

(CoFeB)-(SiO₂)系高電気抵抗膜の高周波透磁率特性Frequency Dependence of Permeability of (CoFeB)-(SiO₂) Films with Highly Electrical Resistivity

宗像 誠, 八木 正昭, 島田 寛*, 馬場 誠**, 山口正洋**, 荒井賢一**

熊本工業大学・エネルギーエレクトロニクス研究所, 熊本市池田4-22-1 (☎860-0082)

*東北大学・科学計測研究所, 仙台市青葉区片平2-22-1 (☎980-8577)

**東北大学・電気通信研究所, 仙台市青葉区片平2-22-1 (☎980-8577)

M. Munakata, M. Yagi, Y. Shimada*, M. Baba**, M. Yamaguchi**, and K. I. Arai**

Kumamoto Institute of Energy Electronics Laboratory, 4-22-1 Ikeda, Kumamoto 860-0082

*Research Institute for Scientific Measurements, Tohoku Univ., 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577

**Research Institute of Electrical Communication, Tohoku Univ., 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577

(1999年10月29日受理, 2000年1月25日採録)

Soft magnetic (CoFeB)-(SiO₂) films with highly electrical resistivity were deposited on glass substrates and hard-cured polyimide substrates by synchronous dual-rf magnetron sputtering. Frequency dependence of the permeability of the films was investigated. The films on both substrates exhibited highly resistive soft magnetic properties and a flat frequency profile with constant μ_r' over 800 MHz and a high resonance frequency of 1.5 to 1.8 GHz. The reciprocal of the loss factor $\tan \delta$ (μ_r'/μ_r'') at 400 MHz was about 30 for the film on a glass substrate.

Films deposited on hard-cured polyimide were applied to a 1-GHz drive frequency inductor. Inductance of the inductor increased by about 20% compared with that of the inductor without these films.

It was concluded that the (CoFeB)-(SiO₂) films exhibited superior low loss characteristics in the range of 10 MHz to 1 GHz.

Key words: (CoFeB)-(SiO₂) film, high resistivity, permeability, low core loss, 1-GHz drive frequency inductor

1. はじめに

近年, 表面実装技術やデバイス集積化技術の発展により, 電子機器の小型化, 薄型化, 軽量化が急速に進められてきた. これとともにインダクタにも高周波化が求められ¹⁾, 数 MHz 以上で動作する電力用薄膜磁心²⁾, 数 100 MHz から GHz 帯で動作するフィルターおよびインピーダンス整合用のインダクタ薄膜磁心³⁾などの開発研究が行われるようになった. このような材料では, 高飽和磁化 ($4\pi M_s$), 低保磁力 (H_c), 低い磁歪 (λ_s), 高電気抵抗率 (ρ), 適度な大きさの一軸異方性磁界 (H_k) を合わせ持つことが必要とされる. 特に数 100 MHz 以上の用途には, 高い電気抵抗と異方性磁界を有するナノグラニューム膜の検討が行われてきた^{4) 5) 6)}.

著者らの一部はこれまで, 数 MHz ~ 数 10 MHz で機能する

電力用薄膜磁心材料として, 400 $\mu\Omega\text{cm}$ 以上の電気抵抗率を持つ (CoFeB)-(SiO₂) 系高電気抵抗軟磁性膜を rf 二元同時スパッタ法によって作製し, この膜が大振幅磁界下において非常に低い鉄損値を示すことを報告してきた⁷⁾. さらに, この膜は 7 ~ 8 kG の飽和磁化と 40 ~ 50 Oe の一軸異方性磁界とを併せ持つため, 自然共鳴周波数 $f_r = \gamma / 2\pi (M_s H_k)^{1/2}$ (γ : ジャイロ磁気定数) が 1 GHz を越えるようなインダクタ磁心³⁾ の特性も備えていると考えられる.

本研究では, ガラス基板上およびガラス基板上に熱硬化したポリイミド層上に (CoFeB)-(SiO₂) 系高電気抵抗膜を作製し, 10 MHz ~ 2 GHz の高周波透磁率特性を検討するとともに, GHz 帯インダクタへの応用について検討したので報告する.

2. 実験方法

成膜は二元同時 rf マグネトロンスパッタ法により, Co_{66.4}Fe_{7.6}B₂₆ ターゲット (99.5 at.%, 直径 100mm × 5mm) と SiO₂ ターゲット (99.5 at.%, 直径 100mm × 5 mm) を用いて Ar 雰囲気中で行った. SiO₂ の添加量は, Co_{66.4}Fe_{7.6}B₂₆ ターゲットへの投入電力を固定し, SiO₂ ターゲットへの投入電力を変えながら調整した. とくに, 高周波透磁率特性の検討のため, 基板の種類に関わらず電気抵抗率と静磁気特性とがほぼ同程度 ($\rho = 380 \sim 590 \mu\Omega\text{cm}$) となるように, 膜中の SiO₂ の体積比率を 20 vol.% 付近⁷⁾ で加減して成膜した. Fig.1 に基板の回転方向とターゲットの位置関係と主な成膜条件を示す. 基板は水冷しながら, その回転軸がターゲット面に平行になるように 140 r.p.m. で回転させた. 基板にはガラス (松波ガラス製 # 7059, 45mm × 45mm × 1mm), ガラス基板上にスピコートしたのち熱硬化したポリイミド層 (厚さ 3 μm), さらに熱硬化ポリイミド層に Cr 下地層 (厚さ数 100 Å) を施したもの, 計三種類を用いた.

磁気特性は振動試料型磁力計 (VSM), 電気抵抗は四端子法, 構造解析は平行ビーム光学系を用いた薄膜 X 線回折 (XRD) によりそれぞれ行った. また, 高周波透磁率は 100 MHz ~ 3 GHz まで広帯域パーミアンス測定装置により測定した.

さらに、(CoFeB)-(SiO₂)膜を用いてGHz帯薄膜インダクタ⁵⁾を試作した。最初(100)配向Si基板の上にウェット熱酸化と常圧CVDにより厚さ1.4 μmのSiO₂層を形成し、その上にAl-Si導体をrfスパッタ成膜したのち、ウェットエッチングにより4ターンのスパイラルコイル(外形337 μm × 337 μm)をパターンニングした。次に厚さ3.5 μmの感光性ポリイミド絶縁層を施し、その上に一層だけ(CoFeB)-(SiO₂)膜を厚さ0.5 μm成膜した。ポリイミド層の上にはあらかじめCr下地層(500 Å)を施した。インダクタンスと抵抗の測定にはウェハープローブ(Cascade Microtech 製, Picoprobe)を用いた⁸⁾。

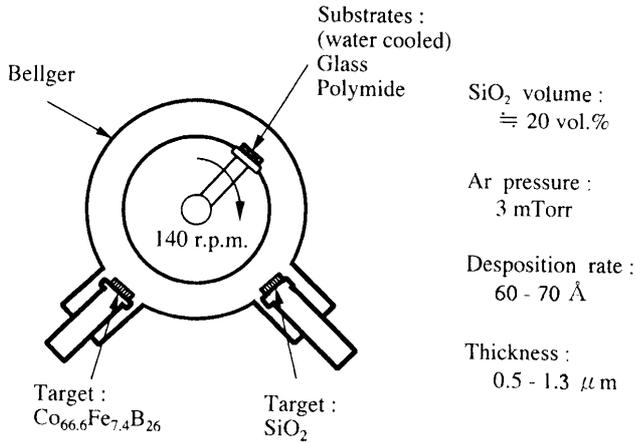


Fig. 1 Schematic illustration of the equipment and deposition conditions.

3. 実験結果

3.1 静磁気特性

Fig.1 (a), (b)はAs-dep.状態の膜の磁化履歴曲線とX線回折パターンの一例を示す。Fig.1 (a)は、ガラス基板に作製した(膜厚d = 1.3 μm, 電気抵抗率ρ = 567 μΩ cm, 飽和磁化4πM_s = 7.3 kG)の磁化履歴曲線である。困難磁化方向の保磁力H_{ch}は0.1 Oe, 容易磁化軸方向の保磁力H_{ce}は0.3 Oeで、高電気抵抗率とともに低保磁力が得られている。H_{ch}には若干の膜厚依存性が見られるが、ガラス基板に作製した膜では、膜厚0.5 μm ~ 1.3 μmで0.05 ~ 0.1 Oeの低保磁力が得られる。さらに膜内には一軸磁気異方性が観測される。異方性磁界H_kは50 Oe, 困難磁化軸は基板の回転方向と一致しており、H_kは膜内において方向、大きさともに一様である。この異方性の成因については不明であるが、少なくとも磁界によって可逆的に誘導される磁気異方性ではなく⁷⁾, Fig.1に示した基板の回転方向に生ずるスパッタ粒子の斜め入射効果⁹⁾などによるものではないかと推察される。

Fig.1 (b)のX線回折パターンでは、膜厚や基板の種類によらず、2θ = 45 deg.付近にCo-Fe系アモルファス合金のハローパターンが観測される。詳しくは透過電子顕微鏡による微視的構造の検討を要するが、Co-Fe系微結晶、Co-O系微結晶などのパターンなども観測されないことから、この膜

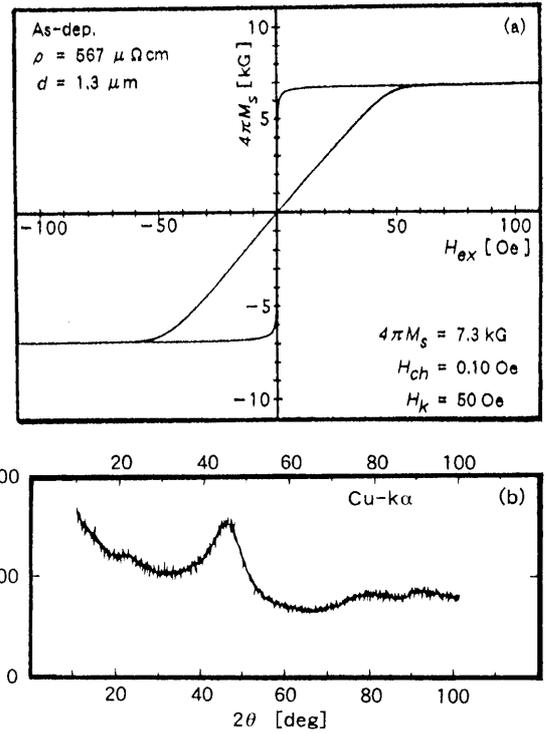


Fig. 2 An example of M-H curves of (CoFeB)-(SiO₂) film (a) and XRD patterns (b).

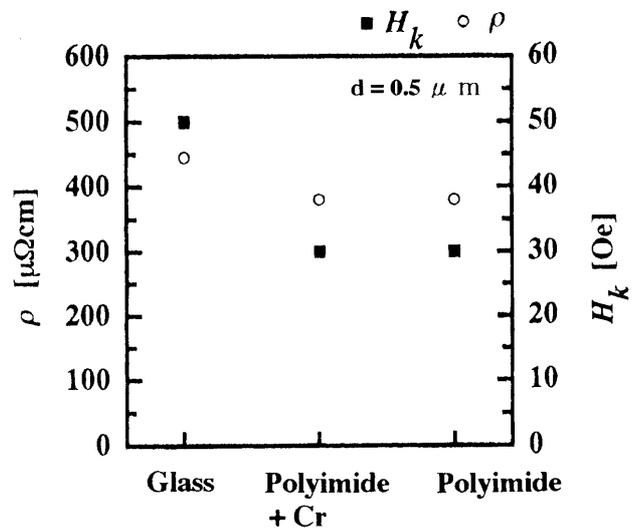


Fig. 3 Substrate dependence of ρ and H_k.

はCo_{66.4}Fe_{7.6}B₂₆磁性アモルファス相とSiO₂系セラミックアモルファス相との複相構造からなるものと推察される⁷⁾¹⁰⁾。

Fig.3は、ガラス、熱硬化ポリイミド層、Cr下地層をコートした熱硬化ポリイミド層上に、それぞれ同じスパッタ条件で作製した厚さ0.5 μmの膜のρおよびH_kを示す。熱硬化したポリイミド層とCr下地層をコートした熱硬化ポリイミド層上に作製した膜のρおよびH_kは、ガラス基板に作製したものに比べて、ρでは10 ~ 20%, H_kでは35 ~ 40%小さくなる傾向を示す。ポリイミド層上ではCr下地層コートのある無し

による差異はほとんど見られない。一方、保磁力 H_{ch} はガラス基板上では 0.1 Oe, ポリイミド層直上で 0.3 Oe, Cr 下地層を施したポリイミド層上で 0.2 Oe で、若干の差異が認められる。ガラス基板上では最も低い保磁力が得られるが、ポリイミド層上では、直上よりも Cr 下地層を施した膜の方が若干低い保磁力が得られる傾向が見られる。この傾向は、結晶質ナノグラニューラ-高抵抗軟磁性膜 Fe-Al-O においても見いだされており^{5) 11)}, Cr 下地層はポリイミド層について共通した改善効果を示す。この効果の原因については不明であるが、膜の平坦性による異方性分散、膜初期成長の差異、基板-磁性膜間の応力緩和、などが関連しているものと考えられる²⁾。

3.2 高周波磁気特性

Fig.4 (a),(b)は、Fig.3に示した膜、すなわちガラス基板上および熱硬化したポリイミド層上に作製した膜の比透磁率 μ_r' および μ_r'' の周波数依存性を示す。共鳴周波数はいずれも 1 GHz を越えており、ガラス基板では約 1.8 GHz, ポリイミド層上では約 1.5 GHz の有効な高周波透磁率特性を示す。 $\mu_r' / \mu_r'' = 1$ の周波数を有効動作周波数 f_e とした場合、ガラス基板の膜では $f_e = 1.2$ GHz の値、ポリイミド層上の膜では $f_e = 1$ GHz である。ガラス基板の膜の 400 MHz における μ_r' / μ_r'' (損失係数 $\tan \delta$ の逆数) の値は約 30 で、この値は膜厚によっても異なるが、CoFeSiB アモルファス多層膜¹²⁾ および Co 系グラニューラ-膜⁴⁾ に比べて少なくとも 1.5 倍以上である。

ポリイミド層上に作製した膜では、Cr 下地層を施したものとしないものとの間には顕著な共鳴周波数の違いは見られない。ガラス基板の膜の共鳴周波数が若干高いのは、Fig.3 において示したように異方性磁界が大きいと考えられるが、詳細については不明である。透磁率の値については、Cr 下地層を施したポリイミド層上の膜が $\mu_r' = 450$ で最も大きく、Cr 下地層を施していない膜より 1.5 倍程度の大きい値を示す。ガラス基板の μ_r' は 160 程度で最も低い。ガラス基板の膜と同様に、ポリイミド層直上の膜の透磁率は異方性磁界による磁化曲線の傾きと一致する。Cr 下地層を施したポリイミド層上の膜では明らかに透磁率改善の効果⁵⁾ が見られるが、異方性磁界による磁化曲線の傾きとは一致していない。

以上の結果、(CoFeB)-(SiO₂)系高電気抵抗膜が大振幅磁界下で低鉄損特性を示すだけでなく、GHz 帯の小振幅磁界においても有効な高周波透磁率特性を示すことがわかった。

3.3 GHz 帯インダクタへの適用

ポリイミドは微細加工性、厚膜形成性、高段差被覆性および耐熱性に優れ、デバイス作製プロセスでは絶縁およびスペーサ用の基板材として重要な役割を果たす。本研究ではデバイス応用の可能性を検討するため、Cr 下地層を施した熱硬化ポリイミド層上の (CoFeB)-(SiO₂) 膜を GHz 帯インダクタに適用した。

Fig.5 (a),(b)に作製したインダクタの構造を示す。インダクタは、厚み 2.6~3.5 μm のスパイラルコイル上にポリイミド層を介して膜厚 0.5 μm の磁性膜を 1 層だけ成膜したものである。磁性膜の困難磁化軸はスパイラルコイルの一辺に平行にしているため、コイルは磁性膜の容易磁化軸と困難磁化軸の両

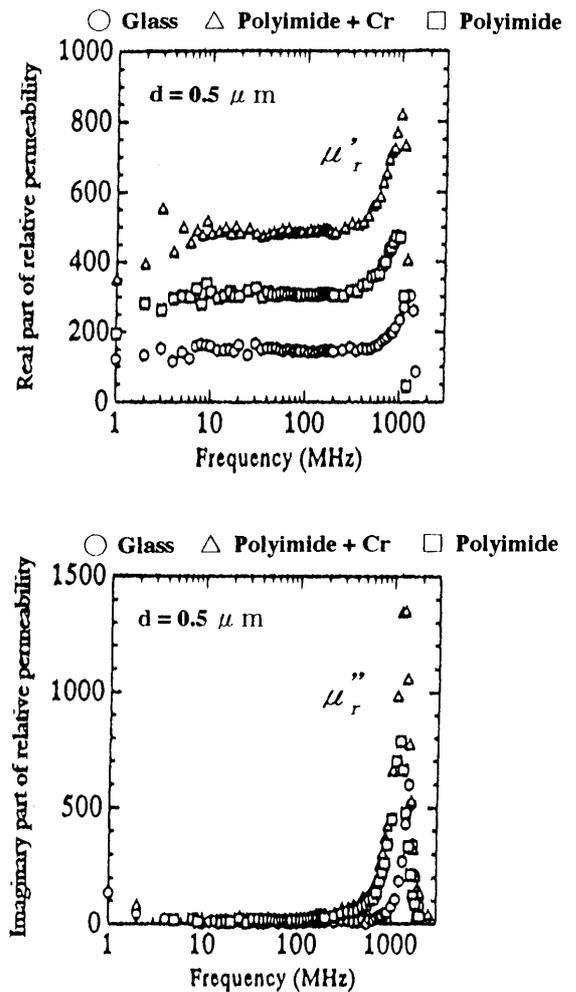


Fig. 4 Frequency dependence of relative permeability μ_r' and μ_r'' .

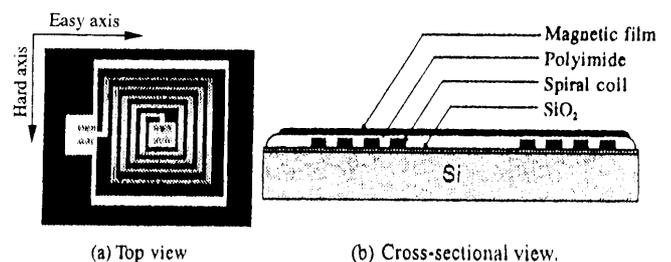
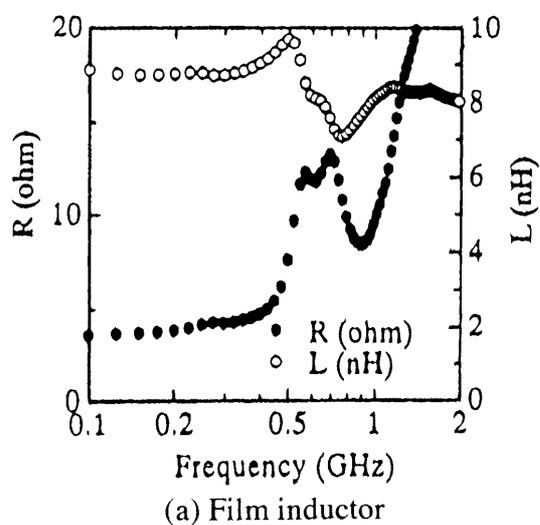


Fig. 5 Structure of microfabricated inductor.

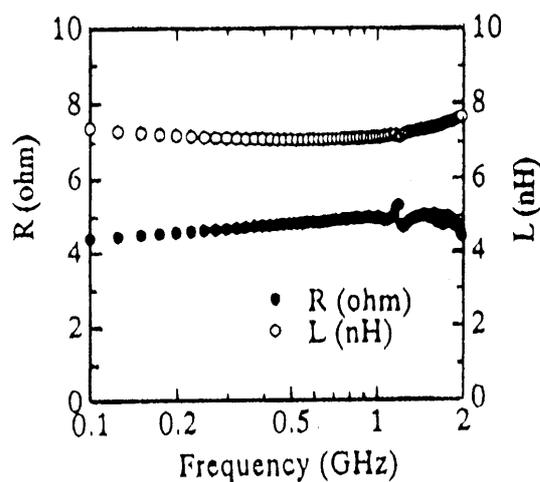
方向を等分に励磁する構造となっている。容易磁化軸方向の励磁部分がある場合、コイルの Q 値は低下することがすでに知られており、対策として励磁方向を困難磁化軸に揃えるようなスリット加工の有効性が明らかにされている^{3) 5) 13)}。Fig.5 に示したインダクタの構造は、磁性膜の機能性の有無を検討するための構造であり、デバイス特性について最適化された構造^{5) 14)}とは異なる。

Fig.6 (a),(b)は、磁性膜を設けた場合と磁性膜なしの空心の場合のインダクタンス L および抵抗 R の周波数依存性を示す。

Fig.6 (a)では、500 MHz 付近に磁性膜の磁気共鳴損失による変動部分を除き、 L はFig.6 (b)の空心の場合に比べて約20%上昇している。この上昇分はCoZrNb膜¹³⁾およびFeAlO膜⁵⁾を磁心に用いた場合に比べて10%程度大きい値を示す。磁気共鳴損失による変動は、磁性膜の局所的な H_k の減少に起因すると考えられるが¹⁴⁾、いずれにしても1 GHz 付近までの R の値とその増加の程度はCoZrNb膜¹³⁾およびFeAlO膜⁵⁾を磁心に用いた場合とほぼ等しいため、磁性膜は部分的に機能していると考えられる。一方、インダクタの1 GHz における性能指数 Q 値は、 R の増加の結果、空心の場合の約50% ($Q = 5.3$)となっている。この Q 値の減少についても、CoZrNb膜¹³⁾およびFeAlO膜⁵⁾を磁心に用いた場合と同程度であり、容易磁化軸方向に励磁される磁性膜部分の高周波損失が原因していると考えられる。



(a) Film inductor



(b) Filmless inductor

Fig. 6 Frequency characteristics of the thin-film inductor and the filmless inductor.

4. まとめ

(CoFeB)-(SiO₂)膜をガラス基板上とスピコート後熱硬化したポリイミド層上に作製し、それらの高周波透磁率特性を調

べ、さらにこの膜をGHz帯インダクタに適用した結果、以下の知見を得た。

- 1) この系の高電気抵抗アモルファス軟磁性膜は、ガラス基板上だけではなく、スピコート後熱硬化したポリイミド層上にも作製できることがわかった。厚さ0.5 μm の膜では、低保磁力 $H_{ch} = 0.2 \sim 0.3$ Oeが得られた。電気抵抗率 $\rho = 380 \sim 400 \mu\Omega\text{cm}$ 、異方性磁界 $H_k = 30$ Oeであった。
- 2) 800 MHz 付近までの高周波比透磁率 μ_r' は、ポリイミド層直上では300、Cr下地を施したポリイミド層上では450、ガラス基板上では160であった。共鳴周波数は1.5~1.8 GHzの範囲にあり、1 GHz 以上であることがわかった。
- 3) 試作インダクタにおいては、同型の空心インダクタに比べて20%程度のインダクタンスの増加が認められた。

以上の結果から、アモルファス(CoFeB)-(SiO₂)高抵抗軟磁性膜は、大振幅磁界下で低鉄損特性⁷⁾を示すだけではなく、小振幅磁界においても1 GHz まで有効な高周波透磁率特性を示すことがわかった。

謝辞 本研究の一部は東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会H11-B01「マイクロ磁気システムの研究」によって行われた。

文献

- 1) 白江公輔, 荒井賢一, 島田寛: マイクロ磁気デバイスのすべて (工業調査会, 東京, 1992).
- 2) 富田宏, 溝口徹彦: 日本応用磁気学会誌, 22, 437 (1998).
- 3) 末沢健吉, 高橋祐一, 山口正洋, 荒井賢一, 島田寛, 李衛東, 田邊信二, 伊藤健治: 日本応用磁気学会誌, 23, 1637 (1999).
- 4) 小林伸聖, 大沼繁弘, 藤森啓安, 増本健: 日本応用磁気学会誌, 20, 469 (1998).
- 5) 山口正洋, 高橋祐一, 末沢健吉, 荒井賢一, 菊池新喜, 島田寛, 李衛東, 田邊信二, 伊藤健治: 日本応用磁気学会誌, 23, 1649 (1999).
- 6) 大沼繁弘, 白川究, 村上進, 増本健: 日本応用磁気学会誌, 23, 1381 (1999).
- 7) 宗像誠, 八木正昭, 島田寛: 日本応用磁気学会誌, 23, 1633 (1999).
- 8) 山口正洋, 高橋祐一, 末沢健吉, 荒井賢一, 菊池新喜: 日本応用磁気学会誌, 22, 861 (1998).
- 9) 李衛東, 加藤和照, 北上修, 島田寛: 日本応用磁気学会誌, 22, 449 (1998).
- 10) H.Matsuyama, H.Eguchi, and H.Karamon: *J.Appl.Phys.* 67, 5123 (1990).
- 11) 宗像誠, 山岡雅則, 八木正昭, 島田寛: 日本応用磁気学会誌, 22, 669 (1998).
- 12) 白川究, 村上進, 増本健: 日本応用磁気学会誌, 22, 437 (1998).
- 13) 馬場誠, 末沢健吉, 高橋祐一, 茂泉孝, 山口正洋, 荒井賢一, 菊池新喜, 芳賀昭, 島田寛, 田邊信二, 伊藤健治: 第23回日本応用磁気学講演概要集, 75 (1999).
- 14) 馬場誠, 末沢健吉, 茂泉孝, 山口正洋, 荒井賢一, 芳賀昭, 島田寛, 田邊信二, 伊藤健治: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-99-185 (1999).