。また、-20℃ から 100℃ の温度範囲での出力変動は、フェールセーフ用には問題のない範囲に設定できる。

文 献

- 1) 産業安全化センシング調査研究報告書 II (日本電子工業振興協会, 1996).
- 2) 務中達也・吉見賢一・中西博昭・飯島賢二・山田康晴: 日本応用磁気学会誌, 20, 561 (1996).
- 3) 藤山陽一・山田康晴・菊池弘昭・山口正洋・荒井賢一: 平成 9 年電気学会全国大会論文集, 2-304 (1997).
- 4) 藤山陽一, 山田康晴, 菊池弘明, 山口正洋, 荒井賢一: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-97-122 (1997).
- 5) Y. Shimada: *Phys. Stat. Sol. (a)*, 80, K87 (1983).
- 6) 品質保証のための信頼性管理便覧 (日本規格協会).
- 7) 榊 陽: 電気学会論文誌, 99-c(10), 243 (1979).
- 8) 菊池弘昭: 修士学位論文「磁気素子のマイクロ化研究」(東北大学工学研究科電気・通信工学, 1997).
- 9) 小山博之, 辻本浩章, 白江公輔: 日本応用磁気学会誌, 10, 327 (1986).

1997 年 10 月 27 日受理, 1998 年 2 月 2 日採録