パラレルラインを用いた高周波透磁率測定

System for Measuring Thin-Film Permeability by Using a Parallel Line

木村卓也・三寺正雄・寺坂正二・野瀬正照・松本文夫

松木英敏*・藤森啓安**・増本 健**

(株)アモルファス・電子デバイス研究所, 仙台市青葉区南吉成 6-6-3 (☎989-32)

*東北大学工学部電気工学科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 (☎980)

**東北大学金属材料研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (☎980)

T. Kimura, M. Mitera, M. Terasaka, M. Nose, F. Matsumoto, H. Matsuki*, H. Fujimori** and T. Masumoto**

Amorphous Magnetic Device Laboratory, 6-6-3 Minami-yoshinari, Aoba-ku, Sendai 980

*Department of Electrical Engineering, Tohoku University, Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980

**Institute for Material Research, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980

A method of measuring the permeability of soft magnetic films at high frequencies was investigated. The main components of this system are a network analyzer and a parallel line. We attempted to discover why the value of the given permeability by the parallel line method is less than that given by the coil impedance method. As a result, we found that the leakage of field energy outside the line must be considered in evaluating the correct permeability. The parameter α was introduced for the leakage of the field energy. We then measured the value of the permeability by the parallel line method (10 MHz~500 MHz), and this value matched well with that measured by using a figure-of-eight permeameter (1 MHz~100 MHz). The dimensions of the parallel line were 15 mm in length, 11.3 mm in width and 1.5 mm in depth.

Key words: parallel line, strip line, permeability, leakage of field energy, high frequency, magnetic thin film

1. はじめに

電子機器の小型化・高性能化に伴い、機器や部品の小型化・高周波化が要求されてきている。その意図は「より高い周波数で、より多くの情報量を伝達する」ということにある。薄膜磁気ヘッドはその代表例に挙げられるが、各種薄膜磁気デバイスも、その要求を満たすことを目標に研究活動が活発化してきている。またそれに伴い、より高周波で優れた特性を持つ磁性材料も同時に求められている。

このような背景から、磁性材料を評価する透磁率測定装置にも高周波化が要求されているが、従来は、ソレノイドコイルを用い、そのインピーダンスを測定することにより透磁率を算出する測定法や、8の字コイルや1

ターンコイルで磁束を検出し透磁率を測定する方法が採用されていた。

しかし、これらの方法では、コイルなど測定系の共振周波数を高めることに限度があったため、測定可能な周波数範囲は高々 100 MHz にとどまっていた。

これに対して、より高い周波数での測定法がいくつか提案されている^{1)~3)}。その一つに、平行平板型の伝送線路であるパラレルライン⁴⁾を使った透磁率測定法がある。

しかし、この方法では測定インピーダンスを透磁率に変換する際に、従来のコイルインピーダンス法での評価法をそのまま適用しても、従来の測定法による透磁率の値と一致しない傾向があり、その測定値の信頼性が懸念されていた。そこで筆者らは、ラインから漏れる磁界のエネルギーを考慮することにより、500 MHz までの周波数帯域で、より信頼性の高い透磁率測定法を検討したのでその結果を報告する。

2. 測定原理

高周波で損失の少ない回転磁化を利用する一軸磁気異方性が付与された薄膜試料を測定するためには励磁方向が特定できなければならないが、そのような目的のためには、TEM 波が適している。筆者らは、従来用いられていた Fig. 1(a) のようなソレノイドコイルに替えて、Fig. 1(b) に示すような、終端をショートしたパラレルラインを TEM 波発生用の治具として用いる方法を検討した。

空芯時のラインのインダクタンス L_0 、電流 I とすると、ラインに蓄積される電源からのエネルギーは

$$W = 1/2 L_0 I^2 \quad (1)$$

一方、透磁率 μ が線形であると仮定した場合、ライン

Fig. 1 Schematic diagram of the solenoid coil (a) and parallel line (b) for permeability measurement.

が発生する磁束密度分布 $B(x, y, z)$ を用いて、単位体積当たりの蓄積エネルギーは $B^2/2\mu_0$ と書くことができる。この蓄積エネルギーをパラレルライン自身を除く空間で積分すると、空間に蓄積されている磁界のエネルギーは、

$$W = \iiint B^2/2\mu_0 dx dy dz$$

と表せる。このエネルギーを、パラレルラインの内側と外側について分けると、

$$\begin{aligned} &= \iiint_{in} B^2/2\mu_0 dx dy dz \\ &+ \iiint_{out} B^2/2\mu_0 dx dy dz \\ &= W_{in} + W_{out} \end{aligned} \quad (2)$$

と表せる。ここで、 W_{in} 、 W_{out} はそれぞれパラレルライン内外の磁界のエネルギーである。空心の場合、 $B = \mu_0 H$ 、 $H(x, y, z) = k(x, y, z)I$ ($k(x, y, z)$ は比例定数) の関係を (1), (2) 式に代入し、(1)=(2) とおくと、空心のインダクタンスは

$$L_0 = \mu_0 \int_{in} k^2 dv_{in} + \mu_0 \int_{out} k^2 dv_{out} \quad (3)$$

ただし、 $dv = dx dy dz$

と表せる。また、試料を挿入した場合のインダクタンス

Fig. 2 Field analysis of parallel line.

L は、 $B = \mu H$ (ただし、 μ は測定範囲内では H に依らない一定の値と仮定する) として、磁化した試料のつくる磁界を無視すると、

$$\begin{aligned} L &= \mu \int_{sample} k^2 dv_{sample} + \mu_0 \int_{in} k^2 (dv_{in} - dv_{sample}) \\ &+ \mu_0 \int_{out} k^2 dv_{out} \\ &= \mu_0 \int_{in} k^2 dv_{in} + \mu_0 \int_{out} k^2 dv_{out} \\ &+ (\mu - \mu_0) \int_{sample} k^2 dv_{sample} \end{aligned} \quad (4)$$

(3) 式と (4) 式より、

$$\begin{aligned} L/L_0 - 1 &= (\mu - \mu_0) \int_{sample} k^2 dv_{out} / \\ &\{ \mu_0 \int_{in} k^2 dv_{in} + \mu_0 \int_{out} k^2 dv_{out} \} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \alpha &= \mu_0 \int_{out} k^2 dv_{out} / \mu_0 \int_{in} k^2 dv_{in} \\ &= W_{out} / W_{in} \end{aligned} \quad (6)$$

と表される係数 α を導入する。 α は、パラレルラインから漏れる磁界のエネルギーの度合いを示す係数 (leakage constant) で、小さいと漏れは少なく、大きいと漏れが大きいことを示す。 α の値は別途磁界解析より求めた。磁界解析の一例を Fig. 2 に示す。図は今回用いた $y = \pm 0.75 \{-5.65 \leq x \leq 5.65\}$ のパラレルラインの断面における磁界の x 方向成分の強さを x - y 平面の z 成分 (スケールは任意) で表したものである。解析範囲の対称性により、図では、解析範囲の 1/4 に当たる第一象限のみを示した。この磁界解析の結果をもとに α を計算すると、パラレルラインの場合、ラインの寸法は特性インピーダンス Z_0 と関係付けられ、 α と Z_0 は Fig. 3 に示すような関係となった。

(5), (6) 式より、パラレルライン内側での磁界が均一であると近似すると、結局、試料の透磁率は下式で表現さ

Fig. 3 Leakage constant α

Fig. 4 Equivalent circuit 1.

れる。

$$\mu/\mu_0 = (L/L_0 - 1)(1 + \alpha)S_0/S + 1 \quad (7)$$

S_0/S はラインと試料との体積比、あるいは、ラインと試料の長さが同じときは、断面積比である。

ここで、測定回路を Fig. 4 で示すような集中定数等価回路で近似し、空心の測定インピーダンス Z_0 、試料挿入時の測定インピーダンス Z 、とおくと、

$$Z_0 = R_0 + j\omega L_0 \quad (8)$$

$$Z = R_0 + j\omega L = (R_0 + \omega L') + j\omega L' \quad (9)$$

(7), (8), (9) 式より、実部と虚部を分離すると、結局次式が得られる。

$$\mu'/\mu_0 = (L'/L_0 - 1) \cdot (1 + \alpha) \cdot S_0/S + 1 \quad (10)$$

$$\mu''/\mu_0 = (R - R_0)/\omega L_0 \cdot (1 + \alpha) \cdot S_0/S \quad (11)$$

ただし、(7) 式で、 L と μ は複素数 $L = L' - jL''$ 、 $\mu = \mu' - j\mu''$ とした。

(9) 式で、実部 $(R_0 + \omega L')$ が実際に測定される抵抗 R 、虚部の L' が実際に測定されるインダクタンスである。

また、(7), (10), (11) 式が示すとおり、従来のコイルインピーダンス法のように、磁界のエネルギーが外に漏れていないとみなせる場合は、 $\alpha = 0$ となり、 μ'/μ_0 、 μ''/μ_0 の表現は次式に示す従来評価法と一致する。

$$\mu'/\mu_0 = (L'/L_0 - 1) \cdot S_0/S + 1 \quad (12)$$

$$\mu''/\mu_0 = (R - R_0)/\omega L_0 \cdot S_0/S \quad (13)$$

しかし、パラレルラインでは磁界のエネルギーが外に漏れるので、従来評価法のままでは、透磁率は小さく見

Fig. 5 Equivalent circuit 2.

積られる結果となる。

3. 測定方法

ラインの長さは、パラレルライン自身の共鳴の影響がなく、集中定数回路で近似できるように極力短くした。測定試料は、磁化容易軸を幅方向と一致させたガラス基板つきの薄膜で、その寸法を幅 10 mm、長さ 40 mm とした。インピーダンス測定には、ネットワークアナライザ (HP4195A) を使用した。また、ショートパラレルラインを固定するために、HP16092A スプリングクリップフィクスチャを使用した。

インピーダンス測定における問題点の一つに「校正方法」が挙げられる。特に本測定では、測定インピーダンスが小さいため、フィクスチャの影響を極力取り除く必要がある。そのためには、電気長を補正する（フィクスチャの長さだけ加える）方法、あるいはパラレルラインの直前でオープンとショートを行い、それによって得られるフィクスチャの 4 端子定数を使ってその影響を取り除く方法などがあるが、ここでは後者の校正方法をとった。

4. 測定誤差の検討

本測定では、測定回路を Fig. 4 で示した等価回路で近似したが、実際、高周波ではライン容量による共鳴の影響が問題になる。ライン容量、ラインインダクタンス、ならびに共鳴周波数は、本測定法の場合パラレルラインの寸法で理論的にはほぼ決まるが、共鳴周波数に関しては、局所的な浮遊容量の影響によって、理論より低くなることが予測される。そこで、Fig. 5 に示すように容量（ライン容量や浮遊容量）を考慮して評価した透磁率の値と、本測定により評価した透磁率の値との差異を検討した。その結果を Fig. 6 に示す。

Fig. 6 には、容量はライン容量のみを考慮し L 、 C 、 R に理論から求められる値を使った場合と、インピーダンス測定に HP8753A ネットワークアナライザを用いて共鳴周波数を実測し、そこから見積られる容量（ライン容量 + 浮遊容量）を使った場合の両方の結果を示した。

同図から明らかなように、本測定では、500 MHz まで、容量の影響を考慮した場合としない場合による値の差異は約 5% 以内であることがわかった。

5. 測定結果

測定試料の諸元を Table 1 に示す。試料 A の本研究の測定法を用いた比透磁率の測定結果を Fig. 7 に、試料 B の結果を Fig. 8 に、試料 C の結果を Fig. 9 にそれぞれ示す。本測定においては、4195A 本体からの出力は 12 dB_m、パラレルラインに届く時点で 0 dB_m になっている。このとき試料に印加される磁界は、計算によると 100 MHz の時点で約 1.6 A/m(=20 mOe) と推定される。本測定での α の値は、測定系の特性インピーダンスが 50 Ω であることから、Fig. 3 より、 $\alpha=0.18$ と求められた。また、いずれの試料も、従来法の一つである 8 の字コイルによる透磁率測定装置での測定結果を併せて示した。この装置では 100 MHz まで測定可能である。

いずれの結果も 100 MHz までの測定値は 8 の字コイル法による測定値と μ'/μ_0 、 μ''/μ_0 共に良く一致している。これによって、本測定値の信頼性は高いと考えられる。ただし、 μ''/μ_0 の実測値は、低周波側では信号量の

Fig. 6 Observational error.

不足で安定性に欠ける。

試料 A (Fig. 7) では、本研究の測定法による μ'/μ_0 の値は 690 であり、一方、8 の字コイル法による値は 640 であった。両者は測定誤差の範囲ではほぼ一致していると

Fig. 7 (a) Relative permeability spectrum of sample A measured on parallel line.

(b) Relative permeability spectrum of sample A measured in figure-of-eight coil.

Table 1 Specifications of samples.

	Structure	Thickness	Heat Treatment
A	CoNbZr (1-layer)	1 μ m	As Depo.
B		1 μ m	U.F.A.
C		3 μ m	As Depo.

(a)

(b)

Fig. 8 (a) Relative permeability spectrum of sample B measured on parallel line.

(b) Relative permeability spectrum of sample B measured in figure-of-eight coil.

考えられる。本試料は異方性磁界が大きいために μ'/μ_0 の値は低いが、500 MHz までは、ほぼ一定の値を示し、優れた周波数特性を持つことがわかる。

試料 B (Fig. 8) では、薄い単層膜にみられる共鳴現象に似た現象が、100 MHz 以上の周波数帯域で観測された。

試料 C (Fig. 9) では、100 MHz 以上の周波数帯域の比透磁率の低下が顕著であり、遮断周波数は約 300 MHz と他の試料に比べ著しく低いことがわかった。これは、この試料の膜厚が 3 μm と比較的厚かったため、低い周波数で渦電流損失が増大したことによると考えられる。

(a)

(b)

Fig. 9 (a) Relative permeability spectrum of sample C measured on parallel line.

(b) Relative permeability spectrum of sample C measured in figure-of-eight coil.

6. まとめ

以上、パラレルラインを使った高周波透磁率測定方法について述べた。今回の検討の結果、磁性薄膜の高周波における透磁率の測定において、パラレルラインを使用し、そのラインの形状に応じて磁界のエネルギー分布を考慮することによって、より信頼性の高い透磁率測定値が得られることを示した。

謝 辞 本研究を進めるに当たり、その機会を与えて頂いた(株)アモルファス電子・デバイス研究所 斎藤保夫常務取締役役に感謝いたします。

文 献

- 1) 白江公輔, 辻本浩章: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-88-7 (1988).
- 2) 神保睦子, 網島 滋, 内山 晋: 日本応用磁気学会概要集, 8aC-10 (1990).
- 3) 天野正彦, 谷川嘉浩, 他: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-92-9 (1992).
- 4) 近角聡信編, 小笠原直幸: 実験物理学講座 17 磁気, p. 448, 共立出版 (1968).

1992 年 11 月 18 日受理, 1993 年 2 月 2 日採録