シールドループコイルを用いた広帯域パーミアンズ計測

High Frequency Permeance Measurements Using a Shielded Loop Coil

蔵上 信・山口正洋・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 (☎980-77)

S. Yabukami, M. Yamaguchi, and K. I. Arai

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku Univ., 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-77

We have developed a 1 MHz–2 GHz thin-film permeance meter using a shielded loop-coil type pickup coil. To measure the permeance accurately up to the GHz region, it is necessary to consider impedance matching throughout the driving plates and pickup coil, mode matching of the pickup coil, electromagnetic mode in the driving plates, and the voltage induced by an electric field. Errors can be reduced in the 500 MHz to 2 GHz range by taking account of the change in the input impedance of the pickup coil with and without a magnetic sample.

Key words: permeance, parallel plates, shielded loop coil, electric field, input impedance of pickup coil

1. はじめに

磁性薄膜の高周波パーミアンスは高抵抗磁性薄膜、フェライト薄膜などの高周波磁性材料の評価に有用であるとともに、薄膜磁気ヘッド、薄膜電源、移動体通信用 LC フィルタ、インピーダンス整合素子などマイクロ磁気デバイスの設計・評価に不可欠である。

従来、高周波パーミアンスの計測は測定周波数帯によってフェライトヨーク法¹⁾ (～10 MHz), 8 の字コイル法²⁾ (100 kHz～100 MHz), 伝送線路のインピーダンス変化を用いる方法^{3), 4)} (100 MHz～) などが組み合わせて使用されてきた。これに対して筆者らは単一の装置により 1 MHz～3 GHz の広帯域においてパーミアンスを測定することを目標として測定装置を開発しつつある^{5)～7)}。筆者らは 1 MHz～10 MHz では SN 比の向上, 数百 MHz 以上の高周波域では装置の細部にわたるインピーダンス整合や電界による誘起電圧の除去, 検出コイルの波長共振, 励磁コイル内の高次モードの除去などを考慮することにより, 1 MHz～1.5 GHz におけるパーミアンスをほぼ測定できることを報告した^{5)～7)}。

本報告では、まず数 100 MHz 以上のパーミアンスについてその定量性を検討した。透磁率が 100 程度と小さく、かつ 1 GHz 以上の自然共鳴周波数を有する磁性薄膜のパーミアンスを本装置により測定すると、理論値との誤差が増大した。この誤差の原因として、 μ'' の増加と磁性薄膜の損失との関係、検出コイルと伝送ケーブルとの接続点におけるインピーダンスの不整合、検出コイル内部での電磁界の位相回り、磁性膜の有無に伴う検出コイルのインピーダンス変化について詳細に検討し、誤差の主因を明らかにした。さらに検出コイルの波長共振を考慮して寸法を設計し、直径 6 mm の磁性膜のパーミアンスを 1 MHz~2 GHz 帯において定量的に計測できることを示したの

で報告する。

2. 測定装置の構成

Fig. 1 は試作したパーミアンス測定装置の概観図を示したものである。本測定装置は平行平板伝送線路による励磁コイルと、検出用のシールドループコイル⁷⁾から構成される。励磁コイルは全長 (l_c) は 80 mm, 幅 (w_c) は 50 mm であり, 長さ 50 mm の平行平板線路部分と長さ 15 mm のテーパー部分から構成されている。励磁コイルは, LC 共振を除去するため平行平板線路, テーパー部をインピーダンス整合し, 多重反射を抑制した。また平行平板内の電磁界から TEM 以外の高次モードを除去するため平行平板の断面寸法, および全長を上限周波数の 1/2 波長以下とし⁸⁾, 2 GHz まで TEM モードにより励磁されるようにした⁶⁾。検出コイルは 50 Ω の特性インピーダンスを有するセミリジットケーブルを介してネットワークアナライザへ接続した。

Fig. 2 は検出用シールドループコイル⁷⁾の概観図を示したものである。このコイルは $50\ \Omega$ の特性インピーダンスを有する矩形半ターンのストリップ線路とさらに半ターンの地導体部分から構成される。検出コイルの中心導体は2枚の地導体面によって挟まれているため外部電界からシールドされる。また地導体面は上下に対称形であり、電界による誘起電圧を差動的に抑制する⁹⁾。したがって本コイルは主として磁界による誘

Fig. 1 Schematic view of the permeance meter.

Fig. 2 Schematic view of the shielded loop coil.

起電圧を発生する。

3. 500 MHz 以上におけるパーミアンスの測定誤差

Fig. 3 は CoZrNb 薄膜の容易軸方向へ直流磁界を 30 Oe 印加し、自然共鳴周波数を約 1.5 GHz とした場合において (1) 式および Fig. 4 に示した手順により磁化困難軸方向のパーミアンスを測定したものである。

$$\mu_r t_m = (S_c/d_m)(V_s - V_o)/V_o + t_m \quad (1)$$

ただし V_s は磁性サンプル挿入時、 V_o は磁性薄膜の磁化容易軸方向へ 600 Oe の直流磁界を印加し、透磁率をほぼ 1 と見なせるバックグラウンド測定時の出力電圧であり、 S_c は検出コイルの面積、 d_m は磁性薄膜の幅、 t_m は磁性薄膜の膜厚である。(1) 式においてパーミアンスは複素電圧 V_s 、 V_o のベクトル的差分によって算出される。Fig. 3 における○△は実測値であり、実線および破線は渦電流と自然共鳴を考慮した理論値¹⁰⁾である。 μ_r' の実測値は 500 MHz 以上で理論値と比較して減少し、 μ_r'' は理論値よりも約 2 倍大きい。パーミアンスは正確に測定されないことが分かる。ただし自然共鳴周波数の実測値は理論値とほぼ一致している。

4. μ_r'' の増加と磁性膜の損失との関係

ここでは Fig. 3 の誤差が磁性薄膜試料の損失か、別の要因によるものかの分離をはかった。シールドループコイルは地導体面を有するため、磁束がコイル近傍において乱れる可能性がある。これにより磁束が薄膜の膜厚方向の成分をもち、膜面内において渦電流が発生し、 μ_r'' が損失として増加することが考えられる。この渦電流損の有無を明らかにするため、非常に

Fig. 3 Permeance measured by the conventional method.

Fig. 4 Measurement method.

Fig. 5 Measured permeability of a YIG film.

高い抵抗率を有し渦電流を無視できる YIG のパーミアンスを本装置により測定した。Fig. 5 は YIG (60 μm 厚、25 mm×25 mm) の容易軸方向へ 70 Oe の直流磁界を印加した場合における磁化困難軸方向のパーミアンスを示したものであり、○△は実測値、実線および破線は理論値¹⁰⁾である。 μ_r' は 100 MHz において理論値よりも大きい。本条件における YIG の自然共鳴周波数は約 1 GHz であることを考慮すれば、測定された μ_r' は磁性薄膜の損失によるものではなく、その他の要因によると考えられる。

5. 回路内部での不整合および検出コイル内の位相変化

本測定装置においてシールドループコイルは 100 Ω 以上の高インピーダンスを有するため 50 Ω 系の伝送ケーブルと整合されていない。また数百 MHz 以上では検出コイルの一周長が 1/10 波長よりも長くなるため、検出コイル内での位相回りを考慮する必要が生じる。ここでは Fig. 3 における誤差が不整合点および検出コイル内の位相回りによって説明できるか否かを等価回路を導き解析的に検討した。

5.1 等価回路の導出

Fig. 6 はシールドループコイル、誘起電圧、伝送ケーブル、ネットワークアナライザの等価回路を示したものである。シールドループコイルおよび伝送ケーブルは 1 GHz における 1/100 波長の要素に分割し、それぞれを 2 個のインダクタンスと 1 個の容量から構成される T 型回路をはしご状に接続した¹⁴⁾。シールドループコイルは 1 本の内部導体と 4 本の地導体面 (外部導体) から構成され、各インダクタンスは全導体の自己インダクタンス¹¹⁾と隣接導体間の相互インダクタンス¹²⁾を求め、その和を標記した。容量素子は等角写像により求め¹³⁾、抵抗分は無視した。鎖交磁束の時間微分によって誘起される電圧源は各要素当たり 2 個ずつインダクタンスに直列に接続した。分布電圧源はすべて同位相とした。このモデルを回路シミュレータ PSpice を用いて解析し、ネットワークアナライザの 50 Ω 抵抗の端子間電圧を求めた。Fig. 7 は Fig. 6 の等価回路においてネットワークアナライザの端子間電圧を示したものである。実測値と計算値は良好に一致しており、本等価回路の妥当性が示された。

5.2 パーミアンスの計算

Fig. 8 は Fig. 7 で算出した出力電圧およびこれに磁性膜の寄与分を加算した出力電圧をそれぞれ (1) 式の V_o 、 V_s へ代入して求めたパーミアンスである。 V_s は Fig. 3 における透磁率の理

Fig. 6 Equivalent circuit.

論値および磁性膜の寸法から鎖交磁束を求め、そこから出力電圧へ換算して V_o とベクトル的に加算したものである。これにより磁性膜の複素透磁率およびその周波数依存性が考慮される。ただしこの場合、磁性膜の有無により検出コイルのインピーダンスは不変と仮定した。この影響は次項において議論する。上記の計算値は Fig. 3 におけるパーミアンスの理論値と一致する。以上より Fig. 3 におけるパーミアンスの誤差は回路内の不整合点、および検出コイルの位相回りに起因するものではないと考えられる。

6. 検出コイルのインピーダンス変化

Fig. 3 におけるこの誤差は直接的には Fig. 4 における磁性サンプル挿入時の出力電圧 V_s とバックグラウンド時の出力電圧 V_o との位相差に起因している。Fig. 9 は Fig. 3 において 1 GHz における V_s および V_o を複素平面上に模式的に示したものである。理論上予測される V_s と V_o の位相差はほぼ 0° である。これは複素パーミアンスに置き換えると、実部が支配的であ

Fig. 7 Output voltage of the shielded loop coil.

Fig. 8 Calculated permeance.

り、虚部が十分小さいことを示している。一方、実測値から得られた位相差は約 2° であり理論値よりも大きい。このように数度の位相差が GHz 帯のパーミアンスの測定値に反映される。

この誤差の原因は磁性サンプルの有無による検出コイルの入力インピーダンスの変化¹⁵⁾によると考えられる。Fig. 10 は Fig. 6 の電圧源、インダクタンス、容量をそれぞれ 1 個の集中定数回路に単純化したものである。これは分布的な等価回路を用いた 5-2 の検討によりパーミアンスの測定誤差が説明できないことが明らかになったためである。電圧源 V_{in} は検出コイル内における誘起電圧であり、 Z_{in} は検出コイル自身の入力インピーダンス、 V_{out} はネットワークアナライザにおいて測定される出力電圧である。上記の誤差は磁性サンプルの有無による V_{in} の変化が V_{out} に反映されていないために起こると考えられ、この原因は Fig. 10 の回路結果を考慮すれば、磁性サンプルの有無によって Z_{in} の位相が変化するためと考えられる。Fig. 11 は磁性膜の有無によるシールドループコイルの入力インピーダンスから位相角の差分を算出したものである。 V_s と V_o の位相差は数百 MHz 以上で増加し、GHz 帯では数度に及ぶ。上記を考慮して磁性サンプル挿入時とバックグラウンド測定においてそれぞれ V_{out} と Z_{in} を測定しこれらから (2) 式により V_{in} を求め、これを (1) 式の V_s 、 V_o へ代入してパーミアンスを算出した。

Fig. 9 Phase difference.

Fig. 10 Equivalent circuit.

Fig. 11 Phase difference of the input impedance of the pickup coil.

Fig. 12 Measured permeance of a CoZrNb film.

$$V_{in} = (Z_{in} + 50) / 50 \times V_{out} \quad (2)$$

7. パーミアンスの測定

測定試料は $\text{Co}_{85}\text{Zr}_{15}\text{Nb}_{12}$ 薄膜 (直径 6 mm, 1 μm 厚) であり, Ar 雰囲気中 20 mTorr, 200 W の条件で製膜し, 回転磁界中熱処理 (500°C, 2 h, 60 rpm) に続いて静磁界中熱処理 (500°C, 1 h) を行ったものである. サンプルはコイル面と直交するように挿入した. パーミアンスは試料を挿入した場合とバックグラウンドに相当する場合において, それぞれ出力電圧 V_s , V_o と検出コイルの入力インピーダンス Z_{ins} , Z_{ino} をそれぞれ測定し, (2) 式を (1) 式へ代入した (3) 式により算出した.

$$\mu_r t_m = (S_c / d_m) (V_s (Z_{ins} + 50) / V_o (Z_{ino} + 50) - 1) + t_m \quad (3)$$

パーミアンスの絶対値は島田らの方法¹⁰⁾を用いて補正した.

Fig. 12 は (3) 式により算出したパーミアンスである. (a) は直流磁界を 30 Oe (2400 A/m) 磁性薄膜の容易軸方向へ印加したものである. 自然共鳴周波数は 1.5 GHz である. $\circ\Delta$ は実測値であり, 1 MHz~2 GHz の広帯域にわたって測定値と理論は良好に一致している. さらに (b) は直流磁界を容易方向へ 70 Oe (5600 A/m) 加えた場合のパーミアンスを表したものである.

る. この場合の自然共鳴周波数は約 2 GHz である. 測定値は共鳴周波数の高周波化に対応して変化している. 2 GHz の測定限界は検出コイルの自己共振および励磁コイル内部の TEM 以外の高次モードの影響と考えられる.

8. ま と め

平行平板型励磁コイルとシールドループ型検出コイルから構成されるパーミアンス測定装置によって 1 MHz~2 GHz の超広帯域計測を実現した. 数百 MHz 以上においてはサンプル挿入時とバックグラウンド測定時における検出コイルの入力インピーダンス変化を考慮する必要があることを示した.

謝 辞 本研究の遂行に当たり貴重な御助言を頂きました東北大学通信工学科 澤谷邦男教授, 東北学院大学電気工学科 芳賀 昭教授, 嶺岸茂樹助教授, 仙台電波高等専門学校 笹森崇行講師に感謝いたします. またマスク作製に御協力頂きました東北大学機械電子工学科江刺研究室の皆様にも感謝いたします.

文 献

- 1) N. Kumasaka, N. Saito, Y. Shiroishi, K. Shiiki, H. Fujiwara, and M. Kudo: *J. Appl. Phys.*, **55**(6), 15, 2238 (1984).
- 2) P. A. Calcagno and D. A. Thompson: *Rev. Sci. Instrum.*, **46**, 904 (1975).
- 3) R. H. Soohoo: *J. Appl. Phys.*, **31**, 218S (1960).
- 4) W. B. Weir: *Proc. IEEE*, **62**, 33 (1974).
- 5) T. Kawazu, M. Yamaguchi, and K. I. Arai: *IEEE Trans. Magn.*, **30**, 4641 (1994).
- 6) 藪上 信, 山口正洋, 荒井賢一: 日本応用磁気学会誌, **20**, 589 (1996).
- 7) M. Yamaguchi, S. Yabukami, and K. I. Arai: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 4941 (1996).
- 8) 赤尾保男: 環境電磁工学の基礎, p. 300 (電子情報通信学会, 東京, 1991).
- 9) J. D. Dyson: *IEEE Trans. Antennas and Propagations*, **21**, 446 (1973).
- 10) 島田 寛, 沼澤潤二, 米田与志朗, 細野彰彦: 日本応用磁気学会誌, **15**, 327 (1991).
- 11) F. E. Terman: *Radio Engineering Handbook* (McGraw-Hill, New York, 1943).
- 12) H. M. Greenhouse: *IEEE Trans. Magn.*, **15**, 1803 (1979).
- 13) M. Yamaguchi, M. Matsumoto, H. Ozeki, and K. I. Arai: *IEEE Trans. Magn.*, **27**, 5274 (1991).
- 14) 例えば, 喜安善市, 斎藤伸自: 電気回路, p. 163 (朝倉書店, 東京, 1989).
- 15) 細野彰彦, 島田 寛, 沼澤潤二, 米田与志朗: 東北大学科学計測研究所報告, **39**, 1 (1990).

1996 年 1 月 14 日受理, 1997 年 1 月 16 日採録