

解説

ハードディスク用磁気ヘッドの静電気破壊

ESD Phenomena in HDD Head

溝尾嘉章 松下寿電子工業(株)

Y. Mizoh, Matsushita Kotobuki Electronics Industries, Ltd.

It is well known that GMR heads used for hard disk drives (HDD) are very sensitive to ESD (electrostatic discharge). ESD damage is very complicated and there has many modes. In this report, we describe a method of categorizing ESD damage modes and related phenomena based on magnetic influences on the heads as observed by QST characteristics, electromagnetic characteristics such as off-track profiles, SEM observation, and cross section TEM. These ESD damage modes are classified into three types: hard ESD damage, soft ESD damage, and quasi-ESD damage. Other degradation modes are head scratch, corrosion, and electro-migration. We also present an example of ESD damage that happened in an actual production process and its preventive measures as guidelines.

Key words: hard disc drive, GMR head, electrostatic discharge, soft ESD, hard ESD, quasi ESD, electro migration, corrosion

1. はじめに

近年の HDD (ハードディスクドライブ) の面記録密度の急激な増加に伴い, HDD の製造工程において静電気による磁気ヘッドの損傷は, 工程歩留まりの悪化にとどまらず, 出荷後障害で HDD の信頼性問題をも発生させる. 従来からバルク型ヘッドは放電による蛍ノイズが雑音源として問題になっていたが, 薄膜ヘッドの登場とともに静電気放電 (ESD: Electro Static Discharge) あるいは, 過剰電圧 (EOS: Electro Over Stress) による損傷として, 再生素子および近傍の融解による絶縁不良や絶縁異常が問題となった¹⁾. さらに, 電気シールドであるギャップ厚の減少, 磁氣的に複雑な構造をもつ GMR ヘッドの採用で, 絶縁破壊に至るハード ESD^{2), 3)} 以外に, ソフト ESD, 疑似 ESD と呼ばれる磁氣的な構造破壊による磁気記録再生特性の異常現象が発生している⁴⁾. また, ヘッドの損傷には, 静電気破壊以外に, ヘッドスクラッチ, エレクトロマイグレーション, 腐食など多くのモードがある. さらに, 静電気破壊自身も以下に詳述するように各種の破壊損傷モードがあり, これらの区別が困難なことも多い. ESD 破壊は, 磁氣的な擬似静特性試験 (Quasi Static Test; QST と略記) や電磁変換特性のオフトラックプロファイルにて確認することができ, 今まで多くの議論がなされている.

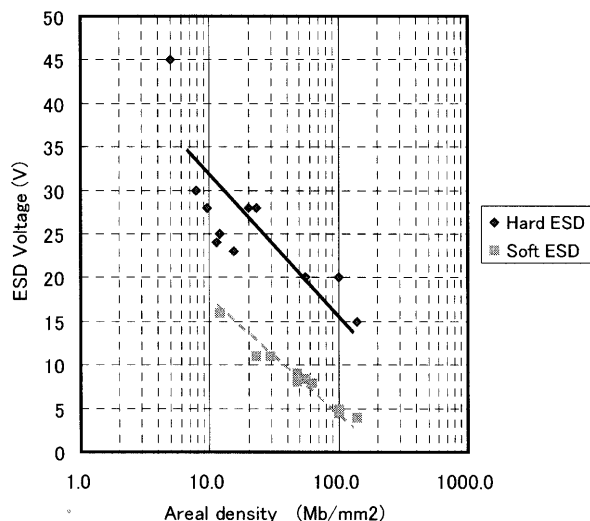


Fig. 1 ESD voltage vs. areal density by hard ESD melting mode and soft ESD mode.

Fig. 1 に記録密度の上昇に伴い, 静電破壊耐電圧が低下してきた様子を示す. 実線で示すハード ESD 耐電圧に対して, 点線で示すソフト ESD 耐電圧は数分の 1 の大きさになり, より深刻なことがわかる⁵⁾. 特に AMR (Asymmetry Magnetic Resistance) ヘッドから GMR (Giant Magnetic Resistance) ヘッドに構造が複雑化したことに伴い, 多種のより複雑なソフト ESD 故障モードが発生している. また, 今後実用化が予想される TuMR (Tunnel Magnetic Resistance) ヘッドはピンホールの発生に伴い 0.5 V 以下の耐電圧になり, 実用化の大きな障害になっている^{6), 7)}. このソフト ESD と呼ばれる現象は直ちに出力の変化や雑音の増加を発生する以外に, しばらく時間がたってから磁氣的な変化が発生する不良モードがあり, 多くのメカニズムは, まだ十分明らかになっていない.

本報では, ESD 現象およびよく似たヘッドの損傷の分類詳細を述べ, 実際の製造工程で起こった事例とその対策例を解説する.

2. HDD 製造プロセス

Fig. 2 に, 磁気ヘッドの製造プロセスを中心とした HDD 製造プロセスの概略と ESD 破壊を起こす可能性の大きいプロセスを示す. HDD の静電対策は, ヘッドウエファ工程からドライブ工程まで汚染を防ぐためクリーンルームで

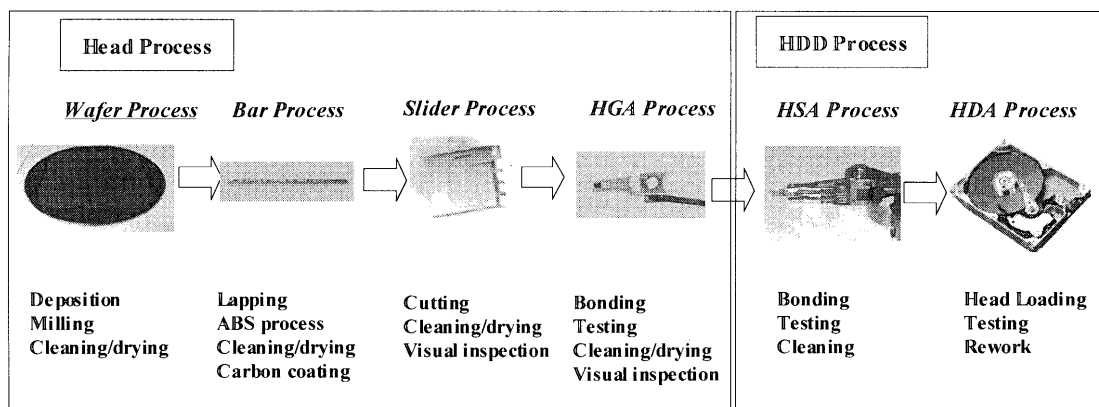


Fig. 2 Manufacture and assembly process of magnetic head and hard disk drive.

行うことに特徴がある。

磁気ヘッドは半導体と同様のウェファ工程で作製される。通常の半導体工程と異なるのは、素子の高さ（ストライプハイト）の寸法決めのため、素子自身の機械的研磨工程などが必要となることである。このウェファを短冊状に切断しストライプハイトを決定あるいは ABS (Air Bearing Surface) 面形状を形成するのがバー工程である。さらにチップに加工し最終的な形状を作製するのがスライダ工程である。

磁気ヘッドスライダとサスペンションを接合するヘッド・ジンバル・アセンブル (HGA) 工程、HGA を重ね合わせプリアンプと接続するヘッド・スタック・アセンブル (HSA) 工程は、金属接触の可能性が非常に多い。

筐体に HSA とメディアとモータを挿入するのがハードディスクアセンブル (HDA) 工程である。HSA の取り扱い、磁気ヘッドがメディアと接触する瞬間、検査工程、ヘッドとプリアンプの接合、工程の EMI (電磁障害)⁸⁾ など ESD を起こす可能性がある。

特にバー工程の ABS 面加工、洗浄、スライダ工程の洗浄、HGA 工程の電気接合、特性検査、HSA 工程の電気接合は、GMR 素子がシャント処理などで保護されておらず、微妙な金属接触や低電圧の放電によって磁気ヘッドの ESD 破壊が発生しやすい危険なプロセスと考えられる。

IEC 61340 (静電気現象からの電子デバイスの保護)⁹⁾ では電子部品 100 V 管理が定義されているが、ハードディ

スクドライブ業界では 5 V 管理からさらに厳しい管理へと移行しつつある^{5), 11)}。HDD の製造工程では、これらの対策として、電荷、電位差を発生させない、また発生した電荷は速やかに除電する対策を行っている。露出した金属は帯電し放電を起こすため、金属露出面をつくらぬ工夫も重要である。ESD 保護区域 (EPA) の設定はもちろん、導電性床、作業面の電位管理、治具、工具、部品箱、測定器、配線、はんだごて、導電椅子などの EPA グラウンド接続点 (EBP) への接抵抗を $7.5 \times 10^5 \sim 10^9 \Omega$ に保つ¹¹⁾、ホットスポットのない導電性服、導電性靴、リストラップの着用、PC モニタや工程の稼働部のモータや金属接触からの EMI 防止、顕微鏡や治具やピンセットの表面電気抵抗を $10^{-6} \sim 10^{-9} \Omega/\square$ に保つ、金属露出面の導電性カバーによる被覆、イオナイザの使用や高湿度環境や局所ドライフォグの導入による除電、各種の静電気モニタリングシステムの導入¹²⁾など多くの対策がとられる。

3. ESD 破壊モードの分類

3.1 ESD による磁気ヘッドの性能低下

磁気ヘッドの性能低下として、機械的や磁気的な破壊によって直ちに発生する出力の変動、低下以外に、信号再生時に発生するバルクハウゼン雑音、熱雑音の増加以外に、ダメージよりやや遅れて発生するポップコーンノイズ (非周期的雑音)、ベースラインドリフトといった、不規則な雑音の増加、さらに時間経過とともに、出力の経時的な変動、

Table 1 Classification of ESD of GMR head

	Mode	Phenomena	Defect in HDD	
Hard ESD	Mechanical breakdown and Diffusion in Stripe of GMR Head	Melting	High MRR	Fig. 4
		Diffusion	Low dR/R	Fig. 5
Soft ESD	Magnetic Destruction	Defect in Permanent Magnet	Can be classified by QST and off-track profile	Fig. 7(a),7(b),7(c)
		Defect in Free Layer		Fig. 7(d),7(e),7(f),7(g),7(h)
		Defect in Pin Layer		Fig. 7(i),7(j),7(k),7(l)
		Defect in AFM		Fig. 7(i),7(j),7(k),7(l)
		Otherwise		
Quasi ESD	GMR is Normal	Capacitance Coupling ESD	Noise in reading	Fig. 9
		EMI		

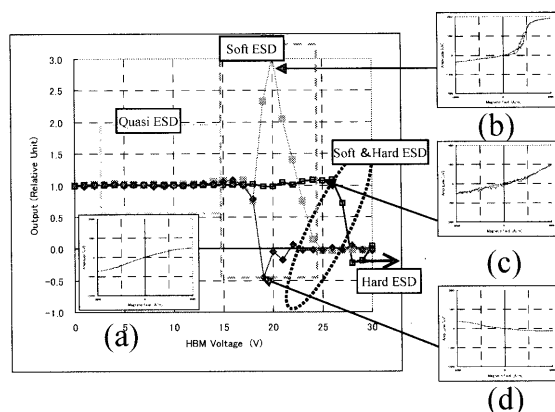


Fig. 3 Quasi static output vs. HBM voltage: (a) initial, (b) Barkhausen noise, (c) noisy TAA, (d) pin reverse transfer curve.

低下や突然の出力低下、雑音の増加が知られている。

Table 1 に ESD 破壊モードの分類法の一例を示す。ESD 破壊モードには、結晶構造などが熱によって破壊されたハード ESD、磁氣的構造が壊れたソフト ESD、素子自身は破壊されてないが雑音が発生する擬似 ESD の 3 種に大別することができる^{13)~15)}。

Fig. 3 に、帯電容量 100 pF、放電抵抗 1.5 kΩ の人体帯電モデルで測定した典型的な磁気ヘッドの抵抗、QST 出力と印可電圧の関係を示す。これは 40 Mb/mm² (トラック幅 420 nm) 相当の GMR ヘッドであるが、25 V 以上をハード ESD、15~25 V をソフト ESD、15 V 以下を擬似 ESD に区分できる。

ハード ESD は、素子の融解による出力がなくなりまた素子の抵抗値も大きく増加する領域である。

ソフト ESD は、磁氣的構造の損傷により出力に異常が起こるが、素子抵抗値としてはほとんど変化しない。初期の出力 (a) に比して、(b) のようにバルクハウゼンにより出力増加した例や (d) のようにピン反転した例、(c) のように電流衝撃により、PM 層の接合部が磁氣的な破壊により、一時的に出力が増加して見える場合もあるが、多くの場合雑音も増加する。

擬似 ESD は、磁気ヘッド自身には構造的にも磁氣的に損傷がないが、雑音が発生する例で、蛍ノイズや EMI 現象も含めて考えられる。

静電気の流れ方には、部品が帯電または部品と周囲との

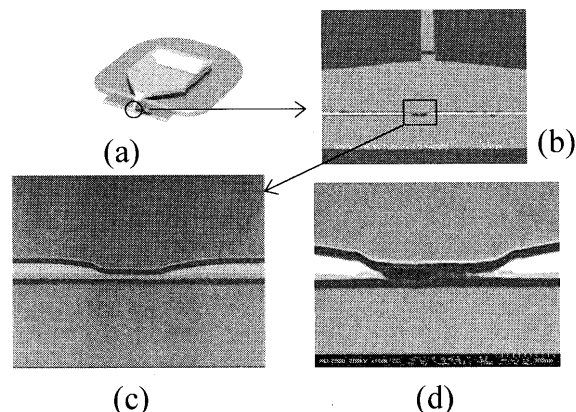


Fig. 4 Typical hard melting ESD in GMR stack: (a) head structure, (b) ABS view, (c) normal GMR, (d) melted GMR.

電位差のため放電によって電流が流れる部品帯電モデル (Charged Device Model) と、電位差から素子に直接電流が流れる人体耐電モデル (HBM: Human Body Model)、機械モデル (MM: Machine Model) などがある。素子通電中の過電流、放電による破壊は EOS (Electric Over Stress) とも呼ぶ。

絶縁性の向上や反強磁性膜の結合磁界の向上など多くの材料に関する研究と平行して¹⁶⁾、どのように電流が流れ放熱するかについての研究も盛んに行われている¹⁷⁾。GMR スタックの構造¹⁸⁾やシールドの構造、ジャンクションの作り方により各部分の発熱や放熱状態が異なるため、溶解も磁氣的破壊も多様な振舞を見せる。

3.2 ハード ESD 破壊とその実例

ハード ESD 破壊とは、GMR 素子の機械的に破壊 (例えば熱溶解や絶縁破壊) されたモード、および膜拡散による GMR 素子破壊されたモードと定義する。従来、ハード ESD に関しては Fig. 4 に示す顕微鏡や SEM 像で観察されるような GMR 素子の溶解の観測報告が多い^{2), 3)}。ハード ESD は、ジュール熱で 1400°C 以上になって溶解するエネルギー破壊モードと高電圧で局所的に絶縁破壊する電圧破壊モードに分けられる¹⁾。

シールド層と MR 素子またはリード層との間の絶縁層の材料、膜質、構造や厚みで耐電圧が決まるが、記録波長を短くするため、ギャップ厚も薄くなり、Fig. 1 に示したように記録密度の上昇とともにハード ESD 耐電圧も低下

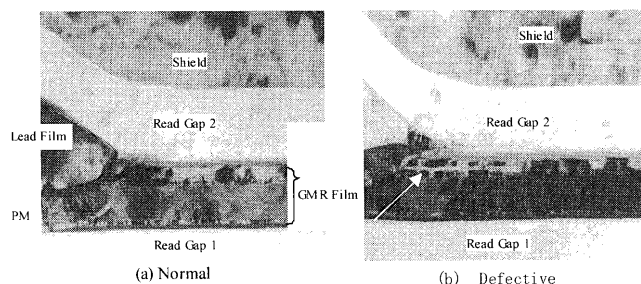


Fig. 5 Diffusion in GMR stack observed by TEM. White arrow shows amorphous state in Cu layer.

してきている。

また、SEM 像レベルでは観測できない場合もある。一例として GMR ヘッド製造工程の再生素子シャント作業においてメタルコンタクトによって生じた膜拡散型ハード ESD 破壊例の断面 TEM 像を Fig. 5 に示す。(a) は通常の GMR 素子、(b) は GMR 素子抵抗値の変化せず抵抗変化率のみが小さくなった試料の断面 TEM 画像である。この不良は、顕微鏡や SEM では GMR 素子異常は確認できなかったが、断面 TEM 観測においては膜中央部 (矢印部) に中間層 Cu の拡散が観測された。このような微小エリアの ESD 破壊を起こさないような膜構造設計と製造工程の構築が非常に重要である。この不良はシャント治具として導電性セラミックを採用することで改善された¹⁴⁾。

3.3 ソフト ESD 破壊とその事例

ソフト ESD 破壊とは、再生素子が磁氣的に破壊されているモードと定義し、磁気抵抗型薄膜用磁気ヘッド特有の現象である。ソフト ESD は流れる過電流による熱と磁界により GMR スタックの磁気構造が破壊されて起こる。特に「Walking Wounded (歩行可能傷病兵)」と呼ばれる一見正常に動作するが、やや激しいストレスの付加、あるいは時間の経過とともに性能が低下する現象は深刻な問題である。これらの不良は、出力を多数回測定して、そのばらつきを見る、あるいは、磁場ショックを加えて、出力の再現性を見るなどの手法で不良を検出する¹⁹⁾。また後で述べ

る各種ノイズの増加を伴う場合が多く、ノイズ波形の温度依存性からも多くの情報が得られる²⁰⁾。

Fig. 6(a) に GMR スタックの構造を示す。GMR スタックは反強磁性 (AFM) 層とピン層とフリー層および永久磁石 (PM) 層からなる。この磁気構造を (b) のように図示する。Fig. 6(c) に示す QST は、磁場中に GMR ヘッドを挿入し (b) に示す垂直方向に磁場を掃引する。フリー層が磁場に応じて回転し、ピン層と成す角度で、磁気抵抗が変化し (d) に示すトランスファークラップが得られる。さらに Fig. 6(e) にスピンスタンドでトラック幅方向の出力を測定する様子を示す。この測定により (f) に示すオフトラック曲線が得られる。これらの測定によりソフト ESD の磁氣的破壊モードを分類することが可能である。QST とスピンスタンド電磁変換特性は、回転磁化か時壁移動かという測定時定数、外部磁界の形状、浮上隙間量、温度上昇が異なるため、物理現象が異なることに注意が必要である^{21), 22)}。

Fig. 7 に、代表的なソフト ESD 破壊の初期磁化状態モデル、QST トランスファークラップ、およびオフトラックプロファイルを示す。Fig. 7(a)~(c) は、PM 層またはジャンクション部が磁氣的に弱くなったことに起因するフリー層の異常な振舞を、Fig. 7(d)~(h) は、フリー層の不安定状態を、Fig. 7(i)~(l) は、ピン層の異常の例を示す。

Fig. 7(a) はアシンメトリずれで、PM 層からのバイアス磁界が弱くなったためにバイアス点がずれて出力の対称性が悪くなった例を示す²³⁾。

Fig. 7(b) は出力バンプで、PM 層と GMR 層のジャンク

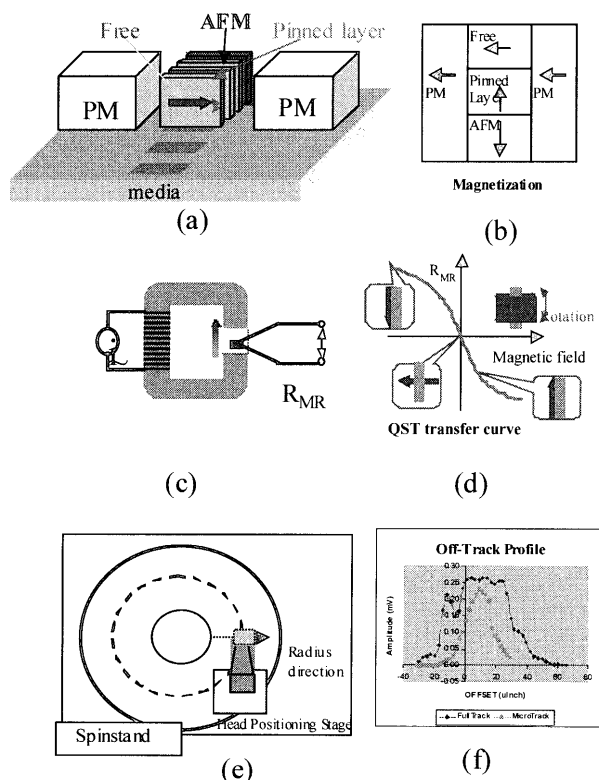


Fig. 6 (a) GMR stack, (b) magnetization in GMR, (c) QST measurement setup, (d) transfer curve, (e) spindrive movement, (f) off-track curve.

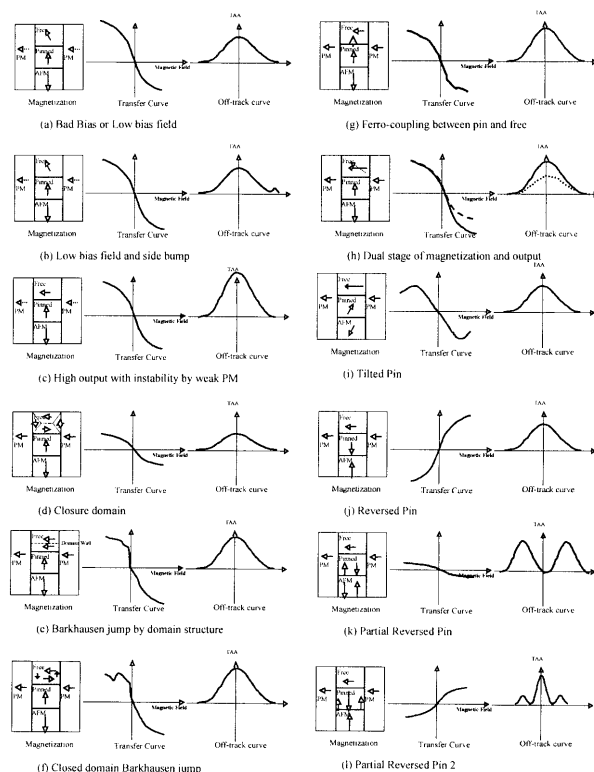


Fig. 7 Typical soft ESD defect in GMR stack.

ション部分の磁界が一部乱れたため、オフトラックカーブの端に異常な出力が発生する例である^{2), 24)}。

Fig. 7(c) は異常出力増加で、弱い PM 層からのバイアス磁界のため、フリー層が回転しやすくなり、出力が増加して見える場合である。Fig. 3 の (c) のトランスファーカーブに示す状態であるが、ヘッドのインスタビリティ¹⁹⁾やバルクハウゼンノイズ、ベースラインポッピング²⁵⁾などを伴う場合が多い。

Fig. 7(d) は出力低下で、PM 層からのバイアス磁界が弱くフリー層が単一磁区をつくれず、クローズドドメインをつくるため、出力が低下する現象である。

Fig. 7(e) はバルクハウゼンノイズで、フリー層中に磁区が発生し磁界の変化で磁区が移動したり、急激に磁区回転することによりバルクハウゼンジャンプが発生する例である²⁶⁾。また kink と呼ばれる時定数のやや長い非線形の MH カーブの異常も知られている²⁷⁾。これらの磁区は、PM 層の磁界強度が弱くなったり¹⁷⁾、フリー層中のピンホール、不純物や、応力によって発生すると思われる。

Fig. 7(f) は 2 重バルクハウゼンノイズで、フリー層が閉ループ型の Double Domain になっている場合に、QST トランスファーカーブにて 2 回のバルクハウゼンジャンプノイズを生じる。これは、フリー層の磁区構造が反平行状態にて磁化回転中に一度、その後フリー層内部磁区構造が反平行状態から平行状態にもう一度バルクハウゼンジャンプが発生すると考えられる。

Fig. 7(g) は強磁性カップリングノイズで、ピン層とフリー層が部分的に強磁性結合をしている場合、GMR 素子抵抗が低い領域（フリー層の磁化方向とピン層の磁化方向が平行に向かう状態）において、この強磁性結合が原因となり、フリー層の磁化回転が不規則となるため、バルクハウゼンジャンプノイズを生じる。このノイズは温度依存性を持ち、低温で低抵抗側に発生する^{13)~15)}。

Fig. 7(h) は出力不安定で、フリー層が準安定状態を持ち、バイステブルな状態になるため出力が 2 値をもつ例である。この状態は記録電流の熱ストレスなどによって加速される^{29), 30)}。

Fig. 7(i) はピン傾斜で、電流による磁場または外部磁場と熱衝撃によりピン層が傾斜し、異常なトランスファーカーブをもつ例である。これは ABS 形成のときのボンディング工程やデボンディング工程のような高温にさらされる工程で発生する場合がある。

Fig. 7(j) はピン層反転で、Fig. 2(d) にも示したように出力が逆転する例で、多くの例が報告されている^{4), 31), 32)}。これも磁場³³⁾と熱³⁴⁾が過度に加わることで発生する。NiO_x のような結合力の弱い反強磁性材料の場合は、過電流を逆転してかけることにより正常に戻ることも知られている。

Fig. 7(k) は一部ピン反転で、一部のピン層の磁化方向が完全に 180° 回転している場合、オフトラックプロファイ

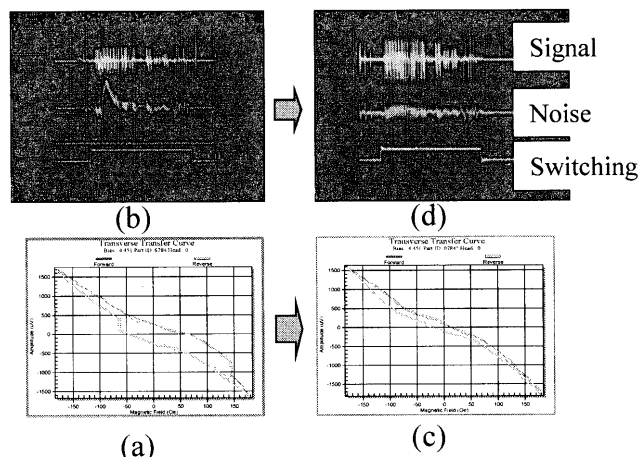


Fig. 8 Effects of re-magnetization: (a) damaged QST transfer curve, (b) read/write signal, (c) after re-magnetization QST transfer curve, (d) read/write signal.

ルの出力のピークが二つになる^{32), 35), 36)}。QST では出力減少として観測される。

Fig. 7(l) に示すように、この局所的なピン層の磁化反転状態によって、三つ以上のピークをもつ場合もある³⁷⁾。このような複雑な現象は、ジャンクションの発熱、GMR 層の発熱とリードからの放熱によりピン層の一部が磁化反転条件を満たすために発生する。

このように、QST トランスファーカーブとスピンスランド測定のアフトラックカーブを併用することにより、故障モードを分類し、原因を特定することは重要である。

実際の工程では、磁気ヘッドスライダのクリーニング工程で IPA に浸した綿棒での洗浄中に IPA が蒸発し綿棒と信号線路が摩擦帯電放電を起こしバルクハウゼンジャンプが発生した例がある¹³⁾。また、テスト工程などでヘッド端子に配線を接続する場合にケーブル中の電荷によって破壊される場合も報告されている³²⁾。

これらのソフト ESD のうち、PM 接合部の磁気的劣化による出力低下やノイズ増加は再着磁により回復する例がある³⁶⁾。その改善例を Fig. 8 に示す。HGA 工程では正常だったヘッドが HDA 組立工程中で Fig. 8(a) に示すようなバルクハウゼンノイズが QST で観測され、ドライブでの記録再生信号にも (b) に示すような大きなノイズが発生する不良例が発生した。このヘッドを PM 方向 0.5~1 T の磁場中に置き再着磁すると、(c) に示すような元の QST トランスファーカーブに戻り、ドライブレベルの記録再生信号 (d) も正常になった。これは HDA 工程で発生した PM 層の弱体化によるソフト ESD 不良が、再着磁で回復したと考えられる。

3.4 擬似 ESD とその例

擬似 ESD とは、GMR 素子自体は正常であるが、GMR 素子からの信号波形がノイズをもつモードである。擬似 ESD の例を Fig. 9 示す。

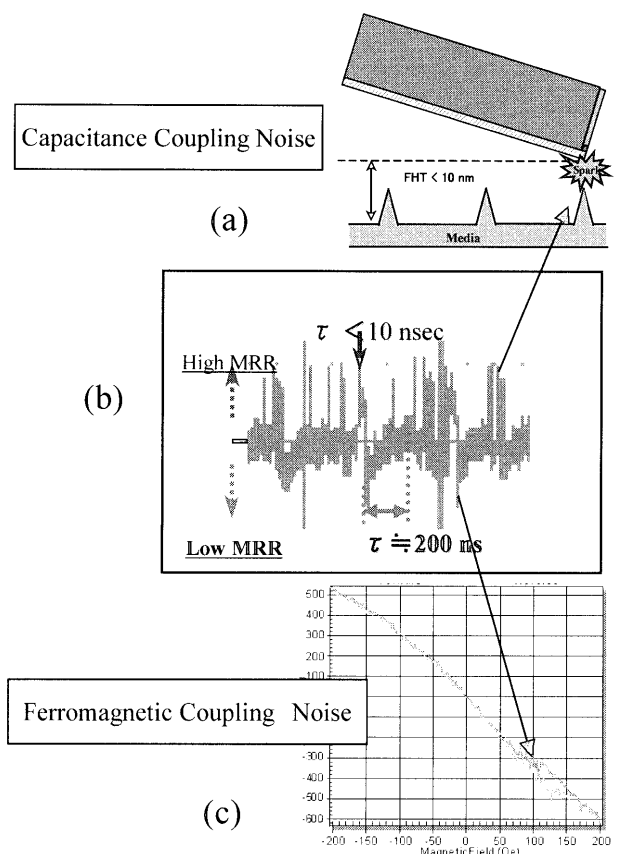


Fig. 9 Quasi ESD example at low temperature: (a) model of head flying, (b) readback noise at low temperature, (c) transfer-curve at low temperature.

Fig. 9(a) に、HDD 用磁気ヘッドが、記録媒体（メディア）を浮上している概念図を示す。近年の高記録密度化に伴い、HDD 用磁気ヘッドの低浮上化（10 nm 以下）が進んでいる。その低浮上量に伴い、磁気ヘッドとメディア間で電界放電が起こり、その放電による GMR 素子の ESD 破壊、もしくは容量結合 ESD によるノイズが発生することが問題になってきている³⁸⁾。

磁気ヘッド、磁気メディアの両方の表面は DLC 層で覆われているため電解放射が起こりやすく、メディア表面の突起ごとに低電圧放電しこの電流補正のため再生回路に容量結合電流が発生し、再生信号 (b) の正方向の高さのそろった半減期が 10 ns より短い雑音として観測される³⁹⁾。これは、記録ヘッドアンプの電位的中立点、ヘッドとメディアの電位差などに起因し、激しい場合はメディアへの損傷、あるいは磁気ヘッド自身の破損につながる。

また低温において低抵抗側に半減期が 200 ns と長い雑音が発生しており、この雑音は低温でのみ発生する。QST で測定すると (c) のように低温でピン層の磁化とフリー層の磁化の平行時に小さなひっかかりが観測され、Fig. 6(e) で示した強磁性結合ノイズも発生していると推測される^{13)~15)}。

4. ESD 破壊モードとよく似た破壊モードの分類

4.1 ヘッド・スクラッチ

ヘッドとメディアの接触、コンタミネーションが磁気ヘッド素子上を通過し、再生素子を傷つけることにより発生するデグラデーションは、HDD を分解しヘッド状態を観察するまでは静電破壊との区別が困難である。

Fig. 10 に磁気ヘッドにコンタミが衝突しヘッドの GMR 素子の一部を破損した例を示す。(a) はコンタミネーションがヘッドとメディアの間を通過した例で、ヘッドはスキュー角をもつため斜めに傷が発生している。(b) は TPI Scoring と呼ばれる多数の傷コンタミが発生している例である。

このようなスクラッチも再着磁によって回復する例も多数あり、コンタミネーションによるヘッド・スクラッチも、摩擦エネルギーや発生した静電気に起因して、ソフト ESD 現象が発生していることがわかる。

4.2 腐食による特性劣化

GMR 素子製造過程で各種の薬品を使うが、この薬品が

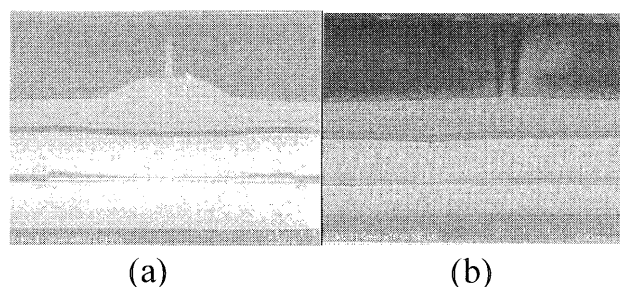


Fig. 10 (a) Head scratch on read element and (b) TPI scoring.

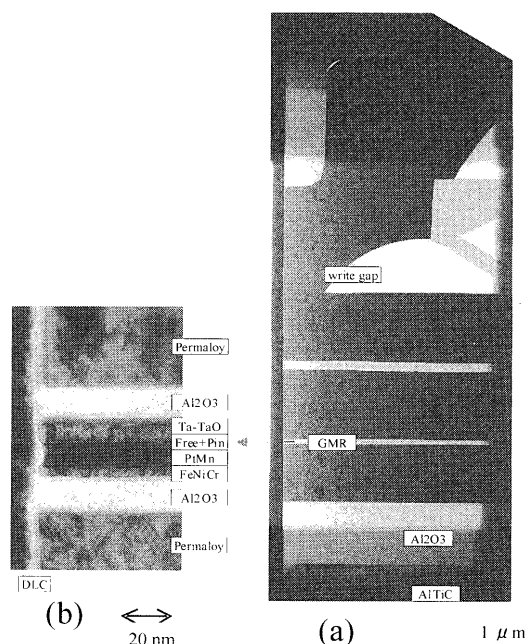


Fig. 11 Cross section of reader and writer.

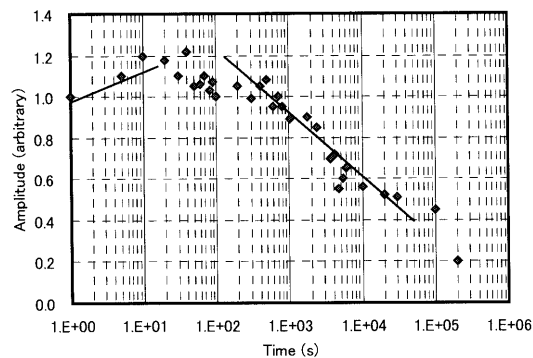


Fig. 12 QST output change example by corrosion.

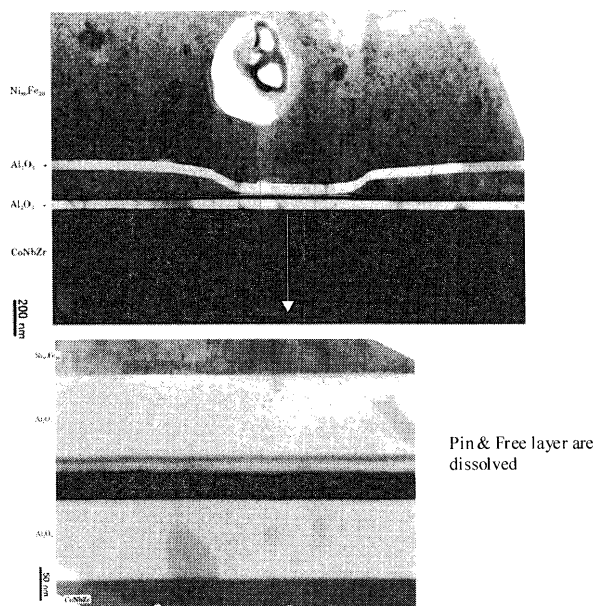


Fig. 13 TEM figure of corroded GMR element.

GMR 素子内で局部電池を形成し特定の層を腐食する場合がある。特に Cu 層がおかされやすいが、初期は、Cu 層の後退により MR ハイトの低下を伴い QST 出力が増加した後、素子全体の腐食が進み出力低下をもたらす。例えば、スライダのラッピング工程などで塩素、フッ素、硫酸痕、アミン基などの腐食性イオンが GMR 表面中に残留し、徐々に GMR 層中の Cu 層やパーマロイ層などの腐食しやすい層を酸化していく。この腐食による出力減少も ESD 破壊と混同が多い。Fig. 11 に磁気ヘッドの断面 TEM 像を示す。磁気ヘッドの表面に数 nm の DLC 層により GMR 素子は保護されているが、ピンホールや ABS 形成時の残留イオンによって腐食が進む場合がある。

Fig. 12 に GMR 磁気ヘッドに DLC 膜を付与しないで、薄いギ酸液にヘッドを浸して QST 出力の時間経過を測定した例を示す。初期の出力増加とその後の緩慢な出力低下がわかる。

Fig. 13 に腐食によって出力が低下したヘッドの断面 TEM 像を示す。GMR 磁気ヘッド層がアモルファス化し白く抜けて見えるのが観察される。

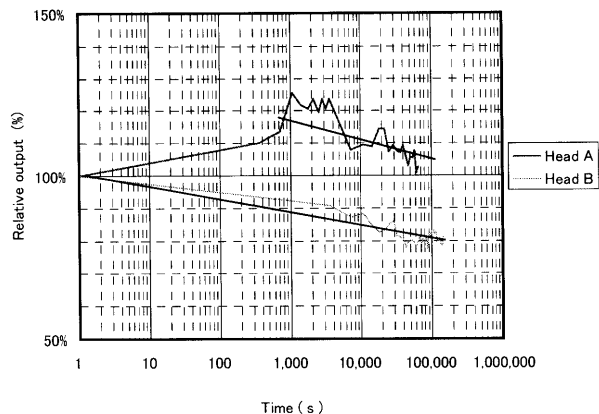


Fig. 14 TAA degradation vs. time at 150 degrees by electro-migration mode.

4.3 エレクトロマイグレーション

ヘッドに加熱通電することにより不純物やホールのマイグレーションが発生し、通常 MR 比は低下する。この現象は温度で加速されアレニウスプロットから寿命予測が可能である^{29), 40)}。この寿命は反強磁性膜のブロッキング温度⁴¹⁾や着磁の状況にも依存する⁴²⁾。さらに GMR 層のアニールによる鏡面性の MR 比の向上もあり、複雑な振舞をする。ソフト ESD によってエレクトロマイグレーション寿命が変化するかどうかという検討もなされているが、明確な相関は得られていない⁴³⁾。

Fig. 14 のヘッド A に示すように、アニール効果で GMR の反射面の粗さ減少による電子反射率向上、電子自由行程の延伸あるいは、ひずみなどが減少し MR 比が増加するフェーズとヘッド B に示すように GMR 素子の中のホールや不純物が温度、電流ストレスによって移動し、MR 比が減少するフェーズがある。

5 ま と め

ESD 対策としては、磁気ヘッドの耐 ESD 電圧を高める材料、構造開発以外に多くの工程での対策がなされる。部品や工程を帯電させないため、イオナイザの利用や工程を高湿度に保つ工夫、さらに床、机、装置、服、靴、組立治具、容器、ピンセットなどの導電性が厳しく管理されている。さらに、最近では EMI 対策も重要になってきている。

本報において、ESD 破壊モードとよく似た現象の分類の詳細を示した。これらによって、磁気ヘッド設計部門や製造工程設計部門へのフィードバックを行い、磁気ヘッド設計の最適化、製造工程の最適化、および ESD 不良原因追求とその対策に役立てることが可能であることを示した。

さらに、次世代の HDD 用磁気ヘッドとして実用化が期待される TuMR ヘッドや CPP 型 GMR ヘッド、CMR, EMR といった新構造磁気ヘッドの耐 ESD 設計管理指針の一助になれば幸いである。

謝 辞 本研究の機会を与えていただきました松下寿電子工業(株)・菊谷常務, 多くの有益な助言をいただき松下電器・櫛間主幹技師, 松下寿・中村主幹技師, 福住主幹技師, 協力をいただきました松下テクノリサーチ・稲里主任技師, 松下寿電子工業開発部門, HDD 事業部, US 開発センターの関係各位に感謝いたします。

References

- 1) A. Wallash and J. Hughbanks: EOS/ESD Symposium, Las Vegas, 1994, p. 73 (1994).
- 2) J. Himlel: *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 3455 (1996).
- 3) A. Wallash: *IEEE Trans Magn.*, **33**, 2911 (1997).
- 4) A. Wallash and Y. K. Kim: *IEEE Trans. Magn.*, **34**, 1519 (1998).
- 5) T. Ohtsu: *Clean Technology* (in Japanese), **6**, 5 (2004).
- 6) A. Wallash: EOS/ESD Symposium, Anaheim, 2000, p. 470 (2000).
- 7) T. Kagami, *et al.*: The 134th Topical Symposium of the Magnetic Society of Japan (in Japanese), p. 134, p. 141 (2004).
- 8) M. Honda: EOS/ESD Symposium, Anaheim, 2000, p. 330 (2000).
- 9) ESD Association Standard, ANSI/ESD S20.20 (1999).
- 10) Technical Report IEC 61340 (1998).
- 11) A. Fujie: *Clean Technology* (in Japanese), **6**, 1 (2004).
- 12) J. Salisbury, *et al.*: EOS/ESD Symposium, Las Vegas, 2003, 4B-6, p. 414 (2003).
- 13) J. Matsugi, N. Nakano, and Y. Mizoh: RCJ Symposium, Tokyo (in Japanese), 2002, 123 (2002).
- 14) J. Matsugi, N. Nakano, and Y. Mizoh: JIEICJ Technical Report, MR-2002-77 (in Japanese) (2002).
- 15) J. Matsugi, T. Nakano, Y. Mizoh, K. Nakamura, and H. Sakakim: EOS/ESD Symposium, Las Vegas, 2003, 4B-1, p. 382 (2003).
- 16) T. C. Chang: EOS/ESD Symposium Proceedings, Santa Clara, 1997, 4B5.1 (1997).
- 17) A. Morinaga, *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 2262 (2002).
- 18) T. Hamaguchi, T. Ichihara, and T. Ohtsu: EOS/ESD Symposium Proceedings, Charlotte, 2002, EOS-24, p. 119 (2002).
- 19) H. Patland and W. A. Ogle: EOS/ESD Symposium Proceedings, Charlotte, 2002, 2B-3 (2002).
- 20) T. Ohtsu, *et al.*: EOS/ESD Symposium, Las Vegas, 2003 4B1, p. 402 (2003).
- 21) J. Himle: *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 1675 (2001).
- 22) Y. Mizoh, T. Nakano, and T. Suzuki: RCJ Symposium, Tokyo (in Japanese), 2003, p. 159 (2003).
- 23) C. F. Lam, E. Salhi, and S. Chim: EOS/ESD Symposium, Santa Clara, 1997, 4B3, p. 386 (1997).
- 24) J. X. Shen, *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 2595 (1999).
- 25) Y. Shen, R. Leung and J. Sun: EOS/ESD Symposium Proceedings, Anaheim, 2000, 3B-8, p. 355 (2000).
- 26) L. Chen: *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 1343 (2001).
- 27) E. Roddick: *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 1340 (2001).
- 28) T. Hamaguchi, T. Ichihara, and T. Ohtsu: *IDEMA Japan News* (in Japanese), **55**, 1 (2003).
- 29) J. Luo, C. Yeh, and A. Sanayei: EOS/ESD Symposium Proceedings, Portland, 2001, 3C. 7, p. 318 (2001).
- 30) H. Hardner, M. Hurben, and N. Tabat: *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 2592 (1999).
- 31) M. Takahashi, *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **34**, 1522 (1998).
- 32) E. K. Jang, *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 2616 (1999).
- 33) C. F. Lam, C. Chang, and R. Karimi Sanayei: EOS/ESD Symposium Proceedings, Reno, 1998, EOS-20, p. 360 (1998).
- 34) C. Moore and A. Wallash Sanayei: EOS/ESD Symposium Proceedings, Orland, 1999, EOS-21, 309 (1999).
- 35) E. K. Jang, *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 2616 (1999).
- 36) Y. Shen, R. Leung, and J. Sun: EOS/ESD Symposium Proceedings, Anaheim, 2000, EOS-22, p. 355 (2000).
- 37) A. Wallash: EOS/ESD Symposium Proceedings, Orland, 1999, EOS-22, p. 349 (2000).
- 38) T. Ohtsu, *et al.*: RCJ Symposium, Tokyo (in Japanese), 2001, p. 129 (2001).
- 39) T. Ohtsu, H. Yoshida, and N. Hatanaka: EOS/ESD Symposium, Anaheim, 2000, EOS-01, p. 172 (2001).
- 40) I. Tsu and K. J. Duxstad: *J. Appl. Phys.*, **85**, 5858 (1999).
- 41) J. P. Nozieres, *et al.*: *J. Appl. Phys.*, **87**, 6609 (2000).
- 42) I. Tsu, G. A. Burg, and W. P. Wood: *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 1707 (2001).
- 43) I. Tsu, M. Davis, and C. Chang: EOS/ESD Symposium, Portland, 2001, EOS-01, p. 187 (2001).

(2004年7月1日受理)



溝尾嘉章 みぞお よしあき

昭53 大阪大学理学部化学科卒業, 昭55 京都大学大学院理学研究科化学専攻終了, 同年 松下電器産業(株)入社, 平8 名古屋大学工学博士, 平13 松下寿電子工業(株)出向, 同社主幹技師, 主任 ESD コーディネータ, 現在に至る。
専門 磁気記録, コンピュータシミュレーション, 磁気応用デバイスの開発 (工博)