

# NiFe/Cu, Co/Cu 多層膜の GMR 特性

## GMR Characteristics of NiFe/Cu and Co/Cu Multilayers

田ノ上修二/Shuji Tanoue・未来技術研究所 エレクトロニクス材料研究部 主任研究員

細谷憲孝/Noritaka Hosoya・本社 知的財産第二室

### 要 約

磁場の印加による電気抵抗の変化を表す指標である磁気抵抗効果(Magnetoresistance Effect: MR)は、多層膜では従来の異方性磁気抵抗効果に比べ、数倍から数十倍の大きさを示すため巨大磁気抵抗効果(Giant Magnetoresistance Effect: GMR)と呼ばれる。このような膜は、ハードディスクドライブ(HDD)の磁気ヘッドセンサーや磁気エンコーダーなどへの適用が考えられる。当社においても多層GMR膜の研究を行い、高いMR比と低い飽和磁場(Hs)の両立を検討してきた。今回NiFe/Cu系の多層膜とCo/Cu系多層膜のGMR特性について報告する。

### Synopsis

Magnetoresistance in multilayers is between several times and several times an order of magnitude larger than conventional magnetoresistance, gaining it the name Giant magnetoresistance (GMR). These multilayers have potential applications in head sensors in hard disk drives or magnetic encoders. We investigated the multilayers and simultaneously improved high MR ratio and saturation field using ion beam sputtering (IBS). In this paper GMR characteristics of NiFe/Cu and Co/Cu multilayers are reported in terms of film thickness and buffer layers.

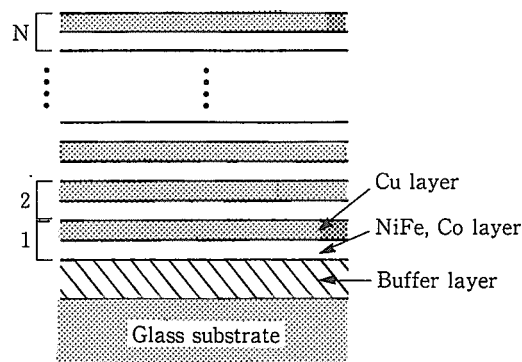
## 1. 緒 言

多層膜による巨大磁気抵抗効果は、1988年にBaibichらにより、Fe/Crの多層膜で4.2 Kで飽和磁場2 Tながら、MR比が45%と非常に大きな値を示し、一気に注目された。その後IBMのParkin<sup>2)</sup>が、1500以上の材料と膜厚の組み合わせを精力的に研究し、大きなMRのためには3d原子が有効なこと、非磁性層の厚みがほぼ1 nmの間隔でMRが振動的な極大を示すことなどを明らかにした。この巨大磁気抵抗効果が注目されたのは、従来の磁気抵抗効果のMR比2-3%と比べて、非常に大きな値であり、磁気センサーとしての可能性が大きいからである。磁気センサーとして使用するには、大きなMR比とともに、小さな飽和磁場(Hs)が必要であり、飽和磁場の大きさとしては100 Oe (7.96 kA/m)以下が目安となる。NiFe/Cu多層膜は比較的Hsが低く、最も実用化に近い材料と考えられ、Co/Cu多層膜はMR比は高いが、Hsが大きいので、バッファ層による効果について検討を行った。

## 2. 実験方法

多層膜の成膜には、3元イオンビームスパッタ装置(IBS)を用い、2"ガラス基板上に多層膜を連続で第1図のように

成膜した。成膜条件を第1表に示すが、成膜は膜厚精度が0.1 nm以下になるような条件と各単層膜電気抵抗が最小となる条件を選択し、膜厚は成膜時間により制御した。NiFe/Cu多層膜の場合はCu 5 nmのバッファ層の上に多層膜を成膜した。Co/Cu多層膜の場合はバッファ層なしの場合とCu, Fe, Crバッファ層厚を変えて、その上に多層膜を成膜した。多層膜の評価はMR比は2"のべた膜を4端子法により、磁気特性はべた膜の中心部1 cm<sup>2</sup>の試料を切り出し、試料振動型磁力計(VSM)により行った。また膜の構造評価として、断面TEM観察等を行った。



第1図 多層膜の構成

・Fig.1 Schematic diagram of experimented multilayers

第1表 IBSによる成膜条件

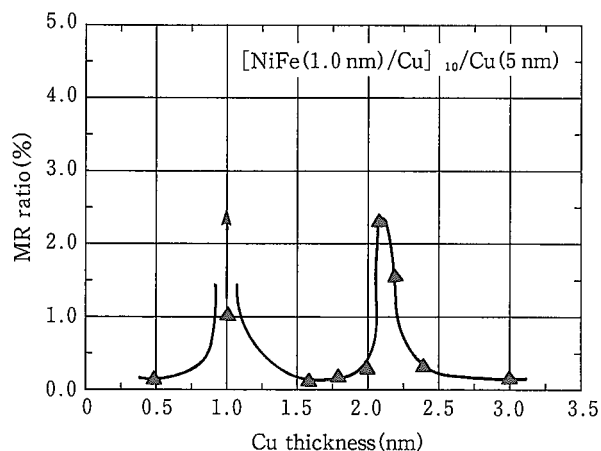
Table 1 Sputtering conditions for IBS

到達真空度	$<5 \times 10^{-7}$ Torr			
成膜ガス圧	$1.0 \times 10^{-4}$ Torr			
各ターゲット 条件		加速電圧 (V)	加速電流 (mA)	成膜速度 (nm/s)
	NiFe	500	60	0.0754
	Co	300	50	0.0435
	Cu	500	60	0.092
		300	40	0.0625
	Fe	300	60	0.0408
	Cr	300	60	0.0639

### 3. 実験結果と考察

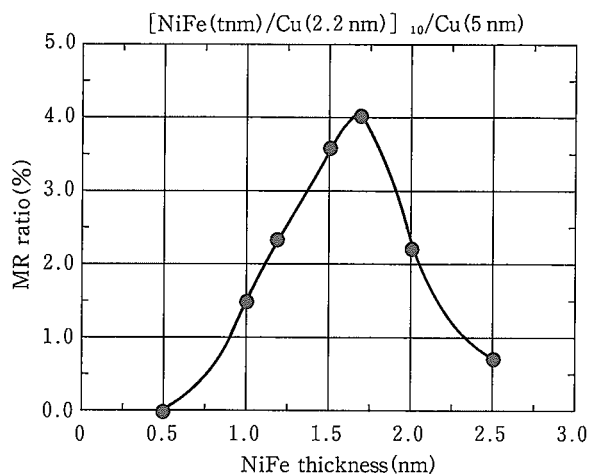
#### 3-1 NiFe/Cu 多層膜の GMR 特性

第2図に NiFe 1.0 nm の磁性体を用いた場合の MR 比と Cu 膜厚依存性の関係を示すが Cu 膜厚が、1.0 nm と 2.1 nm 付近で、ピークを持つ。第1ピークの 1.0 nm のところでは、飽和磁化が 200 Oe 以上であり、正確な測定はできていない。本研究では実用可能な飽和磁化を示す第2ピークについて MR 比の検討を主に行った。第2ピークは 2.1 nm と 2.2 nm の間でピークを取り、極狭い範囲で、MR 比が増大する。第3図に Cu 膜厚を 2.2 nm に固定し、NiFe 膜厚を 0.5 nm から 2.5 nm まで変化させたときの MR 比を示すが、NiFe が 0.5 nm では、MR 比は零であるが、膜厚が厚くなるに従い、MR 比は向上し、1.7 nm で MR 比 4.0 % のピークを取り、それ以上の膜厚で減少する。この理由として膜厚 0.5 nm では、磁性体として、磁化が弱く、またある膜厚でピークをとり、それ以上で MR 比が減少するのは、Mathon<sup>3)</sup>や Dieny<sup>4)</sup>の理論により、スピンの非対称散乱により、定性的に説明できる。第4図に Cu 膜厚 2.2 nm で、NiFe 膜厚 1.5 nm と 1.0 nm の多層膜の2層膜回数と MR 比の関係を示すが、いずれの場合も積層回数



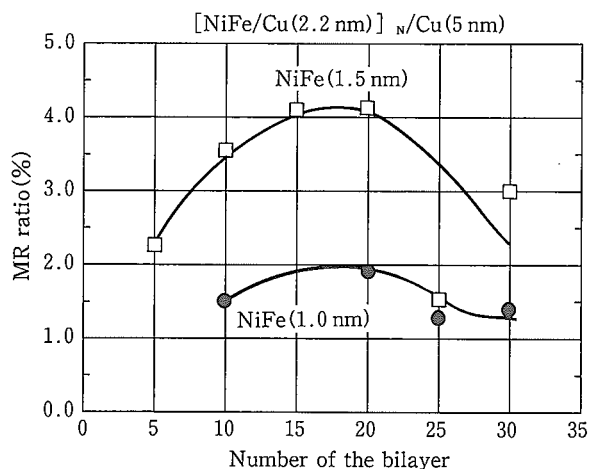
第2図 NiFe/Cu多層膜のMR比のCu膜厚依存性

Fig.2 MR ratio dependence on Cu film thickness in NiFe/Cu multilayer



第3図 NiFe/Cu多層膜のMR比のNiFe膜厚依存性

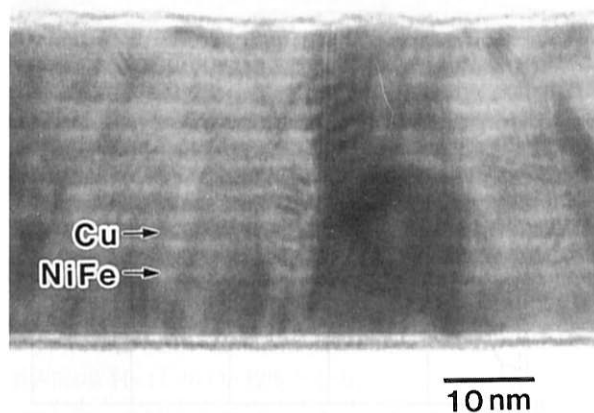
Fig.3 MR ratio dependence on NiFe film thickness in NiFe/Cu multilayer



第4図 NiFe/Cu多層膜のMR比と積層回数依存性

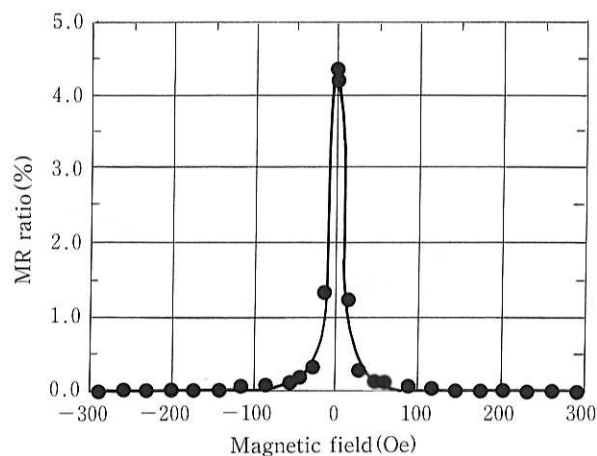
Fig.4 MR ratio dependence on bilayer repetition in NiFe/Cu multilayer

が 15 回から 20 回でピークを取り、それ以外で減少している。回数が 20 回を超えると MR 比が減少するのは、膜厚のずれが生じたり、界面の粗さが変化してくるためと考えられる<sup>5)</sup>。第5図に [NiFe 1.5 nm/Cu 2.2 nm]<sub>9</sub>/Cu 5 nm の多層膜の断面 TEM 写真を示すが、各界面を通してモアレが認められることから、整合性は良好と判断される。第6図に [NiFe 1.5 nm/Cu 2.2 nm]<sub>15</sub>/Cu 5 nm 多層膜の MR 曲線を示すが、飽和磁場  $H_s$  は 40 Oe 程度と小さいが、MR 比は 4.3 % 程度であり、電流のバッファ層へのシャントを抑えるため、Cu バッファを除いても 5 % 弱であった。このため IBS を用いた NiFe/Cu 多層膜の第2ピークの MR 比は最大で 5 % 程度と推定される。



第5図  $[\text{NiFe } 1.5 \text{ nm}/\text{Cu } 2.2 \text{ nm}]_9/\text{Cu } 5 \text{ nm}$  の多層膜の断面 TEM 写真

Fig.5 Cross-section TEM image of  $[\text{NiFe } 1.5 \text{ nm}/\text{Cu } 2.2 \text{ nm}]_9/\text{Cu } 5 \text{ nm}$  multilayer



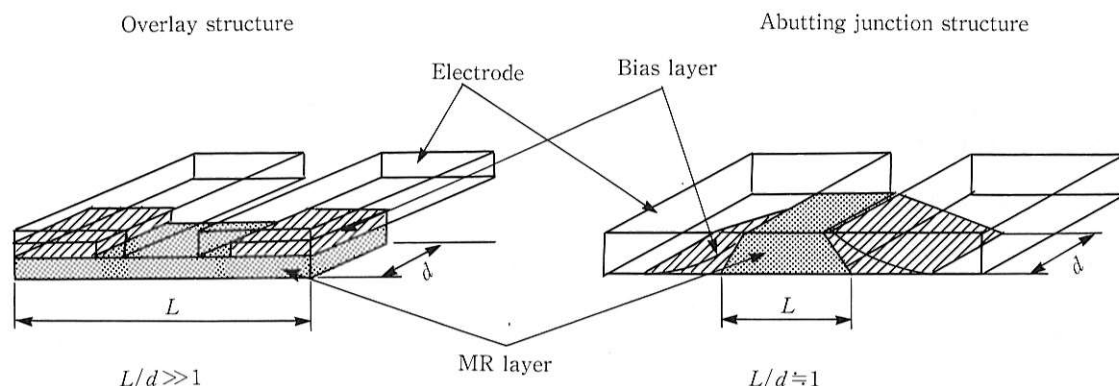
第6図  $[\text{NiFe } 1.5 \text{ nm}/\text{Cu } 2.2 \text{ nm}]_{15}/\text{Cu } 5 \text{ nm}$  の多層膜 MR 曲線

Fig.6 MR curve of  $[\text{NiFe } 1.5 \text{ nm}/\text{Cu } 2.2 \text{ nm}]_{15}/\text{Cu } 5 \text{ nm}$  multilayer

### 3-2 Co/Cu 多層膜の GMR 特性

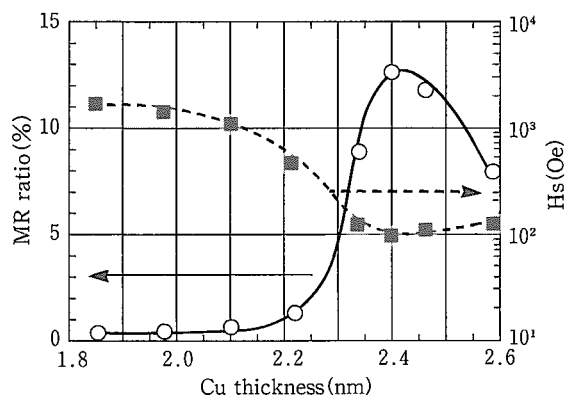
Co/Cu 多層膜は NiFe/Cu 多層膜に比べて、発現する MR 比は大きい、飽和磁場  $H_s$  も大きい。第7図に示すように膜を厚み方向に重ねていく従来のオーバーレイ構造では、センサー膜の長さ  $L$  と幅  $d$  との比である  $L/d$  が大きく、そのため形状異方性が大きくなり、センサーにしたときの飽和磁場  $H_s$  は更に大きくなる。事実 NiFe/Cu 多層膜では、膜単独の  $H_s$  は 40 Oe 程度であったが、オーバーレイ構造のセンサーでは  $H_s$  は 150 Oe と約 4 倍大きくなっている<sup>6)</sup>。そのためこの構造では、膜単独の  $H_s$  が大きい Co/Cu 多層膜のヘッドセンサーへの適用は困難であるが、センサー膜とバイアス、電極膜を膜断面方向で接続させる最近のアバットジャンクション構造<sup>7)</sup>ではセンサー膜の長さ  $L$  と幅  $d$  の比である  $L/d$  がほぼ 1 に近くなってきており、形状異方性は小さく、センサーにしたときの飽和磁場は、膜の  $H_s$  が主であり、ヘッドセンサー適用も可能な領域に入ってきている。

第8図は Co 膜厚 1.0 nm と Cu を 20 層積層した多層膜の Cu 膜厚を 1.8 nm から 2.6 nm まで変えたときの MR 比と飽和磁場  $H_s$  との関係を示すが、Cu 膜厚 2.4 nm で MR 比は最大の 12.5 % を取り、飽和磁場  $H_s$  は最小の 95 Oe を取った。この関係は従来の Fe/Cr 等で知られている、MR 比が高いと飽和磁場も高い<sup>8)</sup>ということと異なっており、MR 比の改善と同時に飽和磁場も改善できることを示している。第9図は VSM により多層膜の磁化曲線を測定し反強磁性結合の体積分率を Hallway ら<sup>9)</sup>と同様に見積もったものである。反強磁性結合の体積分率が増加するにつれ、MR 比は線形的に増加している。12.5 % の MR 比では、約 60 % が反強磁性的な結合をしており、理想的な 100 % の結合では直線を外挿することにより、IBS による第2ピークでの Co/Cu 多層膜の MR 比は 22 % に達すると推定される。



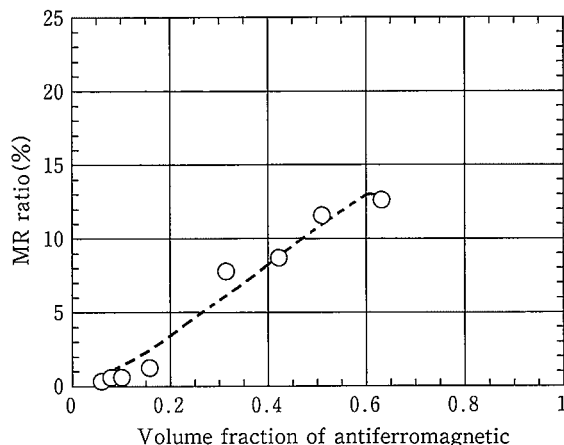
第7図 磁気ヘッドセンサーの構造図

Fig.7 Two structures of magnetic sensors



第 8 図 Co/Cu 多層膜の MR 比, 飽和磁場  $H_s$  の Cu 膜厚依存性

Fig.8 MR ratio and saturation field dependence on Cu film thickness in Co/Cu multilayer



第 9 図 磁化曲線より求まる反強磁性体の体積分率と MR 比

Fig.9 Volume fraction of antiferromagnetic vs. MR ratio

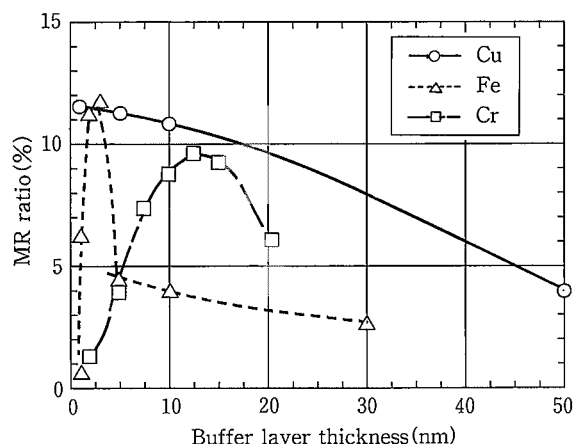
### 3-3 バッファ層の効果

Co(1.0 nm)/Cu(2.4 nm) 多層膜の MR 比と飽和磁場  $H_s$  を改善する方法として, RF スパッタにおいてバッファ層の変化により MR 特性が変化すると報告<sup>10),11)</sup>もある。バッファ層として, bcc 系の Fe, Cr, fcc 系の Cu について, その膜厚を変えて, MR 比と飽和磁場に及ぼす影響について検討を行った。第 2 表には, 用いたバッファ層と Co 磁性層との整合性を示す。格子整合性では Cr, Fe, Cu の順である。MR 比と  $H_s$  に及ぼすバッファ層厚の効果を図 10 図と第 11 図に示す。Fe バッファ層の場合

第 2 表 バッファ層と磁性層との整合性

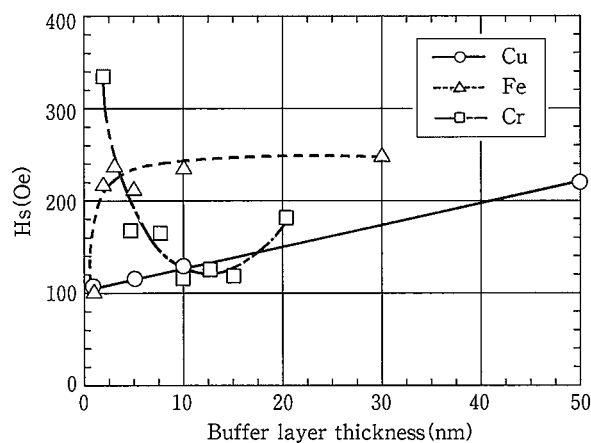
Table 2 Lattice coherency between magnetic layer and buffer layer

バッファ層	(111) 面間隔 (nm)	fcc-Co(111) (0.2047 nm) との差 (%)
fcc-Cu	0.2088	2.0
bcc-Fe	0.2027	-0.98
bcc-Cr	0.2039	-0.39



第 10 図 Co/Cu 多層膜の MR 比とバッファ層厚の関係

Fig.10 Relationship between MR ratio and buffer layer thickness in Co/Cu multilayer



第 11 図 Co/Cu 多層膜の飽和磁場とバッファ層厚の関係

Fig.11 Relationship between saturation field and buffer layer thickness in Co/Cu multilayer

は, 1 nm では MR 比は低く, 2-3 nm に MR 比のピーク 12% を持ち, 5 nm 以上では MR 比は 5% 以下に減少する。

一方飽和磁場  $H_s$  は 1 nm の 100 Oe から増大し, 2 nm 以上で 240 Oe と一定になる。Cr バッファ層の場合は, 2 nm で MR 比は 2% 弱と低く, Cr 膜厚が増大するにつれ増大し, 12 nm で最大の 9.6% をとり, それ以上で MR 比は減少する。 $H_s$  は従来の傾向と同じで MR 比が高いほど減少している。Cu バッファ層の場合は, 膜厚が厚くなると電流のシャントにより, MR 比は低下する。飽和磁場  $H_s$  も膜厚が厚くなると増大している。

このように IBS で成膜した Co/Cu 多層膜においては, バッファ層の種類や層厚により, MR 比や  $H_s$  に変化は認められるが, バッファ層がない場合に比べて特性改善効果はなかった。バッファ層の特性は Cu, Fe, Cr バッファ層の順であり, この結果は DC スパッタでの S. Gangopad-

hyay ら<sup>12)</sup>の CoFe/Cu 多層膜のバッファ層の結果と一致している。

#### 4. 結 言

IBS を用いて, NiFe/Cu 多層膜, Co/Cu 多層膜の第 2 ピークの GMR 特性について検討を行い, 以下の結論を得た。

- (1) NiFe/Cu 多層膜では, NiFe 1.5 nm, Cu 2.2 nm の膜厚の 15 層から 20 層構成で MR 比は最大の 4.3 % を取り, 飽和磁場  $H_s$  は 40 Oe 程度となる。
- (2) Co/Cu 多層膜では, Co 1.0 nm, Cu 2.4 nm の膜厚構成で, MR 比は最大の 12.5 %, 飽和磁場は最小の 95 Oe を取る。
- (3) Co/Cu 多層膜では MR 比が最大のところで, 飽和磁場は最小を取る。
- (4) Co/Cu 系では, Cu, Fe, Cr バッファ層による MR 比, 飽和磁場の特性改善効果は認められなかった。

#### 謝 辞

本研究を推進するにあたり, 多大の貢献を頂いた現リードライトエスエムアイ(株)上野昌紀氏に謝意を表します。



田ノ上 修二/Shuji Tanoue

未来技術研究所  
エレクトロニクス材料研究部 主任研究員  
(問合せ先: 06(489)5951)

#### 参考文献

- 1) M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich and J. Chazelas: *Phs. Rev. Lett.*, **61**, 2472 (1988)
- 2) S. S. P. Parkin: *Phs. Rev. Lett.*, **67**, 3598 (1991)
- 3) J. Mathon: *J. Mag. Magn. Mat.*, **100**, 527 (1991)
- 4) B. Dieny, A. Vedyayev and N. Ryzhanova: *J. Mag. Magn. Mat.*, **121**, 366 (1993)
- 5) 角田匡清, 高橋研, 宮崎照宣: 日本応用磁気学会誌, **17**, 826 (1993)
- 6) 上野昌紀, 田ノ上修二: 日本応用磁気学会誌, **19**, 401 (1995)
- 7) D. Hannon, M. Krounbi and J. Christner: *IEEE Trans. Mag.*, **30**, 298 (1994)
- 8) 久保田均, 石尾俊二, 宮崎照宣: 日本応用磁気学会誌, **16**, 309 (1992)
- 9) H. Holloway and D. J. Kubinski: *J. Appl. Phys.*, **79**, 7090 (1996)
- 10) 後藤章二, 神保睦子, 目黒賢一, 綱島滋, 内山晋: 日本応用磁気学会誌, **18**, 345 (1994)
- 11) 高島洋, 北上修, 島田寛: 日本応用磁気学会誌, **19**, 381 (1995)
- 12) Sunita Gangopadhyay, Jian X. Shen, M. T. Kief, J. A. Banard and M. R. Parker: *Trans Mag.*, **31**, 3933 (1995)