

有限要素法解析を用いたマイクロストリップ線路型プローブによる 高周波透磁率最適化

今井優希¹, 沖田和彦², 薮上信^{1,2}
(¹ 東北大学, ² Tohoku-TMIT 株式会社)

Simultaneous Measurement of Permeability and Permittivity Using a Microstrip Line-Type Probe

Y. Imai, K. Okita, S. Yabukami
(¹ Tohoku University, ² Tohoku-TMIT, Ltd.)

1. はじめに

マイクロストリップ線路型プローブと有限要素法電磁解析を用いて、厚膜磁性材料の高周波透磁率を評価し、反磁界による測定誤差を抑制できた。

2. 計測方法

Fig. 1 にプローブおよびサンプルの配置の概要図を示す。市販のノイズ抑制体シート(トーキン製 NSS NSS(EFS-02)) をマイクロストリップ線路型プローブ [1] に PET フィルム(約 250mm 厚)を介して近接配置し、電磁石を用いて強磁界(2 T)中でキャリブレーションし、磁界 0 にして、透磁率の寄与分のみ反映された透過係数 S_{21} を得た。 S_{21} から (1) 式により磁性体の等価的インピーダンス Z を求めた。

$$Z = R + j\omega L = 2Z_0 \frac{(1-S_{21})}{S_{21}} \quad (1)$$

ただし Z_0 は特性インピーダンスである。2次元有限要素法 (Ansoft Maxwell 2D) を用いて磁性体の比透磁率とインダクタンスの関係を求め、実数部透磁率は(1)式から測定されたインダクタンス L を満たすように最適化した。透磁率虚数部は(1)を用いて $\mu_r''/\mu_r' = R/X$ を仮定して換算した。

3. 計測結果および考察

Fig. 2 はトーキン製ノイズ抑制シート(EFS-02, 10 mm×2 mm, 厚み 200 μ m) の透磁率測定結果を示したものである。実線は本手法による測定結果であり、破線は Nicolson-Ross-Wier 法 [2] による測定結果 (サンプルサイズは外形 4 mm のトロイダルサンプル) の評価結果を示している。4 GHz 付近で強磁性共鳴により虚数部が最大値になるところを含めて、両者の測定結果はほぼ対応した。筆者らのマイクロストリップ線路型プローブを用いた透磁率換算では、磁性体へ厚み方向の磁界成分により反磁界により強磁性共鳴が 10 GHz 程度へシフトし、材料固有の透磁率評価が困難であった [3]。一方、本手法では有限要素法解析の中に、磁性体の反磁界の影響が加味された状態で透磁率とインダクタンスの関係が出力されるため、反磁界による誤差が低減でき、材料固有の高周波透磁率が評価できたと考えられる。

謝辞

透磁率評価にご協力いただいた東北大学齊藤伸教授、岩動大樹様に感謝します。本研究の一部は JST 大学発新産業創出基金事業可能性検証 (JPMJSF23C4) により実施した。

参考文献

- [1] S. Yabukami et. al., *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, 6100305(2022).
- [2] A. M. Nicolson et al., *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 19, 377 (1970).
- [3] K. Takagi et al., *Journal of Magnetics Society of Japan*, vol. 46, 102 (2022).

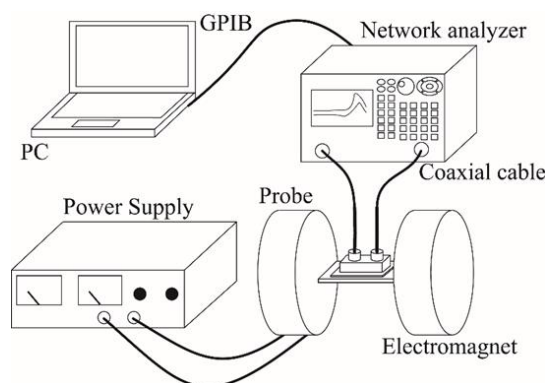


Fig. 1 Schematic of measurement system.

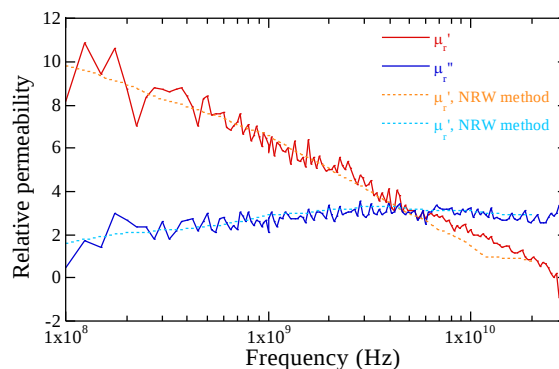


Fig. 2 Relative permittivity of NiZn ferrite sheet.

平行二本線路を用いた厚膜磁性体の透磁率測定に関する反磁界補正

益子朝日¹, 藪上信^{1,2,3}, 沖田和彦³

(¹ 東北大学 大学院工学研究科, ² 東北大学 大学院医工学研究科, ³ Tohoku-TMIT 株式会社)

Parallel line type permeameter for thick magnetic material to reduce the error of demagnetizing field

A. Mashiko¹, S. Yabukami², K. Okita³

(¹ Graduate School of Engineering Tohoku University, ² Graduate School of Biomedical Engineering Tohoku University, ³ Tohoku-TMIT, Ltd)

1. はじめに

第5世代移動体通信システムやスピントロニクスデバイスなどの利用により, 磁性材料や磁性薄膜の高周波透磁率を測定する必要性が高まっている. 高周波で使用されるフェライトなどのノイズ抑制体や電波吸収体は, 100 μm 以上の厚い試料が多い. このような厚い磁性材料評価では磁界印加時に発生する, 反磁界の誤差を抑制する必要がある[1][2]. 本稿では厚み方向の磁界成分を抑制する構造として, 平行二本線路による透磁率測定プローブを試作し, 反磁界による誤差を低減できたので, 報告する.

2. 実験方法

プローブはFig. 1のようにプリント基板(中興化成工業 CGK-500, 厚さ 0.5 mm, 比誘電率 5)に長方形の穴を切り取り, Tokin 製 NiZn フェライト (3 mm $\times$ 3 mm, 厚み 0.5 mm) をプリント基板の穴に入れ, 直径 2 mm, 長さ 3 mm の2本の銅線で挟み, 銅線と SMA コネクタを接続することで, プローブを作製した. プローブとネットワーク・アナライザを同軸ケーブルで接続し, 磁性体を外部強磁界 (2 T) でキャリブレーションを行ったのちに透過係数 (S_{21}) を測定した. また, Maxwell 2D (Ansoft 製) による2次元有限要素法による渦電流解析によってプローブの磁場解析および電解解析を行った. これにより磁性体の透磁率とインダクタンスの関係を求め, 透磁率実部を最適化するとともに, 伝送線路としての特性インピーダンスも求めた. 比透磁率の虚数部は, 測定したインピーダンスの抵抗とリアクタンスの比を用いて求めた[1].

3. 実験結果

Fig. 2はプローブの断面における磁界解析による磁束線図を示したものである. 周波数は1 GHzであり, 平行2本導体に互いに逆方向の高周波電流を印加し, 磁性体内部等の磁束密度を求めた. サンプル内部の磁界はほぼ面内成分を持ち, 厚いサンプルでも磁場の垂直成分がキャンセルされ, 反磁場による測定誤差が抑制されると考えられる. 電磁界解析結果より, プローブの特性インピーダンスが50 Ω 付近であることを確認した. Fig. 3は, 100 MHz–67 GHzにおけるNiZnフェライトシート (3 mm $\times$ 3 mm, 厚さ500 μm) の透磁率をNicolson-Ross-Weir法[3]と比較したグラフである. ●は本測定結果であり, 実線および破線はNicolson-Ross-Weir法の測定結果を表している. 両者はほぼ一致した. 強磁性共鳴周波数は

約1.5 GHzで, 材料の固有の値と一致し, 提案手法が反磁界による誤差を抑制し正しい透磁率を評価できていると考えられる.

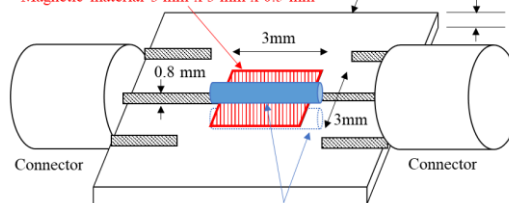
謝辞

磁性体透磁率評価にご協力いただいた東北大学齊藤伸教授、岩動大樹様に感謝します. 本研究の一部はJST 大学発新産業創出基金事業可能性検証 (JPMJSF23C4) により実施した.

参考文献

- [1] S. Yabukami, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 58, No. 2, p. 1-5 (2022).
- [2] K. Takagi, *Journal of Magnetics Society of Japan*, vol. 46, no. 6, pp. 102-106 (2022).
- [3] A. M. Nicolson and G. F. Ross, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 19, 377–382 (1970).

Magnetic material 3 mm x 3 mm x 0.5 mm CGK-500, 0.5 mm thick, $\epsilon_r \approx 5$



Two Cu wires (2 mm ϕ), symmetrical above and below the sample

Fig. 1 Diagram of two parallel tracks

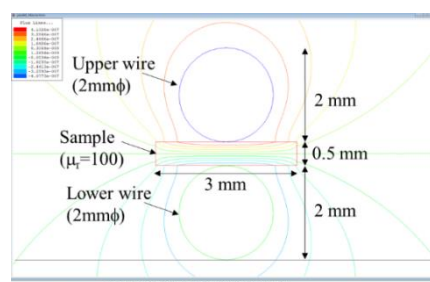


Fig. 2 Electric lines of force in the cross-section of the parallel wires and sample obtained by two-dimensional electric field analysis (1 GHz).

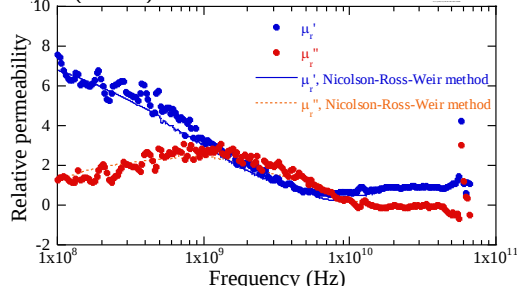


Fig. 3 Measured permeability of NiZn ferrite (3 mm x 3 mm, 0.5 mm-thick).

スリット付き高周波駆動薄膜磁界センサの磁界検出感度

鈴木 椋太¹, 本多 順一², トン タット ロイ¹, 薮 上 信^{1,2}

(¹ 東北大学 大学院工学研究科, ² 東北大学 大学院医工学研究科)

Sensitivity of Coplanar Line Type Thin Film Magnetic Field Sensor with Slit

R. Suzuki¹, J. Honda¹, L. Tonthat¹, S. Yabukami²

((¹ Graduate School of Engineering Tohoku University, ² Graduate School of Biomedical Engineering Tohoku University,))

1. はじめに

表皮効果や強磁性共鳴を利用した高周波駆動薄膜磁界センサは、高周波帯で磁性薄膜によるインピーダンス不整合によりセンサ感度が悪化することが課題であった。この原因はキャリアの反射損失であり、磁性薄膜にスリットを設けることでインピーダンス整合が実現できた[1]。本稿では交流磁界印加によるAM変調信号の側波帯に対するスリット幅依存性について実験的に検討した。

2. センサ構造と実験方法

本センサは薄膜の幅方向を磁化容易軸となるように磁気異方性を制御した磁性薄膜(CoNbZr 薄膜)、誘電体薄膜(SrTiO 薄膜)、コプレーナ線路によって構成されており、横幅 1.15 mm、長さ 18 mm である[2]。CoNbZr 薄膜なしのコプレーナ導体のみで特性インピーダンスはほぼ 50 Ω に整合している。Fig. 1 に示すように磁性薄膜スリット幅を 6, 10, 26, 36, 50 μm としたセンサ素子をガラス基板上に作製した。透過係数(S_{21})はセンサ素子に直流磁界をゆっくり変化させて高周波キャリアを通电し、ネットワークアナライザ(R3767CG, アドバンテクト)を用いて計測した。シグナルジェネレータ(8684D, アジレントテクノロジー)からセンサへ高周波キャリアを通电し、センサ素子にバイアス磁界を印加し、交流磁界(990 Hz, 1.6 A/m)を励磁してAM変調波および側波帯のスペクトルをスペクトラムアナライザ(8653EC, アジレントテクノロジー)で観測した[3]。

3. 実験結果

Fig. 2 に S_{21} 計測から得られたスリット幅ごとのセンサ感度と側波帯信号の大きさを比較した。センサ感度は交流磁界に対する側波帯の大きさを示す(1)式よりキャリアの信号強度と S_{21} の振幅の磁界の変化に対する勾配の積に比例すると仮定して評価した。

$$|V_o(\omega)| = J \cdot K \cdot \left(\frac{\Delta S_{21}}{\Delta H} \right) \quad (1).$$

ここで J はセンサに流れる電流、 K は定数、 $\Delta S_{21}/\Delta H$ は外部磁場の変化に対する S_{21} の変化量である。スリット幅 10 μm で振幅感度は最大となった。Fig. 2 よりスリットのないセンサと比較し、側波帯信号はスリット幅 10 μm のセンサでは 10 dB ほど信号が大き

くなった。センサの交流磁界に対する最大感度はおよそスリット幅 10 μm で得られることがわかった。これはスリットを設けることでインピーダンス整合による反射の抑制と実効透磁率の減少のトレードオフで決まっていると考えられる。

参考文献

- [1] T. Ishihara et al, Journal of Magnetic of Japan, vol.6 (2022).
- [2] H. Uetake et al, "Highly Sensitive Thin-Film Magnetic Field Sensor Meandering Coplanar Line", *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, vol. 51, No. 11, 4005003(2015).
- [3] 村山芳隆, 小澤哲也, 薮上信, 石山和志, 荒井賢一, "10⁻¹³ T 台の磁界検出分解能を有する高周波伝送線路型薄膜磁界センサ", 日本応用磁気学会誌 vol. 31, pp. 17-22(2007).

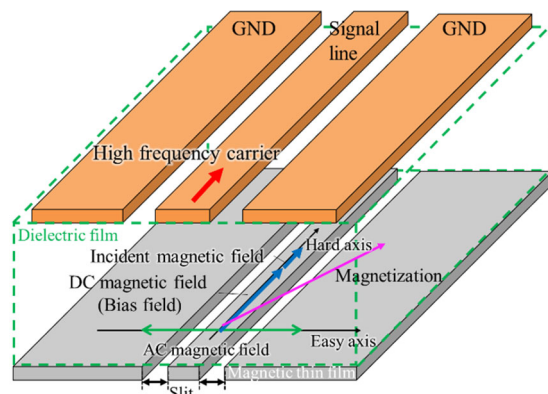


Fig. 1 Sensor structure

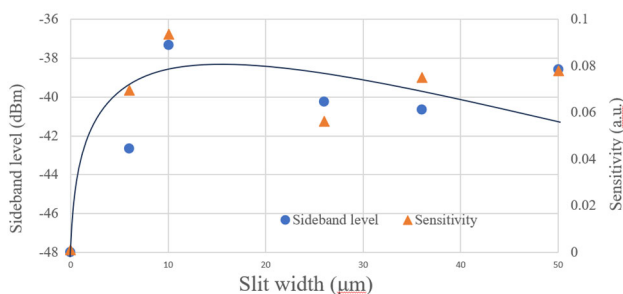


Fig. 2 Sensitivity & Sideband level VS Slit width of the sensor

謝辞

本研究の一部は JST 大学発新産業創出基金事業可能性検証 (JPMJSF23C4) により実施した。

等価磁気・電気回路を利用した MSL 上の磁性膜の透磁率推定

三上 貴大¹, 室賀 翔², 田中 元志³, チャカロタイ ジェドヴィスノプ¹,

阿加 賽見², 遠藤 恭², 藤井 勝巳¹

(¹情報通信研究機構, ²東北大学, ³秋田大学)

Permeability estimation of magnetic film placed on MSL using equivalent magnetic and electric circuit

T. Mikami¹, S. Muroga², M. Tanaka³, J. Chakarothai¹, S. Ajia², Y. Endo², K. Fujii¹

(¹NICT, ²Tohoku Univ., ³Akita Univ.)

はじめに 磁性ノイズ抑制シート (NSS) の開発のためには、高周波数帯域における透磁率測定が重要である。これまで、高精度な透磁率測定装置が提案されているが、大きな電磁石の準備や測定用サンプルの切り出しが必要である等、測定は簡便とは言えない。また、NSS の性能評価においては、IEC62333-2 に基づいて試作されたマイクロストリップ線路 (MSL) 上に磁性シートを配置した場合の伝送減衰率を測定する。この測定結果を利用して、NSS と線路の電磁気的な相互作用に関する情報を抽出し、伝送減衰率の測定と同時に透磁率が推定できれば、時間的、経済的なコストを大きく削減可能となる。

本研究では、MSL 上に配置した磁性膜の透磁率を、磁気・電気回路を利用して推定する方法について検討する。初めに、透磁率を変数として、磁性膜を配置した MSL の等価回路解析から S パラメータを算出する。次に、解析値を実験値にフィッティングすることにより、透磁率を求める。

評価対象 図 1 に、NSS として Co-Zr-Nb 膜を配置した MSL の概形を示す。MSL は、比誘電率 9.8 のアルミナ基板上に試作した¹⁾。信号線の長さ l_s は 10 mm、幅 w_s は 0.095 mm である。図 2 に、Co-Zr-Nb 膜の透磁率 (Meas.¹⁾) を示す。低周波数で比透磁率約 600、強磁性共鳴 (FMR) 周波数は約 1 GHz、抵抗率は $120 \mu\Omega\text{cm}$ である。

等価回路解析による透磁率の推定 Co-Zr-Nb 膜を配置した MSL の等価回路解析²⁾を利用して S パラメータを算出し、測定値との差異が最小になるようにフィッティングした。透磁率の実部と虚部をそれぞれ変化させ、測定値との差異が最小になる組み合わせを探索した。ただし、高周波数帯域は波長共振の影響が大きいと考え、3 GHz 以下でフィッティングを実施した。

図 3 に、フィッティング結果を実験値と比較して示す。フィッティング結果は実験値とおおむね一致した。ここで、 $|S_{21}|$ については、3 GHz 付近で FMR 損失による極小値が得られた。磁性膜が局所的に励磁されることにより反磁界が生じ、材料固有の FMR 周波数が高周波側にシフトしたと考えられる。図 2 中に、フィッティングから推定した透磁率 (Estimated) を示す。推定値は、実験値と 3 GHz 以下の周波数範囲で概ね一致した。反磁界による FMR 周波数のシフトについてもおおむね補正されており、本手法の利用可能性が示された。

おわりに MSL 上に配置した磁性膜の透磁率を簡便な手法で推定できる可能性を示した。今後、波長共振の影響の低減や等価回路モデルの改善により、測定の高精度化、高周波数化を目指す。

謝辞 本研究の一部は、東北大学—NICT マッチング研究支援事業の支援を受けて実施された。

参考文献

- 1) S. Muroga et al: *IEEE Trans. Magn.*, 47(2), pp.300-303, 2011.
- 2) T. Mikami et al., *IEEE Trans. Magn.*, 59(11), #9201304, 2023.

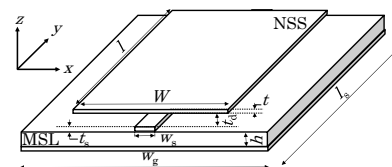


Fig. 1: MSL with Co-Zr-Nb film

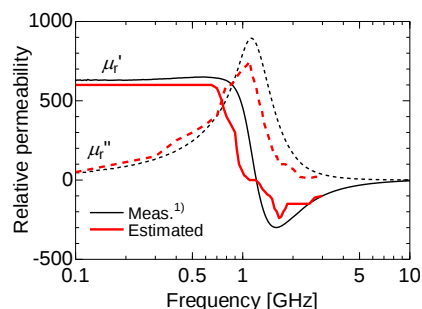


Fig. 2: Result of measured and estimated permeability of Co-Zr-Nb film

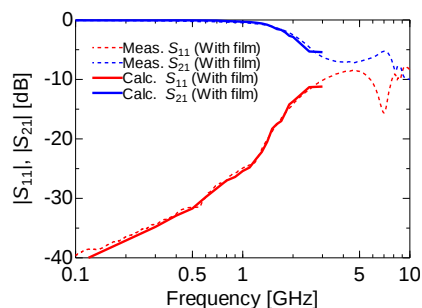


Fig. 3: Result of measured and calculated S parameter

ミアンダ・パラレル形状薄膜磁気インピーダンス素子の基礎特性およびジュール加熱の影響

田中 雄太*, 菊池 弘昭

(岩手大)

Effects of Joule heating on thin-film magneto-impedance element with meander and parallel

Y. Tanaka, H. Kikuchi

(Iwate Univ.)

はじめに

本研究では、外部磁界が印加されたときに透磁率が変化することを利用し、表皮効果やインダクタンス変化および強磁性共鳴に起因して素子の電気的なインピーダンスが変化する磁気インピーダンス(MI)素子に焦点を当てる。GHz の比較的高周波における高感度化の検討において、素子のインダクタンス分が寄与することがわかっており、その制御性を検討するためにミアンダ構造の素子について検討を行うとともに、ジュール加熱を適応し、ミアンダ構造の素子における磁気特性制御の可能性を検討した。さらに、素子の形状をパラレルとした場合の影響についても検討した。

実験方法

本研究で用いた試料は、CoZrNb の磁性膜合金に Cu の電極を取り付けた構造となっている。薄膜は、フォトリソグラフィとマグネトロンスパッタリングにより作製した。また、磁気インピーダンス素子では、磁化容易軸を素子幅方向に制御した場合に高感度が見込めるため、真空中で 400°C、3 kOe の静磁界中で 1 時間の熱処理をおこなった。一方、異方性を未制御な素子において、125 mA で 1 分間ジュール加熱をおこない、磁気インピーダンス特性に及ぼす影響を検討した。加熱時には磁石を用いて素子幅方向に磁界を印加した。作製した素子のインピーダンスは、ネットワークアナライザ及び、ピコプローブを使用し反射法で測定した。反射点における反射係数をネットワークアナライザにより測定し、インピーダンスを算出した。

実験結果

図 1 (a), (b) は駆動周波数が 100 MHz, 1 GHz のときのインピーダンスの外部磁場特性を示した図である。一例として、素子幅 40 μm で 1 ターンのミアンダ形状の素子を示している。素子長は 0.5 mm とした。SFA は、磁場中熱処理をおこなった素子である。他は、ジュール加熱の有無で比較している。ジュール加熱をすることにより、磁気異方性が誘導されていることは確認できるが、素子作製の段階で磁場中熱処理をおこなったものと比較すると感度は劣る。一方で周波数 1 GHz では、ジュール加熱をしたものと、SFA とは一致している。これは、SFA とジュール加熱時の印加磁界の違いに起因しているものと考ええる。磁性体がミアンダ形状では、素子間隔が狭いとインピーダンスの変化率は高くなった。間隔が狭いと相互インダクタンスは強くなるが、ミアンダ形状では負に働くので全体でのインダクタンスは低下する。磁界ゼロ時のインダクタンスが低下したことが変化率を上げた可能性がある。

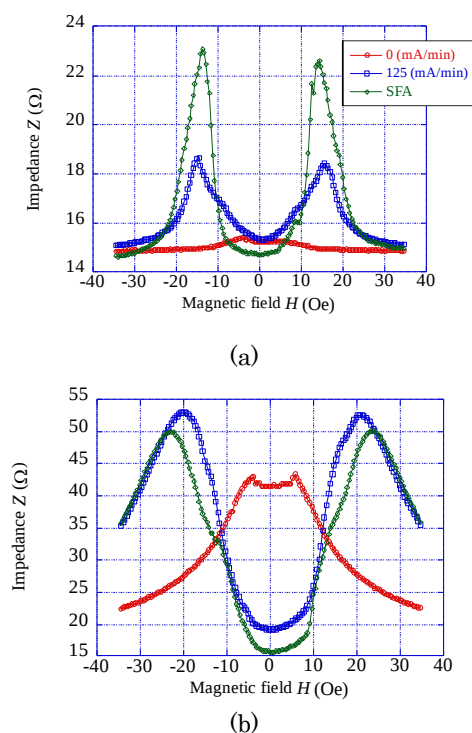


Fig. 1 Dependence of impedance on external magnetic field at (a) 100 MHz and (b) 1 GHz.

パルス励磁 MI センサの印加電流波形に関する考察

井立聖二、内山剛

(名古屋大学)

Study of Applied Current Waveform in Pulse Excitation MI Sensor

S. Idachi, T. Uchiyama

(Nagoya University)

はじめに

軟磁性ワイヤに高周波電流を流すことで表皮効果が生じ、それによってワイヤのインピーダンスが磁界の大きさに応じて敏感に変化する現象を Magneto-Impedance (MI) 効果と呼び、MI センサという磁気センサとして利用される。また MI 効果は、軟磁性ワイヤ周りに巻いたピックアップコイルに、磁界の大きさに応じた電圧を励磁することも確認されている^[1]。消費電力を削減するため、ワイヤへ印加される電流は、立ち上がり時間 t_r 、パルス高さ I_p のパルス電流 i_p (図 1) が用いられ、この時 i_p は、

$$i_p = \frac{I_p}{2} \left(1 + \sin \frac{2\pi t}{nt_r} \right)$$

で表される交流電流が、ワイヤへ印可されたときと同等の MI 効果を引き起こすとされる。ここで、 $n \cong 2 \sim 3$ である。パルス高さ I_p はコイルに励磁される電圧に影響を与えることが観測される。しかしパルス電流と同等の交流電流を印可した場合は、電流振幅はワイヤのインピーダンスに影響を与えないことが報告されており^[2]、パルス電流と交流電流の振幅や周波数の関係が明らかでない。

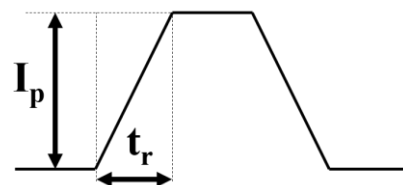


図 1 パルス電流波形

本報告では、アモルファスワイヤに印加するパルス電流の電流変化率 (I_p/t_r) と、ピックアップコイルに励磁される電圧の関係について検討し、報告する。

実験方法

図 2 にパルス励磁 MI センサの回路ブロック図を示す。400 ターンの 1cm 長ソレノイドコイルに $\phi 30 \mu\text{m}$ の FeCoSiB アモルファスワイヤを通した。

ワイヤ長及び電流制限用抵抗を変化させることで、印加パルス電流波形を調整し、その際のピックアップコイルに励磁される電圧振幅を計測した。印加パルス電流の波形から電流変化率を計測し、コイルに励磁される電圧との関係を調べた。

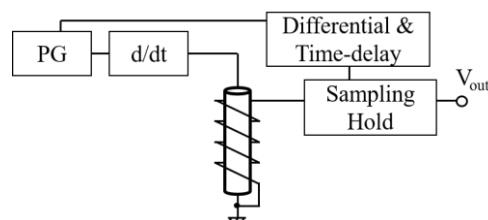


図 2 回路ブロック図

実験結果

図 3 に、パルス電流変化率に対するワイヤの磁場感度変化を示す。パルス電流の電流変化率に比例して磁場感度が変化する様子が示される。講演では、パルス電流と同等の交流電流と、パルス電流の関係性に関しても合わせて報告する。

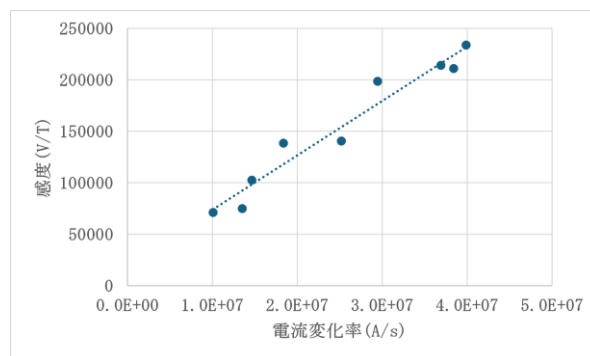


図 2 電流変化率と感度

参考文献

- 1) Kawajiri et al., IEEE Trans. Magn., 35(5), 1999
- 2) 武士田ら, 日本応用磁気学会誌, 18(2), 493-498, 1994.