各種軟磁性材料の磁気インピーダンス効果に関する検討

An Experimental Study of Magneto-impedance Effects of Various Soft Magnetic Materials

正会員 黒 江 章 郎[†], 村 田 明 夫[†]

村 松 小百合[†], 正会員 小 林 正 明

Akio Kuroe[†], Akio Murata[†], Sayuri Muramatsu[†] and Masaaki Kobayashi[†]

あらまし 各種材料の磁気インピーダンス効果について検討した。その結果、MnZn フェライト短冊状試料のインピーダンス変化率が58%にも達することを確認した。また、CoZrTa と SiO₂ の積層膜を用いた薄膜素子を試作し、インピーダンス変化率13~14%を実現した。

キーワード：磁気インピーダンス効果素子，CoZrTa 膜，磁場中熱処理，磁気異方性磁界，アモルファス金属

1. ま え が き

ハードディスクドライブ(HDD)の記録密度は、年々大幅に向上し、2000年には10 Gb/in²以上の面記録密度を達成することが予想されている¹⁾。この面記録密度を実現するための手段のひとつとして、スピンバルブやGMRヘッドの開発が行われ、各社しのぎを削っている。一方、高周波における透磁率の変化を利用した素子や薄膜ヘッドの研究開発^{2)~4)}も行われており、パーマロイ/SiO₂多層膜を用いた薄膜素子を用いて、50~60%のインピーダンス変化率を達成した報告がある⁴⁾。

一方、高周波における磁気インピーダンス効果を安定に測定するには、高周波発信器、回路、測定器を良好に調整するなど、技術的に高度な測定技術が要求される。通常、磁気インピーダンス効果を測定するには、振幅の大きな高周波電流を抵抗を介して素子の巻線に印加し、磁芯に高周波磁界を加える。そして、ヘルムホルツコイルにより素子に均一な直流外部磁界を印加する。その磁界強度に対応し、素子の微分透磁率の変化に応じて生じる電圧降下値を巻線の両端で測定する。これに対して筆者らは、磁芯を有するインダクタの高周波インピーダンスメータでの測定では、接続した素子の巻線にインピーダンスメータの測定端子から微小電流が加わり(微小振幅の高周波磁界を磁芯に印加)、ヘルムホルツコイルにより外部磁界を加えると、

微分透磁率の変化に対応して生じる電圧降下値からインピーダンスを測定していることに着眼した。一般に、磁芯を有するインダクタのインピーダンスは、インダクタンスと微小な抵抗の和として表現される。インダクタンスは、構成する磁芯の形状によって大きく異なるが、反磁界が零の場合には、そのインピーダンスは巻線の2乗と透磁率に比例して測定されることは、電磁気測定でよく知られていることである。

上記2つの測定を比較して考えられることとして、磁界に対する直線性の差異が生じる可能性もあるが、本報告の測定値は、材料の本質的な特性のひとつを表すものと考えられる。そこで、インピーダンスメータを用い、薄膜やバルク材料のインピーダンス変化率を、短冊状試料を用いた極めて簡単な方法で測定できるようにした。そしてインピーダンスが大幅に変化することを実験的に確認した。また、磁性膜をスパッタ蒸着法によって形成した後、磁気特性を磁場中熱処理によって変え得るCoZrTaアモルファス材料を用いて、磁気インピーダンス効果薄膜素子を試作した。その素子について、磁気異方性磁界とインピーダンス変化率との関係等を実験的に明確にし、13~14%のインピーダンス変化率を実現した。本報告では、これらの実験結果について報告する。

2. 実 験 方 法

バルクのフェライトおよび長さ25.4 mm×幅25.4 mm×厚み0.6 mmのガラス基板面上に磁性膜を形成した2枚のブロックの磁性面を互いに内側にして張合わせたものを、外形を12.65 mm×2.3 mm×1.3 mmの外形寸法の短冊状の測定試料に切断した。さらに、この短冊状試料

1997年10日、磁気記録研究会(画像情報研究会共催)で発表
1997年11月8日受付、1998年2月19日再受付、1998年3月4日採録

[†] 松下電器産業株式会社 AVC 商品開発研究所

(〒571-0050 門真市大字門真1006, TEL 06-905-5413)

[†] AVC Products Development Laboratory, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

(1006, Kadoma, Kadoma-shi, Osaka 571-0050, Japan)

表 1 ラージスケール実験用試料の寸法と特性
Dimensions and properties of specimens using at the large scale experiment.

試料 No.	材料	磁性体寸法	$\Delta Z_H/Z_0$ (%)	$\Delta Z_H/Z_0$ の勾配 (%/Oe)	測定周波数 (MHz)
No. 1	MnZn フェライト	2.3 mm×1.3 mm	58.0	0.3	185
No. 2	センダスト膜	2.0 μ m×2 mm	10.0	4.6	225
No. 3	CoZrTa アモルファス膜	1.2 μ m×2 mm	9.8	0.45	225
No. 4	CoNbZrTa アモルファス膜	42 μ m×2 mm	17.0	1.0	225
No. 5	CoNbZrTa アモルファス膜	42 μ m×2 mm	26.0	22.6 Easy axis	2.0

・No. 2, No. 3, No. 4, No. 5 の外形寸法は No. 1 と同じ
・試料長さ: 12.65 mm

上に直径 100 μ m, 長さ 40 mm のエナメル線を 3 ターン巻いた。

それらの試料を表 1 に示す。上記試料をヘルムホルツコイルの中心部に配置して、巻線の両端を直接インピーダンスアナライザ (hp 4191 A) に接続した。次に、ヘルムホルツコイルに直流電流を加えて直流磁界強度 (以下、外部磁界強度と呼ぶ) を変え、インピーダンスの変化を測定した。このように構成すると、試料には測定周波数に対応した高周波電圧が加わり、試料のインダクタンスおよびインピーダンスメータまでの線間の浮遊容量とで電気共振が生じる。測定時には共振直前の周波数におけるインピーダンスの変化を測定した (以下、この実験をラージスケール実験と呼ぶ)。

なお、No. 2, No. 3, No. 4 の試料では、磁性膜の磁化容易軸方向が短冊状試料の幅方向に、No. 5 の試料では磁化容易軸方向が短冊状試料の長手方向になるように、上記 25.4 mm×25.4 mm×0.6 mm ブロックから切出した。

また、No. 1 のフェライトの試料として、MnZn 単結晶を用い、短冊状試料の側面を (110) 面とした。

一方、試作した CoZrTa の磁気インピーダンス効果薄膜素子の評価時には、磁性体部のインピーダンスに対して、リード部のインピーダンスを小さくするため、測定用のリード線をできるだけ短くする必要がある。そのため、基板上に形成した素子の銅薄膜のリードを直接、インピーダンスアナライザの端子で挟込むように接続した。直流磁界の印加には、表面磁界 4.3 kGauss の SmCo 磁石を上記薄膜素子に近づけることによって、インピーダンス変化率が飽和する値を測定した。

3. Co 系アモルファス材料を用いた薄膜素子の製作

3.1 SiO₂/CoZrTa 積層膜形成の条件

アモルファス金属材料膜は、スパッタ蒸着法により薄膜

表 2 CoZrTa および SiO₂ 膜のスパッタ条件
Sputtering conditions of CoZrTa and SiO₂ films.

膜の種類	ターゲット	直径 (cm)	パワー (W)	Ar 圧 (mTorr)	到達真空度 (10 ⁻⁷ Torr)
CoZrTa 膜	Co ₉₀ Zr _{5.5} Ta _{4.5}	9.23	400	8	2~3
SiO ₂ 膜	SiO ₂	9.23	100	7	50~60

図 1 薄膜素子の製作工程
(a) 試作薄膜素子の平面図, (b) SiO₂/CoZrTa 膜の形成, (c) 磁極の形成, (d) Cu 電極の形成
Fabricating process of thin film sensor.

を形成した後で磁場中熱処理をすることにより、その磁気特性を変えることができる特徴がある。

表 2 に、RF スパッタ装置を用いた CoZrTa および SiO₂ の成膜時のスパッタ条件を示す。また、磁気異方性磁界 H_k を変えた試料は、スパッタ蒸着した後の (SiO₂/CoZrTa)×2 層膜に、Ar ガスの雰囲気中で、温度 250°C、静磁界 100 Oe を約 10 分間加えた後、温度 250°C、磁界 100 Oe の回転磁界中での熱処理時間の長さを変えて製作された。その後、B-H ループトレサにより磁気異方性磁界 H_k を測定した。

3.2 磁気インピーダンス効果薄膜素子の製作

図 1 は、(SiO₂/CoZrTa)×2 層膜 (以下、CoZrTa 多層膜と呼ぶ) を用いて製作した磁気インピーダンス効果薄膜素子 (以下、薄膜素子と呼ぶ) の製作工程を示すものである。

図 1 (a) は薄膜素子の平面図であり、薄膜素子の上に銅 (Cu) 膜の電極が横切って構成した状態を示している。(b) 以下は、鎖線で示した h-h' 断面での薄膜素子の各製作工程における構成を表すものである。(b) は、ガラス基板上に CoZrTa 多層膜を、スパッタ蒸着法によって厚さ 0.6

図 2 試作した薄膜素子
Thin film sensor fabricated photolithographically.

μm 形成した後、後述する条件で磁場中熱処理し、再びクロム (Cr) 膜を厚さ 0.1 μm 形成した断面図である。(c) は、Cr/SiO₂/CoZrTa 膜をフォトリソグラフィ技術とイオンビームエッチングによって所定の幅 W の磁極にパターン化した断面図を示す。(d) は、1.0 μm 厚の Cu 膜を全面に形成した後、イオンビームエッチングによって Cu 膜を 6 μm 幅にパターン化した断面図である。なお、製作に用いたフォトマスクは、種々の形状の素子をウエハ上に形成できるように設計した。図 2 に製作した薄膜素子の一例を示す。

4. 実験結果および考察

外部磁界強度が零の時のインピーダンス Z_0 と外部磁界強度が H Oe の時のインピーダンス Z_H との差 ($Z_0 - Z_H$) を ΔZ_H として Z_0 で除した $\Delta Z_H / Z_0$ をインピーダンス変化率と定義する。図 3 は、ラージスケールの実験による結果を示したもので、ヘルムホルツコイルで加えた外部磁界強度に対するインピーダンス変化率を示したものである。また、図 4 には、磁気記録媒体から信号磁界を再生する際の薄膜素子の感度を想定して、図 3 の微小磁界強度領域を拡大して示した。さらに、図 4 より 1 Oe 当たりのインピーダンス変化率の最大勾配を求め、表 1 にまとめた。

以上のデータより、No. 1 の MnZn フェライトの場合には、200 Oe の外部磁界強度で 58.0% の大きな変化率を示しているが、微小な 40 Oe 以内の外部磁界に対してなだらかな勾配 (0.3%/Oe) になっている。この原因は、磁極面に発生する磁荷によって大きな反磁界が生じ、試料に実効的な磁界が加わっていないためと推定される。そのため反磁界を補正した曲線を求める必要がある。

そこで、円柱状の磁芯の端面に発生する反磁界係数を山本、山田らの計算法⁵⁾によって算出した。その時用いる寸法比 (円柱の長さ L と直径 D 比: L/D) を R. Moskovitz らの角柱の端面面積を円柱の端面面積に置換え、その時の等価直径を用いる計算方法⁵⁾によって算出した。そのようにして反磁界係数を求めると、約 3×10^{-2} となる。図 3 のインピーダンス変化率が飽和する点 A において、本実験

図 3 インピーダンス変化率の外部磁界による依存性
Dependence of external magnetic field on the impedance change rate $(Z_0 - Z_H) / Z_0$.

図 4 微小外部磁界領域におけるインピーダンス変化率
Effect of small external magnetic field on the impedance change rate $(Z_0 - Z_H) / Z_0$.

に用いた MnZn フェライトのリング状の試料で測定した飽和磁束密度 B_s は 4700 Gauss であるから、反磁界係数を乗じて、反磁界は -140 Oe となり、補正すると点 A' となる。ここでは、点 A 以下の外部磁界強度に対する磁性体の磁化が不明のため、磁化が外部磁界に比例するものと仮定し補正した。

このようにして得られたのが補正曲線 1 である (図 3 中には補正 1 として示した)。このように補正した後の曲線では、MnZn フェライトのインピーダンス変化率の勾配は 1.5%/Oe となることが推定される。また、No. 5 は、外部磁界を磁化容易軸方向に加えた場合の特性である。測定周波数は低い大幅に変化し、22.6%/Oe もの急峻な勾配が得られている。この場合には、磁化容易軸方向が試料の長手方向であるため、磁性膜の抗磁力 H_c 近傍で磁化が反転し急峻な勾配が得られていることが推定される。磁壁移動によるノイズの発生などの問題点が考えられるが、材料特性や構造等を最適化することによって、高感度の磁気イ

図5 異方性磁界 H_k の回転磁場中熱処理時間による影響
Effect of the period kept at the rotational magnetic field on anisotropy magnetic field.

図6 異方性磁界 H_k とインピーダンス変化率との関係
Relation between anisotropy magnetic field and the impedance of thin film sensor.

ンピーダンス効果素子およびヘッドの実現が期待される。

磁性薄膜の磁化困難軸方向の磁気異方性磁界 H_k は、軟磁気特性の透磁率の目安を示す重要な要因のひとつである。CoZrTa 多層膜に関する熱処理条件を検討した結果、回転磁場中熱処理と静磁場中熱処理の組合せによって、 H_k の大きさを精度良くコントロールできることがわかった。すなわち、先に静磁場中熱処理を 250°C で 10 分間行った後、回転磁場中熱処理の時間の長さを変えることによって、 H_k の大きさを回転磁場中熱処理時間に逆比例してコントロールできることが判明した。

その実験結果を図5に示す。次に、上記磁場中熱処理法によって H_k を変えた CoZrTa 多層膜を成膜し、図1に示した工程に従って薄膜素子を作製した。それらの薄膜素子

のインピーダンスの変化率を測定した。図6には、磁気異方性磁界 H_k とインピーダンス変化率との関係を示す。 H_k が小さくなるにつれ、インピーダンス変化率が急激に変化し、1~2 Oe の H_k 近傍で 13~14% に達していることがわかった。

5. む す び

ラージスケール実験により各種磁性体の磁気インピーダンス効果に関して検討した。その結果、MnZn フェライトのインピーダンス変化率が極めて大きいこと等を確認した。また、CoZrTa/SiO₂ 積層膜を用いた薄膜素子を試作し、 H_k が 1~2 Oe 近傍でインピーダンス変化率 13~14% を実現した。

最後に、薄膜素子の材料の提供と御協力を頂いた中央研究所 榎間リーダおよび入江技師、素子作製に際して適切な助言と御協力を頂いた横山首席技師に感謝致します。

〔文 献〕

- 1) E. Grochowski and D. A. Thompson: "Outlook for Maintaining Areal Density Growth in Magnetic Recording", IEEE Trans. Magn., 30, 6, pp. 2797-3800 (Nov. 1994)
- 2) K. Mohri, T. Kohzawa, K. Kawashima, H. Yoshida and L. V. Panina: "Magneto-inductive Effect (MI effect) in Amorphous Wires", IEEE Trans. Magn., MAG-28, 5, pp. 3150-3152 (Sep. 1992)
- 3) J. Akiyama, H. Iwasaki, S. Yatabe and S. Chiba: "Magnetic Read-Out Head Using Induced RF Permeability Variation", IEEE Trans. Magn., MAG-22, 5, pp. 692-694 (Nov. 1994)
- 4) M. Senda, O. Ishii, Y. Koshimoto and T. Toshima: "Thin-Film Magnetic Sensor Using High Frequency Magneto-Impedance (HFMI) Effect", IEEE Trans. Magn., 30, 6, pp. 4611-4613 (Nov. 1994)
- 5) 山本行雄: "直流磁気回路の解析", 磁気回路解析応用ハンドブック, pp. 33-69, 株式会社トリケップス (Apr. 1982)

くろえ あきお
黒江 章郎 1964 年、東北大学工学部通信工学科卒業。同年、松下電器産業(株)に入社。以来、磁気記録分野における磁気ヘッド、媒体、トライボロジーに関する研究開発に従事。工学博士。正会員。

むらた あきお
村田 明夫 1985 年、神戸大学理学部化学科卒業。同年、住友特殊金属(株)入社。垂直薄膜磁気ヘッドの開発に従事。1989 年、松下電器産業(株)入社。VTR ヘッドのアジマス記録、レーザ光照射によるヘッド高さ調整等の開発に従事。専門は、ホトリソグラフィ技術、薄膜プロセス磁気記録など。

むらまつ きょり
村松小百合 1985 年、大阪大学理学部化学科卒業。同年、松下電器産業(株)に入社。現在、AVC 商品開発研究所。この間、磁気テープの開発における材料解析、ヘッド/テープのインタフェース問題の解析に従事。

こばやし まさあき
小林 正明 1970 年、静岡大学工学部電気工学科卒業。1972 年、同大学院工学研究科修士課程修了。同年、松下電器産業(株)に入社。以来、民生用 VTR、プロフェッショナル機器およびシステムの研究開発に従事。現在、同社 AVC 商品開発研究所所長。工学博士。正会員。