高周波キャリア型薄膜磁界センサの検出磁界分解能

Magnetic Field Resolution of a High-Frequency Carrier-Type Thin-Film Magnetic Field Sensor

荒井賢一・大平祐史*・馬場 誠・竹澤昌晃・山口正洋・芳賀 昭*

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)

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

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

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

(1998 年 10 月 15 日受理, 1999 年 1 月 21 日採録)

This study reports the performance of a high-frequency carrier-type thin-film magnetic field sensor that uses impedance change at high frequencies. To obtain high resolution, we reduced environmental electromagnetic noise and used high resolution instruments. A voltage change ratio (similar to the MR ratio) of 26.7% was achieved when ac carrier frequency was 400MHz. The resolution of the sensor was dc 2×10^{-4} Oe and ac 8×10^{-5} Oe, respectively.

Key words: CoNbZr thin-film magnetic sensor, sensitivity, voltage change ratio, magnetic field resolution.

1. はじめに

近年, 磁性体に高周波電流を通電し, 外部から磁界を印加した場合に磁界の関数としてその透磁率及び表皮効果に変化し, それによって抵抗, インダクタンス及びインピーダンスが変化するという効果を利用したセンサの開発が積極的に試みられている^{1)~11)}. 例えば長さ 5 mm, 50 μ m 径のアモルファスワイヤにおける両端間電圧の振幅が, ワイヤの長さ方向の直流磁界に対して最大 50 % (0 ~ 100 Oe) の変化率を持ち, また単位磁界当たり最大約 50 mV/Oe 変化する磁界センサが報告されている³⁾. また, これに増幅回路や共振回路等を組み込むことにより交流磁界分解能約 10^{-6} Oe, 直流磁界分解能 10^{-6} Oe が得られるという報告例がある⁴⁾.

オンチップデバイス化による装着性の良さや組成, 構造面等の柔軟性が高いことから, 薄膜構造の研究も行われており^{5)~11)}, 長さ 1 mm, 幅 10 μ m の素子を持ちて, 同様に最大電圧変化率 50~60 % (0 ~ 80 Oe), 感度約 40 mV/Oe, 交流磁界分解能約 10^{-6} Oe が得られるという報告例がある⁵⁾.

これらに対して我々は短冊状に微細加工した CoNbZr 薄膜素子について, 磁気異方性や透磁率変化等の材料特性の面からそのインピーダンス特性を定量的に明らかにし⁸⁾, 外部印加磁界に対して大きなインピーダンス変化が得られることを確認しており, 素子構成や寸法の最適化等によりさらなる高感度化を検討している^{9)~11)}. 本稿では短冊状に微細加工した CoNbZr 薄膜センサ素子 (以下, センサ素子) についてセンサ出力の最大電圧変化率, 感度, 直流及

び交流の磁界分解能について検討を行ったので報告する.

2. 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直径 25 mm, 厚さ 3 μ m, の円形の CoNbZr アモルファス薄膜を作製した. 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, 1 時間の熱処理を行って一軸異方性を導入した. その後, イオンミリングによって短冊状に微細加工した. この際, 磁気特性が劣化する可能性が考えられるので, 微細加工時に再度熱処理を行った. 熱処理後の異方性磁界は約 5.5 Oe で素子の幅方向が磁化容易軸となるように付与した. センサ素子の寸法は膜厚 t が 3 μ m, 幅 w が 100 μ m, 長さ l が 5 mm である.

Fig. 1 Schematic view of the high-frequency carrier-type thin-film sensor.

Fig. 2 Measurement system of the sensor element.

この長手方向に高周波電流を通電し、幅方向に微小振幅の交流励磁が行われるようにした。これらのことを Fig. 1 に示す。これを Fig. 2 に示すようにマイクロストリップ線路の導体部分に直列に設け、線路入力端から高周波電流を印加した場合の線路終端の発生電圧をロックインアンプ (SRS SR844) 及びスペクトラムアナライザ (HP8561E) を用いて測定を行った。この際、キャリア発振源には最大出力 1.5 V のシグナルジェネレータ (HP8656B) を、センサ素子への外部印加磁界は磁気シールドで覆われたソレノイドコイルを用いた。また、センサ素子のインピーダンスは長手方向に外部直流磁界 H_{dc} を印加し、ネットワークアナライザ (HP8752A) を用いて反射法¹²⁾により測定した。

3. センサ素子

高周波キャリア型センサは、磁性膜の透磁率変化とそれに基づく表皮効果を利用するもので、外部印加磁界や周波数の関数として、そのインピーダンスが変化する。ここでは、磁界分解能の測定に用いた本センサ素子のインピーダンスの諸特性について測定を行った。

Fig. 3 に直流の外部印加磁界をパラメータとするセンサ素子のインピーダンスの周波数依存性を示す。約 500 MHz 以下で周波数の増加とともにインピーダンスは単調に増加する特性が得られ、これはその表皮効果の顕在化によるインピーダンスの増加によると考えられる。しかし、直流磁界強度によっては外部印加磁界 4 Oe 以上で周波数に対してインピーダンスは減少する場合があります、これは単純な表皮効果だけでは説明できないため、今後の検討課題である。また外部印加磁界に対するインピーダンスの変化の割合を見ると、5~6 Oe、300~600 MHz の範囲で単位磁界当たりに特に大きな変化が得られている。

Fig. 4 にこの 5~6 Oe の単位磁界当たりにおけるインピーダンス変化量の周波数依存性を示す。約 400~500 MHz で最も大きく変化しており、約 14 Ω /Oe が得られた。

Fig. 5 は、このうち 400 MHz に周波数を固定してインピーダンスの外部印加磁界依存性を測定した結果である。

Fig. 3 Dependence of the impedance on the carrier frequency.

約 3 Oe まで緩やかに増加し、その後急峻な増加から約 7 Oe で最大値を示した。この間にインピーダンスは約 40 Ω 変化しており、 $H_{dc} = 0$ の場合のインピーダンスを Z_0 とおくとインピーダンス変化量 $\Delta Z/Z_0$ は 130 % である。なお、このインピーダンスが最大となる磁界強度 7 Oe は、冒頭で述べた本センサ素子の異方性磁界強度 5.5 Oe に対して 1.5 Oe ほど大きい。これは異方性磁界付近でインピーダンスが最大になるという高周波キャリア型センサの動作原理⁸⁾だけでは説明できず、今後の検討課題である。

4. 最大電圧変化率及び感度

本センサは外部印加磁界変化を高周波キャリア電圧の振幅変化として取り出す。Fig. 6 は線路入力端のシグナルジェネレータから 400 MHz、200 mV の高周波キャリア電圧を印加した場合に、スペクトラムアナライザで検出される電圧の外部印加磁界依存性を測定した結果である。直列に接続されているセンサ素子とスペクトラムアナライザの入力抵抗で発振器出力を分圧するため、インピーダンス特性とは逆の傾向を示す。いま、この検出電圧の変化率を (1) 式のように定義する。

Fig. 4 Dependence of ΔZ on the carrier frequency.

Fig. 5 Dependence of the impedance on the external field at 400 (MHz).

Fig. 6 Dependence of the output voltage on the external field.

Table 1 Environmental electromagnetic noise and resolution limit of instrument ^{12)~15)}.

Noise source	Countermeasure
• Sensing signal	• Solenoid coil • Lead storage battery
• Sensor	• Magnetic shield case for sensor (-60 dB)
• Signal line	• Ferrite beads for signal line • To minimize connection
Noise and sensitivity limit	
• Amplifier ¹²⁾ (Gain : 24 dB)	• Noise figure 6.5 dB (~2 GHz) • Pre-amplifier noise 0.21 nV
• Signal generator ¹³⁾	• SSB phase noise -125 dBc/√Hz (400 MHz±50kHz) • Reliability <±1 dB (>123 MHz)
• Measuring instrument	• Lock-in amplifier (f = 140 MHz) ¹⁴⁾ Noise < 8 nV/√Hz Resolution 10 μV • Spectrum analyzer (f = 400 MHz) ¹⁵⁾ SSB phase noise -125 dBc/√Hz (400 MHz±50kHz) Resolution -145 dBm

$$\Delta V/V(0) [\%] = [V(H) - V(0)]/V(0) \times 100 \quad (1)$$

ここで $V(0)$ は外部印加磁界が零のときの検出電圧、 $V(H)$ は外部磁界が印加された状態での検出電圧である。この時 $V(H)$ として検出電圧が最も変化する 7.0 Oe の値を用いると最大約 26.7 % が得られた。これは従来の MR 効果と比べ 5 倍以上の値である。また単位磁界当たり最も大きな変化が得られる 4.5 ~ 5.5 Oe の範囲で感度約 14 mV/Oe が得られた。

5. 磁界分解能

5-1 高磁界分解能検出のための検討項目

高磁界分解能検出においては、本報告のような非常に簡単な測定システムにおいても多くの検討項目が必要になる。特に S/N の問題をいかに明確にしていくかが重要である。Table. 1 に我々が行った雑音の対策と測定器の仕様により決定される雑音レベルと分解能について列挙した。まず、磁界信号に含まれる雑音、つまり印加磁界の安定性については、ソレノイドコイルとその電流供給用に鉛蓄電

Fig. 7 Amplitude of the sensor output for a small dc field change, ΔH_{dc} , of 2×10^{-4} (Oe)

Fig. 8 Amplitude of the sensor output for a small ac field change.

池を使用することにより 10^{-5} Oe 以下の低雑音、高安定な磁界の作製を可能にした。またセンサ及び信号ラインに混入する可能性のある雑音については、センサ素子を -60 dB の磁気シールド内に設ける事や、配線の最短化、フェライトビーズによるケーブル全体のシールド等により雑音対策を施した。

また測定器の仕様、検出信号のレベル等によっては、測定器の雑音、分解能がシステムの測定限界に大きく依存することがある。同様に Table. 1 に、後述する検出信号のレベルに合わせてその雑音、分解能について表記した。例えばロックインアンプを用いた測定においては検出電圧のレベルや周波数を高く設定しているため、その測定器分解能に依存するところが大きく、仕様によると約 10 μV までの測定が望める。またスペクトラムアナライザの測定においては、キャリア供給用もしくは測定器のローカル発振源による安定性、特に SSB 位相雑音成分に依存するところが大きく -125 dBc/√Hz までの測定が望める。これらのもとに、直流磁界及び交流磁界の分解能について検討を行った。

5-2 直流磁界分解能

線路入力端からロックインアンプに混入するノイズ及びドリフトが小さい 140 MHz, 200 mV の高周波電圧を印加し, 線路終端の発生電圧をロックインアンプにより検出した. Fig. 7 は検出電圧に線形性を持たせるため約 5.5 Oe のバイアス磁界を加え, そこから微小に磁界をステップ的に変化させたときの様子をプロットしたものである. 横軸約 10 秒の測定のうち約 5 秒で約 2×10^{-4} Oe の磁界ステップを与えたとき, 約 15 μ V のセンサ出力が得られた. この時バックグラウンドノイズが同程度の大きさを示しており, 磁界分解能として 2×10^{-4} Oe が得られたことになる.

5-3 交流磁界分解能

線路入力端から 400 MHz, 200 mV の高周波電圧を印加し, 線路終端の発生電圧をスペクトラムアナライザにより検出した. この場合センサ素子を 50 kHz の低周波で交流励磁し, キャリアの振幅変化つまり AM 変調波をキャリア信号とその側波帯として検出した. この側波帯の振幅をいかに小さく検出できるかでその磁界分解能を測定する仕組みになっている. Fig. 8 のように交流磁界を小さくしていくと 8×10^{-5} Oe で SSB 位相雑音成分に相当するフロアノイズに埋もれたので, 磁界分解能としては 8×10^{-5} Oe が得られたことになる.

6. まとめ

本報告についてまとめる. 今回我々はセンサ素子を伝送線路上に直列に配置しただけの簡単な出力検出回路において, 雑音対策を施し以下のような特性を得た.

1. 最大電圧変化率は従来の MR 効果に比べ 5 倍以上の約 26.7 %を得た.
2. 発振器出力 200 mV の時, 感度約 14 mV/Oe が得られた.
3. 磁界分解能としては直流で 2×10^{-4} Oe, 交流 50 kHz で 8×10^{-5} Oe が得られた. 現在得られている分解能はロックインアンプ及びスペクトラムアナライザの分解能により決定されている.

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財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技術支援—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.

文献

- 1) 沼沢 茂, 村上 孝一, 北条 博行 : 日本応用磁気学会誌, 9, 263 (1985)
- 2) M. Yamaguchi, H. Matuki, K. I. Arai and K. Murakami : *IEEE Trans. Magn.*, **25**, 3824 (1989).
- 3) 武士田健一, 野田充宏, パニナ ラリサ, 吉田 史, 内山 剛, 毛利佳年雄 : 日本応用磁気学会誌, 18, 493 (1994)
- 4) 毛利佳年雄 : 日本応用磁気学会誌, 19, 847 (1995)
- 5) M. Senda and Y. Koshimoto : *IEEE Trans. Magn.*, **33**, 3379 (1997)
- 6) N. Jiang, K. Yamakawa, N. Honda and K. Ouchi : *J. Magn. Soc. Jpn.*, **21**, 491 (1997)
- 7) 森川健志, 西部祐司, 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)
- 8) 菊地弘昭, 竹澤昌晃, 山口正洋, 荒井賢一 : 日本応用磁気学会誌, 21, 789 (1997)
- 9) 若生直樹, 佐藤尚之, 阿部岩男, 竹澤昌晃, 大平祐史, 馬場 誠, 山口正洋, 荒井賢一, 芳賀 昭 : 電気学会マグネティクス研究会資料, MAG-98-102
- 10) 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 : 第 22 回日本応用磁気学会誌学術講演概要集, 21aA-9 (1998)
- 11) 竹澤昌晃, 山口正洋, 荒井賢一 : 第 22 回日本応用磁気学会誌学術講演概要集, 22aB-5 (1998)
- 12) K. I. Arai, M. Yamaguchi, and H. Ohzeki : *IEEE Trans. Magn.*, **28**, 2175 (1992).
- 13) HEWLETT PACKARD : Test & Measurement Catalogue, 237 (1998).
- 14) HEWLETT PACKARD : Test & Measurement Catalogue, 183 (1998).
- 15) Stanford Research Systems : SR844 RF Lock-in Amplifier Operating Manual and Programming Reference, v.
- 16) HEWLETT PACKARD : Test & Measurement Catalogue, 229 (1998).