Thermal-Damage-Free TMR Heads

N. Yoshida, K. Etoh, T. Shintani, K. Meguro, M. Hatatani, and K. Watanabe

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

We have developed a way of making TMR heads that are free from thermal damage. We found that during the annealing stage in the write head process the resistance area (RA) product increased and the magnetoresistance ratio (MR) decreased. This degradation depended on the kind of insulator material on both sides of the TMR junction. Because Al_2O_3 has a relatively high Gibbs free energy, it suppressed the degradation, and thus oxidation at the sensor edge caused less thermal damage. To prevent thermal damage, we developed a TMR head with a Damascene coil process in the write head. It showed no degradation after the write head process, and, furthermore, had good readback performance.

Key words: TMR head, read head, thermal damage, write head, inductive head, Damascene coil process

サーマルダメージフリーTMR ヘッド

芳田伸雄・江藤公俊・新谷 拓・目黒賢一・幡谷昌彦・渡邊克朗

(株)日立製作所 中央研究所, 神奈川県小田原市国府津 2880 (〒256-8510)

1. はじめに

磁気ディスク装置の高記録密度化に伴い、キーデバイスである薄膜磁気ヘッドには、トラック幅やギャップ長などの幾何学寸法の狭小化および高出力化が絶えず求められている。近年の薄膜磁気ヘッドは、再生ヘッドと記録ヘッドから構成されており、そのうち、再生ヘッドにおいては、磁気抵抗効果センサ膜の膜面内方向にセンス電流を流す CIP(Current into plane)構造素子が用いられてきた。しかしながら、CIP 構造ヘッドで実現できるシールド間距離(以下、再生ギャップ長と記す)は約 60 nm 程度であり、それ以下に狭くするためには CPP(Current perpendicular to plane)構造ヘッド¹⁻⁴⁾が必要となる。その代表的なものの一つが TMR(Tunneling magnetoresistive)ヘッド¹⁻⁴⁾であり、障壁層を挟んで設けられた 2 層の磁性層の相対的な磁化方向に応じてトンネル電流が変化することを利用したもので、高い出力が得られることが特徴である。

一方、再生ヘッドとして TMR ヘッドを用いる場合においても、記録ヘッドに関しては、上部磁極と下部磁極の間にコイルが配置されたインダクティブヘッドが用いられ、一般的には、コイルを絶縁するための有機絶縁体形成の際に 250~300℃程度の熱処理が施される。再生ヘッドにはこの熱処理でも劣化を起こさない熱安定性が必要である。MRAM(Magnetic Random Access Memory)向けに研究開発されている比較的厚い障壁層を有する TMR 素子については、熱安定性改善の検討が行われているが^{8,9)}、薄い障壁層を有する磁気ヘッド用の TMR 素子およびその形成プロセスに関する報告は少ない。そこで、我々は、TMR ヘッドの記録ヘッドプロセスまで含めた熱安定性を評価して劣化の原因について検討を行い、さらに、記録ヘッドプロセスを改良することによって、狭トラック幅においても熱劣化(以下、サーマルダメージと記す)が殆ど無い TMR ヘッ

ドを形成することに成功したので、その結果について報告する。

2. TMR ヘッドの特性劣化

Fig. 1 に、再生ヘッドとして TMR ヘッドを、記録ヘッドとしてインダクティブヘッドを用いた薄膜磁気ヘッドの構造を示す。基本的なインダクティブヘッドの構造は、下部磁極、上部磁極と、その間に設けられた記録電流を流すコイルからなっており、コイルについては、コイル間及び上部磁極と下部磁極との間で電気的絶縁を取ることが必要である。通常、コイル絶縁膜形成プロセスとしては、コイル絶縁膜として用いるホトレジストを硬化させるために 250~300℃程度の熱処理が用いられ、また、上部磁極および下部磁極形成の際にはイオンミリングなどによるトラック幅形成プロセスが用いられる。インダクティブヘッドプロセスによる TMR ヘッド特性の変化を調べた結果を Fig. 2 に示す。なお、

Fig. 1 Schematic of conventional magnetic head with TMR read head.

Fig. 2 TMR property degradation after write head process.

TMR ヘッドとしては、センサ膜構成としてシード層/PtMn 14/CoFe 1.5/Ru 0.8/CoFe 2/Al-O ~1/CoFe 0.5/NiFe 4/Ta 6 [nm] を有し、センサ膜両脇には絶縁膜を介して縦バイアス印加層を配置したアバット構造を有するものである。Fig. 2は、インダクティブヘッドプロセス前後におけるTMRヘッドの面積抵抗RAとMR比の関係を示したものであり、インダクティブヘッドプロセス後においてMR比は約1/3に減少し、RAは約2倍に増大していることが分かる。この著しい特性劣化の原因を追跡したところ、上部磁極および下部磁極形成時のイオンミリングなどによるダメージではなく、コイル絶縁膜形成時の熱処理工程であることが判明した。つまり、低抵抗で出力の高いTMRヘッドを得るためには、このサーマルダメージ防止が必要であり、次節3においてはTMRヘッドの構造について、4節においてはインダクティブヘッドの構造に関して検討した結果を述べる。

3. TMR ヘッド構造の検討

TMRヘッドの構造は、センサ膜を構成するTMR膜の中には障壁層となる絶縁膜を配置し、エッチングにより所望の寸法にTMRセンサを形成した後には、センス電流をTMRセンサのみに流すためにTMRセンサ周囲に絶縁膜（以下、ギャップ絶縁膜と記す）が配置される。このようにセンサ膜周囲に絶縁膜が隣接する構造はTMRヘッドに特異なものであるため、ギャップ絶縁膜とサーマルダメージの関係について検討した。検討を行った素子は、Fig. 3(a)に示すような素子構造で、TMRセンササイズは $0.6\mu\text{m} \times 0.6\mu\text{m}$ 、ギャップ絶縁膜の材料としては、 Al_2O_3 及び SiO_2 を用いた。Fig. 3(b)はコイル絶縁膜形成プロセスの熱処理前後におけるMR比およびRAの変化を示したものであり、MR比およびRA共に熱処理前の値で規格化してある。ギャップ絶縁膜が Al_2O_3 または SiO_2 であっても、熱処理後ではRAが増大してMR比が減少しているが、 SiO_2 と比べて Al_2O_3 の方がこれらの変化が小さいことが分かる。つまり、サーマルダメージはギャップ絶縁膜の材料に大きく依存している。

我々は、このサーマルダメージがTMRセンサ端部における現象であると考え、Fig. 4に示すモデルを考えた。このモデルは、ギャップ絶縁膜を構成する酸化膜中の酸素が、熱処理によって拡散

Fig. 3 Investigation into thermal damage to TMR head structure. (a) Schematic of test device structure with different gap insulators. (b) Change to TMR property materials by annealing damage.

Fig. 4 Model of thermal damage at TMR sensor edge.

して、TMRセンサ端部においてTMR膜を構成する材料と反応し、RAの増大やMR比の低下をもたらすというものである。ギャップ絶縁膜である Al_2O_3 と SiO_2 の化学的な安定性を標準生成エネルギーを尺度に比較してみると、 Al_2O_3 は -1055kJ/mol^{10} 、 SiO_2 は -851kJ/mol^{10} であり、 Al_2O_3 の方がより安定であるということができ、材料による違いを説明することができる。

このようなTMRセンサ端部での酸化によるダメージを仮定すると、トラック幅によりサーマルダメージの劣化に違いが生じることが考えられる。Fig. 5は、ギャップ絶縁膜が Al_2O_3 である場合のサーマルダメージのトラック幅依存性である。評価は、Fig. 5(a)に示すようなTMRヘッド構造を用い、TMRセンササイズはトラック幅80~145nm及び素子高さ $1.5\mu\text{m}$ 、熱処理前後のMR特性を測定し、熱処理前の値で規格化することにより行った。Fig. 5(b)

Fig. 5 Investigation into thermal damage to TMR head. (a) Schematic TMR head structure. (b) Dependence of thermal damage on track width.

に示すようにトラック幅 145nm での熱処理後における MR 比は、熱処理前の約 82%を維持しているが、トラック幅が狭くなると共に MR 比は劣化し、トラック幅 80nm では約 60%にまで劣化する。この結果から、トラック幅が狭いほど劣化が大きいことが分かる。Fig. 4 のモデルでは、酸化によるダメージを受ける層の厚さは一定と考えることができるので、狭いトラック幅ではそのダメージ層の相対的割合が大きくなり、その結果、サーマルダメージによる劣化はより顕著になるものと説明できる。

以上の結果より、TMR ヘッドのサーマルダメージは、TMR センサ端部における酸化の進行と推定することができる。実際にセンサ膜のどの層がどれだけ酸化しているかは不明であるが、これまでの RA が増大及び MR 比が劣化するという結果から磁性層端部や磁性層/障壁層界面の端部における酸化の影響が大きいと考えている。つまり、酸化によって端部の実効的障壁膜厚が大きくなることで RA が増大することと、磁性層の分極率低下による MR 比の劣化が同時に発生することがサーマルダメージの原因と考えている。また、サーマルダメージは、化学的に安定なギャップ絶縁膜を用いることによって低減できると考えられる。今後、更にトラック幅が狭くなるとサーマルダメージがより顕著になることが予想され、ギャップ絶縁膜の材料や形成方法の改良が必要になるものと考えられる。

4. インダクティブヘッドに関する検討

前節において、TMR ヘッドの構造、具体的にはギャップ絶縁

Fig. 6 Conventional coil process.

Fig. 7 Damascene coil process.

膜を検討した結果、化学的に安定な材料をギャップ絶縁膜に用いることにより、サーマルダメージを低減できることが分かった。しかし、Fig. 5 (b)の結果に示すように、化学的に安定な Al_2O_3 ギャップ絶縁膜を用いても、狭いトラック幅においてはサーマルダメージの抑止効果が十分ではない。

そこで我々はインダクティブヘッドの作製プロセスにおいて、RA の増加及び MR の劣化の原因となる熱処理工程の影響を低減する試みを検討した。具体的には、コイル絶縁膜の熱処理そのものをなくす為、ダマシンプロセスを用いてコイル絶縁膜およびコイルを形成し、ヘッド作製を行った。Fig. 6 および Fig. 7 において、従来のコイル形成プロセスと我々が開発したダマシンコイル形成プロセスを比較する。従来のコイル形成プロセス Fig. 6 は、(a) コイルを形成し、(b) フォトリソでコイルを覆った後、熱処理を行い、(c) コイル絶縁膜を形成するのに対し、ダマシンコイル形成プロセス Fig. 7 は、(a) Al_2O_3 膜にコイル溝を掘り込んでトレッチを形成し、(b) トレッチ内にダマシンプロセスを用いてコイルを埋め込み、(c) コイル上部に Al_2O_3 膜を成膜し、コイルを囲む Al_2O_3 膜がコイル絶縁膜を形成する。Fig. 8 はダマシンコイル形成プロセスを用いて形成したインダクティブヘッドを搭載した TMR ヘッ

Fig. 8 Cross-sectional SEM image of TMR head with Damascene coil write head.

Fig. 9 TMR properties before and after write head process with conventional coil.

ドのSEM像である。コイルが Al_2O_3 コイル絶縁膜に埋め込まれていることが観察できる。ダマシコイルはPlaner Pole-Tip (以下、PPTと記す) ヘッド¹⁾ 構造と組み合わせて形成した。PPTヘッドの特徴としては、上部磁気コアを分割形成し、記録トラック幅を規定する磁気コアを平坦面上に形成するため、狭トラック幅形成及び寸法高精度化が両立可能な構造である。

従来コイル形成プロセスを用いた場合のTMRヘッドのMR-RA特性をFig. 9に、ダマシコイル形成プロセスを用いた場合のMR-RA特性をFig. 10に示す。なお、TMRヘッドのギャップ絶縁膜は Al_2O_3 を用い、トラック幅は80nmである。Fig. 9の従来コイル形成プロセスの場合には、インダクティブヘッド形成後に大幅な特性劣化が認められるが、一方、Fig. 10のダマシコイル形成プロセスの場合には、ほとんどMR、RAともに変化が無く、特性が劣化していないことが分かる。つまり、ダマシコイル形成プロセスを採用することでTMRヘッドのサーマルダメージを無くすることができる。

ダマシコイル形成プロセスを適用して試作したTMRヘッドの記録再生波形をFig. 11に示す。TMRヘッドの再生トラック幅は80nm、再生ギャップ長は57nmであり、インダクティブヘッ

Fig. 11 Readback waveform of TMR head with Damascene coil write head.

Fig. 10 TMR properties before and after write head process with Damascene coil.

ドの記録トラック幅は135nm、記録ギャップ長は74nmである。記録媒体は面内記録媒体である。再生波形は V_{pp} :2.54mVとTMRセンサ特性から考えると良好な値であり、再生波形の非対称性(Asym)も5.1%と小さく良好であった。以上のように、熱処理を行わないインダクティブヘッドプロセスを採用することにより、TMRヘッドにサーマルダメージを与えることなく、良好な記録再生特性を有するTMRヘッドが得られることが確認できた。

5. まとめ

TMRヘッドにおけるサーマルダメージを防止するため、TMRヘッドの構造、及びインダクティブヘッドの構造について検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) TMRヘッドのMR特性のサーマルダメージは、ギャップ絶縁膜を化学的に安定な材料を用いることにより低減できる。
- (2) このサーマルダメージはギャップ絶縁膜から酸素の拡散などによってTMR膜端部が酸化するためと考えられる。
- (3) インダクティブヘッドとして、コイル絶縁膜の熱処理を必要としないダマシコイルプロセスを採用する

ことにより、狭いトラック幅においてもインダクティブヘッドプロセス後で MR 特性の劣化がないヘッドを得ることができた。

References

- 1) S. Araki, K. Sato, T. Kagami, S. Saruki, T. Uesugi, N. Kasahara, T. Kuwashima, N. Ohta, J. Sun, K. Nagai, S. Li, N. Hachisuka, H. Hatate, T. Kagotani, N. Takahashi, K. Ueda, and M. Matsuzaki, *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 72 (2002).
- 2) T. Kuwashima, K. Fukuda, H. Kiyono, K. Sato, T. Kagami, S. Saruki, T. Uesugi, N. Kasahara, N. Ohta, K. Nagai, N. Hachisuka, N. Takahashi, M. Naoe, S. Miura, K. Barada, T. Kanaya, K. Inage, and A. Kobayashi, *IEEE Trans. Magn.*, **40**, 176 (2004)
- 3) T. Kagami, T. Kuwashima, S. Miura, T. Uesugi, K. Brada, N. Ohta, N. Kasahara, H. Sakiyono, S. Saruki, K. Inage, N. Takahashi, and K. Terunuma, *IEEE Trans. Magn.*, **42**, 93 (2006).
- 4) S. Mao, Y. Chen, F. Liu, X. Chen, B. Xu, P. Ru, M. Patwari, H. Xi, C. Chang, B. Miller, D. Menard, B. Pant, J. Loven, K. Duxstad, S. Li, Z. Zhang, A. Johnston, R. Lamberton, M. Gubbins, T. McLaughlin, J. Gadbois, J. Ding, B. Cross, S. Xue, and P. Ryan, *IEEE Trans. Magn.*, **42**, 97 (2006).
- 5) A. Matsuzono, S. Terada, H. Ono, A. Furukawa, T. Sone, S. Sasaki, Y. Kakihara, T. Takeda, N. Chiyokubo, and H. Matsuki, *J. Appl. Phys.*, **91**, 7267 (2002).
- 6) A. Tanaka, Y. Seyama, A. Jogo, H. Oshima, R. Kondo, H. Kishi, C. Kamata, Y. Shimazu, S. Eguchi, and K. Saitoh, *IEEE Trans. Magn.*, **40**, 203 (2004).
- 7) K. Nakamoto, H. Hoshiya, H. Katada, T. Okada, M. Hatatani, K. Hoshino, N. Yoshida, I. Nunokawa, K. Etoh, and K. Watanabe, *IEEE Trans. Magn.*, **41**, 2914 (2005).
- 8) T. Ochiai, N. Tezuka, K. Inomata, S. Sugimoto, and Y. Saito, *J. Magn. Soc. Jap.*, **27**, 307 (2003).
- 9) S. V. Pietambaram, J. Janesky, R. W. Dave, J. J. Sun, G. Steiner, and J. M. Slaughter, *IEEE Trans. Magn.*, **40**, 2619 (2004).
- 10) A. Yazawa, *Refinement of Nonferrous Metal* (The Japan Institute of Metals), 315 (1979).
- 11) N. Yoshida, I. Oodake, K. Kudou, M. Fuyama, A. Taniyama, S. Ohtomo, and Y. Maruyama, *Digest of the 26th Annual Conference on Magnetism of Japan*, 19aB-6 (2002)

2007年8月29日受理, 2007年11月13日採録