SAL バイアス法を用いた NiFe/Cu 多層膜 MR 素子の特性

Properties of the Magnetoresistive Elements for NiFe/Cu Multilayers
Using the SAL Biasing Method

上野昌紀・田ノ上修二

住友金属工業(株)未来技術研究所, 尼崎市扶桑町 1-8 (〒660)

M. Ueno and S. Tanoue

Advanced Technology Research Labs., Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-8, Fuso-cho, Amagasaki 660

Magnetoresistive (MR) elements fabricated and investigated for NiFe/Cu multilayers with transverse biasing structures. The magnetoresistive ratio of those elements is about 3.3%, which is 2.5 times as large as that of MR elements of a NiFe single film. The soft-adjacent-layer (SAL) biasing method is available for NiFe/Cu multilayers. The MR ratio decreases with increasing sense current owing to a rise in the temperature of the elements. The MR ratio is maintained in annealing up to 220°C, but rapidly decreases as a result of annealing at 250°C.

Key words: magnetoresistive element, magnetoresistive head, NiFe/Cu multilayer, giant magnetoresistance, soft-adjacent-layer bias, sense current, annealing effect

1. はじめに

磁気抵抗効果型型ヘッド (MR ヘッド) の登場以来ハードディスクの記憶密度の向上は目覚ましく, 数年後には 1 Gbit/in² が 2000 年には 10 Gbit/in² 程度が実用化されると考えられている。この領域では現状のパーマロイ (NiFe) を使った MR ヘッドでは再生出力が不足してくるので, より大きな MR 効果を持つ材料の開発が求められている。パーマロイに代わる材料として近年盛んに研究されているのが, 巨大磁気抵抗効果 (GMR) を示す磁性多層膜材料である¹⁾。

GMR を示す多層膜材料としては Fe/Cr²⁾, Co/Cu³⁾, Co/Ag⁴⁾, NiFe/Cu⁵⁾ などがあり, その中でも Co/Cu 多層膜は室温で 65% もの MR 比を示す³⁾。しかし磁気抵抗変化が飽和する磁場 (H_s) は約 10 kOe と非常に大きく, 磁気ヘッドのように微小な磁場を感知する MR 素子には適さない。一方 NiFe/Cu 多層膜では Cu の膜厚を 22 Å と振動の第 2 ピークに設定した場合, MR 比は約 8% とそれほど大きくないが H_s が約 80 Oe と小さくなるため⁶⁾, MR ヘッド用材料として期待できる。

実際に磁気ヘッド用 MR 素子として磁性多層膜を使用するためには, 通常のパーマロイ単層膜を使う場合と同様に横バイアス磁界を印加する必要がある。またヘッドに使用するサイズの素子を用いてさまざまな特性を検討する必要がある。これまで NiFe/Cu 多層膜の MR ヘッドへの応用のアプローチとしては Kitada らによる素子形状での MR 特性の検討があるが⁶⁾, 横バイアス印加機構を備えた素子での報告はない。

そこで本研究では MR ヘッド用の実用的な GMR 材料とし

て NiFe/Cu 多層膜をとりあげ, 横バイアス印加機構を備えた MR 素子を作製し MR 特性や横バイアスの特性などを検討した。また実際の磁気ヘッドの製造プロセス中では 100~300°C 程度の熱処理が行われるので, 熱処理が NiFe/Cu 多層膜の MR 特性に与える影響も調べた。

2. 実験方法

NiFe/Cu 多層膜はイオンビーム・スパッタリング法で成膜した。パーマロイ・ターゲットの組成は Ni₈₀Fe₂₀ (at%) である。チャンバー内が 5.0×10^{-7} Torr 以下になるまで排気し, Ar ガス圧が 1.0×10^{-4} Torr, イオンビームの加速電圧が 500 V, 加速電流が 60 mA の条件で成膜した。この条件での NiFe, Cu の成膜レートはそれぞれ 0.754, 0.920 Å/s であった。各層の膜厚は成膜時間で制御した。基板にはガラスを用い, 誘導磁気異方性を付与するため, 約 100 Oe の一方向磁場を成膜中に基板面に平行に印加した。

横バイアスとしては MR ヘッドでよく用いられている SAL (Soft adjacent layer) バイアス法^{7,8)}を採用した。実験に使用した試料の断面構成図を Fig. 1 に示す。ソフト膜にはアモルファス Co₈₃Zr₆Mo₁₁ (at%) を磁気的分離膜には Ti を用い, この両者は RF マグネトロン・スパッタ法で成膜した。それぞれの膜厚を Fig. 1 中に示すように変化させ, 数通りの試料を作成した。多層膜の構成は NiFe の膜厚を 15 Å に Cu を 21 Å に固定し, 積層回数は 9 あるいは 14 回 (NiFe は 10 あるいは 15 層) とした。Fig. 1 のように各層を成膜した後, フォトリソグラフィとイオンミリング工程により $3 \times 100 \mu\text{m}$ のストライプ形状に加工した。その際, 素子の長手方向は成膜時の印加磁場と平行とした。その後, 間隔 $10 \mu\text{m}$ の電極を形成した。MR

Fig. 1 Schematic cross-section of an MR element.

効果は素子高さ方向に±225 Oeの静磁場を印加し測定を行った。

熱処理の効果は素子の真空中アニールを行って評価した。温度範囲は100～250℃、アニール時間は30 minとした。またアニールは無磁場中で行った。

3. 結果と考察

3.1 MR特性とSALバイアス特性

ストライプ形状に加工する前のNiFe/Cu多層膜のMR曲線をFig. 2に示す。MR比は約5%で、 H_s は約40 Oeと比較的小さくMR曲線のヒステリシスも小さい。この構成の膜では平均すると約4.5%のMR比を示した。

Fig. 3にNiFe/Cu多層膜のSALバイアス構成でのMR曲線を示す。反磁場のためMR曲線の幅は広がり、 H_s は約150 Oeに増加している。MR比は約3.3%であり、NiFe単層膜を用いて類似の構成のMR素子を作ったときと比べて2.0～2.5倍の値を示している。またMR曲線のヒステリシスは、素子加工前と変わらず小さい。センス電流を増加させていくとMR曲線のピーク位置は正磁場側へシフトしていくことから、横バイアス磁場が印加されセンス電流とともに増加していくことが分かる。またセンス電流を増加させるとMR比が減少するが、これについては後述する。

NiFe/Cu多層膜をMR素子にした時とシート状の膜の時のMR比の比較をTable 1に示す。積層回数の違いにかかわらず、素子にすることによってMR比はシート状の膜の時よりも

[NiFe (15 Å) / Cu (21 Å)]₁₄ / NiFe (15 Å) / Ti (50 Å)

Fig. 2 Magnetoresistance vs. applied field in a NiFe/Cu multilayer.

Table 1 MR ratios in sheets and elements of NiFe/Cu multilayers

Number of NiFe layers	MR ratio (%)		MR _{element} /MR _{sheet}
	Sheet	Element	
10	4.0	2.9	73 %
15	4.5	3.3	73 %

25% 程度減少することが分かる。この原因としてソフト膜 (CoZrMo) および磁気的分離膜 (Ti) による目減りと、電極の抵抗および接触抵抗が考えられる。CoZrMo と Ti による MR 比の目減りはそれぞれの膜厚によっても変化してくるが、今回の膜厚とそれぞれの抵抗率から算出すると 15～20% 程度 MR 比を減少させる。また CoZrMo と Ti を付加せずに電極のみ付けた場合には、電極の抵抗および接触抵抗として MR 比は約 10% 減少する。両者を合わせるとほぼ今回の結果と一致する。

次に SAL バイアス特性の結果を示す。Fig. 4 にバイアス磁場のセンス電流依存性を示す。ただし Fig. 4(a) は NiFe が 15 層、Fig. 4(b) は NiFe が 10 層の場合である。また Ti は 50 Å に固定し、CoZrMo を 300, 250, 200 Å と変化させた。センス電流を増加させると、バイアス磁場は増加し約 7 mA 以上で飽和する傾向を示す。バイアス磁場の飽和は、センス電流の作る磁場により CoZrMo の磁化が素子高さ方向に飽和するために起こると考えられる。また CoZrMo が厚いほどバイアス磁場

[NiFe (15 Å) / Cu (21 Å)]₁₄ / NiFe (15 Å) / Ti (100 Å) / CoZrMo (300 Å)

Fig. 3 Magnetoresistance vs. applied field characteristics in the MR elements of NiFe/Cu multilayers with a SAL biasing structure. Sense current is (a) 1 mA, (b) 5 mA, and (c) 10 mA.

の飽和値は大きく、積層回数が少ないほどバイアス磁場の飽和値は大きい。

Fig. 5 に飽和バイアス磁場の CoZrMo 膜厚依存性を示す。飽和バイアス磁場は CoZrMo の膜厚に比例している。SAL バイアスの場合バイアス磁場は CoZrMo から出る磁束に比例するが、バイアス磁場の飽和時には磁束は CoZrMo の膜厚に比例する。したがって飽和バイアス磁場は CoZrMo の膜厚に比例する。

このように NiFe/Cu 多層膜を用いた MR 素子の SAL バイアス特性は、NiFe 単層膜を用いたときの傾向⁹⁾とよく一致する。ただし NiFe/Cu 多層膜を用いた場合には、NiFe 単層膜を用いた場合と比べてバイアス磁場を飽和させるのに要するセンス電流が大きい。これは多層膜部の膜厚が厚く、バイアス磁場が一様にかかるにくいためと考えられる。

3.2 MR 比のセンス電流依存性

3.1 でセンス電流を増加させると MR 比が減少する傾向が見られたので、さらに詳しく MR 比のセンス電流依存性を調べた。Fig. 6 に MR 比、素子の電気抵抗、および電気抵抗の変化量 (ΔR) のセンス電流依存性を示す。センス電流を増加させると MR 比は急激に減少し、13 mA では 1 mA の時の約半分に達する。一方、素子の電気抵抗は若干増加の傾向を示し、 ΔR は

大きく減少する。したがって MR 比の大きな減少は、センス電流の増加によって ΔR が急減するために引き起こされる。しかしセンス電流を 13 mA まで増加させた後 1 mA まで減少させて測定した結果、MR 比、電気抵抗、 ΔR とともに初期の値とほぼ一致した。このことから NiFe/Cu 多層膜の膜質には大きな変化は起こっておらず、 ΔR の減少は膜の劣化によるものではないと考えられる。センス電流を増加させるとわずかながら電気抵抗の上昇が見られることから、ジュール熱により素子の温度が上昇している (数十℃程度) と考えられる。その結果 NiFe 層間の反強磁性的な相互作用が弱くなり GMR 効果が小さくなって ΔR すなわち MR 比が減少すると考えられる。しかし膜質を変化させるほどには温度は上がっていない。このように NiFe/Cu 多層膜を用いた MR 素子は、非常に大きな MR 比の温度依存性を示すことが示唆された。

センス電流が 10 mA の時この素子に流れるセンス電流の密度は約 4×10^6 A/cm² であり、通常の MR ヘッドの動作電流である 1×10^7 A/cm² より小さい。実際の MR ヘッドでは磁気シールドを介してガラスより熱伝導度の良い AlTiC 基板に熱が逃げるので、単純には比較できない。しかしいずれにしても、素子の温度上昇を抑制するためには素子構造を改良するなどして放熱性をよくする必要がある。

3.3 熱処理の影響

真空中アニールを行った結果として、Fig. 7 にアニール温度に対する MR 比の変化を示す。アニール温度を上昇させていくと、220℃ までは MR 比はほとんど変化せず初期の値を保つ。しかし 250℃ のアニールにより MR 比は約 2.0% まで減少する。この温度では NiFe/Cu 多層膜の NiFe と Cu が相互に拡散し、多層構造が乱れ始めていると推測される。Ni₈₀Fe₁₅Co₅/Cu 多層膜について熱処理の影響を調べた結果によると¹⁰⁾、Cu が 20 Å の膜では 225℃ より高い温度のアニールにより MR 比が大きく減少する。本研究では Co を含まない NiFe を磁性層としているにもかかわらず、MR 比が減少し始めるアニール温度はほぼ同じである。磁気ヘッド製造のプロセス温度は 200℃ 前

[NiFe (15 Å) / Cu (21 Å)]₁₄ / NiFe (15 Å)

[NiFe (15 Å) / Cu (21 Å)]₉ / NiFe (15 Å)

Fig. 4 Sense-current dependence of the bias fields in MR elements. The numbers of NiFe layers are (a) 15 and (b) 10.

[NiFe (15 Å) / Cu (21 Å)]_N / NiFe (15 Å) / Ti (50 Å) / CoZrMo (300 Å)

Fig. 5 Saturation bias fields vs. the CoZrMo thickness.

[NiFe (15 Å) / Cu (21 Å)]₁₄ / NiFe (15 Å)
/ Ti (100 Å) / CoZrMo (300 Å)

Fig. 6 Sense-current dependence of (a) the MR ratio, (b) the resistance of a element, and (c) the resistance change when a field of 225 Oe is applied. Open circles represent values of the sense current at 1 mA after a measurement of 13 mA.

後とされているので、この素子ではプロセス中でMRが減少してしまう可能性がある。

4. ま と め

NiFe/Cu 多層膜を用いた MR 素子は約 3.3% の MR 比を示した。この値は NiFe 単層膜を用いた場合の約 2.0~2.5 倍である。また、SAL バイアス法は NiFe/Cu 多層膜にも有効に動作することがわかり、SAL バイアス特性は NiFe 単層膜を用いた

[NiFe (15 Å) / Cu (21 Å)]₁₄ / NiFe (15 Å)
/ Ti (50 Å) / CoZrMo (300 Å)

Fig. 7 Change in the MR ratio with increasing annealing temperature.

時と良く似た傾向を示す。

センス電流を増加させると MR 比は減少する。このことは素子の発熱による温度上昇によって、反強磁性的な相互作用が弱まって GMR 効果が小さくなるためと考えられる。

またこの素子は 220°C までの熱処理では MR 比は変化しないが、250°C では MR 比が減少することがわかった。熱処理によって NiFe と Cu が相互に拡散し、多層構造が乱れるためと考えられる。

文 献

- 1) 中谷, 星屋, 杉田: 日本応用磁気学会誌, **18**, 770 (1994).
- 2) M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, and J. Chazelas: *Phys. Rev. Lett.*, **61**, 2472 (1988).
- 3) S. S. P. Parkin, Z. G. Li, and D. J. Smith: *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 2710 (1991).
- 4) S. Araki: *J. Appl. Phys.*, **73**, 3910 (1993).
- 5) R. Nakatani, T. Dei, T. Kobayashi, and Y. Sugita: *IEEE Trans. Magn.*, **28**, 2668 (1992).
- 6) M. Kitada and R. Nakatani: *J. Magn. Magn. Mat.*, **127**, 224 (1993).
- 7) F. Jeffers, J. Freeman, R. Toussaint, N. Smith, D. Wachenschwanz, S. Shtrikman, and W. Doyle: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-21**, 1563 (1985).
- 8) T. Maruyama, K. Yamada, T. Tatsumi, and H. Urai: *IEEE Trans. Magn.*, **24**, 2404 (1988).
- 9) 永井, 田ノ上, 山崎: 日本応用磁気学会誌, **18**, 121 (1994).
- 10) M. Satomi and H. Sakakima: *J. Magn. Magn. Mat.*, **126**, 504 (1993).

1994 年 10 月 13 日受理, 1995 年 1 月 20 日採録