Dependence of MR properties of CPP-GMR Sensors with Co-Fe/Cu Multilayer on Sensing Current

K. Meguro, H. Hoshiya, and K. Nakamoto

Central Research Laboratory, Hitachi Ltd., 2880 Kozu Odawara-shi, Kanagawa 256-8510, Japan

The dependence of the MR properties of CPP (Current Perpendicular to the Plane)-GMR (Giant Magneto-Resistive) sensors with a Co-Fe/Cu multilayer on sensing current was investigated. A CPP-GMR sensor with a $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(1.5\text{ nm})/\text{Cu}(2.0\text{ nm})]_{16}$ multilayer had an MR ratio of 17.5 %. The MR ratio monotonically decreased with increasing sensing current. Split peaks for the MR ratio were also observed in an MR curve, when sensing current was so high as to drastically decrease the MR ratio. We calculated the MR curves with a simple coherent rotation model assuming a circular current induced field, and confirmed that the calculated MR curves were qualitatively in good agreement with experimental ones. The micromagnetic simulation for read-head dimensions also revealed degradation in the MR ratio due to the current induced field. The simulated results indicated that reducing the sensor size would effectively suppress the current induced field, which resulted in high output. The estimated output and head-amp SNR for a size of $50 \times 50\text{ nm}$ were over 2 mV and 33 dB, respectively. Therefore, a CPP-GMR sensor with a Co-Fe/Cu multilayer possibly had sufficiently high potential to be a candidate for future recording technology.

Key words: Co-Fe/Cu, multilayer, CPP-GMR, MR ratio, current induced field

Co-Fe/Cu 多層膜を用いた CPP-GMR 素子における MR 特性のセンス電流依存性

目黒賢一・星屋裕之・中本一広

日立製作所, 神奈川県小田原市国府津 2880 (〒256-8510)

1. はじめに

現在, ハードディスク装置に搭載される再生ヘッドは, CIP (Current in the Plane) -GMR (Giant Magneto-Resistive) ヘッドから TMR (Tunneling Magneto-Resistive) ヘッドに移行しつつある. 更なる記録密度向上及び高速転送化を実現する為には, 抵抗が低く, 高いヘッドアンプ SNR (Signal to Noise Ratio) が期待される CPP (Current Perpendicular to the Plane) -GMR ヘッドが注目を集めており, 研究開発が盛んに進められている. 従来の CIP-GMR ヘッドや TMR ヘッドと同様に, CPP-GMR ヘッドも SV (Spin-Valve) 構造のセンサ膜が, ヘッド応用に適した形態と考えられているが, SV 構造のオールメタル系 CPP-GMR 素子は, 寄生抵抗が占める割合が大きく, MR 比が小さいことがひとつの大きな課題となっている. CPP-GMR 素子において高 MR 比化を達成する為には, 電流狭窄層^{1)~5)}や高スピン分極率材料⁶⁾を適用した構成において, MR 比向上に関する報告がなされている. しかしながら, SV 構造の CPP-GMR ヘッドにおいては, 強磁性層体積の減少に伴って増大する磁化の熱揺らぎ起因のマグノイズ^{7), 8)}や, 高電流密度駆動によるスピントルクノイズ^{9), 10)}が問題となり, 高いヘッドアンプ SNR の実現が困難となる懸念がある.

一方で, Co-Fe/Cu 多層膜を用いた CPP-GMR 素子が, 高い MR 比を示すことが報告¹¹⁾されている. この系は各強磁性層が中間層を介して反強磁性的な相互作用を有することから, 強磁性層全体としての体積が大きく, 熱揺らぎ起因のマグノイズ抑制が期待される.

本研究では, 高い MR 比が報告されている Co-Fe/Cu 多層膜を用いた CPP-GMR 素子を作製し, MR 特性を評価した. 再生ヘッドとしての出力を考える上では, ヘッド動作時のバイアス電流 (電

圧) における MR 比が重要である為, MR 比のセンス電流依存性について検討し, その影響について考察した. また, 記録密度 500 Gb/in^2 相当以上を想定し, トラック幅が 50 nm クラスのヘッドにおける再生出力とヘッドアンプ SNR を見積もった.

2. 実験方法

Co-Fe/Cu 多層膜は, DC マグネトロンスパッタ法にて成膜した. 典型的な膜構成は, $\text{seed}/[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(1.5\text{ nm})/\text{Cu}(2.0\text{ nm})]_{16}/\text{cap}$ とした. CPP-GMR 素子は, 厚さ $1.2\text{ }\mu\text{m}$ の Ni-Fe 下部電極上に, Co-Fe/Cu 多層膜を成膜し, $0.3 \times 0.3\text{ }\mu\text{m}$ から $1 \times 1\text{ }\mu\text{m}$ のサイズにパターンニングし, 上部電極として厚さ $0.2\text{ }\mu\text{m}$ の Au を形成して作製した. MR 特性は, 室温にて直流四端子法を用いて定電流モードで測定した. 尚, 面積抵抗 RA (Resistance Area product) と MR 比は, 素子抵抗の面積依存性から寄生抵抗を算出し, これを差し引いて補正した値を用いた.

3. 結果と考察

3.1 MR 比の積層回数依存性

はじめに, $[\text{Co-Fe/Cu}]_N$ 多層膜の積層回数を変えて MR 特性を調べた. Fig. 1 に, MR 比の積層回数依存性を示す. ここでは, 素子に印加される電圧が 5 mV になるように, 測定時のセンス電流を調整した. MR 比は積層回数が増加すると共に, 単調に増大しており, 積層回数 N が 16 の時に, 17.5 % の MR 比が得られた. この時の面積抵抗 RA は, $48\text{ m}\Omega \cdot \mu\text{m}^2$ であった. 以後の実験では, 最大の MR 比が得られた $[\text{Co-Fe/Cu}]_{16}$ を用いて検討した結果について述べる.

Fig. 1 Dependence of MR ratio on number of bilayers for seed/[Co-Fe(1.5 nm)/Cu(2.0 nm)]_N/cap sensors.

3.2 MR 比のセンス電流依存性

Fig. 2 に、様々な面積の素子について、MR 比のセンス電流依存性を示す。面積の異なるいずれの素子においても、センス電流を増加するに伴って、MR 比は単調に減少した。また、素子面積の大きさに依らず、センス電流の増加に伴って、MR 比はほぼ同様に低下していることが分かる。即ち、MR 比は印加電圧ではなく、印加電流に依存して変化していることを示唆している。また、センス電流が大きい場合に、素子面積が小さいほど MR 比の低下が大きいのは発熱の影響と考えられる。

Fig. 2 Dependence of MR ratio in various size sensors on sensing current.

Fig. 3 に、面積が $0.3 \times 0.3 \mu\text{m}$ の素子について、MR 比のセンス電流依存性と、各センス電流を用いた測定の直後に行った 1.7 mA での測定で得られた MR 比を示す。例えば、66 mA のセンス電流を用いた測定では、MR 比は 3.7% まで低下しているが、その直後に行った 1.7 mA 測定では 18.5% の MR 比を示しており劣化が見られなかった。従って、大きなセンス電流の通電によって、素子には、発熱による界面での相互拡散などの不可逆的な変化は生じていないと考えられる。

Fig. 3 Dependence of MR ratio on sensing current and post-measured MR ratio with 1.7 mA after high sensing current measurements for $0.3 \times 0.3 \mu\text{m}$ sensor.

Fig. 4 に、面積が $0.3 \times 0.3 \mu\text{m}$ の素子について、センス電流を変えた場合の典型的な MR 曲線を示す。4 mA センス電流の場合には、センサ膜の磁気特性から期待されるように、ゼロ磁場で最大の MR 比を示した。センス電流を増大していくと、MR 比の低下と共に、MR 比のピーク位置が次第にスプリットしていることが分かる。即ち、センス電流を増大していくと、ゼロ磁界付近において Cu 層を介して隣接する Co-Fe 層磁化の反平行配列が阻害されていると考えられる。

Fig. 4 Measured MR curves for a $0.3 \times 0.3 \mu\text{m}$ sensor with various sensing currents.

センス電流を増大した際に見られるこの特徴的な挙動を理解する為、以下に示すモデルを用いて MR 曲線の計算を行った。素子にセンス電流を流すと、素子の端部には環状の電流バイアス磁界が生じる。オールメタル系 CPP-GMR 素子は抵抗が低い為、センス電流が大きく、電流バイアス磁界が強磁性層の磁化状態に強く影響することが指摘^{1,2)} されている。そこで、電流バイアス磁界を考慮に入れて、一斉磁化回転モデルを用いて各 Co-Fe 層の磁化方向を算出し、MR 曲線を計算した。電流バイアス磁界は、素子端部において最大となり、素子の中心部に向かって小さくなるが、

Co-Fe 膜における交換スチフネスは十分大きいことを考慮すると、素子端部の磁化状態が素子の中心部領域の磁化状態に強く影響すると思われる。従って、ここでは便宜的に $0.3 \times 0.3 \mu\text{m}$ の形状の素子を4分割し、各領域には Fig. 5 に示したように、測定磁界方向に対して平行及び直交方向に一樣な電流バイアス磁界が作用していると仮定した。また、その大きさは素子端部に生じる電流バイアス磁界とした。

Fig. 5 Schematic of current induced field.

Fig. 6 に、4分割された各領域について計算したMR曲線を示す。電流バイアス磁界の方向は、正の印加磁界方向となす角度として定義した。また、ここでは電流バイアス磁界の大きさを 500 Oe とした。これは、 $0.3 \times 0.3 \mu\text{m}$ の形状の素子に対して、およそ 40 mA 程度の電流を流した際に、素子端部に生じる電流バイアス磁界に相当する。電流バイアス磁界が測定磁界と平行な場合 (0° 及び 180°) は、電流バイアス磁界の大きさに応じて MR 曲線が横軸方向にシフトしている。この場合、最大の MR 比に変化は見られない。即ち、電流バイアス磁界の大きさに等しく、逆向きの測定磁界が印加された際に、素子に加わる合成磁界がゼロとなり、各 Co-Fe 層の磁化が反平行配列して最大の MR 比を示していると理解される。正の測定磁界方向に対して、 0° 及び 180° の方向の電流バイアス磁界を有する領域の MR 曲線は、それぞれ反対方向にシフトする。これが、センス電流を増加していった際に MR 曲線に見られた MR 比ピーク位置のスプリットの原因と考えられる。一方で、電流バイアス磁界が測定磁界と直交な場合 ($\pm 90^\circ$) は、MR 曲線にシフトは見られず、最大の MR 比に低下が見られる。この場合、素子には常に電流バイアス磁界の絶対値以上の合成磁界が印加されている。従って、各 Co-Fe 層の磁化は完全な反平行配列することがなく、最大の MR 比が低下していると理解される。

次に、4つの領域のMR曲線を積算することで、素子全体のMR曲線を計算した。Fig. 7 に、センス電流を変えた場合の、 $0.3 \times 0.3 \mu\text{m}$ 形状の素子に対するMR曲線の計算結果を示す。計算でも、センス電流増加に伴うゼロ磁界におけるMR比の低下及び、MR比ピーク位置のスプリットが確認でき、Fig. 4 に示した実験結果と良い一致が見られる。従って、センス電流の増加によってMR曲線に見られた変化の特徴は、電流バイアス磁界に起因して生じていると理解される。

Fig. 6 Overview of calculated MR curves with various biasing field directions.

Fig. 7 Calculated MR curves for a $0.3 \times 0.3 \mu\text{m}$ sensor with various sensing currents.

3.3 ヘッド寸法における再生出力及び SNR 見積り

3.2 節の結果から、Co-Fe/Cu 多層膜を用いた CPP-GMR 素子においては、センス電流による電流バイアス磁界が MR 比に大きく影響することが明らかになった。ここでは、面記録密度 500 Gb/in^2 相当以上を想定したトラック幅 50 nm クラスのヘッド寸法における電流バイアス磁界の影響をマイクロマグネティック・シミュレーターを用いて検討した結果について述べる。トラック幅と素子高さが等しい形状とし、セルサイズはヘッド寸法を縦横ともに均等に 10 分割して、 $\pm 3 \text{ kOe}$ の範囲の外部磁界に対する MR 曲線を計算した。また、計算の便宜を図る為に、Co-Fe/Cu 多層膜の構成は $[\text{Co-Fe}(1.5 \text{ nm})/\text{Cu}(2.0 \text{ nm})]_8$ とし、ここでは積層回数が 8 回で R_0 は $50 \text{ m}\Omega \cdot \mu\text{m}^2$ 、電流バイアス磁界の影響がない状態での MR 比は 17.5 % が得られるものと仮定して検討した。

Fig. 8 に、トラック幅 50 nm のヘッドに 20 mA のセンス電流を流した時の電流バイアス磁界の分布を示す。センス電流方向は、紙面の裏から表の向きとし、x 方向がトラック幅方向、y 方向が素子高さ方向に対応する。電流バイアス磁界は、素子中心部では相殺されてほぼ零となり、素子端部で最大値 1290 Oe を取る環状

の分布になっているのが分かる。Fig. 9に、トラック幅 50 nm のヘッドにおいて、隣接する Co-Fe 層の零磁界での磁化状態をセンス電流 (A) 5 mA, (B) 20 mA の場合について比較して示す。センス電流が (A) 5 mA の場合は、隣接する Co-Fe 層の磁化がほぼ反平行配列している。一方で、(B) 20 mA の場合は、Fig. 8に示した電流バイアス磁界に対応して、素子端部で磁化の曲がりが生じ、隣接する Co-Fe 層の磁化の反平行配列が阻害されている様子が分かる。それぞれに対して MR 比を計算すると、センス電流が (A) 5 mA の場合は 17.3 %, (B) 10 mA の場合は 12.1 %であった。従って、マイクロマグネティック・シミュレーションからも、電流バイアス磁界が MR 比の劣化に影響することが確認された。

Fig. 8 Simulated current induced field distribution in a 50×50 nm head with a sensing current of 20 mA.

Fig. 9 Simulated magnetization state of adjacent Co-Fe layers in a 50×50 nm head with sensing currents of (A) 5 mA and (B) 20 mA.

次に、MR 比のトラック幅依存性について計算した。ここでは、センサ部に印加されるバイアス電圧が 100 mV となるように各素子サイズに対してセンス電流を変化させた。Fig. 10に、計算された MR 比のトラック幅依存性を示す。トラック幅を小さくするほ

ど高い MR 比が得られていることが分かる。

Fig. 10 Simulated dependence of MR ratio on track width (= stripe height) with varying sensing currents under constant bias voltage of 100 mV.

センス電流 I_{sense} は、トラック幅 (= 素子高さ) を r とすると、式 (1) で表され、トラック幅の 2 乗に比例して増大する。

$$I_{\text{sense}} = \frac{r^2}{RA} V_{\text{bias}} \quad (1)$$

ここで RA は CPP-GMR 素子の面積抵抗、 V_{bias} はセンサ部に印加されるバイアス電圧である。素子端部に生じる電流バイアス磁界 H_{bias} は、アンペール則に式 (1) を代入すると式 (2) で表される。

$$H_{\text{bias}} \cong \frac{I_{\text{sense}}}{2\pi(r/2)} = \frac{rV_{\text{bias}}}{\pi RA} \quad (2)$$

即ち、センサ部に印加されるバイアス電圧が一定の条件では、電流バイアス磁界はトラック幅に比例して増大する。従って、Fig. 10 でトラック幅を小さくほど高い MR 比が得られたのは、トラック幅の縮小に伴う電流バイアス磁界の抑制効果によるものと考えられる。

次に、Fig. 10 に示した MR 比を用いて、ヘッドの再生出力及びヘッドアンプ SNR を見積もった。再生出力 V_{pp} は、利用率を ε 、ヘッド抵抗と MR 比の掛け算で求められる抵抗変化量を ΔR とすると、式 (3) で表される。

$$V_{\text{pp}} = \varepsilon \Delta R \cdot I_{\text{sense}} \quad (3)$$

ここでは利用率 ε は 15 % と仮定した。また、帯域は 460 MHz とし、ノイズはヘッド温度を 100°C としてジョンソンノイズとアンプノイズのみ考慮した。Fig. 11 に、見積もった再生出力及びヘッドアンプ SNR のトラック幅依存性を示す。Fig. 10 に示した MR 比に対応して、再生出力はトラック幅を小さくするほど増大しており、例えばトラック幅 50 nm においては、2.35 mV を示した。また、ヘッドアンプ SNR は、トラック幅の縮小に伴って増大していき、トラック幅 50 nm において最大値 33.9 dB を示した。トラック幅 25 nm でヘッドアンプ SNR が低下するのは、再生出力の増加割合よりもヘッド抵抗の増大によるヘッドアンプノイズの増加割合が大きい為である。しかしながら、センサ部に印加されるバイアス電圧を 100 mV から、例えば 140 mV とすることでヘッドアンプ SNR は 33.6 dB に向上する。これは、センス電流として 1.25 mA から 1.75 mA の変化に相当し、

電流バイアス磁界の影響は極めて微小であり、MR 比は殆ど劣化しない。従って、トラック幅 25 nm のヘッドにおいて、バイアス電圧を 100 mV から 140 mV に変えた場合のヘッドアンプ SNR の向上は、ヘッドアンプノイズを増大することなく、再生出力を 4 割増加できることに起因する。

Fig. 11 Estimated output and head-amp SNR as function of track width.

以上のことから、Co-Fe/Cu 多層膜を用いた CPP-GMR 再生ヘッドにおいて、高いヘッドアンプ SNR を得る為には、素子面積を縮小し、電流バイアス磁界の影響を抑制することが有効であることが明らかとなった。この系を再生ヘッドへ適用する為には、バイアス制御や磁区制御手段に関して課題を残しているが、再生出力やヘッドアンプ SNR という観点では今後の高記録密度化に対応し得る高いポテンシャルがあると考えられる。

4. まとめ

17.5 %のMR 比を有する $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(1.5 \text{ nm})/\text{Cu}(2.0 \text{ nm})]_{16}$ 多層膜を用いた CPP-GMR 素子において、センス電流がMR 特性に与える影響について検討した。

MR 比はセンス電流の増加に伴って単調に減少し、MR 曲線において MR 比のピーク位置が次第にスプリットしていくことが確認された。また、計算からこれらの現象が電流バイアス磁界に起因することを明らかにした。

この系を再生ヘッドに適用するに際しては、電流バイアス磁界の影響を抑制する為、素子面積を小さくすることが有効であり、面記録密度 500 Gb/in²以上が想定される 50 × 50 nm のヘッド形状において 33 dB 以上のヘッドアンプ SNR を示すことが見積もられた。

謝辞 本研究を行うにあたり、有益なご助言を頂いた日立製作所中央研究所の片田裕之氏、椎本正人氏、渡邊克郎氏、星野勝美氏、佐藤陽氏に深く感謝致します。

References

- 1) H. Fujiwara, T. Zhao, G. J. Mankey, K. Zhang, W. H. Butler, and S. Matsunuma: *Trans. Magn. Soc. Jpn.*, **3**, 95 (2003).
- 2) A. Tanaka, Y. Seyama, A. Jogo, H. Oshima, R. Kondo, H. Kishi, C. Kamata, Y. Shimizu, S. Eguchi, and K. Satoh: *IEEE Trans. Magn.*, **40**, 203 (2004).
- 3) H. Fukuzawa, H. Yuasa, S. Hashimoto, K. Koi, H. Iwasaki, M. Takagishi, Y. Tanaka, and M. Sahashi: *IEEE Trans. Magn.*, **40**, 2236 (2004).
- 4) K. Hoshino, H. Hoshiya, H. Katada, N. Yoshida, K. Watanabe, and K. Nakamoto: *IEEE Trans. Magn.*, **41**, 2926 (2005).
- 5) A. Jogo, Y. Seyama, T. Ibusuki, K. Nagasaka, Y. Shimizu, T. Uzumaki, and A. Tanaka: *IEEE Trans. Magn.*, **42**, 2456 (2006).
- 6) M. Saito, N. Hasegawa, Y. Ide, T. Yamashita, Y. Hayakawa, Y. Nishiyama, M. Ishizone, S. Yanagi, K. Honda, N. Ishibashi, D. Aoki, H. Kawanami, K. Nishimura, J. Takahashi, and A. Takahashi: *Digests of Intermag*, FB-02 (2005).
- 7) N. Smith and P. Arnett: *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 1448 (2001).
- 8) M. Shiimoto, H. Katada, K. Nakamoto, H. Hoshiya, M. Hatatani, and A. Namba: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **31**, 54 (2007).
- 9) M. Covington, M. AlHajDarwish, Y. Ding, N. J. Gokemeijer, and M. A. Seigler: *Phys. Rev. B*, **69**, 184406 (2004).
- 10) J. G. Zhu, and X. Zhu: *IEEE Trans. Magn.*, **40**, 182 (2004).
- 11) M. A. Seigler, P. A. A. Van der Heijden, A. E. Litvinov and R. E. Rottmayer: *IEEE Trans. Magn.*, **39**, 1855 (2003).
- 12) H. Katada, M. Shiimoto, K. Nakamoto, H. Hoshiya, K. Hoshino, and N. Yoshida: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **31**, 31 (2007).

2007年9月26日受理, 2008年2月14日採録