

次世代 HDD 用ヘッド材料の開発

野口 潔

TDK (株) テクノロジーグループ SQ 研究所
〒385-8555 長野県佐久市小田井 543

1. はじめに

世界初のHDD (Hard Disk Drive) であるIBM社製のRAMACが製品化されて50年余りが経過したが、HDDの歴史は記録密度の向上、大容量化の歴史と見ることが出来る。高密度化は様々な技術の集大成として図られて来たが、磁気ヘッドの観点からは1990年代の異方性磁気抵抗効果型(AMR: Anisotropic magnetoresistive) ヘッドとそれに続くスピナルブGMR (Giant magnetoresistive) ヘッドの導入によるところが大きい。

その後も継続してHDDの高密度化へ向けて技術開発が行われたが、それまでの長手記録方式とスピナルブGMRヘッドを基本とした構成では記録密度の向上が鈍り始め、既存の延長線上には無い新たな技術的ブレークスルーが求められる状況に至った。このような状況の下、2005年にはTMR (Tunneling magnetoresistive) ヘッドの導入が始まり、また垂直磁気記録方式、垂直磁気記録ヘッドがついに実用化された。

本稿ではHDDのキーパーツである磁気ヘッドの変遷、材料技術のトレンドと将来の方向性について概観する。

2 再生素子

2. 1 GMRヘッド

FeとCrの多層膜で50%以上の巨大磁気抵抗(GMR: Giant magnetoresistance)効果が見い出され¹⁾、この物理現象を実用化したのがGMRヘッドである。GMR効果は非磁性層を介する上下の磁性層の磁化状態により伝導電子の散乱が異なるスピン散乱に由来しており、上下磁性層間の磁化の向きが平行のときは抵抗が低く、反平行のときは抵抗が高くなる現象である。GMR効果の形態には、種々のものがあるが、スピナルブ型が実用化された²⁾。

図3に示すように、スピナルブGMRヘッドは、自由層/Cu非磁性層/固定層/反強磁性層から構成される。自由層にはNiFe/CoあるいはNiFe/CoFeの2層膜、固定層にはCoあるいはCoFe合金が適用されている。

固定層の磁化はPtMn, IrMnなどの反強磁性層と

の交換相互作用により固定される。この反強磁性層

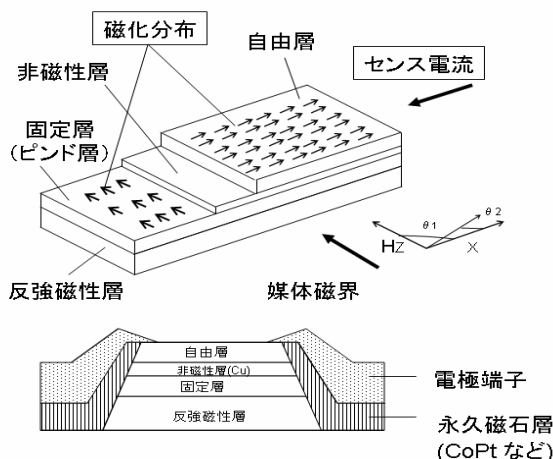


図1. スピナルブGMR素子の基本構造

と磁性層の交換結合技術がスピナルブGMRヘッドの最も特徴的な技術である。反強磁性層には、1) 固定層との交換結合磁界 (H_{ex}) が大きい、2) H_{ex} が消失するブロッキング (T_B) 温度が高い等が求められる。特にMn系反強磁性材料の開発が活発になされた。表1に各種反強磁性材料の特徴を示す。

第1世代のスピナルブGMRヘッドにおいてはIrMn, RuRhMn, PtMn, PtPdMnなどの様々な反強磁性材料が採用された。しかし、静電破壊 (ESD) 電流で特性が劣化してしまう現象³⁾を抑制するため、高い H_{ex} および T_B を有するPtMn等の規則系材料が主流となった。

表1. 各種反強磁性材料の特徴

種類	材料	交換結合磁界 (H_{ex})	ブロッキング温度 (T_B)	臨界膜厚	熱処理	
Mn合金系	不規則系	FeMn, IrMn, RuRhMn 等	中	<260°C	~5nm	不要
	規則系	PtMn, PtPdMn, NiMn 等	大	>300°C	~13nm	230°C以上
酸化物系	NiO, α -Fe ₂ O ₃	小	<250°C	~50nm	220°C以上	

高記録密度を実現するためには、再生ヘッドの狭リードギャップ化が求められ、スピナルブ

GMR膜厚は薄いほうが好ましい。記録密度向上とともに反強磁性層厚も徐々に薄くなったが、PtMn等の規則系材料は、所望の特性を得るためには15nm以上の層厚を要する。そこで、固定層構成を工夫すると共に、7nm程度でも比較的の高い H_{ua} と T_B を有する不規則系IrMnが第2世代スピンバルブGMRヘッドに用いられるようになり、現在のTMRヘッドにも適用されている。TMRヘッドにおいても、更なる狭リードギャップ化は必要である。層厚5nm以下でも実用可能な反強磁性層が求められており、規則相IrMn₃合金などの新材料及びプロセス開発が継続して進められている⁴⁾。

2. 2 TMRおよびCPP-GMRヘッド

TMRヘッドは薄い絶縁層（トンネルバリア）を挟んで二層の磁性膜を配置し、それぞれの磁性膜の磁化のなす角度に依存して前記絶縁層を通過するトンネル電流値が変化することを利用して⁶⁾。基本的構成と動作原理はGMRヘッドと同じであり、非磁性層にCu導体層でなく絶縁層を適用している点異なる。また、従来のスピンバルブGMRヘッドが素子の膜面内方向（トラック幅方向）にセンス電流を流すCIP (Current-In-Plane) 構造であるのに対して、TMRヘッドでは素子膜面に垂直にセンス電流を流すCPP (Current-Perpendicular-to-Plane) 構造となっている。この様子を図4に示す。TMRヘッドはスピンバルブGMRヘッドに対して、5倍以上の出力と高いSN比（Signal-to-Noise Ratio）を確保する事ができる⁵⁾。TMRヘッドのバリア絶縁層には、アモルファスAlO_x、TiO_x等が採用され実用化が始まった。

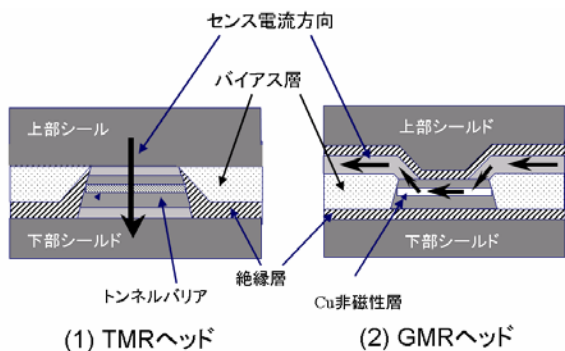


図3. TMRヘッド(CPP構造)とGMRヘッド(CIP構造)の比較

TMRヘッドは将来の高密度化に対して高いポテンシャルを秘めているが、さらに高密度化が進展して再生トラック幅が減少した場合には、その抵抗増加が問題となることは予想される。そこで、将来の

高密度再生ヘッドの有力候補の一つとして、CPP構造でトンネルジャンクションの代わりにスピンバルブGMRを用いたCPP-GMRヘッドの開発が進められている。

CPP-GMRヘッドにおいて実際にMR発現を担うのはピンド層とフリー層であるが、Co、Fe、Ni等の組み合わせで構築される事が一般的であり、その改善による具体的なMR比向上手法の報告は数少ない。その中の一つに、非磁性体であるCuを強磁性体中に薄く挿入する事によりMR比を向上させる技術がある^{6,7)}。しかしその微小領域においてどのような原理でMR比が向上するかについては不明な点が多い。この現象の理解のためには、挿入した非磁性体のスピン状態解析は必須であり、XMCD (X-ray Magnetic Circular Dichroism)測定が有効である。

そこで、強磁性層中に添加する不純物元素の磁気輸送特性に及ぼす役割を、磁気分極との相関の観点から明らかにするため、強磁性FeCo層中に非磁性層(Ti, V, Cr, Mn, Cu, Mo, Ru, Pd, Ag)を挿入した多層膜を作製し、透過法にてXASとXMCD測定を行った。

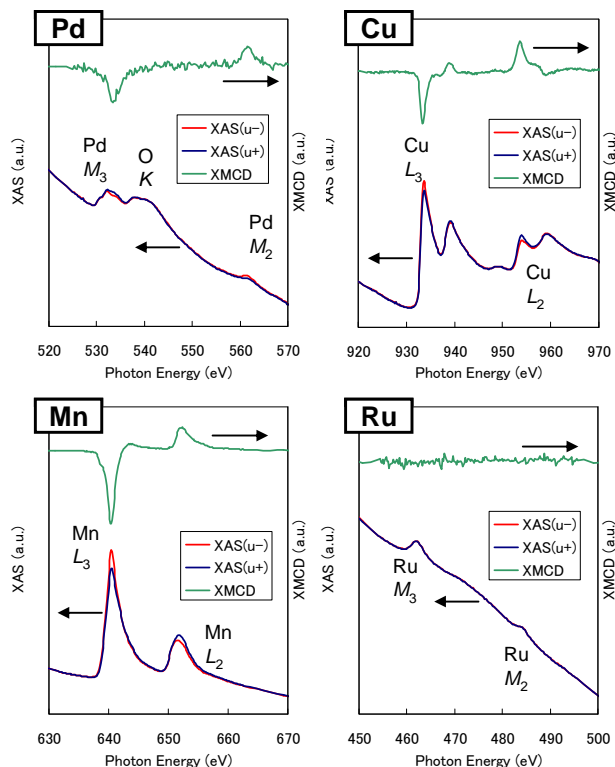


図4. FeCo/非磁性(Pd,Cu,Mn,Ru)積層膜のXAS及びXMCDスペクトル

図4に代表例としてPd, Cu, Mn, RuをFe₇₀Co₃₀中

に挿入した試料の XAS, XMCD 測定結果 (一部) を示す。MCD は Mn について最も大きく、順に Pd, Cu, Ru となる。Ru においては分極が全く観測されなかった。

この得られた分極情報と MR 効果の関係を調べた結果、Cu, Pd が高い MR エンハンスメント効果を示すのに対し、最も大きな分極値が XMCD 測定により示された Mn については、挿入により逆に ΔRA の低減が確認され、強磁性層中に挿入した非磁性体の分極と MR エンハンスメントには線形の相関が認められなかった。この結果から、分極率を高めれば MR 比を大きくできるわけではなく、バンド構造も考慮した材料選択が不可欠である事が明らかとなった。

CPP-GMRヘッドはTMRヘッドに比べてMR比が低いという課題がある。そこで、この課題をブレイクスルーするために、CPP-GMR膜中に極薄酸化物層 (NOL: Nano-Oxide-Layer) を挿入したタイプの研究が行われ、スピンバルブ膜中にAlCuのNOLを挿入し、電流狭窄効果を用いたCPP-GMR膜でMR比 = 8.2%、RA = 0.57 $\Omega \mu m^2$ が⁸⁾、またCoFeの極薄酸化物層をスペーサー層に形成することでMR比 = 17%、RA=0.2 $\Omega \mu m^2$ が得られており⁹⁾、この構造が高いポテンシャルを有することが示されている。また、オールメタルタイプについて磁性層に比抵抗の大きな材料を用いる手法とスピン分極率の大きいホイスラー合金を用いる研究がなされており、スピン分極率が1のフルホイスラー金属を自由層および固定層に用いたデュアル構造でMR比 = 11.5%、RA=0.08 μm^2 の膜特性が得られている¹⁰⁾。ホイスラー合金をヘッドに実用化するためには更なる低磁歪化ならびに結晶化温度の低温化を図っていくことが必要である。

3 記録素子

面内磁気記録から垂直磁気記録方式へ

垂直磁気記録方式は1977年に岩崎等により提案され¹¹⁾、2005年に世界で初めて、当時世界最高の面記録密度133Gb/in²の垂直磁気記録方式を採用したHDDが製品化された。以後、150Gb/in²を超えるHDDには全て垂直磁気記録方式が採用されている。

図5は、垂直磁気記録の動作原理を従来の面内磁気記録と比較して示したものである。垂直磁気記録では単磁極と媒体SUL (Soft Under Layer) との相互作用により、強くて急峻な垂直磁界を発生させ、媒体記録層を垂直方向に磁化する。そのため、面内磁気記録にくらべ、より強力な磁界で記録できる。

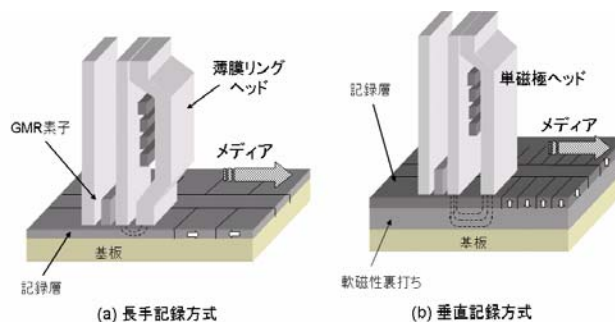


図5. 面内記録方式と垂直記録方式の比較

垂直磁気記録の実用化に当たっては様々な垂直磁気記録特有の課題を解決する必要がある。その一つがポールレイジャーである。ポールレイジャーとは、記録動作後の主磁極先端の残留磁化と媒体裏打ち層との相互作用により、記録データを消去してしまう現象であり、HDDとして致命的な問題である。

垂直記録ヘッドの磁極材料には2T以上のFeNi系、CoFe系合金が使われているが、主磁極膜の内部応力や異方性磁界を制御し、主磁極先端の実効的保磁力を小さくすることでポールレイジャーを抑制できる¹²⁾。また、RKKYの交換相互作用を利用し、FeCo層とRuやCrなどの薄い非磁性層を積層して反強磁性的に結合させる、あるいはFeCo層とアルミニウム酸化物層を積層させて保磁力を低減させることで、残留磁化をほぼ零にする手法等が検討されている^{13,14)}。

記録磁極材料の飽和磁束密度は、ほぼ理論限界に達していることから、垂直磁気記録と言えども、いかに書き込み能力確保するかは大きな課題である。そこで、熱やマイクロ波などを瞬間的に照射するエネルギーアシスト技術が新たに検討されている^{15,16)}。

4 まとめ

HDDのアプリケーションは堅調なPC向けに加えてコンシューマー・エレクトロニクス分野にも拡大しており、今後も高密度化が求められていくものと考えられる。それに応えるべく、垂直磁気記録方式の導入により、HDDは再び新たな飛躍へ向けての第一歩を踏み出し始めた。また、HDDの驚異的な面記録密度の向上に貢献したスピンバルブGMRヘッドにかわって、高感度再生素子としてのTMRヘッドの実用化が始まっており、さらには将来に備えてCPP-GMRヘッドの開発も進められている。特に、今後の高密度化に向けた再生素子開発においては、MR膜の高スピン分極率材料開発と多層膜界

面制御手法が鍵になると考えられる。サイエンスとエンジニアリングの叡智を結集し、活発な研究開発の進展に期待したい。

References

- 1) M. Baibich *et al.*, : *Phys. Rev. Lett.*, **61**, 2472 (1988).
- 2) B. Dieny *et al.*, : *J. Appl. Phys.*, **69**, 4774 (1991).
- 3) M. Takahashi *et al.*, : *IEEE Trans. Magn.*, **34**, 1522 (1998).
- 4) M. Tsunoda *et al.*, : *J. Magn. Magn. Mater.*, **304**, 55, (2006).
- 5) T. Kuwashima *et al.*, : *IEEE Trans. Magn.*, **40**, 176 (2004).
- 6) H Yuasa *et al.*, : *J. Magn. Magn. Mat.*, 286, (2005).
- 7) S. Isogami *et al.*, : *Phys. Stat. Sol. (a)* 204, 4033 (2007).
- 8) H. Iwasaki *et al.*, : *Digest of INTERMAG 2005*, No.GQ-01 (2005).
- 9) H. Katada *et al.*, : *J. Magn. Magn. Mat.*, 2975, (2008).
- 10) M. Saito *et al.*, : *Digest of INTERMAG 2005*, No.FB-02 (2005).
- 11) S. Iwasaki *et al.*, : *IEEE Trans. Magn.*, **13**, 1272 (1977).
- 12) K. Hirata *et al.*, : *J. Magn. Magn. Mat.*, **287**, 352 (2005).
- 13) K. Nakamoto *et al.*, : *J. Magn. Soc. Jpn.*, **27**, 124 (2003).
- 14) M. T. Kief *et al.*, : *IEEE Trans. Magn.*, **44**, 113 (2008).
- 15) M. A. Seigler *et al.*, : *IEEE Trans. Magn.*, **44**, 119 (2008).
- 16) J. Zhu *et al.*, : *IEEE Trans. Magn.*, **44**, 125 (2008).