Cusp-Field Single-Pole Head Fabricated with Electrodeposited Films

K. Taguchi, T. Yokoshima*, **, M. Uchida, S. Takahashi, K. Yamakawa, K. Ouchi, and T. Osaka**

AIT (Akita Research Institute of Advanced Technology, Akita Prefectural R&D Center), 4-21 Sanuki, Araya, Akita 010-1623, Japan

*AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology), AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568, Japan

**School of Science and Engineering, Waseda Univ., 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan

To enhance the write performance of a CF-SPT head, a smaller main pole of Co-Ni-Fe and a finer coil were fabricated by using the electrodeposition method. Fine coils with 2.5 μm pitch were obtained by the damascene process. The magnetic domain structure of the 15- μm -high and 20- μm -wide main poles could be controlled by changing their taper angles. A head with a favorable domain except at its tip exhibited stable write performance and no pole erasure. Thus, it was concluded that a control of the magnetic domain was necessary for write heads.

Key words: perpendicular magnetic recording, single-pole head, cusp-field coil, electrodeposited film, magnetic domain structure, pole erasure

めっき法により作製したカスプコイル励磁型単磁極ヘッド

田口 香・横島 時彦*・**・内田 勝・高橋 慎吾・山川 清志・大内 一弘・逢坂 哲彌**

秋田県産業技術総合研究センター 高度技術研究所, 秋田市新屋町字砂奴寄4-21 (〒010-1623)

*独立行政法人産業技術総合研究所, 茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第2(〒305-8568)

**早稲田大学理工学部, 東京都新宿区大久保3-4-1 (〒169-8555)

1. はじめに

垂直磁気記録用ヘッドとして、高い記録性能を有するカスプコイル励磁型単磁極ヘッド¹⁾が提案されている。このヘッドは、主磁極を挟む2つの補助磁極がシールドとしても機能するので高い外部磁場耐性を有する上、主磁極・補助磁極・コイルが単純な積層構造になっているので量産性にも優れている。また、主磁極先端部の両側に配置されたコイルが、ヘッドの高い電流・磁束効率を生み出している。したがって、コイルの小型・高密度化により、このヘッドをさらに高性能化することができる。また、主磁極を小型化することで漏れ磁束の低減による磁束効率の向上も期待できる。今回、めっき法を用いて小型化したカスプコイル励磁型ヘッドを作製する際の主磁極形状と記録特性の関係について実験的検討を行ったので報告する。

2. ヘッド作製プロセス

カスプコイル励磁型単磁極ヘッドの構造をFig. 1に示す。このヘッドは、下部補助磁極・下部コイル・主磁極・上部コイル・上部補助磁極の順に作製する。従来のカスプコイル励磁型単磁極ヘッドは6 μm ピッチのコイルと30 μm 高さおよび幅の主磁極により構成されていた。今回は、コイルピッチと主磁極を従来の約1/2に小型化したヘッドを、より微細な構造の形成に有利であると考えられるめっき法を用いて、以下の通り作製した。

2.1 コイル形成

コイルはダマシン法²⁾により形成した。初めに絶縁層である Al_2O_3 および SiO_2 をスパッタ法により成膜する。フォトレジストによりコイルパターンを形成し、反応性イオンエッチング

Fig. 1 Schematic view of the CF-SPT head¹⁾.

により SiO_2 にコイル溝を形成する。なお、このとき Al_2O_3 は SiO_2 エッチングのストッパーの役割をしている。反応性ガスとして CF_4 に H_2 を流量比で20%添加した混合ガスを用い、ガス圧力5 Paにてエッチングを行った。めっき用の下地膜としてCu(50 nm)/Ti(50 nm)をスパッタ法により形成した後、電気めっきによりCu導体部を形成した。Cu導体の形成はダマシン用硫酸銅めっき浴（添加剤：スルカップESA-21, 上村工業(株)製）にて行い、電流密度は20 mA/cm²とした。コイルピッチ2.5 μm 、深さ1 μm の溝に厚み2 μm のCu導体をめっき成膜した後の断面観察SEM(走査型電子顕微鏡)写真をFig.2に示す。試料鉛直方向から55°の角度より観察した。幅が約1 μm のコイル溝に対して欠陥のない埋め込みが行われていることが分かる。コイルパッドなど大面積の領域に対しても同程度の膜厚が形成されていることも確認している。また、抵抗率に関しても2 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ であり、膜密度としても十分な値が得られていると考える。

Fig. 2 Cross-sectional view of a coil.

2.2 Co-Ni-Fe軟磁性薄膜の形成

主磁極及び上部・下部補助磁極には $\text{Co}_{63}\text{Ni}_{13}\text{Fe}_{24}$ めっき薄膜³⁾を用いた。Table 1に浴組成および成膜条件を示す。成膜は、攪拌機能を備えたパドルめっき法³⁾により行った。また、誘導異方性を付与するため100 Oeの磁界を主磁極の幅方向に印加しながら成膜している。主磁極は反磁界抑制に有効と言われているフレームめっき法⁴⁾を用いて、以下の手順で形成した。下地膜としてCu(100 nm)/Ti(10 nm)膜をスパッタ法により成膜する。その上に、フォトリソグラフィにより幅1 μm、高さ0.4 μmのレジストフレームを形成する。酸による表面処理を行った後、200 nm厚のCo-Ni-Fe膜をめっきする。Fig.3にフレームパターンを有する200 nm厚のCo-Ni-Feめっき膜の磁化曲線を示す。飽和磁束密度 B_s が20 kG、異方性磁界 H_k が20 Oeであり、困難軸方向の抗磁力 H_c が2 Oe、角型比 S が0.2の一軸異方性が付与されていることが確認できた。下部および上部補助磁極の膜厚は1 μmとしたが、そのときの H_c と S はそれぞれ1 Oeと0.1以下であった。

今回、主磁極の高さを従来の半分の15 μmとし、磁路長を短くした。幅が高さと同じ場合には容易軸方向に平行な磁壁を持たない磁区構造が現れており、主磁極として不適当であることが分かった⁵⁾。そこで、形状異方性効果と逆磁歪効果による実効的な異方性を増加させて磁区構造を改善するため、幅は高さより大きい20 μmとした。さらに、主磁極の先端絞込み角度 θ を45 deg. および14 deg. の2種類のヘッ

Table 1 Bath composition and plating conditions for electrodeposited Co-Ni-Fe films.

Chemicals	Concentration (mol/dm ³)
H ₃ BO ₃	0.4
NH ₄ Cl	0.28
CoSO ₄ 7H ₂ O	0.064
NiSO ₄ 6H ₂ O	0.2
FeSO ₄ 7H ₂ O	0.011
SDS	10 ppm
pH	2.8
Current density	20 mA/cm ²
Agitation speed	144 cpm
Bath temperature	18 - 21 °C
Counter electrode	Co plate
Magnetic field	100 Oe
Underlayer / substrate	Cu/Ti/glass (1 inch square)

Fig. 3 M-H loop for 200-nm-thick Co-Ni-Fe electrodeposited film.

ドを検討した。

主磁極の先端絞込み角度 θ の異なる主磁極のMFM(磁気力顕微鏡)像をFig.4に示す。 θ が45 deg.の主磁極にはほとんどエッジに平行な磁区しか観察されず、主磁極絞込み部には、縦に走る磁壁が観察される。それに対して、 θ が14 deg.の主磁極絞込み部には、幅方向に平行な磁化ベクトルを有する大きな磁区が現れ、縦に走る磁壁は観察されない。主磁極の先端絞込み角度を小さくすることは、少なくとも主磁極の幅広部の磁区制御には有効な手段であることが確認された。主磁極先端部の磁区構造に関しては、今後、詳細な検討を要すると考えている。

2.3 めっき膜を適応したカスプコイル励磁型ヘッドの作製

以下にFig. 1の構造を有するカスプコイル励磁型単磁極ヘッドの作製手順について述べる。基板としてはヘッド磨耗が少ないと考えられる Al_2O_3 -TiC基板(1mm厚)を用いた。初めに100 μm角の下部補助磁極部分として前述のCo-Ni-Fe膜をフレームめっき法により厚み1 μm形成する。この場合のフレーム幅は3 μm、高さ約1.2 μmとした。フレームめっき後、レジストにより磁極部分を覆う。磁極周囲の余分な磁性膜をイオンミリング法により除去し、さらにレジストを

(a) $\theta=45$ deg.

(b) $\theta=14$ deg.

Fig. 4 MFM images of the main pole core with different taper angles. Schematic magnetic domains are shown on the right.

除去することで補助磁極形状が形成される．なお、この方式の場合、レジストフレーム直下のCu/Ti下地層が除去できないことになるが、非磁性材料であるため、ヘッドの記録性能には影響しないと考えられる．続いて、磁極周囲の絶縁層として Al_2O_3 を成膜し、平坦化研磨を行うことで磁極上の Al_2O_3 を除去する．続いて下部補助磁極と下部コイル間の絶縁層 Al_2O_3 を $0.5\text{ }\mu\text{m}$ およびコイル間の絶縁層 SiO_2 をスパッタ法により形成する．コイル形成については前述の通りダマシン法により形成する、即ち、導体Cu膜をめっき法により成膜した後、平坦化研磨により不要なCu膜の除去を行う．このとき、 SiO_2 とCu間の段差は 40 nm 以下であった．下部コイルと主磁極間の絶縁層 Al_2O_3 をスパッタ法により $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 成膜した後、前述のフレームめっき法により主磁極を形成する．補助磁極の形成と同様に主磁極部をレジストで保護し、ケミカルエッチングにより不要な磁性膜およびCu下地層を除去する．その後、レジストを除去し、イオンミリング法によりTi下地層の除去を行う．この際、主磁極膜も同時にエッチングを行うことになるが、あらかじめ膜減り分を考慮して主磁極を厚くしている．また、膜面の平坦性は記録磁化転移形状に直接影響を及ぼすが、今回の成膜条件によるフレームめっきでは膜表面形状のAFM(原子間力顕微鏡)観察においてトラック中央部分の盛り上がりなどの平坦性の劣化は見られていない．主磁極部を形成後の顕微鏡観察写真をFig.5に示す．最外周のコイル幅の半分程度まで摺動面の研磨を行うことで、先端励磁が可能な構造となっている．この後の工程は再び絶縁層 Al_2O_3 を介し、下部コイルと逆巻に上部コイルを形成する．そして、絶縁層を介して上部補助磁極を形成し、保護膜を形成して完成する．作製したヘッドの緒元をTable 2に示す．摺動面の機械加工を行い、コンタクト方式で記録するための3点パッドを摺動面に形成後、平行リンクサスペンションに取り付けた．

3. 主磁極形状と記録再生特性

2.2節で述べたように、磁区構造の観点からは主磁極の先端絞込み角度 θ が 14 deg. と小さい方がよりヘッド主磁極に適

Fig. 5 Structure of a CF-SPT head with electrodeposited films.

Table 2 Head specification.

Main pole material	Co-Ni-Fe
B_s	20 kG
Main pole thickness	$0.2\text{ }\mu\text{m}$
Track width	$1\text{ }\mu\text{m}$
Throat height	$1.5\text{ }\mu\text{m}$
Return path material	Co-Ni-Fe
Return path thickness	$1\text{ }\mu\text{m}$
Number of coils	4 turns

した構造であると考えられる．この磁区構造の違いが記録特性に与える影響について調べるため、 θ が 14 deg. と 45 deg. のヘッドについて入出力特性を測定した．その結果をFig.6に示す．再生には市販の浮上型GMRヘッド($T_{wr}=0.23\text{ }\mu\text{m}$, $G_S=0.075\text{ }\mu\text{m}$)を用い、記録と再生を分離して行った．ヘッドー媒体間相対速度は 10 m/s とした．媒体として 50 nm 厚の記録層を有するCo-Cr系二層膜垂直記録媒体($H_C=3.4\text{ kOe}$, $H_S=8\text{ kOe}$, $SQ=0.74$)を用いた．両者の記録感度にわずかな違いが見られるものの、いずれのヘッドにおいても、今回用いた媒体を十分に飽和記録できていることが分かる．また、記録密度特性についても、Fig.7に示すように、両ヘッドで大きな違いは見られず、今回の測定周波数範囲($f\sim 100$

Fig. 6 Saturation curves of the CF-SPT heads with different taper angles of the main pole.

Fig. 7 Roll-off curves of the CF-SPT heads with different taper angles of the main pole.

(a) $\theta = 45$ deg.

(b) $\theta = 14$ deg.

Fig. 8 Deviation of the reproduced output in every dc-erase/writeoperation.

MH) では、磁区構造の違いの記録特性への影響は認められなかった。

次に、記録特性の安定性を調べるため、 θ が異なる2種類のヘッドについて、記録ヘッドにより 50 mA で直流消去後、40 kFRPI, 20 mA_{0-p} の信号を記録し、再生出力を測定する一連の動作を 100 回繰り返して行った。その結果を、Fig.8 に示す。縦軸は平均値で規格化した出力、横軸は記録再生操作の回数である。いずれのヘッドにおいてもほぼ $\pm 10\%$ 以内の出力変動に収まっているものの、標準偏差 σ としては、45 deg. のヘッドでは 0.032 に対し、14 deg. のヘッドでは 0.027 と減少し、これは 15 % 程度出力変動が小さくなったことを意味している。このことから、主磁極絞込み部に現れていた縦方向に走る磁壁も出力変動の原因のひとつであると考えられる。

また、ヘッドの帯磁による影響を調べるため、ヘッド Load 状態における再生出力の減衰を測定した。記録ヘッドにより直流消去を行った後、40 kFRPI, 20 mA_{0-p} の信号を記録し、記録ヘッドを Load 状態での再生出力の時間変化を測定した。主磁極の先端絞込み角度 θ が異なる 2 種類のヘッドについて測定した結果を Fig.9 に示す。評価に用いた媒体は SQ が 1 以下であるため、縦軸の出力減衰を、Un-load 状態での再生出力で規格化することにより、媒体自身の熱減磁による減衰分を排除している。 θ が 45 deg. のヘッドにおいては約

Fig. 9 Degradation of the reproduced output by the head load state. Output signals were normalized by the output for the head un-load state at every measurement.

2.5%/decade の出力減衰が観測されたが、 θ が 14 deg. のヘッドにおいては、ヘッドに起因する再生信号の減衰はほとんど見られなかった。

以上の結果から、主磁極の先端絞込み角度を小さくすることで、記録特性の安定性や帯磁の問題を改善できることが分かった。これらは、主磁極絞込み部の磁区制御の効果であり、さらに、幅 1 μm ・ 高さ 1.5 μm の主磁極先端部の磁化ベクトルが主磁極絞込み部を反映してトラック幅方向を向いている可能性があることを推測させる結果と考えられる。この効果が、さらに小さな主磁極先端部でも適用できるかは、今後の検討を要する。

4. おわりに

カスプコイル励磁型単磁極ヘッドをさらに高性能化するため、めっき法を用いて主磁極及びコイルを小型化したヘッドを作製した。磁気ヘッドの記録特性は主磁極絞込み部の磁区構造の影響を受けることが分かった。したがって、記録ヘッドにおいては少なくとも主磁極幅広部の磁区制御が重要であると考えられる。また、この部分の磁区制御には主磁極の先端絞込み角度を小さくすることが有効であり、磁区構造に起因する問題を改善できる一手法であることが分かった。

謝辞 日頃、ご指導・ご鞭撻を賜ります AIT 名誉所長 岩崎俊一 東北工業大学学長に深謝致します。媒体を作製した AIT 有明順上席研究員に感謝する。本研究の一部は文部科学省科学技術振興調整費「ナノ界面制御による磁気記録材料の創製」の研究助成を受けて行われた。関係の方々に謝意を表す。

Reference

- 1) K. Ise, et al., *IEEE Trans. Magn.*, **36**, pp.2520-2523 (2000)
- 2) E. J. O'Sullivan, et al., *IBM J. Res. Dev.*, **42**, 607 (1998)
- 3) T. Osaka, et al., *Nature*, **392**, 796 (1998)
- 4) J. V. Powers, L. T. Romankiv, US. Patent, 3652442 (1972)
- 5) T. Yokoshima, et al., Proc. the 2005 IEICE general conf., C-7-1 (2005)

2005年10月19日受理, 2006年2月21日採録