

.....
論 文
.....

スピンスタンドを用いた GMR ヘッドの ESD 破壊モードの解析

市原貴幸^{*,1}, 濱口雄彦^{*}, 大津孝佳^{**}

(2004年8月23日 受付; 2005年11月19日 受理)

Analysis of ESD Failure Mode in GMR Head by Using Spinstand

Takayuki ICHIHARA^{*,1}, Takehiko HAMAGUCHI^{*} and Takayoshi OHTSU^{**}

(Received August 23, 2004; Accepted November 19, 2005)

We used a spin-stand with a pre-amplifier with a built-in ESD simulator circuit to investigate a new magnetic failure mode caused by ESD. This failure mode originates in Barkhausen noise from domain walls in the free layer of a giant magneto-resistive (GMR) head. According to a modified machine model (0 Ω, 47 pF), this failure occurs at the ESD voltage of approximately 0.5 V, which is a quarter of that at which a conventional pinned layer reversal failure occurs. It is concluded that this technique is useful for measuring thresholds of Barkhausen noise failure because of its ability to detect read/write characteristics during ESD breakdown process. And we found that a strong magnetic bias field could improve stability against ESD failure by adjusting the thickness or changing the material of the domain control layer.

1. はじめに

近年、磁気ディスク装置の記録密度は年率 60~100%という驚異的なペースで向上しており、特に再生感度の高い磁気抵抗 (Magneto-Resistive, MR) ヘッド、および巨大磁気抵抗 (Giant Magneto-Resistive, GMR) ヘッドの性能向上がその原動力となってきた。ここで MR ヘッド、GMR ヘッドにおいて、記録密度の向上に伴う素子の微細化により、以下に示す ESD による素子破壊が重大な問題となっている。

MR ヘッドのセンサー部分は 100nm に満たない厚さの薄膜で構成されているため、比較的低い ESD エネルギーによっても容易に膜温度が上昇し溶融破壊に至る。例えば HBM (Human Body Model) を用いた ESD 印加試験では、85~150V で素子が損傷を受けて抵抗値が上昇する例が報告されている¹⁾。

また、GMR ヘッドの素子部分は、図 1(a)に示すように反強磁性層とピン層、フリー層が積層された構造をとっている。

キーワード: GMR ヘッド, ESD 破壊, スピンスタンド, バルクハウゼンノイズ

* 日立製作所 研究開発本部 (256-8510 神奈川県小田原市国府津 2880)

Research & Development Group, Hitachi, Ltd., 2880, Koza, Odawara-shi, Kanagawa-ken, 256-8510, Japan.

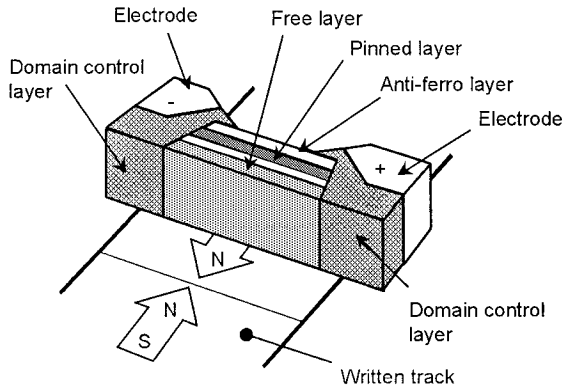
** 日立グローバルストレージテクノロジーズ (256-8510 神奈川県小田原市国府津 2880)

Hitachi Global Storage Technologies Co., Ltd., 2880, Koza, Odawara-shi, Kanagawa-ken, 256-8510, Japan

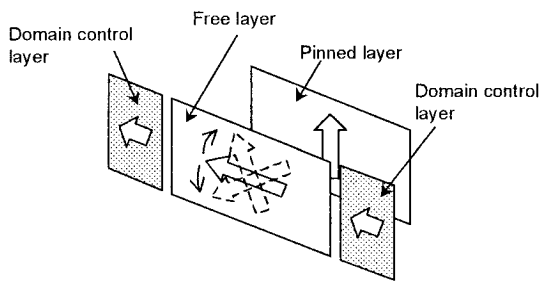
¹ ta-ka@rd.hitachi.co.jp

図 1(b)に示すように、ピン層の磁化方向は反強磁性層とのカップリングにより上方向に固定されており、素子の両端部に配置された永久磁石の磁区制御膜は、フリー層に横向きのバイアス磁界を与える働きをしている。フリー層はディスクからの上下方向の磁界によって容易に回転するため、ピン層とフリー層との磁化角度に応じて素子抵抗が変化し、記録トラックの情報を再生することができる。この GMR ヘッドでは溶融破壊に至る 1/4 程度の ESD エネルギーによって、ピン層の磁化方向が反転して再生特性が劣化する現象が発生する²⁾。これは温度上昇による反強磁性層とピン層とのカップリングの消失と、ESD 電流自身が発生する磁界が関与する現象である。この故障モードは、磁気ディスク製品の組み立て工程における ESD 破壊の主要因であり、歩留まりを低下させる大きな問題となっている。磁気ディスク装置の高密度化に伴い、より小型でかつ薄いセンサー膜構造に移行しているため、ピン層の磁化反転を生じる破壊電圧は HBM において 10V 程度にまで急速に低下してきている。したがって、GMR ヘッドの ESD 耐性向上のためにその破壊の過程を観測し、その原因を究明することがきわめて重要となっている。

本報告では回転するディスク上に記録、再生を行うヘッドテスト (スピンスタンド) をベースに、従来とは異なる ESD 破壊モードとしてバルクハウゼンノイズに着目した評価を行った。このノイズは、トラップ点においてピン留めされたフリー層の磁壁が、ディスクからの磁場を受けて突発的に移



(a) GMR 再生ヘッドの構成要素
(a) GMR head element.



(b) GMR 再生ヘッドの各層の磁化方向
(b) Magnetization direction in each layer of GMR head element.

図1 GMR 再生ヘッドの概要図
Fig. 1 Schematic diagram of GMR head.

動して再生信号に誘起されるものである。バルクハウゼンノイズは、検出エラーの原因となるだけでなく、測定による選別が難しい故障モードである。バルクハウゼンノイズに対するESD耐圧を確保するためには、特に磁区制御膜によるフリー層の安定性が重要であることを考察する。

2. 実験方法

ESD起因のピン層の磁化反転の検出には、GMRヘッド素子に直流電流を流しながら、外部から静磁界もしくは1kHz程度の交流磁界を印加して再生出力電圧を観察する測定法(ΔVH法)を用いることができる。しかし数百MHzの信号帯域を扱う実際の磁気ディスク装置と比較して、ΔVH法の測定周波数は極端に低く、ディスクを再生した際のノイズ特性を正確に予測することは困難である。そこで実際の装置に近い条件でのGMRヘッドの特性変化を観察するために、ディスクに記録・再生を行って電磁変換特性を評価するヘッドテスト、通称スピンスタンドを評価に用いた。スピンスタンドは数千rpmで高速回転する磁気ディスク上にヘッドをロー

ドさせて、記録ヘッドの書き込み能力と、GMRヘッドで再生した信号の強度、ノイズを評価する装置である。新たにESDシミュレータ回路を搭載したプリアンプを作製し、市販のスピンスタンドに組み込んで実験を行った。装置の概略図とESD電流の波形例を図2に示す。作製したプリアンプは4×5cm程度の大きさであり、このプリアンプとヘッド端子とは、ノイズスペクトルを評価する80MHzという帯域を考慮して約5cmの短い伝送線で接続されている。スピンスタンドは床からの振動を遮断するために圧縮空気で浮上させた石定盤の上に機構系を組み込んだ構成であり、約1m²の床面積を占める比較的大きな測定装置である。なおESDシミュレータ回路には、HDD組立工程における治具とGMRヘッドとの接触を想定して回路定数を調整したMM(Machine Model, R=0Ω, C=47pF)を用いた。参考のためGMR素子抵抗=56Ω、チャージ電圧(Vd)=2.0V条件におけるESD電流波形を同図中に示した。

実験はヘッドをディスクから離れた状態で0.1VステップずつVdを増加させながら1回ずつESD印加を行い、4200rpmで回転する磁気ディスク上にヘッドをロードして、線記録密度3.3kflux/mmのパターンを記録したときの再生信号出力と、線記録密度19.8kflux/mmのパターンを記録したときのノイズスペクトラムを、それぞれデジタルオシロスコープおよびスペクトラムアナライザを用いて測定した。ノイズレベルは、1MHz~80MHzの帯域でノイズスペクトラムを積分したノイズ電力より求めた。またセンサー膜の磁区構造を推定するた

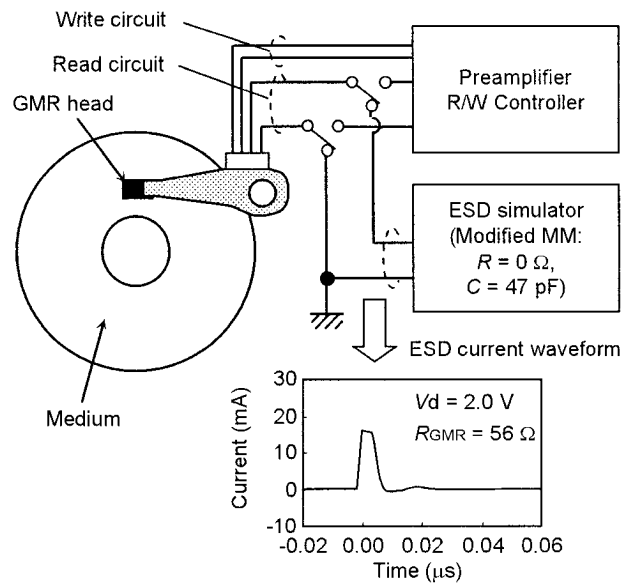


図2 ESDシミュレータを搭載したスピンスタンドの概略図およびESD電流波形の例
Fig. 2 Schematic representation of head tester with ESD simulator and typical ESD current waveform.

めに, GMR ヘッドのトラック幅方向の再生感度分布の測定を行った. 再生感度分布は, ディスク上にあらかじめ記録された幅の狭いパターンを, トラック幅方向にGMR素子をずらしながら再生することで得ることができる. ディスク1枚あたりの記憶容量が 10 GB の 2.5 インチ磁気ディスク製品 (記録密度は約 19 Gb/in^2) 向けに, 磁区制御層の層厚および飽和磁化を変えることにより, フリー層へのバイアス磁界を変えた GMR ヘッドを試作して, ESD による特性変化を比較した. 製品のトラックピッチは約 $0.7 \mu\text{m}$ であり, GMR ヘッドの幾何学的トラック幅 (電極間隔) は約 $0.4 \mu\text{m}$ である.

3. 結果および考察

始めに, バイアス磁界の弱い長手バイアス比 $\gamma_B=4$ のヘッドを用いて, ESD による信号再生レベルの変化を測定した結果を図3に示す. $V_d=0\sim 2.1\text{V}$ までは, ヘッド端子換算でほぼ $600 \mu\text{Vpp}$ 程度の値を保っているが, $V_d=2.2\text{V}$ から 2.3V にかけて $200 \mu\text{Vpp}$ 程度まで急激に出力が低下している. $V_d=0\sim 2.1\text{V}$ の範囲において測定値が多少増減しているが, これは各測定の前後の記録動作に伴う通常のレベル変動量である. $V_d=2.3\text{V}$ までの全測定範囲において素子抵抗は 56.3Ω と一定であり, この出力低下は溶融破壊などの物理的な変化ではなく, GMR 素子の磁気的な劣化によるものと推定される.

この時測定した GMR 素子のトラック幅方向の感度分布形状を図4に示す. 横軸は素子のトラック幅方向の位置, 縦軸は規格化した出力値である. $V_d=0\sim 2.1\text{V}$ の範囲において, ほぼ一定の感度分布形状が得られている(a). $V_d=2.2\text{V}$ において, 頂上付近の形状がわずかに傾斜し(b), 更に $V_d=2.3\text{V}$ では, 3つ山の形状へと急激に変化している(c). GMR 素子の両端部には Au 電極が接続されているため, ESD 電流による熱は両端部で冷却されやすい. この結果, 最も温度上昇した素子の中央部で反強磁性層とピン層のカップリングが失われ, 素子が冷却される過程で ESD 電流の発生する磁界の方向にピン層の磁化方向が再固定されるものと考えられる³⁾. 図4(c)の形状は, 素子の中央部分の再生極性が逆転し, 素子両端部では正常極性の感度が残存した状態と説明することができる. なお, 本実験に用いたすべてのヘッドにおいて同様の再生感度分布形状の変化が観測された.

ノイズスペクトラムから算出した積分ノイズのレベル変化を図5に示す. 積分ノイズレベルのうち, ディスクから発生するノイズ成分は再生感度に比例するため, 再生信号出力の図3と密接な相関を示すが, ここでは異常に大きく変動する結果となった. 例えば, $V_d=0.5\text{V}$ や 1.3V , 2.2V の ESD 印加後の測定点では, 特異的に大きなノイズレベルが観測され

ている. ESD 印加前と $V_d=0.5\text{V}$ の測定点におけるノイズスペクトラムを図6に示す. ESD 印加により, 低域成分のノイズが増加する現象が発生している. このノイズスペクトラムはバルクハウゼンノイズと呼ばれる故障モードにて観察される形状である. $V_d=0.5\text{V}$ や 1.3V の測定点で観察されるバルクハウゼンノイズは, 本来磁区制御膜によって単磁区となっ

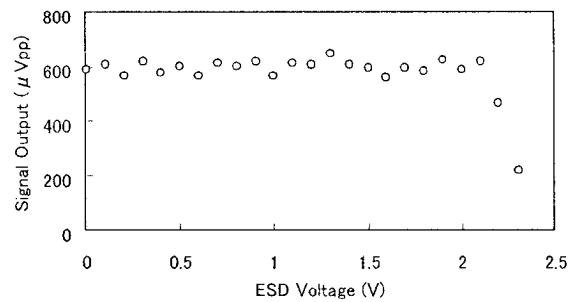


図3 ESD による再生信号出力の変化

Fig. 3 Signal level drops when ESD current reverses magnetization direction of pinned layer.

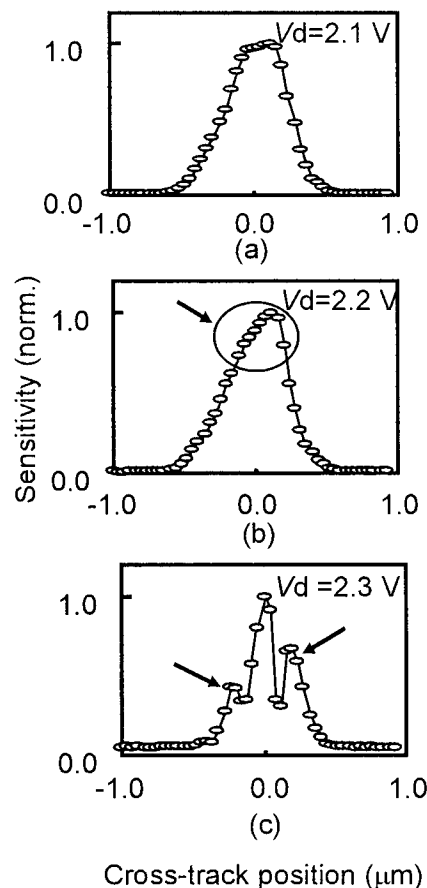


図4 ESD による GMR ヘッドの正規化した再生感度分布形状の変化

Fig.4 Sensitivity profile changes when ESD current reverses magnetization direction of pinned layer.

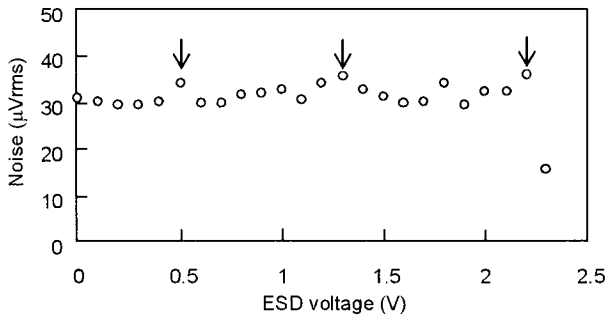


図5 ESDによるノイズレベルの変化
Fig.5 Noise level increase when ESD current disturbs magnetization direction of pinned layer.

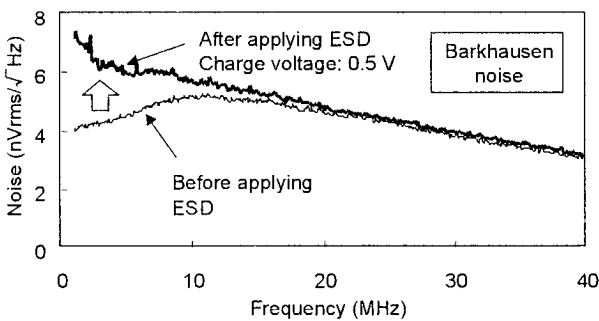


図6 ESDによるノイズスペクトラムの変化
Fig. 6 Typical noise spectrum change caused by ESD current.

ているフリー層に磁壁が生じている可能性を示唆している。この状態のGMRヘッドに、磁区制御膜の磁化方向と同じ方向に13kOeの強磁場を印加したところ、正常なノイズスペクトラム形状に復帰させることができた。このことから、ESD電流による加熱や磁界に誘導されて磁壁が発生しており、バルクハウゼンノイズが観察されたと説明することができる。なお、 $V_d=2.2V$ の試験では、図4(b)に示す感度分布形状の変化と、図5に示すノイズレベルの上昇が見られることから、ピン層の一部の磁化反転とフリー層の磁壁との両方が同時に発生したと考えられる。同様にほとんどのGMRヘッドで、出力が低下する V_d と同じポイントでバルクハウゼンノイズが観察されており、ピン層の一部でも磁化が反転した状態では、フリー層の単磁区構造を維持できないと推定される。

図1に示したタイプのGMRヘッドでは、磁区制御膜の膜厚や材料を変化させてフリー層へのバイアス磁界を調整することができる。磁区制御膜の膜厚と飽和磁化の積と、フリー層の膜厚と飽和磁化の積との比で定義される長手バイアス比 γ_B を変えたヘッドを3水準6種類試作し、出力が半分に低下したESD電圧と、バルクハウゼンノイズが発生したESD電圧との関係の評価した結果を図7に示す。多くのヘッ

ドで出力低下と同じ V_d にてバルクハウゼンノイズが発生するため、プロット点は図中の傾き1の破線付近に集中する。しかし、 $\gamma_B=4$ のヘッドにおいて、出力低下と比較して極端に低いESD電圧でバルクハウゼンノイズが発生している。図3から図6の結果は、バイアス磁界の弱い $\gamma_B=4$ のヘッドを用いたものであり、 γ_B が大きなヘッドについては図3、図4のようなピン層の磁化反転による出力低下や、感度分布形状の変化は見られたが、図5、図6のような、低い V_d における特異的なノイズの増大は見られなかった。このことから、ESDによるバルクハウゼンノイズを防止するためには、 γ_B を大きくしてバイアス磁界を強くする必要があることが判った。

GMRヘッドの素子抵抗と、バルクハウゼンノイズが発生

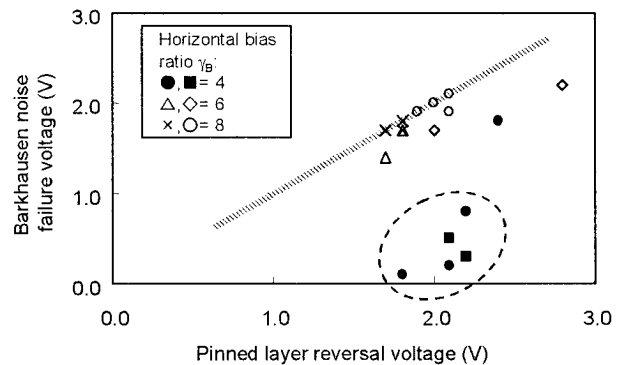


図7 出力低下電圧とノイズ増加電圧との関係
Fig. 7 Barkhausen noise failure voltage versus pinned layer reversal voltage for six types of GMR heads.

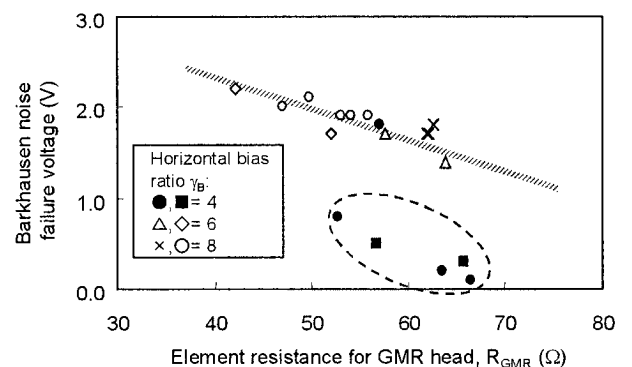


図8 GMR素子抵抗値とノイズ増加電圧との関係
Fig. 8 Barkhausen noise failure voltage versus element resistance for six types of GMR heads.

した ESD 電圧との関係を図 8 に示す. 図中のプロット記号は図 7 と対応している. GMR 素子高さは機械的な研磨工程で決定されるため, その素子抵抗は $42\sim 66\Omega$ と広い範囲に分布している. 多くのプロット点が右下がりの傾向に従うことから, 素子高さが低く, 抵抗の高いヘッドは, ESD 電流によって加熱されやすく, ピン層やフリー層の磁化状態が劣化しやすいと考えられる. しかし $\gamma_B=4$ のヘッドは, ESD に対して明らかに弱い傾向を示している.

以上, 本実験で観測された ESD 破壊現象について, GMR 膜各層の磁化状態に着目して考察する.

GMR 膜において, 図 9(a) に示すようにピン層は反強磁性膜によって磁化の方向を媒体対向面に対し垂直方向に固定されており, フリー層は両端の磁区固定層によって媒体対向面に対し水平方向に磁化が揃えられている.

ここで, ESD 電流によって GMR 素子が反強磁性膜のプロッキング温度近傍まで加熱された場合, ピン層と反強磁性膜のカップリングが失われ, 図 9(b) に模式的に示すようにピン層の磁化の一部が反転し, GMR 膜の再生感度が著しく低下する. このときフリー層の磁化方向は, より安定な磁化方向をとるためにばらばらになり, フリー層内に磁壁が発生する. この磁壁の不連続な移動がバルクハウゼンノイズとして観測される.

さらに磁区制御層の固定能力が低下している場合, 図 9(c) に模式的に示すように, ピン層が反転するよりも低い ESD 電流により, 磁区制御層の磁化が減磁してフリー層に磁区が発生したか, または, 磁区制御層によるバイアス磁界が弱いためにフリー層に磁区が発生し, バルクハウゼンノイズとなって観測される. この故障は, 磁区制御層とフリー層の再着磁を行い磁区固定能力を復活させることにより修復可能であるが, 再着磁には 10 kOe を超える大きな磁界が必要であり, 実際のディスク装置上での修復は困難である.

従来は, ピン層の磁化反転に対する ESD 耐圧を向上させるために, プロッキング温度の高い反強磁性膜を GMR 素子に採用する手法が用いられてきた. しかし磁区制御膜からフリー層に十分なバイアス磁界が印加されないヘッドでは, ピン層が磁化反転する ESD 耐圧よりも極端に低いエネルギーでバルクハウゼンノイズが増加する故障が発生することが判った. 総合的な ESD 耐圧を確保するためには, 従来の反強磁性膜のプロッキング温度や素子抵抗の制御だけでなく, バルクハウゼンノイズ増加の故障に関与する磁区制御膜の設計も重要だと言える. ただし過剰なバイアス磁界は, フリー層の磁化方向の自由な回転を妨げてヘッド感度を低下させる. 磁気ディスク装置に必要なヘッド感度と磁区制御能力とのバランスに注意を払った設計が要求される.

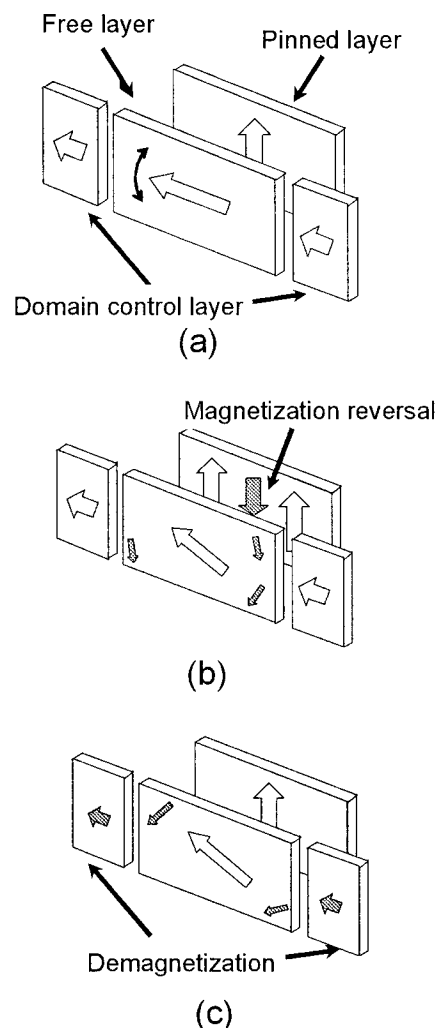


図 9 ESD 破壊時の GMR 膜の磁化方向
Fig. 9 Schematic magnetization direction of GMR element damaged by ESD.

4. まとめ

実際の磁気ディスク装置に近い条件で GMR ヘッドの ESD 耐圧を検討するため, ESD シミュレータ回路を搭載したプリアンプを作製した. このプリアンプとスピンドルを組み合わせた実験により, 従来の熔融破壊モードおよびピン層磁化反転破壊モードとは異なる第 3 の破壊モードを見出した. これは ESD 電流による加熱や磁界に誘導されて GMR ヘッドのフリー層に磁壁が発生し, 外部磁界によって不連続に移動するバルクハウゼン性のノイズであり, フリー層の磁区制御能力の低いヘッドでは, 非常に低い ESD エネルギーで発生することが判った.

参考文献

- 1) Albert J. Wallash: IEEE Trans. Magn., **33** (1997) 291
- 2) M. Takahashi, T. Maeda, K. Inage, M. Sakai, H. Morita, and M. Matsuzaki: IEEE Trans. Magn., **34** (1998) 1522
- 3) 山田健一郎, 向山直樹, 金井均: FUJITSU.51, **5** (2000) 291