薄膜インダクタ用磁心の高周波特性に関する検討

A Study of the High-Frequency Magnetic Properties of Amorphous Cores for a Thin-Film Inductor

野瀬正照・白川 究・三寺正雄・松本文夫・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)

*東北大学金属材料研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980)

M. Nose, K. Shirakawa, M. Mitera, F. Matsumoto, H. Fujimori* and T. Masumoto*

Amorphous Magnetic Device Lab., 6-6-3 Minamiyoshinari, Aoba-ku, Sendai 989-32

*Institute for Materials Res., Tohoku Univ., 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980

The high-frequency magnetic properties of thin-film cores for a micro-inductor were investigated. The inductor was composed of a five-turn spiral coil and laminated or unlaminated CoNbZr cores. Laminated cores made of CoNbZr films with Cu or SiO₂ interlayers were prepared by dual-type sputtering. The ratio μ'/μ'' ($=1/\tan \delta$), measured as a function of the core width in the frequency range from 10 MHz to 500 MHz, increased with increasing core width up to 300 μm . This ratio for laminated cores was large as 160~180% of that for unlaminated cores at high frequencies below 100 MHz. Domain wall observations imply that these results were caused mainly by reduction of core losses due to wall motions.

Key words: thin-film inductor, core loss, high-frequency response of magnetization, laminated core, CoNbZr/SiO₂, CoNbZr/Cu

1. はじめに

高周波で動作する薄膜マイクロインダクタの品質係数の向上には鉄損の抑制が不可欠である。そのために磁心の材質や形状に関する多方面からの研究がなされている。磁性材料の観点からはセラミックスと磁性膜の多層化¹⁾や高抵抗化²⁾が種々検討され、主として渦電流損の低減に主眼を置いた研究がなされている。しかし従来の研究では、磁心材料の特性の評価にはマイクロデバイスよりも遙に大きな寸法の試料、例えば 10 mm×40 mm や 25 mm×25 mm などの基板に成膜された膜が用いられてきた。しかし、倉田ら³⁾によると、インダクタに用いられる微小サイズの磁心の透磁率は、同じ組成、履歴の薄膜の大型試料で測定した値に比べ約 40% 低下したということが報告されており、マイクロデバイスサイズの磁心の直接的な評価が必要であると考えられる。

そこで本研究では、薄膜インダクタの磁心の高周波特性を直接評価する手段を検討した。またこの手法を用

い、各種構造のストライプ磁心の特性を直接比較することにより、磁心として最適な寸法を検討するとともに、多層化による鉄損抑制の要因を検討した。

2. 実験方法

2.1 試料の作製

本研究に用いた試料はフォトリソグラフィー技術を用いて作製した 1 mm×0.5 mm の平面スパイラルコイル型インダクタである。その模式図を Fig. 1 に示す。図では省略してあるが、コイルと磁心の間には熱硬化レジストによる絶縁層を形成した。用いた磁性膜は Co₈₉Nb_{8.5}Zr_{2.5} 非晶質合金薄膜で、 $B_s=12,000$ G, $\lambda=-1.2\times 10^{-6}$ のものである。膜作製には RF 2 極スパッタ装置を用い、Ar ガス圧 15 mTorr、投入電力 2.3 W/cm² で一方向磁界中にて成膜した。磁心には単層膜および Cu または SiO₂ を中間層とする積層膜を用い、磁性膜厚は単層膜の場合 1 μm とした。また積層膜の場合、中間層を 0.02 μm 、その上下の磁性層が 0.5 μm ずつになるように成膜した。これらの磁性膜をリフトオフ法⁴⁾により、幅 10~600 μm 、長さ 180 μm のストライプ状

Fig. 1 Schematic structure of micro-inductor.

に形成し、磁心とした。また磁区観察には、硼珪酸ガラス基板上に直接成膜し、リフトオフ法により形成した同形状、同寸法のストライプ状磁心を用いた。いずれも膜の磁化容易軸がストライプの幅方向に一致するようにパターン化した。

2.2 磁気特性の評価

磁心の透磁率、 μ' 、 μ'' は一般的に下記の式で表される。すなわち、

$$\mu' = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{X - X_0}{\omega L_0} \cdot \frac{S_0}{S} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{L - L_0}{L_0} \cdot \frac{S_0}{S}$$

$$\mu'' = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{R - R_0}{\omega L_0} \cdot \frac{S_0}{S}$$

ここで、 α : インダクタの構造による係数

L : 磁心があるときのインダクタンス

L_0 : 空心時のインダクタンス

R : 磁心があるときの抵抗

R_0 : 空心時の抵抗

S : 磁心の断面積

S_0 : 空心部断面積

μ' 、 μ'' を求めるには α 、 S 、 S_0 の値を知る必要があるが、 μ' 、 μ'' の比は、

$$\frac{\mu'}{\mu''} = \frac{(L - L_0)/L_0}{(R - R_0)/\omega L_0} = \frac{\omega(L - L_0)}{R - R_0} = \frac{1}{\tan \delta}$$

$$= Q$$

となり、インダクタの L 、 R および磁心を飽和させたときの L_0 、 R_0 がわかれば、インダクタ上の磁心の $1/\tan \delta$ ($=Q$ 値) を求めることができる。そこで本研究では作製したスパイラルコイル状試料の L_0 、 R_0 、 L および R をネットワークアナライザ (HP-4195A) を用いて測定し、上記の式から磁心の $1/\tan \delta$ を求めることにより、スパイラルコイル上に形成した磁心の高周波特性の評価を行った。

2.3 動的磁化挙動の観察

動的磁化挙動は Scanning Kerr Effect Microscope (Phase Metrics 社製、以後 SKEM と記す) を用いて観察した。SKEM は縦カー効果を利用して高周波励磁状態での磁性体の面内の磁化変化量を検出する装置である。本研究では、光源に Ar ガスレーザ (波長 488 nm) の S 偏光をビーム径約 $1 \mu\text{m}$ に絞り、その入射面が磁化容易軸にほぼ垂直になるように入射して測定を行った。すでに報告されているように⁵⁾、レーザ入射面を磁化容易軸方向に垂直にとると主磁区内の磁化回転に伴う局所的磁化変化量が、カー信号出力として感度良く測定できる。高周波励磁はいずれも困難軸方向に行い、Fig. 1 のコイルに 50 mA_{p-p} の高周波電流を流すことによりその上の磁心を励磁した。

3. 実験結果および考察

本研究に用いた 3 種類の磁性膜の特性を幅広試料 (10 mm $\times$ 40 mm) で測定した結果を Table 1 に示す。いずれの膜も 100 MHz における透磁率は約 700 とほぼ同じ値を示し、単層膜の μ'/μ'' すなわち $1/\tan \delta$ に対し、2 種類の積層膜のそれらは 60 MHz で約 1.2 倍に、100 MHz で 1.3 $\sim$ 1.4 倍になった。またこの寸法の試料では中間層の異なる膜 B、C で特性にほとんど差がないことがわかる。

次に Table 1 と同じ磁性膜からなるストライプ磁心を有するインダクタの特性を 1 $\sim$ 500 MHz まで測定し、磁心の透磁率 μ' 、 μ'' を求めた。その代表例として 600 μm 幅の磁心を有するインダクタのインダクタンス、 L および抵抗、 R ならびにそれらから求めた磁心の μ - f 特性を Fig. 2 に示す。磁心の体積は、10 mm $\times$ 40 mm $\times$ 1 μm の試料の場合約 0.4 mm³ であるのに対し、本研究の試料では約 2×10^{-4} mm³ と 1000 分の 1 以下の微小な

Table 1 High-frequency magnetic properties of CoNbZr films (Sample size: 10 mm $\times$ 40 mm)

Film	Structure	Thickness (μm)	μ'	μ' / μ''	
			60-100 MHz	60 MHz	100 MHz
A	* CNZ (unlaminated)	1.0	708	18	9
B	CNZ/Cu/CNZ	0.5/0.02/0.5	701	21	12
C	CNZ/SiO ₂ /CNZ	0.5/0.02/0.5	705	21	13

* CNZ = CoNbZr

磁心であったにもかかわらず、10 MHz 以上では良好な感度で測定できた。なお本研究の方法で求めた透磁率は任意単位であるが、 μ' と μ'' の比が分かりやすくなるように数字を入れた。

このようにして求めた単層膜磁心 (film A) および Cu を中間層とする積層膜磁心 (film B) の μ - f 特性について、各磁心幅をパラメータとしてまとめたものが Fig. 3 である。いずれの場合も μ' には磁心幅による大きな差は見られなかったが、 μ'' は磁心幅の増大とともに著しく低減した。また単層膜磁心では幅にかかわらず μ'' にうねりが見られるが、これは単層膜特有のある種の共鳴⁹⁾によるものと考えられる。積層膜磁心でも幅が 30~60 μm の磁心において μ'' にうねりが見られるが、後で示すように幅の狭い積層膜磁心では 180 度磁壁がかなり観察されたことから、これも同様の原因によるものと考えられる。

次に、このようにして得られた各磁心の 100 MHz および 60 MHz における $1/\tan \delta$ と 100 MHz における規格化した透磁率 μ'_R とを磁心幅についてまとめ、Fig. 4 に示す。 μ'_R は積層膜 C の 300 μm 幅磁心での値を 1 として、磁心の体積も考慮して規格化した。幅 60 μm 以下では磁心の違いにより μ'_R の値に大きな差が見られたが、これは Fig. 3 から分かるように、上述の共鳴の影響によるものと考えられる。一方、幅 100 μm 以上では幅の増加に対して μ'_R はわずかながら単調に減少したが、これは反磁界の増加によるものと考えられる。これに対して、 $1/\tan \delta$ は磁心幅の増大により急激に上昇し、200~300 μm 幅以上で飽和する傾向を示した。また、同じ磁

Fig. 2 Frequency dependence of the inductance L and resistance R for an inductor with a core (MC) or without a core (AC), and the relative permeabilities μ' and μ'' for the core.

心幅で比較すると、10 μm 幅の場合を除いて積層膜磁心はいずれも単層膜磁心に比べ $1/\tan \delta$ が大きく、例えば 300 μm 幅の場合、単層膜磁心の $1/\tan \delta$ に対し、Cu を

Fig. 3 Frequency dependence of the relative permeabilities μ' and μ'' for the striped cores: (a) film A, (b) film B.

Fig. 4 Dependence of the relative permeabilities μ_r and the ratio $\mu'/\mu'' (=1/\tan \delta)$ on the stripe width for the thin-film cores.

中間層とする積層膜磁心のそれは 60 MHz では約 1.7 倍、100 MHz では約 1.5 倍、 SiO_2 を中間層とする磁心ではいずれの周波数でも約 1.8 倍になることが分かる。これは先に Table 1 で示した幅広試料 (10 mm × 40 mm) での測定結果とは異なり、マイクロインダクタサイズでは積層膜磁心の高周波での損失が単層膜磁心に比べ遙に小さいことを示している。次に、このような磁心の寸法と構造による $1/\tan \delta$ の差異について検討した。Fig. 5 は単層膜磁心および Cu を中間層とする積層膜磁心の磁区図形写真である。 SiO_2 を中間層とする積層膜磁心の磁区図形は Cu を中間層とする磁心のそれと同様であったので省略した。単層膜磁心では 100 μm 幅以下では還流磁区が、それ以上の幅ではリフシツ型の磁区構造が見られた。

数十 MHz の周波数領域でも磁壁が運動し^{6)~8)}、しかもそれによる大きな損失が生じる⁹⁾ことが知られている。Fig. 5(a) の単層膜磁心の磁区図形からも明らかに、同一面積内の磁区の数が磁心の幅によって著しく異なる。そこで、 $1/\tan \delta$ に及ぼす磁壁の影響を検討す

るため、各磁心の単位体積当たりの磁壁面積をピクチャー図形から算出した。なお、磁壁はすべてブロック磁壁とし、膜面に垂直であると仮定した。その結果を Fig. 6 に示す。磁心の単位体積あたりの磁壁面積、 S/V は磁心幅に対しほぼ反比例するように変化している。Fig. 4 に示した磁心幅が広いほど単層膜の $1/\tan \delta$ が大きいという傾向は、単位体積あたりの磁壁面積が小さいほど磁壁の運動による損失が減少するという定性的に説明が可能になる。

一方、積層膜磁心では Fig. 5(b) から明らかなように、磁心の両端に磁化の遷移領域を表すと考えられる帯が見られ、それらは磁心幅に依存せずほぼ一定の幅であることが分かる。そこで幅の異なる積層膜磁心の 30 MHz における磁化挙動を SKEM を用いて調べた。その結果を Fig. 7 に示す。同図は磁心の幅方向に走査したカー信号の実数部と虚数部の変化を示す。30 μm 幅、120 μm 幅、いずれの磁心でも両端部から約 4 μm 程度の磁化変化のない領域 (不動帯) が存在し、これは edge curling wall (ECW)⁹⁾ と呼ばれているものに相当すると考えられる。その内側に約 4 μm 程度の磁化変化の著しい領域が見られ、この領域で損失が最も大きいことが分かる。このように積層膜においては、数十 MHz 程度の周波数領域で損失の大半が磁心両端部で生じており、その領域の面積が磁心幅に依存せず一定であると考えれば、単層膜磁心と同様に積層膜磁心でも幅が広いほど $1/\tan \delta$ が大きいという傾向を説明できる。

また、Cu を中間層とする積層膜磁心については、その電気抵抗が単層膜磁心に比べ大きいわけではないので、単層膜磁心との $1/\tan \delta$ の差異は、古典的な渦電流損失の減少によって説明できない。むしろ積層膜磁心には大きな損失を発生する磁壁が—90 度磁壁はもちろん 200 μm 幅以上では 180 度磁壁も—ほとんど存在しないことから、積層化によって磁壁が著しく減少し、磁化過程が磁区内の回転磁化モードのみによる単一磁区により近い状態になったことが、Cu を中間層とする積層膜磁心における $1/\tan \delta$ 向上の原因であると考えられる。ただし、Cu を中間層とする積層膜磁心と SiO_2 を中間層とする積層膜磁心との $1/\tan \delta$ の差異は電気抵抗の上昇による渦電流損失の減少によるものであろう。しかしながら、各磁心の $1/\tan \delta$ の差異をみると Cu を中間層とする積層膜磁心と SiO_2 を中間層とする積層膜磁心との差異よりも、単層膜磁心と Cu を中間層とする積層膜磁心との差異の方が大きいことから、積層化による 100 MHz 以下における損失低減は、渦電流損失の抑制よりも磁壁の減少による寄与が大であると考えられる。

Fig. 5 Domain patterns of unlaminated CoNbZr striped cores and laminated cores with Cu spacers, obtained at a length of 180 μm and various stripe widths w : (a) film A, (b) film B.

Fig. 6 Dependence of the area of the magnetic domain wall per unit volume on the stripe width for the unlaminated cores (film A).

4. ま と め

(1) マイクロインダクタに搭載された微小磁心 (10~600 μm 幅×180 μm 長さ×1 μm 厚さ) の 10 MHz~

日本応用磁気学会誌 Vol. 18, No. 2, 1994

Fig. 7 Line profiles of SKEM signals for the 30- μm -wide and 120- μm -wide striped cores (film B).

500 MHz における高周波特性を直接評価することができた。

(2) 10~100 MHz における磁心の損失を抑制するためにその積層化が有効であるが、積層化により磁壁が減

少し、単一磁区状態により近くなったことが損失低減の大きな要因として挙げられる。

(3) 磁心の特性、特に μ'' は磁心の寸法に依存する、単層膜、積層膜いずれの場合も、磁心幅を小さくし過ぎると μ'' すなわち損失が増大する傾向がある。

謝 辞 最後に本研究を進める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、斎藤保夫常務に感謝致します。

文 献

- 1) 島田, 細野: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-88-8 (1988).

- 2) 林出, 大沼, 松本, 藤森, 増本: 日本応用磁気学会誌, **15**, 379 (1991).
- 3) 倉田, 白川, 鳥生, 村上: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-92-166 (1992).
- 4) 檜岡清威, 二瓶公志: フォトエッチングと微細加工, p. 185 (総合電子出版社, 東京, 1988).
- 5) 由比藤, 濱川, 佐々木, 椎木: 電子情報通信学会, 研究会資料, MR90-63 (1990).
- 6) Y. Hamakawa, I. Yuitoo, S. Sasaki and K. Shiiki: *J. Appl. Phys.*, **69**, 2444 (1991).
- 7) K. Ohashi: *IEEE Trans. Magn.*, MAG-21, 1581 (1985).
- 8) 野瀬, 三寺, 白川, 木村, 増本, 藤森: 日本応用磁気学会誌, **17**, 247 (1993).
- 9) J.C. Slonczewski, B. Petek and B.E. Argyle: *IEEE Trans. Magn.*, MAG-24, 2045 (1988).

1993年10月14日受理, 1994年1月28日採録