

薄膜インダクタの性能指数と薄膜磁心の損失係数との相関

Correlation between Quality Factor in Thin Film Inductor and Loss Tangent of Thin Film Magnetic Core

白川 究・村上 進・岩佐忠義・三寺正雄・増本 健

(財)電気磁気材料研究所, 仙台市太白区八木山南 2-1-1 (☎982-0807)

K. Shirakawa, S. Murakami, T. Iwasa, M. Mitera, and T. Masumoto

Research Institute for Electric and Magnetic Materials, 1-1 Yagiya-minami 2-chome, Taihaku-ku, Sendai 982-0807

This paper deals with the properties of micromagnetic films for planar inductors with a magnetic core, and with a production process that does not damage the magnetic properties. Micro-rectangular-multilayer $(\text{CoFe})_x(\text{SiB})_{1-x}/\text{SiO}_2$ ($x=0.82\sim0.90$) films 300 μm wide and 2 mm long were prepared by an RF-magnetron sputtering method. The frequency dependence of the complex permeability (μ' and μ'') of films was measured by using the parallel line method. The inverse loss tangent ($1/\tan \delta$) values of multilayer films were calculated from the value of μ'/μ'' at 400 MHz. The values of $\mu' \times (1/\tan \delta)$ of multilayer films increased to a maximum of 6500 at $x=0.86$. Planar inductors with a multilayer film core were fabricated by using an RF sputtering method and a lift-off technique. The highest value of the maximum value of the quality factor (Q_{max}) of inductors is obtained by using a multilayer film of $x=0.86$. The present results emphasize that a higher value of $\mu' \times (1/\tan \delta)$ and a higher flatness of the insulation layer under the magnetic core are important factors for increasing the quality factor of micro-planar devices with a magnetic core.

Key words: high-quality factor, multilayered film, high-frequency loss, complex susceptibility, thin-film inductor

1. はじめに

高周波デバイスに用いる磁気素子の一つとして、磁性薄膜を用いたマイクロインダクタの研究がなされている¹⁾。これらのインダクティブ素子の作製は、薄膜ヘッドにおけるマイクロ化技術を採用して進められている。しかし、これまでの薄膜インダクタの性能指数はたかだか 20 程度である。このようなインダクタを L, C, R からなるデバイスの素子として用いた場合には、インダクタの性能指数が低いため、そのデバイスの応用範囲に限界がある。インダクタ素子の性能指数向上が薄膜磁気デバイスの実用化への突破口になると考えられる。

そこで、薄膜インダクタの性能指数を磁性材料の面から、向上させることを目的に、薄膜インダクタに用いる高周波領域において、高透磁率でその周波数依存性が小さく、損失の低い磁性膜の検討がなされている²⁾。例えば、高周波用磁心の渦電流損失やマイクロ化に伴う共鳴の影響を抑える一つの方法として、薄い軟磁性膜と中間絶縁膜を交互に積層することや、高抵抗軟磁性薄膜が提案されるなど、多くの研究がなされている^{3,4)}。一般に、高周波用軟磁性膜には、高周波損失を抑制するためには、高飽和磁化、高異方性磁界、高抵抗が要求され、

励磁は磁化困難方向に行うことが望ましいとされている。著者らはすでに、高周波で低損失を示す多層膜の作製条件について検討し、損失と磁性膜および中間絶縁膜の厚さとの関係や、マイクロ化した場合の損失と多層膜の寸法との関係などを明らかにしている⁵⁾。さらに、軟磁性膜のマイクロサイズにおける複素透磁率の周波数特性について考察し、高周波領域で高透磁率・低損失を示す多層磁性薄膜の、各層における膜厚、積層数、サイズなどについて報告している⁶⁾。しかし、実際には磁性膜の特性が必ずしもインダクタの特性に反映しないことから、今後、インダクタの磁心として用いた状態での磁性膜の特性について検討することや、磁性膜の高周波特性とインダクタの性能指数とを比較検討することにより、薄膜インダクタの性能指数を向上させる要因を明らかにすることが必要とされる。

本論文では、まず、Co-Fe-Si-B と SiO_2 の多層膜について、(CoFe) と (SiB) の組成比を変え、飽和磁化、磁歪、複素透磁率の組成依存性と、これらの多層膜を磁心として用いた薄膜インダクタの特性との比較検討を行った。さらに、基板上の磁性膜の特性と薄膜インダクタを構成した状態での磁性膜の特性について比較検討し、作製プロセスによる磁性膜の劣化の原因を調べ、その解決方法を提案する。

2. 多層膜ならびにインダクタの作製

一般に、磁性膜の高周波損失を低減する手段として、飽和磁化、異方性磁界、ならびに比抵抗を大きくする方法が採用されている。これまでに、磁心の実効電気抵抗を大きくするために、磁性膜と絶縁膜との多層構成の磁性膜を用いてきた。一方、多層膜の飽和磁化を高くするためには、多層膜を構成する磁性膜の飽和磁化を高くする必要がある。

まず、飽和磁化および異方性磁界を大きくするために、Co-Fe-Si-B の半金属濃度を小さくした単層膜について検討した。(CoFe)_x(SiB)_{1-x} 表示において $x=0.72\sim0.82$ についてはすでに報告しているが⁶⁾、さらに、 $x=0.82\sim0.90$ の範囲まで組成を拡げて検討した。なお、これまで同じ成膜条件で作製できる磁性膜は $x=0.90$ までであった。ここでは、Co と Fe の比は 94 対 6 と固定し、Si と B の比は 52 対 48 に固定してある。形状が 10 mm 角で膜厚が 1 μm の単層膜の飽和磁化 (B_s) の金属元素比 x に対する変化を Fig. 1 に示す。図からわかるように、 B_s は x の増加に伴い単調に増加し、 $x=0.90$ で最大値 $B_s=14$ kG が得られた。

次に、上述した軟磁性膜と SiO_2 からなる多層膜の磁気特性

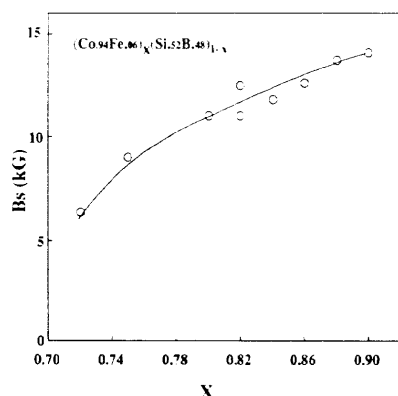


Fig. 1 Concentration dependence of the saturation flux density (B_s) of single layer films.

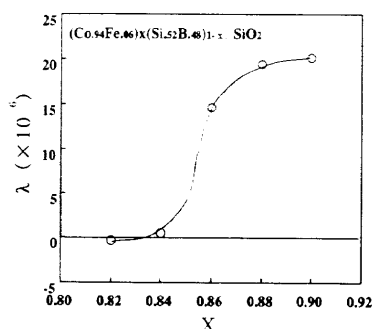


Fig. 2 Concentration dependence of the magnetostriction of multilayered films.

の組成変化について検討した。多層膜の構成は、磁性層膜の膜厚を $0.1\mu\text{m}$ 、中間絶縁層の膜厚を $0.03\mu\text{m}$ とし、10 層交互に積層したものである。これらの膜厚は、磁性膜の総膜厚を $1\mu\text{m}$ とした場合の損失が最も小さくなる組み合わせとして決めた膜厚である。多層膜の形状は幅 $300\mu\text{m}$ で長さ 2mm の矩形である。幅を $300\mu\text{m}$ に設定した理由は、すでに著者らが報告しているように微細化により、透磁率が急激に小さくならない限界の膜幅である⁷⁾。

多層膜の成膜はマグネトロンスパッタ装置を用いて行い、磁性膜は矩形の長手に対して、直角方向に約 60Oe の磁界をかけ、矩形の長手方向が磁化困難方向になるように Ar ガス雰囲気中で成膜した。中間層膜は SiO_2 ターゲットを用い、5% 酸素と 95% アルゴンの混合ガス雰囲気中で成膜した。中間層膜の組成は分析していないが、酸素欠損の SiO_{2-x} 膜になっていると推察される。

マイクロサイズ ($300\mu\text{m} \times 2\text{mm}$) の多層膜の複素透磁率の測定は、パラレルライン法で 1.5GHz までの範囲で行った。測定用試料は幅 10mm 、長さ 20mm 、厚さ 0.5mm のガラス基板上 (コーニング 7059) に $100\mu\text{m}$ の間隔でマイクロサイズの集合体を作製し、磁化困難方向に励磁して行った^{6), 8)}。各周波数での損失係数 ($\tan \delta$) は、複素透磁率の周波数依存性より、実数部 (μ') と虚数部 (μ'') との比として求めた。

また、磁性膜を用いたデバイス作製プロセスで生じる内部応力と密接な関係にある磁歪の測定を行った。多層膜における磁歪定数と磁性膜の組成の関係を Fig. 2 に示す。評価に用いた試料サイズは $10\text{mm} \times 20\text{mm}$ である。磁歪定数は $x=0.84$ 付

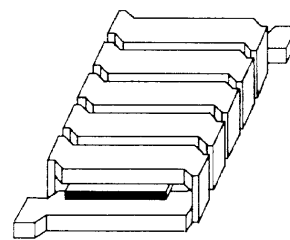


Fig. 3 Structure of a thin-film inductor.

近ではほぼ零になり、 x の高い領域では大きい正の値になっている。これらの多層膜に用いた磁性膜は Co と Fe の比を 94 対 6 に固定しているためにこのような結果が得られたが、Fe の濃度を調整することにより、広範囲の x に対して磁歪の小さい薄膜を成膜できると考えられる。

これらの多層膜の特性と薄膜インダクタの特性を比較するために、多層膜の組成を変えた磁心を用いた薄膜インダクタを作製し、多層膜単体の高周波特性と比較検討した。薄膜インダクタの構造は Fig. 3 に模式図で示すような下層コイル、絶縁層、磁性膜、絶縁層、上部コイルの順で作製した 5 層構造からなる巻線コイル型になっている。コイル幅は $120\mu\text{m}$ 、コイル間距離は $20\mu\text{m}$ で、巻数は 20 ターンである。磁心に用いた磁性膜は上述した多層膜と同じ構成で、磁心のサイズは、幅 $300\mu\text{m}$ 、長さ 2mm である。薄膜インダクタの作製はリソグラフィでパターンニングし、リフトオフ法で作製した。コイルは、マグネトロンスパッタ装置で、無酸素銅のターゲットを用い、Ar ガス雰囲気中で成膜した。膜厚は $6\mu\text{m}$ である。Fig. 3 には磁心とコイル間の絶縁層は示していないが、AZ 系レジストを 200°C で 1 時間キュアして作製し、絶縁層の膜厚を約 $4\mu\text{m}$ とした。絶縁層としては、さらに高い $250\sim 270^\circ\text{C}$ の温度でキュアすることが望ましいが、Co 濃度の高い CoFeSiB 系では、キュアの行程で結晶化が始まる可能性があるため 200°C とした。さらに、絶縁層の硬度を増加させ、また、作製プロセスにおける絶縁層の剥離を防ぐために、AZ レジストをキュアした上に、さらに約 $1\mu\text{m}$ の SiO_{2-x} 膜でコートした。

3. 実験結果および考察

通信用フェライトコアなどで用いられているように、実際に素子に用いる場合の磁性体の特性評価値として、透磁率と損失係数の逆数の積の値が重要である⁹⁾。そこで、このような評価係数が、数百 MHz 帯の軟磁性薄膜において用いることが可能であるか、また、この係数が、薄膜インダクタ (薄膜デバイス) の性能指数とどのように関連するかを検討した。

3.1 多層膜

まず、多層膜 $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_x(\text{SiB})_{1-x}/\text{SiO}_2$ ($x=0.82\sim 0.90$) の複素透磁率の実数部 (μ') および虚数部 (μ'') の周波数依存性について述べる。

Fig. 4(a), (b), および (c) にそれぞれ、 $x=0.82, 0.86$, および 0.9 の結果を示す。測定は 10MHz から 1.5GHz の周波数範囲で行った。低周波領域における μ'' のばらつきは、微細加工された試料による出力低下および測定装置の精度によるものである。いずれの場合も μ' は 500MHz 付近まで変化は少ないが、

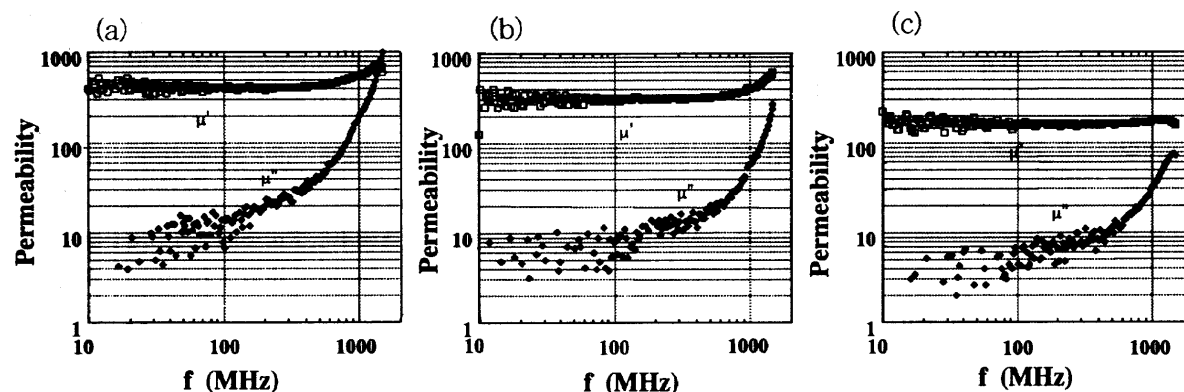


Fig. 4 Frequency dependence of the complex permeability of multilayered films.

高周波領域では、磁体性の自然共鳴のために増加している。

一方、損失成分の μ'' は高周波数領域で急激に増大している。このような傾向はいずれの組成の試料においても同様であった。高周波における損失の組成依存性をみるために、400 MHzでの損失について検討した。周波数を400 MHzと決めた理由は、すべての試料において共鳴の影響が少なく、 μ' の周波数依存がフラットな上限周波数領域で検討するためである。400 MHzでの μ' 、 μ'' の値と組成の関係はFig. 5に示すとおりである。 μ' は $x=0.86$ まではあまり変化がないが、 μ'' は $x=0.82$ から0.90まで単調に減少している。損失係数($\tan \delta$)は両者の比より求められる。400 MHzでの損失係数の逆数($1/\tan \delta$)を組成に対し図に示すとFig. 6に示すようになる。 $1/\tan \delta$ は x の増加に伴い直線的に増加し、 $x=0.88$ 付近で最大値22を示す。実際に磁性膜をデバイスに用いる場合には、上述した損失係数が小さいことと、透磁率が高いことが望まれる。そのために、透磁率と損失係数の逆数との積 $\mu' \times (1/\tan \delta)$ が磁性膜の評価指数として用いられる。この値の組成依存性をFig. 7に示す。図に示すように、 $x=0.82$ では5000程度であるが、 x の増加に伴い $\mu' \times (1/\tan \delta)$ は増加し、 $x=0.86$ 付近で最大値6800を示す。

3.2 薄膜インダクタ

実際に上述した多層膜を高周波用インダクティブ素子に用いた場合について検討を行った。磁性膜を用いたインダクタの構造はすでにFig. 3の模式図に示してある。磁心のサイズは磁性膜について検討した場合と同様の $300 \mu\text{m} \times 2 \text{ mm}$ である。多層膜の構成は磁性膜膜厚 $0.1 \mu\text{m}$ 、絶縁層膜厚 $0.03 \mu\text{m}$ とし

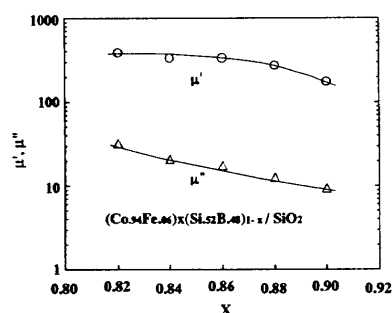


Fig. 5 Concentration dependence of the real and imaginary components of the permeability of multilayered films.

て、それぞれ10層積層したものである。これらの多層膜を用いたインダクタのインダクタンス(L)、抵抗(R)、性能指数(Q)をFig. 8に示す。Fig. 7に示した $\mu' \times (1/\tan \delta)$ の結果と比較するために、 $\mu' \times (1/\tan \delta)$ の大きい $x=0.86$ の場合およびその前後の $x=0.82$ 、 $x=0.90$ の多層膜を磁心としてインダクタを試作した。

インダクタの性能指数の最大値(Q_{max})は $\mu' \times (1/\tan \delta)$ の値に強く依存している。すなわち、 $\mu' \times (1/\tan \delta)$ が大きいほど Q_{max} が大きくなることがわかる。今回用いた磁性膜においては $x=0.86$ で最大の Q_{max} の値が得られた。このことから、磁性膜を用いたインダクティブ素子の高い性能指数を得るためには、 $\mu' \times (1/\tan \delta)$ の大きい軟磁性膜が必要となることが明らかとなった。これまでの研究から、磁性膜のマイクロ化に伴い透磁率が低下することが知られている⁷⁾。したがって、インダクティブ素子の性能指数を向上させるためには、実際に用いられる高周波用マイクロ磁心の形状で、できるだけ損失の小さい

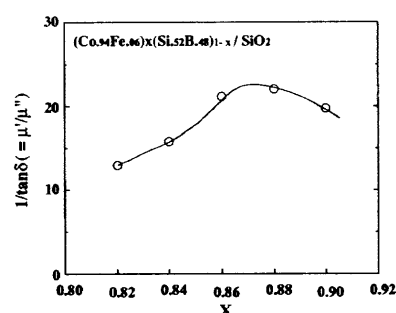


Fig. 6 Concentration dependence of the loss tangent ($1/\tan \delta$) of multilayered films.

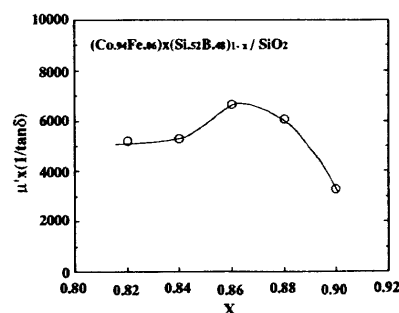


Fig. 7 Concentration dependence of the value of $\mu' \times (1/\tan \delta)$ of multilayered films.

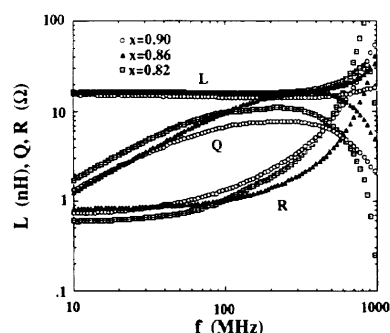


Fig. 8 Frequency dependence of L , Q , and R of thin-film inductors.

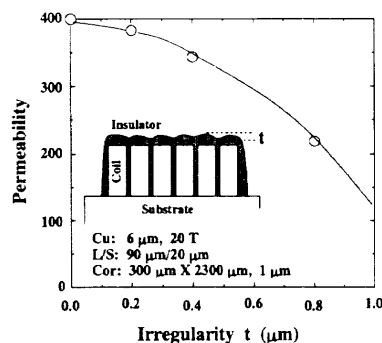


Fig. 9 Dependence of the permeability on the flatness of the insulator under a magnetic film.

磁性材料の選択が必要と考えられる。

試作した素子のインダクタンス値は、Fig. 8 に示すように、いずれもほぼ 16 nH 程度であった。これらの値は空心インダクタンス L_0 と磁心によるインダクタンス L_m との和として次式から求められる。

$$L_0 = \mu_0 \cdot S_0 \cdot N^2 \quad (1)$$

$$L_m = \mu_0 \cdot (\mu'_m \cdot S_m / S_0) \cdot S_0 \cdot N^2 / l \quad (2)$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率、 μ'_m は磁心の透磁率、 S_0 はインダクタの断面積、 S_m は磁心断面積、 N はコイル巻数、 l は磁心長さである。

ここで、空心のインダクタンスは計算値 3.15 nH、実測値 3.2 である。したがって、磁心によるインダクタンス値は約 13 nH となる。磁心の透磁率は、(2) 式を用いて計算すると、約 210 と求められる。この値は、Fig. 5 に示した透磁率の約半分に低下している。したがって、磁性膜がインダクタの作製プロセスで劣化したものと考えられる。その要因は種々考えられるが、磁性膜の下地の平坦性が重要な意味をもつものと考えられる。そこで、Fig. 9 の図中に示したように、下層コイル

の上の絶縁層の凹凸と磁性膜の透磁率の関係について調べた。その結果を Fig. 9 に示す。磁性層下地の凹凸が磁性膜の透磁率に影響を及ぼしていることが明らかになった。このことより、素子化プロセスにおいて絶縁層の平坦性の吟味が必要と考えられる。また、今回検討した磁性膜の組成においては、磁歪定数がかかなり大きかったこともインダクタ作製プロセスで生じる内部応力による透磁率低下の要因となっていると考えられる。今後、さらに、Co/Fe 比を変えることで、高飽和磁化で磁歪定数零の組成を見いだすことならびに磁心の平坦性を吟味することでより高い性能指数の薄膜インダクタが得られることが期待される。

4. ま と め

幅 300 μm 、長さ 2 mm にマイクロ化された多層膜 ($\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06}$) $_{1-x}/\text{SiO}_2$ ($x=0.82\sim0.90$) の高周波磁気特性ならびにこれらの多層膜を磁心として用いた薄膜インダクタを試作し、以下の結果を得た。

1. 多層膜の 400 MHz での損失係数の逆数は、 x の増加に伴い増加し、 $x=0.88$ で最大値 22 を示す。
2. 高周波薄膜インダクタの性能指数向上のために磁性膜評価指数として $\mu' \times (1/\tan \delta)$ が有効であり、 $\mu' \times (1/\tan \delta)$ が大きいほどインダクタの性能指数は向上する。
3. 多層膜の 400 MHz での $\mu' \times (1/\tan \delta)$ の値は $x=0.86$ で最大値 6800 が得られた。
4. マイクロ化された多層膜の透磁率は、下地の平坦性の低下に伴い低下する。したがって、高周波薄膜インダクタの性能指数向上のためには、インダクタを構成する磁心下地の平坦性が重要である。

文 献

- 1) 白川：日本応用磁気学会誌，17, 649 (1993).
- 2) 細野，島田：日本応用磁気学会誌，14, 295 (1990).
- 3) J. S. Feng and D. A. Thompson: *IEEE Trans. Magn.*, 13, 1521 (1977).
- 4) S. Ohnuma, H. Fujimori, S. Mitani, and T. Masumoto: *J. Appl. Phys.*, 79, 47 (1996).
- 5) 白川，三寺：電気学会論文誌 A, 114, 811 (1994).
- 6) 白川，三寺，増本：日本応用磁気学会誌，19, 40 (1995).
- 7) 白川，倉田，三寺，鳥生，村上：電気学会マグネティックス研究会資料，MAG-92-161 (1992).
- 8) 木村，三寺，寺坂，野瀬，松本，松木，藤森，増本：日本応用磁気学会誌，17, 497 (1993).
- 9) 大田恵造：磁気工学の基礎 II, p. 304 (共立出版，東京，1943).

1997 年 10 月 29 日受理，1998 年 2 月 2 日採録