不連続的特性を有した高周波キャリア型磁界センサにおける インピーダンス特性の温度変化

Variation of Non-Linear Impedance as a Function of Temperature for High-Frequency Carrier-Type Magnetic Field Sensors

> 中居 倫夫・阿部 宏之・荒井 賢一* 宮城県産業技術総合センター, 仙台市泉区明通 2-2 (〒981-3206) *東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

T. Nakai, H. Abe, and K. I. Arai*

Industrial Technology Institute, Miyagi Prefectural Government, 2-2 Akedori, Izumi-ku, Sendai 981-3206, Japan *Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan

Variation of non-linear impedance as a function of circumferential temperature is reported. Non-linear impedance occurs in rectangular strips of thin-film soft magnetic material with a width of tens of microns and with inclined stripe domains. Sensors with different studied with circumferential dimensions were temperatures ranging from $\ensuremath{^{-}20^\circ\!C}$ to 70°C. It was found that the change in the non-linear impedance profile had the same tendency, irrespective of the impedance profile. As the circumferential temperature increases the width of magnetic field between the non-linear impedances, these happen in case of increasing or decreasing the magnetic field, narrows. A method of compensating for the temperature drift of the magnetic field in which non-linear impedance appears is proposed. It is shown that this method compensates well for the temperature drift within the range of measurement error.

Key words: thin film magnetic domain structure, magnetic anisotropy, impedance, magnetic field sensor, temperature drift

1. はじめに

近年,非磁性体ワイヤ表面にミクロンオーダーの磁性膜 を形成した際,ワイヤの軸方向に印加する外部磁界とイン ピーダンスの関係に,非線形な特性が発生することが報告 されている¹⁾²⁾.ここで言う非線形な特性とは,ある外部磁 界強度において,インピーダンスに不連続的な大きな変化 を発生する特性である.この特性は,磁性膜の磁気異方性 がワイヤ軸方向に対し高次の項を有し,かつ,一次の異方 性定数が負の値を有する場合において,ワイヤの軸方向磁 界が外部から印加された際に発生することが解析的に示さ れている¹⁾.この際,磁気モーメントの方向が正の軸方向 から門周方向に転移しさらに負の軸方向へと転移すること で非線形的なインピーダンス特性が発生しうることが示さ れている.

著者らは、矩形状に形成された薄膜磁性体素子に、素子 幅方向から薄膜面内で傾斜した方向に磁化容易軸を形成 し、この際に生じる梯子状磁壁の傾斜角度を所定の角度範 用に制御することで不連続的な外部磁界とインピーダンスの関係を実現している³⁾⁴⁾. また,この不連続的特性が,傾斜した梯子状磁区構造から単磁区構造への相転移とほぼ同時に発生することが報告されている³⁾.

本報告では、この不連続的なインピーダンス特性を有す る 高 周 波 キ ャ リ ア 型 磁 界 セ ン サ (Giant Magnetoimpedance: GMI センサとも表現される) におけ るインピーダンス特性温度変化について、実験的に得られ た結果を報告する. さらに、これらの結果を踏まえて、イ ンピーダンスがステップ的に変化するステップ点を用いて 外部磁界検出を行う 5際に有効な温度補償の方法を提案す る.

2. 実験方法

Fig. 1 に、本検討で試作した素子の形状を示す.素子は、 RF スパッタで形成された CossNb12Zr3 薄膜をリフトオフ 法を用いて矩形状に成形したものを中心導体として、コプ レーナ形状になるようにその両側に Cu 薄膜で形成された GND ラインを配置した構造となっている.素子インピーダ ンスを評価するために、コプレーナラインの一端は短絡さ れ、もう一端には電極パッドを形成して高周波プローブ電 極との接点とした.本検討においては、矩形状 CoNbZr の 幅は、20 μ m とし、長さは 2000 μ m および 3000 μ m とし た.膜厚は、各々、2.7 μ m および 3.2 μ m とした.なお、 Fig. 1 に示す3素子は、本報告で評価した素子と同一基板 上に作製された素子であり、素子幅条件が異なった3種類 の素子を示している.本検討では、素子幅条件にかかわら ず、コプレーナ線路の信号線である磁性体と GND ライン の間隔は 20 μ m 一定とした.素子作製方法をFig. 2 に示す.

Fig. 3 は、傾斜磁区構造の模式図である。矩形状に成形 された CoNbZr 薄膜の短軸方向を幅方向として、この幅方 向から傾斜した角度を有する梯子状磁壁を傾斜磁区構造と 呼び、磁壁傾斜角度を図のように定義する。

磁壁傾斜角度は、矩形状に成形された CoNbZr 薄膜に誘 起する磁気異方性の方向で制御できる。磁気異方性の方向 は、真空磁界中熱処理で印加する磁界方向と矩形状に成形



Fig. 1 View of a fabricated sensor element.

CossNb12Zr3 magnetic thin film

RF sputter deposition (Ar atmosphere) Microfabricated by the lift-off method

Magnetic field annealing

Rotational field annealing: 673 K, 500 Oe, 2 hours (< 10⁻⁴ Pa), 60 rpm Static field annealing:

673 K, 500 Oe, 1 hour (< 10⁻⁴ Pa)

Cu electrode

RF sputter deposition (Ar atmosphere) Microfabricated by the lift-off method Fig. 2 Fabrication process for the element.



された CoNbZr 薄膜内部,特に素子幅方向に発生する反磁 界の二つを考慮することで制御可能であるの.本検討では, 熱処理磁界強度を 500 Oe,熱処理磁界の印加方向を素子幅 方向から1°傾斜させた方向とした.

素子の高周波インピーダンスと外部磁界の関係を測定す る測定装置は、ネットワークアナライザ(アジレント社: HP4396B)と高周波プローブ(GGB 社: ピコプローブ 40A-GSG)を用い S11 の測定から素子インビーダンスを換 算する装置を用いた ⁷⁾. 本検討では、この測定装置の測定 部(素子固定部、ウエハプローブおよびヘルムホルツコイ ル)を恒温恒湿槽(タバイエスペック社: PSL・2KPH)の 内部に設置して素子インピーダンスの温度変化を測定し



Fig. 4 Equipment for measuring the temperature variation of the sensor impedance.

た.装置の外観図を、Fig. 4 に示す.なお、本実験でイン ピーダンス測定の際、素子に通電した高周波電流の周波数 は50 MHz とした.外部磁界は、恒温恒湿槽内部に設置す るヘルムホルツコイルの抵抗温度変化を考慮して、定電流 制御とした.本コイルに電流を供給する電流源は、直流電 流源(ケスレー社:ソースメーター2400型)を使用した. 素子インビーダンスと外部磁界の関係は、素子に印加する 外部磁界を連続的に増加減少させながら測定した.インビ ーダンス測定の際,外部磁界は、0.02 Oe/秒の変化速度で、 任意に定めた磁界振幅の負の値から正の値まで増加させ、 引き続き、正の値から負の値に減少させた.

磁区構造の観察には、カー効果顕微鏡(ネオアーク社: BH-780)を使用した。カー効果顕微鏡では、観察試料に直 流磁界を印加するためにヘルムホルツコイルを使用した。 なお、素子インピーダンスの測定と磁区観察は、個別に行 なわれ、お互いの測定値は、外部磁界強度を用いて対応を 取った。

3. 実験結果

Fig. 5 に、膜厚 2.7 μm、素子長 2000 μm の CoNbZr 薄 膜素子における磁区構造を示す.

Fig. 6は、Fig. 5に磁区構造を示した素子における外部 磁界とインピーダンスの関係の実測値である. 図中 100 mOeの矢印は、Fig. 5に示す磁区構造の観察点を示してい る. 図に示されるような傾斜磁区構造は、素子インピーダ ンスが不連続点を介して急激に低下した領域で観測される ことが報告されている³⁾. また、傾斜磁区構造は、外部磁 界変化に対し、傾斜角度がほぼ一定で、ストライプ状磁区 の幅が変化することも示されている⁵⁾. これらの知見に基

日本応用磁気学会誌 Vol. 29, No. 6, 2005

づき、本報告では Fig. 5 に示す磁区構造を代表値として示 した.本測定では、外部磁界の走引速度に対し、ネットワ ークアナライザの測定速度を確保するために、測定の平均 化処理を行わず、さらに、素子インピーダンスの抵抗成分 のみをサンプリングした.このような測定方法に起因して、 Fig. 6 における測定結果では、測定誤差のために測定値に 鋸歯状の小さな増減が観測されている.しかしながら、不 連続的なインピーダンス変化は、測定誤差よりも明らかに



Fig. 5 Magnetic domain structure of an element with a thickness of 2.7 μ m and a length of 2000 μ m.



Fig. 6 Variation of the sensor impedance as a function of the alternating external magnetic field (with the domain shown in Fig. 5).

Fig. 7 Magnetic domain structure of an element with a thickness of 3.2 μm and a length of 3000 μm.



Fig. 8 Variation of the sensor impedance as a function of the alternating external magnetic field (with the domain as shown in Fig. 7).

大きな変化が発生していることがわかる. 図の 1-D は,外部磁界増加時にインピーダンスが不連続的に減少する点, 1-U は,外部磁界増加時にインピーダンスが不連続的に増加する点を示し,2-D は,外部磁界減少時にインピーダンスが不連続的に減少する点,2-U は,外部磁界減少時にインピーダンスが不連続的に増加する点を示している.

Fig. 7 に, 膜厚 3.2 µm, 素子長 3000 µm の CoNbZr 薄 膜素子における磁区構造を示す.

Fig. 8は, Fig. 7に磁区構造を示した素子における外部 磁界とインピーダンスの関係の実測値である. 図中 200 mOe の矢印は,磁区構造の観察点を示している. 図中の 1-D, 1-U, 2-D, 2-Uの記号の意味は, Fig. 6と同じく, 外部磁界増加時と減少時に発生する不連続的インピーダン ス変化の発生点と変化方向を示している. 本素子において は,素子幅が 20 µm と一定でありながら, Fig. 5 の素子と 比較して膜厚が大きいため,磁界中熱処理時に大きな反磁 界が発生し,結果として磁性薄膜中の実効磁界が小さくな ると推測できる. これに起因して,磁性膜に誘導される磁 気異方性の異方性分散が大きくなると考えられる.



Fig. 9 Dependence of the magnetic field of impedance step shown in Fig. 6 on the circumferential temperature.



Fig. 10 Dependence of the magnetic field of impedance step shown in Fig. 8 on the circumferential temperature.

これが原因となる磁区構造の乱れが、Fig. 7 に示す不明確 なストライプ状磁区構造の原因であると考えられる.しか しながら、部分的ではあるが、明確な傾斜磁区構造が観測 され、この傾斜磁区構造は、素子インピーダンスが不連続 点を介してステップ状に減少した磁界で観測された.

以上に示した、不連続的特性を有する高周波キャリア型 磁界センサにおける、外部磁界とインピーダンスの関係の 温度変化を測定した結果を Fig. 9, Fig. 10 に示す. これら の図は、不連続的にインピーダンスが変化するインピーダ ンス不連続点について、この不連続点が発生する外部磁界 の温度変化を測定したものである.本図から、外部磁界増 加時のインピーダンス減少点(1·D)とインピーダンス増 加点(1·U)の間隔、および、外部磁界減少時のインピー ダンス減少点(2·D)とインピーダンス増加点(2·U)の間 隔が、各々、温度増加に伴い、狭くなっていくことがわか った.

4. 考察

不連続的なインピーダンス特性を有する高周波キャリア 型磁界センサを磁界検出に応用する際に、特性の温度変化 が大きい状況では、センサ駆動回路による温度補償が必要 になり、実用化の際にコスト高となるデメリットを有する. そこで、本報告で明らかにしたインピーダンス不連続点の 温度変化の対称性を用いて温度補償を行う方法を提案する.

Fig. 9, Fig. 10において,外部磁界増加時にインピーダ ンスが不連続的に増加する点 1-U(この際の外部磁界 Hi-u) と外部磁界減少時にインピーダンスが不連続的に増加する 点 2-U(この際の外部磁界 H2-u)に注目すると,これらの不 連続点の発生する磁界強度の温度変化は,外部磁界増加時 と減少時で対称的な温度ドリフトを示す.そこで,これら 不連続点の相加平均を演算することでセンサ特性の温度ド リフトを容易に補償できると考えられる.式(1)に本温 度補償方法の演算式を示す.ここで,Hest は,演算式によ り推定された外部磁界である.



Fig. 11 Output of the impedance-step sensor with compensation for temperature drift.

$$H_{est} = \frac{H_{1-U} + H_{2-U}}{2}$$
 (1)

Fig. 11 に、本報告で不連続点の温度変化を示した2種類 の素子について、外部磁界増加時と減少時に生じるインビ ーダンス増加不連続点の発生磁界の相加平均値の温度変化 を示す.図には、Fig.9に示す特性に対応したプロットと、 Fig. 10 に対応したプロットを同時に示している. これらの 結果から、本報告で提案する方法は、・20℃から 70℃の温 度範囲で、各々のプロットについて最大値と最小値の幅と して、20 mOe 以下となることがわかった. この 20 mOe という値は、不連続点の発生ばらつきに相当する値である ため、本図の曲線は測定誤差の範囲内であり、従って、Fig. 11 に示す本報告の提案する演算方法による出力値の温度 ドリフトは測定誤差範囲以内であると言える。なお、本測 定において、地磁気等の環境磁界は、遮蔽されていない. 従って, Fig. 11 における結果は, 環境磁界が重畳した測定 結果である、本測定において、本提案の演算方法に基づく 結果が示す,-110±15 mOe という値は,測定場所における 環境磁界とほぼ一致する.

Fig. 9, Fig. 10 に示される温度特性となる理由として、 温度上昇に伴う磁気モーメントの熱運動増加に起因する実 効的飽和磁化の低下が考えられる. Fig. 12 の模式図に示さ れるように、センサ素子の長軸方向に強い磁界が印加され 磁気モーメントの方向が揃った状態から外部磁界を減少さ せた場合,磁化容易軸の効果により磁気モーメントは、素 子幅方向に向く.この過程で、素子幅方向の端面には、磁 極が生じ、エネルギー的に高い状態になる.この高いエネ ルギー状態のエネルギーを下げるために、ストライプ状磁 区構造が生じる.このストライプ状磁区構造は、Fig. 8 の ように逆方向の磁界が印加された状態で発生する場合があ ることが示されているが、これは、形状異方性の影響によ るものと推測できる.この単磁区状態からストライプ状磁 区構造への転位は、素子幅方向の端面に生じる磁極の強さ、 すなわち実効的飽和磁化の大きさに影響される.Fig. 12 に



Fig. 12 Estimated domain structure as a function of external magnetic field.

おいて、+-の符号は、素子端部に生じる磁極を表してい る.ここで、実効的飽和磁化が大きな場合(低温時)には、 ストライプ状磁区構造に転位しやすく、従って、ストライ プ状磁区構造に起因する素子インピーダンスが一段低い領 域幅が広くなる. 逆に, 実効的飽和磁化が小さい場合(高 温時)には,ストライプ状磁区構造に転位し難く,素子イ ンピーダンスが一段低い領域幅が狭くなる.本考察に基づ くと、本報告の現象は、その温度変化の対称性により、 式 (1) に示す演算式で温度補償が可能であることが示され る.一方,温度変化に対して磁区構造の転位が磁壁のピン ニングに起因すると説明した場合には、温度が高くなると ボルツマンエネルギーによりピンニングが外れ易くなると 考えられ、インピーダンス不連続点は、外部磁界変化の方 向に対し,インピーダンス減少点,増加点いずれの場合も 手前側に移動すると考えられる. 従って, Fig. 9, Fig. 10 に示す変化傾向を説明できない.以上の考察は、あくまで 定性的な考察であり、今後、素子端部における磁区構造を 解明し、定量的な解析を行う必要がある.

5. まとめ

不連続的なインピーダンス特性を有する高周波キャリア 型磁界センサの、-20℃から 70℃の温度範囲における温度 変化を明らかにした.すなわち、外部磁界を周期的に増加 減少させながら素子インピーダンスを測定した場合、イン ピーダンス不連続点で挟まれたインピーダンスが低い領域 において、温度を増加させるにつれて、この低インピーダ ンスの領域幅が狭くなることがわかった.さらに、ここで 明らかにした温度変化に基づいて、外部磁界増加時と減少 時に生じる特性温度変化の対称性を利用して温度ドリフト を補償する演算方法を提案し、その有効性を示した.

6. 謝辞

本研究の一部は,科学技術振興機構の宮城県地域結集型 共同研究事業「生体機能再建・生活支援技術一機能的電気 刺激システムを中核とする最先端リハ・福祉システムの構 築と新産業の創出一」によるものである.さらに,本研究 の一部は,科学技術振興機構研究成果活用プラザ宮城の「「 能性試験によるものである.

References

- G.V.Kurlyandskaya, H.Yakabchuk, E.Kisker, N.G.Bebenin, H.Garcia-Miquel, M.Vazquez and V.O.Vaskovskiy, J. Appl. Phys., Vol. 90, No.12, pp.6280-6286(2001).
- G.V.Kurlyandskaya, A.Garcia-Arribas and J.M.Barandiaran, Sensors and Actuators A, Vol. 106, pp.234-239(2003).
- T.Nakai, H.Abe and K.I.Arai, J. Physics of Metals and Metallography, (2005 in press).
- T.Nakai, H.Abe, S.Yabukami and K.I.Arai, J. Magn. Magn. Mat., (2005 in press).
- 5) T.Nakai, H.Abe, N.Hoshi, H.Suzuki and K.I.Arai, The Papers of Technical Meeting on Magnetics, IEE Japan, MAG-04-248,(2004).
- T.Nakai, H.Abe, S.Yabkami, M.Yamaguchi and K.I.Arai, J. Magn. Soc. Jpn. Vol. 27, pp.832-838(2003).
- 7) T.Nakai, H.Abe, M.Yamaguchi, S.Yabkami, H.Kikuchi and K.I.Arai, J. Magn. Soc. Jpn. Vol. 27, pp.419-424(2003).

2005年1月11日受理, 2005年4月15日採録