Measurement of Permeability of Magnetic Thin Film by Meander-Type Probe

J. Takahashi, A. Sato*, S. Yabukami*, T. Ozawa, Y. Miyazawa**, K. Yanagi**, and Y. Shimada***

Sendai National College of Technology, 48 Nodayama, Medeshima-Shiote, Natori, Miyagi 981-1239, Japan

*Department of Electrical Engineering and Information Technology, Tohoku Gakuin University, 1-13-1 Chuo, Tagajo 985-8537, Japan

**Toei Scientific Industrial co., Ltd., 75 Kitaoki, Iino-aza, Natori, Miyagi 981-1225, Japan

***Graduate School of Engineering, Tohoku University, 6-6, Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

A highly sensitive method of obtaining the permeability of magnetic film without limitations in sample size was developed based on the electrical impedance of magnetic film in contact with microstrip meander lines. The permeability of a CoNbZr thin film (25×25 mm, 0.1- μ m thick) was evaluated in a frequency range of 100 MHz – 8 GHz; the measured values roughly corresponded to those obtained with the Landau-Lifshitz-Gilbert equation. The proposed method shows promise for measuring the permeability of wafer-sized samples because it is not restricted by size limitations.

Keywords: permeability, magnetic thin film, meander line

ミアンダ形プローブによる磁性薄膜の透磁率計測

高橋純也・佐藤彰*・薮上信*・小澤哲也・宮澤安範**・柳邦雄**・島田寛***

仙台高等専門学校, 名取市愛島塩手字野田山 48 (〒981-1239)

*東北学院大学工学部, 多賀城市中央 1-13-1 (〒985-8537)

**東栄科学産業, 名取市飯野字北沖 75 (〒981-1225)

***東北大学大学院工学研究科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6 (〒980-8579)

1. はじめに

我々の身の回りにある携帯電話やパソコンなどの電子機器は高周波化が進んでおり、携帯電話においては大量のデータ送受信の必要性や通信方式・周波数の国際標準対応といったグローバル化、小型化などの点から GHz 帯の周波数が使用されるようになった。このように電子機器内部の高周波化は、高周波用磁性材料の開発を加速させ、それに付随した新しい評価方法の研究も盛んに行なわれている。特に高周波領域におけるインダクタンス特性や損失を決定する高周波透磁率評価方法の確立は必須のものとなっている。

従来の磁性薄膜の高周波透磁率評価方法には、8 の字コイル法¹⁾、シールドッドループコイルを用いる方法²⁾、伝送線路を用いる方法³⁾等が挙げられる。しかし、これらの方法は評価周波数の上限が検出コイルなどの共振周波数により制限されてしまうため評価できる試料の大きさに制限がある。そのため、ウエハや基板から透磁率評価用の小さな試料を切り出して計測することが必要であり、ウエハ等の透磁率をインラインで評価することは困難であった。

筆者らは、これまで磁性薄膜に直接高周波電流を通電させて、厚さが 4 μ m の CoNbZr 薄膜の複素透磁率を最適化処

理で大まかに評価できることを示した⁴⁾。本報告ではミアンダ形のプローブを開発し、これを磁性薄膜に近接させることで高周波インピーダンス計測及び最適化処理により非破壊に透磁率を評価した。これまでミアンダ形プローブによる磁性薄膜の透磁率計測は報告されておらず、本プローブを用いることで、大きな試料サイズにも対応可能な透磁率評価が可能になると考えられる。また本論文で開発したミアンダ形プローブをウエハ上で走査することにより透磁率の分布等を評価可能と考えられる。

2. 透磁率計測方法

2.1 プローブの構造

Fig. 1 はプローブの構成及び評価する磁性薄膜を模式的に示した図である。プローブは 2 本のセミリジッドケーブルとミアンダ構造のマイクロストリップ線路で構成されている。マイクロストリップ線路は厚さ 0.5 mm、銅箔 18 μ m のテフロン基板 (CGK-500 XP0002, 比誘電率 = 5) を使用した。プリント基板加工機 (ミッツ製 FP-21 型) により幅 0.8 mm、線間隔 0.8 mm、長さ 5.0 mm、3 ターンのミアンダ形状とし、特性インピーダンスはほぼ 50 Ω とした。本論文ではなるべく磁性薄膜の磁気信号を高い SN 比で計測するために、直線線路を折り曲げてプローブを構成した。

隣接導体間の電氣的な結合はある程度あるものの、補正等
はしていない。ミランダ線路に流れる高周波電流は導体の
幅方向に高周波磁界を励磁するため、Fig. 1 の場合高周波
インピーダンスは、困難軸方向の透磁率に対応する。プロ

(a) Microstrip meander type probe

(b) Contacts between probe and magnetic film

Fig. 1 Schematic of probe.

Fig. 2 Structure of measurement system.

ーブと磁性薄膜の間に絶縁体（ポリビニルフィルム、厚さ
10 μm）を挟み、磁性薄膜にミランダ線路を押し付けるこ
とで磁性薄膜の高周波インピーダンスを計測する。

2.2 透磁率の評価方法

Fig. 2 は本計測システムの構成を示した図である。パソ
コン、ネットワークアナライザ (ADVANTEST R3767CG)、
プローブ、ヘルムホルツコイル、直流電源から構成されて
おり、プローブは同軸ケーブルを介してネットワークアナ
ライザに接続する。これらの装置から磁性薄膜の透過係数
(S_{21}) を測定し、GP-IB でパソコンにデータを取り込み、
最適化処理により複素透磁率を求める。本測定では磁性膜
を飽和させたバックグラウンド測定と主測定（直流磁界を 0
にした状態）の差分計測を行い、その差分が磁性膜の寄与
分であり、グラウンドプレーンを流れる電流の変化は十分小
さいと考えて透磁率を最適化した。

Fig. 3 に本計測システムの等価回路、Fig. 4 に計測のフロ
ーチャートを示す。本システムの計測手順は Fig. 2 のよう
に結線し、プローブと磁性薄膜の間にポリビニルフィルム
（厚さ 10 μm）を挟んで近接させる。そして、ヘルムホル
ツコイルの中に入れ約 800 Oe の直流磁界を加えて磁性薄
膜を飽和させ、ネットワークアナライザでキャリブレイシ
ョンする。これにより、プローブおよびケーブルの電気長、
磁性薄膜の直流的なインピーダンス、非磁性信号等を除去
する。その後、直流磁界を解除して磁性薄膜の寄与分の透
過係数 (S_{21}) を測定し、(1)式により磁性薄膜に近接するミ
ランダ線路のインピーダンスを求める。Fig. 5 はマイク
ロストリップ導体および磁性薄膜の磁界および電流の様子
を模式的に示したものである。導電電流はマイクロストリ
ップ導体に流れ、磁性薄膜内部では表皮効果により膜表面
に渦電流および電磁界が局在化すると考えられる。Fig. 4 の
最適化処理ではミランダ線路に近接する磁性薄膜におい
て、Fig. 5 の width の範囲で電流が表皮効果により膜厚方
向へほぼ 1 次元的に偏ることを仮定し、(2)～(4)式を用い
て Fig. 6 の Newton-Raphson 法により複素透磁率を最適化す
る。

Fig. 3 Equivalent circuit.

$$Z = 50(1 - S_{21}) \quad (1)$$

$$Z = \frac{k_s \rho l}{2w} \coth \left(\frac{k_s t}{2} \right) \quad (2)$$

$$k_s = \frac{(1+j)}{\sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_r \mu_0}}} \quad (3)$$

$$\mu_r = \mu_r' - j\mu_r'' \quad (4)$$

ただし、 ρ は抵抗率、 l は試料長さ、 w は試料幅、 t は膜厚、 f は周波数、 μ_r は複素比透磁率、 μ_0 は真空の透磁率である。ただし、本手法の適用は磁性薄膜内部の電流が表皮効果に基づいて膜厚方向へ1次的に偏る場合に適用可能であり、2次的な電流の偏りが支配的になった場合には、適用は困難になると考えられる。

Fig. 4 Flow chart of measurement.

Fig. 5 Structure of thin film and skin effect.

3. 評価結果

3.1 インピーダンスの測定結果

Fig. 7 は評価に用いたアモルファス CoNbZr 薄膜 (25 × 25 mm, 厚み 0.1-μm) の M-H ループの測定結果である。この磁性薄膜は RF スパッタ法でガラス基板に 0.1 μm 成膜し、その後熱処理により異方性を付与した。Fig. 7 より、評価した磁性薄膜の異方性磁界 H_k は 40 Oe 程度であった。

Fig. 8 は本計測方法による高周波インピーダンスの測定結果である。低周波ではインピーダンスは 0 に近い値を示しており、周波数の増加に伴って表皮効果によりインピーダンスが増加していることが分かる。強磁性共鳴周波数の前後ではリアクタンスが減少し、抵抗分が極大値となっている。

Fig. 6 Flow chart of Newton-Raphson method.

Fig. 7 Measured M-H loop of CoNbZr film (25 × 25 mm, 0.1-μm thick).

3.2 透磁率の計測結果

Fig. 9 は Fig. 8 のインピーダンス測定結果から Fig. 4 の最適化処理により求めた透磁率の計測結果である。●及び○が計測値であり、実線及び破線は Fig. 7 の M-H ループから得られた異方性磁界 ($H_k = 40$ Oe) に基づき LLG 方程式と渦電流損を考慮した理論値⁵⁾である。評価結果は大まかに理論値と対応しており、1.8 GHz 付近で強磁性共鳴が確認された。誤差の主な原因は、作成した磁性薄膜の保磁力 H_c が大きいことやスルーホールによるはんだの若干の盛り上がり等と考えられる。本手法は従来法と異なり、試料を一樣磁界中で励磁させる測定ではないため、従来法に比較して必ず何らかの誤差が生じると考えられる。本論文では

Fig. 8 Measured impedance of CoNbZr film (25 × 25 mm, 0.1-μm thick).

Fig. 9 Measured permeability of CoNbZr film (25 × 25 mm, 0.1-μm thick).

精密な評価ではなく、強磁性共鳴周波数よりも低周波帯における透磁率の周波数依存性の傾向、および強磁性共鳴周波数が LLG 方程式による理論値とほぼ対応することから大まかに評価できたと考えられる。

4. まとめ

1. 磁性薄膜ヘミアンダ形プローブを近接させることで磁性薄膜の高周波インピーダンスを計測し、最適化処理により非破壊に透磁率を計測した。
2. 25 × 25 mm, 厚み 0.1-μm のアモルファス CoNbZr 薄膜の透磁率を 100 MHz – 8 GHz まで評価した。共鳴周波数以下の周波数依存性、および共鳴周波数が LLG 方程式による理論値とほぼ対応した。
3. 薄膜を特定サイズに切り出すことなく大まかな透磁率が評価できた。

5. 今後の展望

本手法は、ミアンダ線路に流れる高周波電流によって磁性薄膜に励磁される範囲の透磁率を計測している。そのため、大サイズのウェハや磁性薄膜の局所的な透磁率評価へ応用することが考えられる。さらに、磁性薄膜上に二次元的に走査することで磁気特性の二次元分布を計測することができると考えられる。ただし、磁性薄膜に流れる電流が 2 次元的に偏る場合や、電流が迂回して流れるような条件になると適用が困難になると考えられるため、その場合は、解析的な最適化法は困難であり、電磁界シミュレーション等を実施して最適化する必要がある。また、CoNbZr 薄膜以外の試料における透磁率の評価を検討している。

謝辞 本研究の一部は JST 地域ニーズ即応の成果である。本研究に有益なご助言を頂きました宮城県産業技術総合センターの熊谷実部長、インテリジェント・コスモス研究機構の松本初男氏に感謝致します。薄膜作製にご協力頂いた宮城県産業技術総合センター中居倫夫氏に感謝致します。治具製作にご協力いただいた東北学院大学工学部機械工場スタッフの皆様へ感謝致します。

References

- 1) P. A. Calcagno and D. A. Thompson: Rev. Sci. Instrum., Vol. 46, No. 7, 904 (1975).
- 2) M. Yamaguchi, S. Yabukami and K. I. Arai: IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 32, No. 5, 4941 (1996).
- 3) W. B. WEIR: Proc IEEE, 62, 33 (1975).
- 4) S. Yabukami: Journal of Applied Physics, Vol. 105, 07E719 (2009).
- 5) Y. Shimada, J. Numazawa, Y. Yoneda and A. Hosono, J. Magn. Soc. Jpn. 15, 327 (1991).

2010 年 8 月 4 日受理, 2010 年 1 月 17 日採録