

高周波キャリアを用いた位相検出型薄膜磁界センサの開発

Development of an Enhanced-Phase-Detection-Type Magnetic Field Sensor using a High-Frequency-Carrier

小澤哲也・横田周子・堀越直*・藪上信・石山和志・荒井賢一

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

*タカノ株式会社, 長野県上伊那郡宮田村 137 (〒399-4301)

T. Ozawa, C. Yokota, N. Horikoshi*, S. Yabukami, K. Ishiyama, and K. I. Arai

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

*Takano Co., Ltd, 137 Miyada-mura, Kamiina-gun, Nagano 399-4301, Japan

The impedance of a magnetic thin film changes when a magnetic field is applied. The high-frequency-carrier magnetic field sensor, also called a GMI sensor, employs this phenomenon as its principle. We directed our attention to the change in the phase characteristic, and measured the magnetic field by measuring the phase of the high-frequency-carrier magnetic field sensor as a phase difference. Although the high-frequency-carrier magnetic field sensor is optimized for impedance detection, it is not appropriate for measuring the magnetic field by detecting the phase difference. To improve its resolution and sensitivity in this respect, we developed an enhanced-phase-difference-detection-type magnetic field sensor. As a result, we obtained a best rate of change of 63.5 degree/Oe and a resolution of 2.6×10^{-7} Oe/Hz^{1/2}.

Key words: magneto-impedance, magnetic thin film, dual-mixer time-difference, microstrip line, phase difference, high-frequency-carrier magnetic field sensor, CoNbZr

1. はじめに

高周波キャリア型薄膜磁界センサは、磁性膜に磁界が加えられたときに磁性膜のインピーダンスが変化する現象、いわゆる磁気インピーダンス効果を原理とした高感度な磁界センサである。

われわれは高周波キャリア型薄膜磁界センサで生じるインピーダンス変化を利用した振幅変調を行ない、その周波数成分をスペクトラムアナライザで測定する方法を報告してきた¹⁾²⁾。しかし、スペクトラムアナライザで振幅変調を測定する方法は、高周波キャリアの位相ノイズの影響で DC から 1 kHz 程度に相当する低周波の磁界測定ができない。そこで、インピーダンス変化に伴って生じる位相成分に着目し、タイムインターバルカウンタで位相変化を測定するという DMTD³⁾⁴⁾方法の利用を提案して、直流磁界の測定が可能であるという報告をした⁵⁾。しかし、その報告で用いたセンサは、振幅変調用、即ちインピーダンス変化用に設計されたものであったので、位相変化が大きいものではない。また、前述の報告で用いた DMTD は、平均値の測定を行なう仕様のために直流磁界しか測定できなかった。

本論文では、位相変化による磁界測定感度の向上を目標として、位相変化率が大きい磁界センサ開発を行なった。その結果、従来型の高周波キャリア型薄膜磁界センサに比べて、1 桁以上高い 63.5 degree/Oe の位相変化率を得たので報告する。

2.1 実験方法

2.1 位相差検出型磁界センサの構造

高周波キャリア型薄膜磁界センサの原理である磁気インピーダンス効果は、外部磁界が加えられたことにより磁性体の透磁率が変化して表皮効果に変化することにより抵抗成分が変化する現象と、キャリアの通電で発生した磁界が透磁率の変化の影響を受けることによりインダクタンスの変化を生じる現象からなる。従来型の振幅変調用高周波キャリア型薄膜磁界センサは、加えられた磁界によりインピーダンスが大きくなることを重視しており、そのインピーダンス Z は、以下の式で表される。

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (1)$$

ここで、 R は通電部分の抵抗、 L はインダクタンス、 ω は角周波数である。抵抗成分とインダクタンス成分の両方がインピーダンス変化率に寄与することになるので、インピーダンス変化型磁界センサでは、印加磁界に対して両者がともに大きく変化するのが望ましい。一方、センサの位相 ϕ は次式で与えられる。

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \quad (2)$$

CoZrNb 磁性膜を直接高周波通電する従来型高周波キャリア型磁界センサでは、磁性膜の表皮効果を利用するためにインダクタンスの変化よりも抵抗成分の変化が大きくなり、位相変化率は必ずしも大きくなかった。位相変化型磁界センサを開発するにあたっては、前述した表皮効果を利用した抵抗成分の変化よりもむしろインダクタンスの変化を利用した方が大きな位相変化率が得られるものと考えられる。そこで、本研究では、センサの通電部分における抵抗成分の影響を抑制するために、キャリア通電用導体ラインの上に磁性膜を配置する構造を提案し、種々の検討を行った。試作した位相差検出型磁界センサの構造を Fig. 1 に示す。

位相差検出型磁界センサの通電部分は、厚さ 500 μm の両面銅板のフッ素樹脂基板 (銅板の厚さ 18 μm , 絶縁層となるフッ素樹脂の比誘電率は 5) にエッチングを施して、マイクロストリップラインとした。また、マイクロストリップラインの上に乗せる $\text{Co}_{85}\text{Ni}_{12}\text{bZr}_3$ 薄膜は、RF スパッタリングによりガラス基板上に成膜して熱処理温度 400°C で異方性を付与している。また、異方性を付与した後、CoNbZr 膜の表面にレジスト (ZPN1100) を塗布

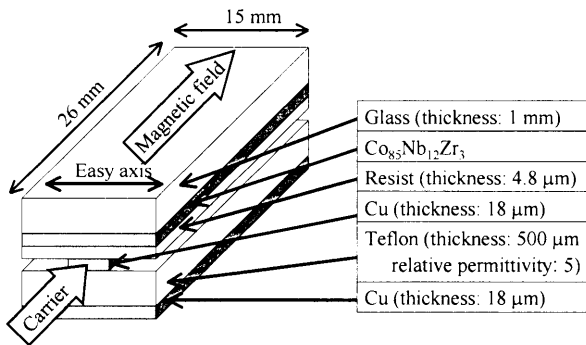


Fig. 1 Enhanced-phase-difference-detection-type magnetic field sensor.

(膜厚 $4.8 \mu\text{m}$)することで、マイクロストリップライン上に載せたときの絶縁を確保して、磁化容易軸をマイクロストリップラインと直角になるように配置して、これを位相変化型磁界センサとして用いた。

2.2 位相の測定方法

実験における実験回路の概略図を Fig. 2 に示す。位相差測定を行なうキャリアの周波数は 50 MHz から 1000 MHz であり、位相に相当する時間差は短く、高分解能での測定は難しい。本論文では DMTD (Dual-Mixer Time-Difference) により、位相変化型磁界センサを通過した後のキャリア周波数を低周波に変換して、その時間差を位相差に換算して位相変化の評価を行なった。

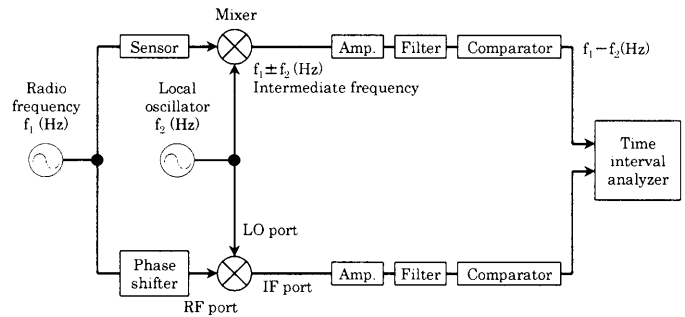
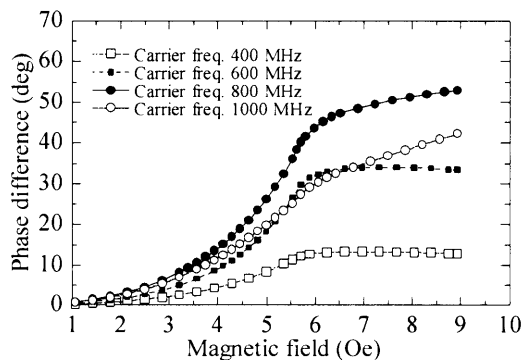


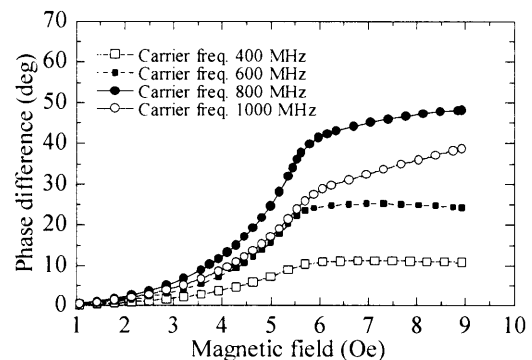
Fig. 2 Dual-mixer time-difference system.

2.3 実験手順

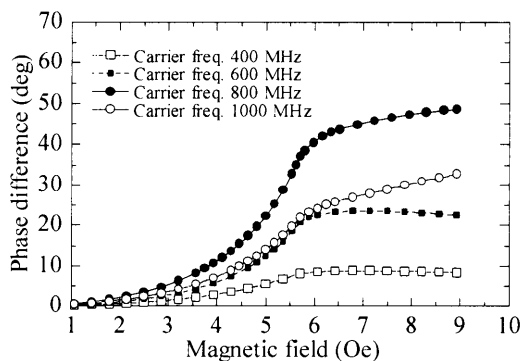
位相変化型磁界センサのマイクロストリップライン幅の依存性を調べるために、 CoNbZr 膜の膜厚を $4 \mu\text{m}$ に固定して、マイクロストリップラインの幅を 0.6 mm , 0.8 mm , 1.0 mm , 1.5 mm に変えたときの直流バイアス磁界と位相差特性を測定した。また、 CoNbZr 膜の膜厚依存性を調べるために、マイクロストリップラインの幅を 0.6 mm に固定して、 CoNbZr 膜の膜厚を $0.5 \mu\text{m}$ から $12 \mu\text{m}$ まで変化させたときの直流バイアス磁界と位相差特性を測定した。位相変化型磁界センサへ加える直流バイアス磁界は、ヘルムホルツコイルを使用して 0 から 9 Oe で変化させた。位相変化型磁界センサに通電させたキャリアの電力は $+8 \text{ dBm}$ であり、キャリアの周波数は 50 MHz から 1000 MHz まで変化させた。センサに通電させた高周波のキャリアは、DMTD 方法により低周波



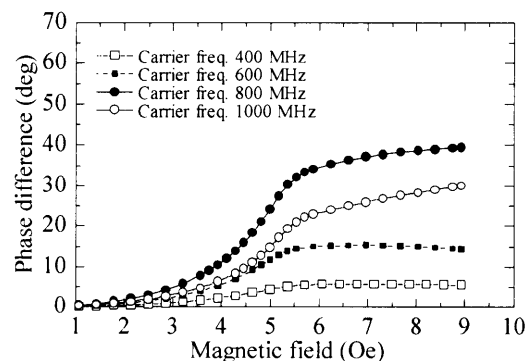
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3 Relationship of the magnetic field to the phase difference of the sensor: (a) microstrip line width 0.6 mm , (b) microstrip line width 0.8 mm , (c) microstrip line width 1.0 mm , and (d) microstrip line width 1.5 mm .

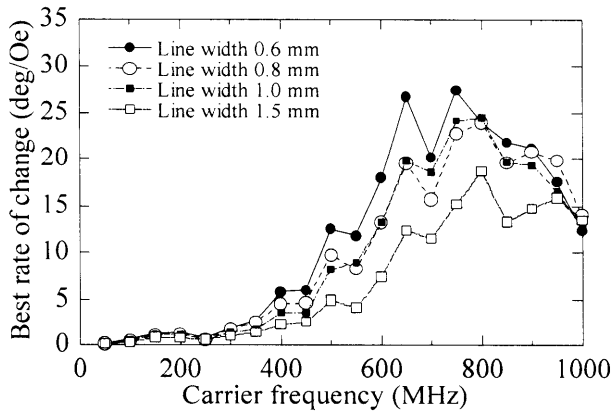


Fig. 4 Relationship of the carrier frequency to the best rate of change for several microstrip line widths.

(15 kHz 一定)へ変換して、 1.62×10^5 degree/Hz^{1/2}の分解能で位相差測定を行なった。実験は、磁気シールドルーム内で行なった。

3. 実験結果

3.1 マイクロストリップライン幅の依存性

CoNbZr膜の膜厚を4 μm に固定して、マイクロストリップラインの幅を0.6 mm, 0.8 mm, 1.0mm, 1.5mmに変えたときの加えた直流バイアス磁界と位相差特性の測定結果をFig. 3に示す。マイクロストリップラインの幅に無関係に、5.5 Oe付近の直流バイアス磁界で位相差が大きく変化することがわかる。この値は使用したCoNbZr膜の異方性磁界5.4 Oeに近い値である。Fig. 1で確認できるように位相変化型磁界センサに載せたCoNbZr膜の磁化容易軸は、キャリアの通電によって励磁される方向にある。しかし、キャリアとして使用されている高周波領域では磁化回転はほとんど生じない状態にある。ここで困難軸方向に直流バイアス磁界をかけると、磁化が容易軸方向から困難軸方向に傾いて磁化回転が生じやすくなる。そして異方性磁界に近い大きさの直流バイアス磁界を加えたときに磁化回転が最も生じやすくなるので、バイアス磁界に対する透磁率の変化率は大きくなり、インダクタンスの変化率も大きくなる。したがって、異方性磁界の値と等しい直流バイアス磁界を加えたときに位相変化率が大きくなっていると考えられる。

Fig. 3における位相変化率 $\Delta\phi/\Delta H$ の最大値を周波数に対してプロットした図をFig. 4に示す。位相変化率は、どのマイクロストリップラインの幅に対しても、概ねキャリア周波数が650 MHzから800 MHzであるときに極大値をとることがわかる。これは、使用したCoNbZr膜の共鳴周波数であり、共鳴が生じるとインダクタンスが急激に変化するので、位相変化率が大きくなっていると考えられる。また、マイクロストリップライン幅が最も細い0.6 mm時に全体的に大きな位相変化率を得られることがわかった。これは幅が狭いマイクロストリップラインのインダクタンス成分は大きいので、インダクタンスの変化率も大きくなり、結果として位相変化率を大きくするためである。

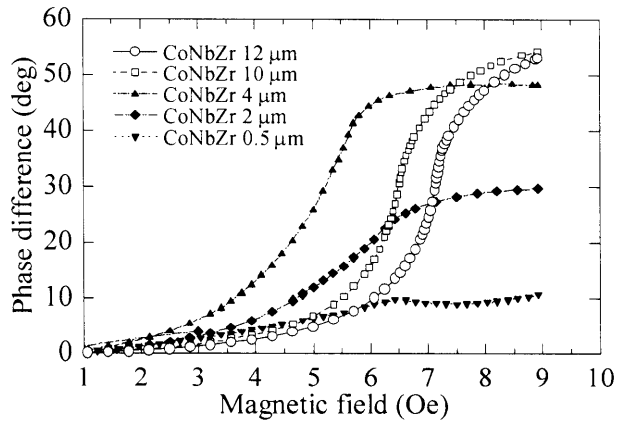


Fig. 5 Relationship of the magnetic field to the phase difference of the sensor for several CoNbZr thicknesses at a carrier frequency of 650 MHz.

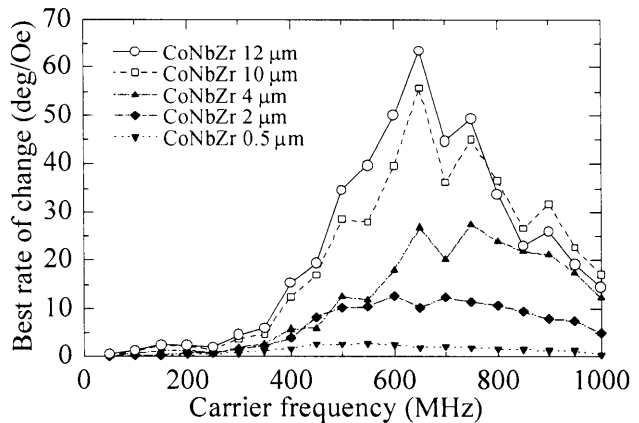


Fig. 6 Relationship of the carrier frequency to the best rate of change for several CoNbZr thicknesses.

3.2 CoNbZr膜の膜厚依存性

マイクロストリップライン幅を0.6 mmに固定して、CoNbZr膜の膜厚を0.5 μm から12 μm に変化させたときの直流バイアス磁界と位相差特性の測定結果のうち、キャリアが650 MHzの場合のみについてまとめたものをFig. 5に示す。また、最大の位相変化率についてまとめた結果をFig. 6に示す。Fig. 5とFig. 6より膜厚を大きくしていくと、全体的に位相変化率が大きくなっていることがわかる。またFig. 6より得られた最大の位相変化率は、マイクロストリップライン幅0.6mm, CoNbZr膜の膜厚12 μm , キャリア周波数650 MHzの条件における63.5 degree/Oeだった。Fig. 5において、CoNbZr膜の膜厚が0.5 μm から4 μm までは位相変化率が最大となる直流バイアス磁界の値が使用したCoNbZr膜の異方性磁界に等しい5.5 Oe程度であるのに対して、10 μm と12 μm の場合では、膜厚が大きくなるほど使用したCoNbZr膜の異方性磁界(10 μm は5.2 Oe, 12 μm は5.1 Oe)よりも最大の位相変化率をとる直流バイアス磁界の値が大きくなっている。これは膜厚が大きくなると反磁界の影響が大きくなるためであり、より大きなバイアス磁界が必要になるためである。

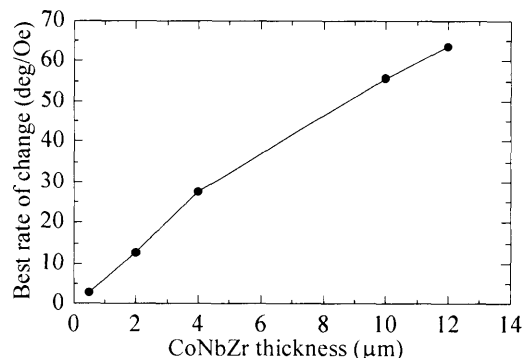


Fig. 7 Relationship of the CoNbZr thickness to the best rate of change.

また、各 CoNbZr 膜の膜厚と位相変化率の極大値の関係についてまとめた結果を Fig. 7 に示す。膜厚が大きくなると、位相変化率は若干の飽和の傾向がある。膜厚が大きくなると位相変化が大きくなる原因は、厚膜化によって渦電流損の変化が大きくなり、位相変化を促進しているためである。

3.3 磁界測定分解能

本論文における位相変化型磁界センサの最大の位相変化率は、63.5 degree/Oe であった。使用した位相測定装置のシステムノイズは 1.62×10^5 degree/Hz^{1/2} であるので、磁界測定の分解能は、 2.6×10^7 Oe/Hz^{1/2} と換算できる。但し、ここで用いている単位の Hz は、連続位相測定時のサンプルレートである。

更に位相変化率を大きくして磁界測定分解能を向上させるためには、CoNbZr 膜の膜厚を大きくすることが効果的であることがわかったが、本論文で既に 12 μm まで成膜しており、スパッタリングの原理を考慮すると、これ以上の膜厚を成膜することは現実的ではない。仮に膜厚を大きく成膜できたとしても、CoNbZr 膜の軟磁気特性が大きく変化して透磁率の悪化を招く可能性があり、これ以上に膜厚を大きくすることは非合理的であると考えられる。

本論文ではマイクロストリップラインの上に CoNbZr 膜を載せる構造を持っているが、この構造ではキャリアの発生した高周波磁界とグランド面に流れる電流によって、マイクロストリップラインで発生する磁界は殆ど打ち消しあい、CoNbZr 膜へ与える磁界の大きさは僅かな量と考えている。本論文の成果よりマイクロストリップラインに CoNbZr 膜を載せた構造の有用性が見出せたので、今後は薄膜作成プロセスにより通電部分と CoNbZr 膜との

距離を極力短くすれば、更に位相変化率が大きくなることが予想されている。

4. まとめ

通電部分の抵抗成分の変化を抑えてインダクタンス成分の変化を促進する目的でマイクロストリップライン上に CoNbZr 膜を載せた位相検出型磁界センサを開発した。

マイクロストリップラインの幅を 0.6 mm から 1.5 mm まで変化させて比較した結果、最も細い 0.6 mm で最大の位相変化率を得た。また、CoNbZr 膜の膜厚を 0.5 μm から 12 μm まで変化させた結果、最も大きな膜厚の 12 μm 使用時に最大の位相変化率を得ることができた。

本論文で開発した位相検出型磁界センサは、最大で 63.5 degree/Oe の位相変化率を得た。この位相変化率は、測定時の S/N 比を考慮すると、 2.6×10^7 Oe/Hz^{1/2} の磁界測定分解能に匹敵する。

謝辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金基盤研究 A(採択番号 16206041)により行なったものである。また東北大学 21 世紀 COE プログラム「新世代情報エレクトロニクスシステムの構築」により行なったものである。

Reference

- 1) S. Yabukami, T. Suzuki, N. Ajiro, H. Kikuchi, M. Yamaguchi, and K.I. Arai, IEEE Trans. Magn., vol. 37, p2019-2021, 2001.
- 2) H. Mawatari, H. Kikuchi, S. Yabukami, M. Yamaguchi, and K.I. Arai, J. Magn. Soc. Jpn., vol. 27, p414-418, 2003.
- 3) Allan, D. W.: "The measurement of frequency and frequency stability of precision oscillators", NBS Tech. Note 699, May 1975.
- 4) Allan, D. W. and Daams, H.: "Picosecond time difference measurement system", Proc. 29th Annu. Symp. Frequency Control, pp.404-411, May 1975.
- 5) T. Ozawa, H. Mawatari, Y. Murayama, S. Yabukami, K.I. Arai, Y. Hanado, and M. Imae, J. Magn. Soc. Jpn., vol. 28, p718-721, 2004.

2004 年 10 月 5 日受理 2005 年 4 月 15 日採録