

電流狭窄型ナノオキシドレイヤーを用いた CPP スピンバルブ膜

CPP Spin-Valve Films with Current-Confined-Path Nano-oxide Layer

福澤 英明 湯浅 裕美 岩崎 仁志
 ■ FUKUZAWA Hideaki ■ YUASA Hiromi ■ IWASAKI Hitoshi

高密度磁気記録のハードディスク装置 (HDD) を実現するために、感度の高い磁気再生ヘッドが求められている。このような磁気再生ヘッドは従来技術の単純な延長では実現不可能であり、新機能を加えた、高感度なスピバルブ膜が必要である。

東芝は、特殊なナノ微細構造を持つスピバルブ膜の作成に成功した。スピバルブ膜の一部に極薄酸化物絶縁層からなるナノオキシドレイヤー (NOL : Nano-Oxide-Layer) を挿入し、NOL を貫通する電流を通電するためのナノサイズの金属電流パスを形成して、大幅に感度向上が可能な膜を開発した。

Demand has recently arisen for new reader heads with high sensitivity for use in hard disk drives (HDDs), in order to realize high-area-density recording. Since such high-density recording cannot be achieved by improvement of the conventional technology, spin-valve films with high sensitivity and new functionality are required.

Toshiba has successfully developed new spin-valve films having a special nanostructure. A significant increase in sensitivity has been achieved by inserting a nano-oxide layer (NOL) in the spin-valve film, with the NOL being mainly composed of an insulator material having nano-size current-confined paths that punch through the insulator layer.

1 まえがき

小型で大容量のハードディスク装置 (HDD) のニーズ増大に伴い、高密度記録状態での微小なビットからの微弱な磁界も検知できる、高感度な磁気再生ヘッドが必要とされている。

磁気再生ヘッドの高感度化を実現する心臓部分が、スピバルブ膜と呼ばれる極薄金属積層膜である。

高密度記録のためには、従来技術の単純な延長では実現困難であり、新たな機能を付加したブレイクスルー技術が必要である。

そこで東芝は、新たな機能として、複雑なナノ微細構造を持つスピバルブ膜を形成することに成功したので次に述べる。

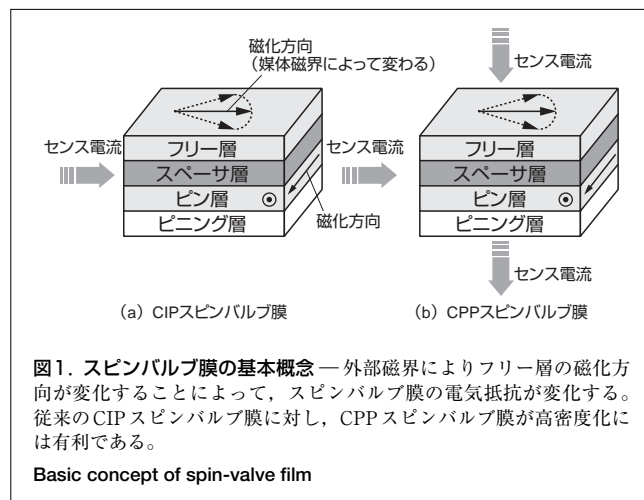


図1. スピバルブ膜の基本概念 — 外部磁界によりフリー層の磁化方向が変化することによって、スピバルブ膜の電気抵抗が変化する。従来のCIPスピバルブ膜に対し、CPPスピバルブ膜が高密度化には有利である。

Basic concept of spin-valve film

2 電流狭窄型 NOL を持つ CPP スピバルブ膜

2.1 電流狭窄型 NOL の基本概念

再生ヘッドの基本構成となるスピバルブ膜の基本概念を図1に示す。スピバルブ膜の基本構成は、媒体磁界によって磁化方向が変化する磁性材料からなるフリー層、非磁性材料のスペーサ層、磁化方向が固着された磁性材料からなるピン層、ピン層を磁化固着するためのピニング層の、少なくとも4層以上の積層膜からなり、1層当たり数nmの膜厚である。媒体磁界によってフリー層の磁化方向が変化し、それに伴ってスピバルブ膜の抵抗が変化することで、媒体情報の“0”と“1”を識別する。

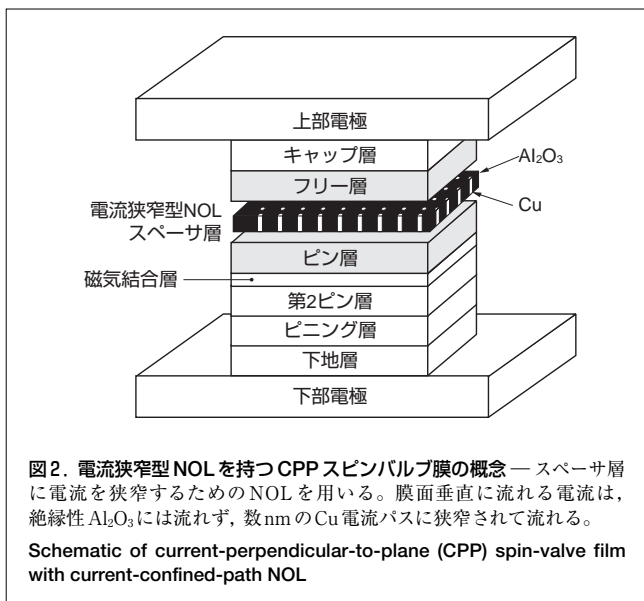
現在のスピバルブ膜は、図1(a)に示したような膜面内にセンス電流を通電するCIP (Current-In-Plane) スピバルブ膜である。記録密度が高くなると媒体磁界が弱くなるので、CIPスピバルブ膜では抵抗変化量が小さくなりヘッド出力が不足してしまう。それに対し、膜面垂直にセンス電流を通電するCPP (Current-Perpendicular-to-Plane) スピバルブ膜が高密度化に有利といわれている⁽¹⁾ (図1(b))。スペーサ層として、金属の銅 (Cu) 層を用いた場合が通常のCPPスピバルブ膜であり、酸化アルミニウム (Al₂O₃)、酸化マグネシウム (MgO) などの絶縁材料を用いた場合がTMR (Tunneling MagnetoResistance) スピバルブ膜である。CPPスピ

バルブ膜では低抵抗が実現できるため、高密度化に伴う高速応答性が優れており、高密度対応スピバルブ膜のもう一方の候補であるTMRスピバルブ膜よりも有利である。

しかし、肝心の高感度化という点においては、CPPスピバルブ膜の抵抗変化量は著しく低い材料しか存在せず、再生ヘッドとしての応用を議論できるようなレベルになかった。そこで感度を上げるための手段として、CPPスピバルブ膜中に極薄酸化層(NOL: Nano-Oxide-Layer)を挿入した、CPPスピバルブ膜が検討されている。その構造の概念を図2に示す。図2では、特殊な構造を持つNOLをスペーサ層として用いている。NOL材料の主成分としては Al_2O_3 などの絶縁材料を用い、その層を上下に貫通するCuなどの金属電流パスを複数形成する。このとき金属パスCu部分に電流が狭窄(きょうさく)されて通電され、 Al_2O_3 は絶縁バリア層として機能する。このようなNOLを、電流を狭窄するためのNOLということで、電流狭窄型(CCP: Current-Confined-Path)NOLと呼ぶ。電流狭窄型NOLを持つCPPスピバルブ膜では、従来のスピバルブ膜で問題であった、高密度化に伴う以下の二つの課題が同時に克服可能となる。

- (1) 高速応答性
- (2) 高感度化

一つ目の高速応答性は、スピバルブ膜の抵抗が低いことに起因する。電流狭窄型NOLを持つCPPスピバルブ膜においては、電子伝導パスはすべて金属で形成されるため、面積抵抗 RA の低い値が実現され、高速応答性に有利な再生ヘッドが実現可能となる。二つ目の高感度化は、電流狭窄型NOLによって抵抗変化量を増大させることで可能となる。その理由は、スペーサ層近傍は媒体磁界によって抵抗変化を生じさせる重要な機能部であるが、電流狭窄されて抵抗

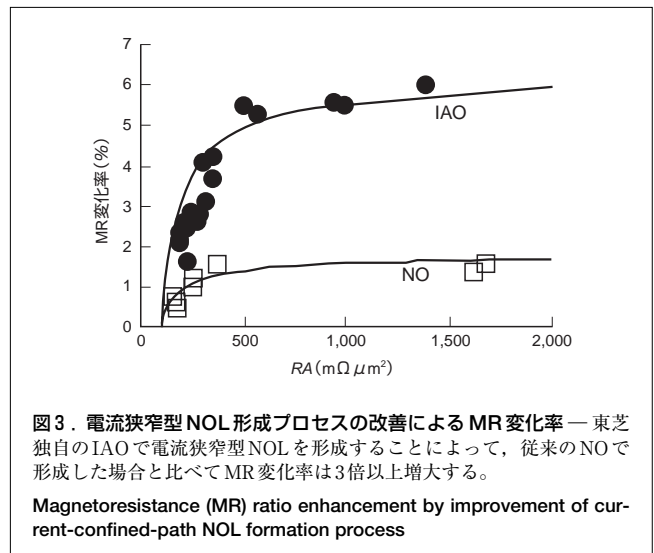


が増大するのはスペーサ層近傍のため、抵抗変化量の増大に大きく寄与するからである。

2.2 東芝独自のNOL形成プロセスによる感度向上

電流狭窄型NOLを持つCPPスピバルブ膜には2.1節で述べたようなメリットはあるが、図2のような複雑なナノ微細構造を積層膜の一部にだけ形成するのは至難の技である。そこで、電流狭窄型NOLを実現するためにNOL形成プロセスの工夫を行った。従来の形成方法は、 Al_2O_3 とCuの母材となる金属層を成膜したのち、自然酸化処理(NO: Natural Oxidation)を行う手法であった。それに対し、当社では独自技術のIAO (Ion-Assisted Oxidation)⁽²⁾を電流狭窄型NOL形成に適用した。IAOとは、酸化処理時にアルゴン(Ar)イオンビームを照射し、そのエネルギーアシスト効果によって Al_2O_3 とCuの相分離を促進させることを目的としたものである。

両者の形成プロセスの比較を行った結果を図3に示す。



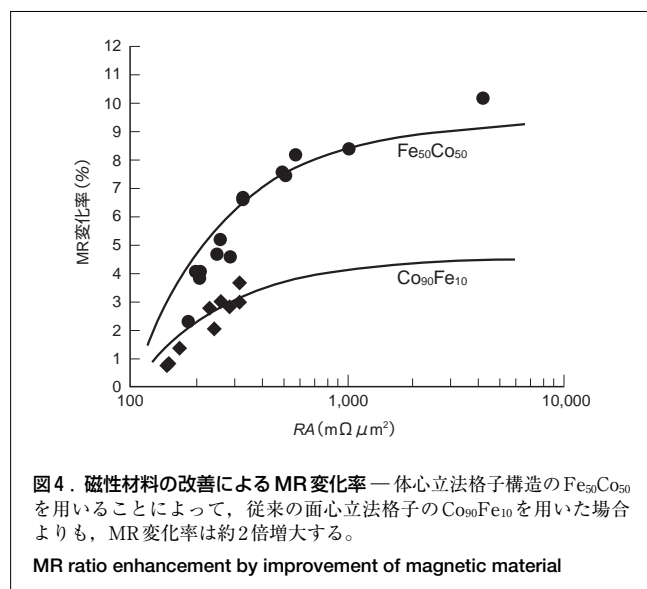
ここで、縦軸のMR (Magnetoresistance) 変化率は $\Delta R/R$ であり、磁界が印加されたときのスピバルブ膜抵抗変化量 ΔR と、スピバルブ膜抵抗 R の比である。MR変化率が大きいほど磁界感度が良好であることを意味する。また、横軸は面積抵抗 RA であり、単位面積当たりのスピバルブ膜の抵抗である。面積抵抗 RA が $500 m\Omega \mu m^2$ と低抵抗領域においても、IAOを適用することでMR変化率を従来のNOで形成した場合の3倍以上も増大させることに成功した。面積抵抗 RA が $1,000 m\Omega \mu m^2$ 以下の値は、TMRスピバルブ膜では実現することが非常に困難であり、このような低抵抗は高速応答性の観点で大きな利点である。

このように、当社独自のNOL形成技術によって電流狭窄NOL構造を実現し、良好な磁界感度を得ることに成功した。MR変化率が向上した理由は、IAOを用いることで Al_2O_3 と

Cuの分離が狙いどおりに促進し、電流狭窄金属パスのCuの純度が向上したためである⁽³⁾。絶縁膜層中の金属電流パスなので酸化の影響を受けやすく、金属純度を向上させることが難しいことは容易に想像できるが、IAOによって絶縁部分と導電部分の差をきれいに分離できたことがキーである。

2.3 磁性材料の工夫による感度向上

NOL形成プロセスに加えて、磁性層を工夫することでMR変化率は更に向上する。CPPスピントラップ膜においては、体心立方格子を持つ鉄コバルト($\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$)合金を用いた場合に、スペーサCu層界面での抵抗変化量が大きくなることを見いだしている⁽⁴⁾。そこで電流狭窄型NOLを持つ場合においても、磁性材料として従来の面心立方格子構造のコバルト鉄($\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$)の代わりに、体心立方格子を持つ $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$ を用いた。その結果を図4に示す⁽⁵⁾。電流狭窄型NOLを持つCPPスピントラップ膜では、スペーサ層近傍で電流が狭窄されるため、体心立方格子を持つ $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$ を用いる効果が特に大きくなる。MR変化率は従来材料と比べて約2倍、IAOを用いない従来プロセスのときと比較すると、約6倍ものMR変化率の増大を実現できた。これによってRAが $570\text{ m}\Omega\mu\text{m}^2$ という低い抵抗において、8.2%のMR変化率、面積抵抗変化量 ΔRA で $46.7\text{ m}\Omega\mu\text{m}^2$ と、大きな抵抗変化量を確認することができ、高速応答性に有利な低抵抗と高感度化の両立を実現することができた。



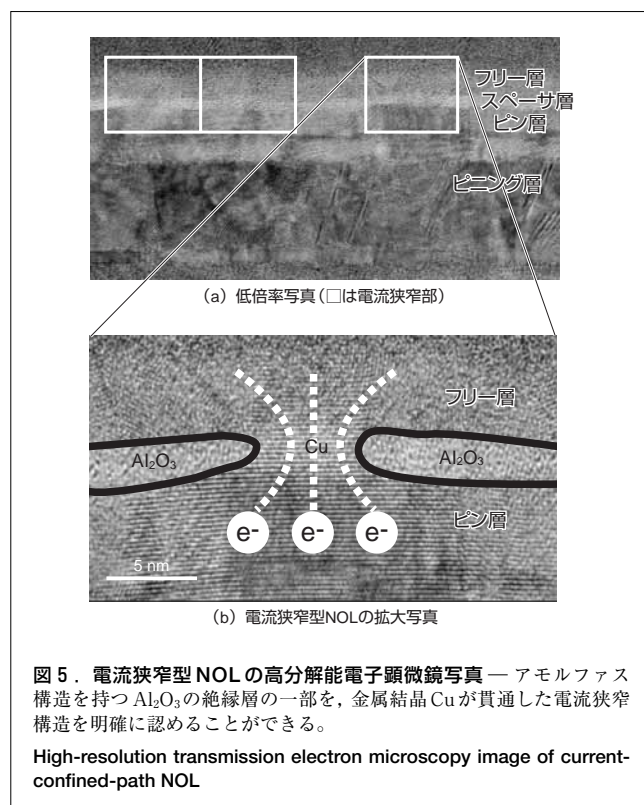
3 電流狭窄型NOLのナノ微細構造

3.1 高分解能電子顕微鏡による電流狭窄型NOL観察

前章で示したように、磁界に対する感度の高い膜パフォーマンスは実現されたが、図2のような構造が実際に形成されているかどうかの確認が必要である。分析の制約上、図2

のような複雑な構造を分析することは非常に難しいが、直接観察することに成功した⁽⁶⁾。

高いMR変化率が確認された膜について、高分解能電子顕微鏡観察を行った結果を図5に示す。図5に示すように、スピントラップ膜のスペーサ層部分に酸化物で形成されたNOLを確認することができる。図5(a)において、□枠で囲んだ部分の拡大写真の一例を、図5(b)に示した。アモルファス酸化層の一部を、上下に貫通する金属結晶格子が存在することがわかる。金属結晶格子部分の直径は約5 nmであり、この部分が垂直通電時の電流狭窄部分として機能する金属電流パスと考えられる。ナノEDS (Energy Dispersive X-ray Spectrum) 分析の結果、アモルファス構造部分は Al_2O_3 であり、結晶構造部分はCuであることがわかった。このように、図2のコンセプトで示したような電流狭窄構造が、実際に実現されていることが確認できた。

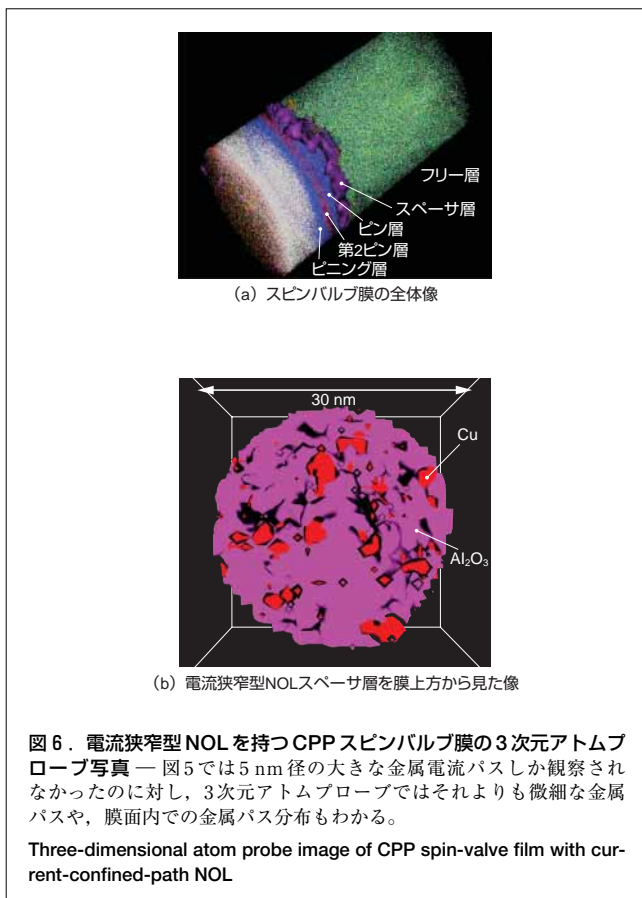


3.2 3次元アトムプローブによる電流狭窄型NOL観察

高分解能電子顕微鏡によって、電流狭窄構造の存在を確認することはできた。しかし、金属電流パスの膜面内における分布状態や、金属電流パスCuのメタル純度などを分析することは、測定サンプルを透かして観察している従来の電子顕微鏡では、どうしても分析することはできない。このような特殊なナノ微細構造を観察するには、3次元アトムプローブが適している。3次元アトムプローブとは、測定サンプルを直径約100 nm程度のニードル状に加工し、その先端に電圧

を印加することによって先端部分を電界蒸発させて、位置敏感な検出器で各元素の質量電荷比と(x, y)の2次元座標を得る分析手法である。電界蒸発は1原子ごとに生じるので、時間軸の分析がz方向の情報を得ることになり、高分解能な3次元像を得ることができる。バルクサンプルにおいては3次元アトムプローブの歴史は長く、実績もあるが、薄膜サンプルでの分析成功例は極めて少なく、分析自体が研究対象となっているような分野である。

今回、当社は、Imago Scientific Instruments社のLocal Electrode Atom Probeを用いて、電流狭窄型NOLのナノ微細構造観察を試みた⁽⁷⁾。その結果を図6に示す。図6(a)からわかるように、スピバルブ膜構造全体が明りょうに分析できていることがわかる。NOL部分を膜平面で切り出し、膜面上側から見たものを図6(b)に示す。Al₂O₃からなる絶縁層の一部に、数nmの径からなる金属電流パスCuが上下に貫通した構造を確認することができる。金属電流パスは最大径のもので約5 nmであり、図5の高分解能電子顕微鏡で確認された金属電流パス径とおおむね一致している。更に、図5では確認することができなかった5 nmよりも小さな金属電流パスについても、3次元アトムプローブ像では確認できており、それによって金属電流パス分布状態も確認することができた。



4 あとがき

当社独自のNOL形成技術を用いることで、低抵抗と高い抵抗変化量を両立した、電流狭窄型CPPスピバルブ膜を実現した。また、電流狭窄型NOLのナノ微細構造を直接観察することに成功した。

このような複雑なナノ微細構造を極薄積層膜中に持つ膜材料開発においては、ナノ構造観察・分析自体が非常に困難となる。今後は、ますます最先端の分析技術まで踏み込んだ膜材料開発を行う必要性がでてくる。

謝 辞

高分解能電子顕微鏡観察を行っていただいた物質・材料研究機構の宝野和博氏、高橋有紀子氏、及び3次元アトムプローブ顕微鏡観察を行っていただいたImago Scientific Instruments社のR. M. Ulfing氏、D. J. Larson氏に深く感謝いたします。

文 献

- (1) M. Takagishi, et al. "The applicability of CPP-GMR heads for magnetic recording". IEEE Trans Magn. 38, 2002, p.2277 - 2282.
- (2) H. Fukuzawa, et al. "Specular spin-valves with FeCo alloy by ion-assisted oxidation". J. Appl. Phys. 91, 2002, p.6684 - 6690.
- (3) H. Fukuzawa, et al. "MR ratio enhancement by NOL current-confined-path structures in CPP spin valves". IEEE Trans Magn. 40, 2004, p.2236 - 2238.
- (4) H. Yuasa, et al. "Output enhancement of spin-valve giant magnetoresistance in current-perpendicular-to-plane geometry". J. Appl. Phys. 92, 2002, p.2646 - 2650.
- (5) H. Fukuzawa, et al. "Large magnetoresistance ratio of 10% by Fe₃₀Co₅₀ layers for current-confined-path current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance spin-valve films". Appl. Phys. Lett. 87, 2005, p.082507-1 - 082507-3.
- (6) H. Fukuzawa, et al. "Nanoconstricted structure for current-confined-path in current-perpendicular-to-plane spin valves with high magnetoresistance". J. Appl. Phys. 97, 2005, p.10C509-1 - 10C509-3.
- (7) 福澤英明, ほか. "CCP-NOLを用いたCPP-GMRスピバルブ膜". 日本応用磁気学会誌. 29, 2005, p.869 - 877.



福澤 英明 FUKUZAWA Hideaki, D. Eng.

研究開発センター 記憶材料デバイスラボラトリー研究主務、工博。磁性薄膜材料、磁気ヘッドの研究・開発に従事。日本応用磁気学会、日本金属学会会員。Storage Materials and Devices Lab.



湯浅 裕美 YUASA Hiromi

研究開発センター 記憶材料デバイスラボラトリー研究主務。磁性薄膜材料、磁気ヘッドの研究・開発に従事。日本応用磁気学会、日本物理学会会員。Storage Materials and Devices Lab.



岩崎 仁志 IWASAKI Hitoshi

研究開発センター 記憶材料デバイスラボラトリー研究主幹。磁気ヘッドの研究・開発に従事。日本応用磁気学会会員。Storage Materials and Devices Lab.