

称号及び氏名	博士（工学）川野 浩 康
学位授与の日付	平成 17 年 3 月 31 日
論 文 名	「Doctoral Thesis at Osaka Prefecture University Double-Layered Perpendicular Media using Fe-C Based Soft Magnetic Underlayers and Amorphous Tb-Fe-Co Recording Layers (Fe-C 系軟磁性裏打ち層と非晶質 Tb-Fe-Co 磁気記録層を用いた 2 層膜垂直磁気記録媒体)」

論文要旨

大容量、低コスト、高速データ転送を兼ね備えた磁気記録装置（ハードディスク）は、ユビキタス情報化社会に溢れる膨大な量のデジタル情報を効率よく蓄積できる優れた情報ストレージ機器として広く知られている。磁気記録では、磁気ヘッドから生じる記録磁界を基板上に形成された磁気記録膜に印加し、磁気記録膜内の微小エリア（ビット）の磁化方向を決定することで情報の記録を行ない、巨大磁気抵抗（GMR）素子を用いてビットからの漏れ磁束を検出することにより情報の再生を行なう。

磁気記録では記録密度を増大するため、磁化反転単位に相当する磁性粒子の体積（ V_a ）を小さくすることによって記録分解能を向上しなければならない。しかし、磁性粒子の微細化は個々の磁性粒子がもつ磁気異方性エネルギー（ $K_u V_a$ ）を小さくすることになるため、周囲の熱エネルギー（ $k_B T$ ）によってビットの磁化方向が乱され易くなる。特に現行の磁気記録装置で用いられている面内磁気記録では、記録膜面に対して平行に形成された記録磁化の方向を長期間に渡って安定に保つことが難しくなる（熱揺らぎ問題）。磁性粒子の熱揺らぎ耐性を高めるため、磁気異方性エネルギー密度（ K_u ）が大きな材料を磁気記録膜として用いた場合には、磁気記録膜の保磁力が大きくなるので、磁気ヘッドから生じる記録磁界強度が相対的に不足し、磁気記録が不可能になる。これに対して、

記録膜面に対して垂直方向に記録磁化を形成する垂直磁気記録では、原理的に隣接するビット間で閉磁回路を形成して記録磁化を強め合うため、ビットを小さくして高密度化するほど記録磁化の熱揺らぎ耐性が向上することになる。また、垂直磁気記録では、磁気記録膜を挟んで磁気ヘッドと対向する位置に大きな飽和磁束密度をもつ軟磁性（裏打ち）層を設けること（2層膜垂直磁気記録媒体）で、磁気ヘッドから生じる記録磁界強度を実効的に増加させることが可能となり、大きな保磁力をもつ磁気記録膜にも磁気記録が可能となる。その結果、磁気異方性エネルギー密度（ K_u ）が大きな材料を磁気記録膜に適用でき、記録磁化の熱揺らぎ耐性をさらに向上させることができる。

本研究は、以上のような背景のもとで、大きな飽和磁束密度と小さな磁気ノイズを兼ね備えた軟磁性裏打ち膜、および大きな磁気異方性エネルギー密度をもつ非晶質 Tb - Fe - Co 三元合金磁気記録膜を用いることにより、熱揺らぎ耐性に優れ、高い記録分解能をもつ2層膜垂直磁気記録媒体の開発を行なった。一般に、大きな飽和磁束密度をもつ裏打ち膜を得るためには Fe または Co を主成分とした軟磁性膜を形成することが不可欠である。また、軟磁性膜には、不均一で粗大な磁区を反映した媒体ノイズおよびブロッホ磁壁から発生するスパイクノイズが生じることが知られており、軟磁性膜を裏打ち膜として使用するためには、これら磁気ノイズを小さくしなければならない。本研究では、無電解めっき法による Co - Fe - Ni 三元合金膜、および共スパッタ法による Fe - C 二元合金膜、Fe - C - Si 三元合金膜を形成し、16 kGauss 以上の大きな飽和磁束密度をもつ軟磁性膜を形成した。また、スパッタ軟磁性膜に関し、膜構造、磁気特性およびノイズ特性の関係について詳細な研究を行ない、大きな飽和磁束密度を維持したまま磁気ノイズを小さくする方法を見出し、2層膜垂直磁気記録媒体に適用可能な軟磁性裏打ち膜を開発した。一方、磁氣的に連続な磁気記録膜の記録分解能を改善するためには、微細で均一な磁壁ピンニングサイトを磁気記録膜中に形成することが必要である。本研究では、非晶質 Tb - Fe - Co 三元合金磁気記録層と軟磁性裏打ち層の間に設けられる非磁性な極薄中間層を磁壁ピン

ニングサイトの形成に対するシード層と位置づけた。濡れ性や表面拡散、凝集に代表される膜成長メカニズムを積極的に利用することにより、軟磁性裏打ち層上に微細で均一な凹凸形状をもった島状構造から成る極薄多層中間層を形成し、磁気記録層の記録分解能を改善した。

本論文は、これらの内容をまとめたもので、以下に述べる 7 章から構成されている。

第 1 章においては、磁気記録媒体の概要を述べた後、本研究の技術的背景として、記録密度の向上と記録磁化の熱安定性および垂直磁気記録媒体の関係について論じた。また、軟磁性裏打ち膜を用いた 2 層膜垂直磁気記録媒体および磁気記録膜として用いる非晶質 Tb - Fe - Co 三元合金磁性膜の特徴についても論じた。以上の背景を踏まえて、本研究で取り上げた高密度記録可能な 2 層膜垂直磁気記録媒体の開発の目的を述べた。

第 2 章においては、量産化に適した無電解めっき法による Co - Fe - Ni 三元合金膜から成る軟磁性膜の磁気特性の下地依存性について調べた。Ni - Fe 下地層上に形成された軟磁性膜の飽和磁束密度は膜厚に依らず 17 kGauss と大きい。しかし、Ni - P 下地層上に形成された軟磁性膜の飽和磁束密度は膜厚が 300nm 程度までの薄い場合には小さな値を示した。これは、Ni - P 下地層近傍のめっき膜が Ni - Fe 下地層近傍のめっき膜よりも疎な膜組織をもつため、測定磁化に影響する実効体積と測定磁化の規格化（すなわち、飽和磁束密度の算出）に用いた見掛け体積が異なることに因ることを明らかにした。

第 3 章においては、共スパッタ法による Fe - C 二元合金膜から成る軟磁性膜の膜構造、磁気特性およびノイズ特性について調べた。C 含有量の増大にともなって大きな飽和磁束密度（19 kGauss）を維持したまま、膜構造は微細化した。また、磁気ドメインも微細化し、媒体ノイズが低減した。さらに、スパイクノイズの抑制に有効な半径磁気異方性が自発的に形成された。一方、媒体ノイズは保磁力に強く依存し、媒体ノイズを抑制するためには数 Oe 以下の保磁力を有する物質を用いることが好ましいことを明らかにした。また、スパイクノイズ

は異方性磁界に強く依存し、スパイクノイズ振幅を抑制するためには 20 Oe 以上の異方性磁界を有する物質を用いることが好ましいことを明らかにした。

第 4 章においては、共スパッタ法による Fe - C - Si 三元合金膜から成る軟磁性膜の膜構造、磁気特性およびノイズ特性について調べた。磁極が膜表面に現われ難いためスパイクノイズを抑制できるネール磁壁構造を有する軟磁性薄層と薄い非磁性中間層 (C 層) をラミネートする (交互に積層する) ことにより、大きな飽和磁束密度 (16 kGauss) と小さな媒体ノイズを維持したまま、スパイクノイズ振幅を抑制することができることを明らかにした。

次に、薄い非磁性中間層に用いる材料に着目し、ラミネート構造の最適化を試みた。C や Ta のような Fe - C - Si 三元合金軟磁性膜と結晶学的なミスマッチが大きい中間層を用いた場合、軟磁性膜の微結晶構造が維持されることを明らかにした。一方、Cr や Ti のような結晶学的なミスマッチが小さい中間層を用いた場合、軟磁性膜の微結晶構造は結晶化することを明らかにした。

さらに、単層膜のスパイクノイズ抑制に有効な半径磁気異方性が自発的に生じる原因を調べた。基板中心からの距離と磁気異方性が良い相関をもつことから、スパッタ粒子の nm オーダでの指向性堆積、つまり一種の形状磁気異方性が半径磁気異方性の自発的発現の一因であることを示した。

第 5 章においては、回折限界を越える Solid Immersion Lens (SIL) 光学系を用いて、非晶質 Tb - Fe - Co 三元合金磁性膜に熱磁気記録を行ない、微小マークの形成を試みた。開口数 (NA) が 0.45 の場合には最短マーク長は 0.4 μm であったが、開口数 (NA) が 1.46 の SIL 光学系を用いることにより 0.2 μm の短マーク形成が可能であることを明らかにした。

第 6 章においては、軟磁性裏打ち層と磁気記録層の間に極薄多層中間層を設けることにより磁気記録層である非晶質 Tb - Fe - Co 三元合金磁性膜の記録分解能の向上を目指した。Fe - C 二元合金膜から成る軟磁性膜上に SiN 層、Cr 層、Ag 合金層、C 層を順次積層することにより、粒径 13 nm の微細で均一な凹凸形状をもつ島状構造を極薄多層中間層として軟磁性裏打ち層上に形成した。この微細

構造は非晶質Tb - Fe - Co三元合金磁性膜の磁壁ピンニングサイトの形成に寄与すると考えられる。また、従来の極薄単層中間層（粒径 35 nm）を用いた場合に比べて 100 kFCIも記録分解能指数（ D_{50} ）を改善した。

第7章においては、本研究で得られた成果を総括した。

本論文の基礎となる発表論文

No.	論文題目	著者名	発表誌名	本論文との対応
1	Effect of Underlayer on Soft Magnetic Properties of Electroless Plated CoFeNi Films	H. Kawano T. Umada M. Moribe K. Shono	Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 43, pp. L1514-L1516 (2004)	第2章
2	Magnetic properties and Noise Characteristics of FeC Film for Backlayer of Double-Layered Perpendicular Magnetic Recording Medium	H. Kawano T. Morikawa K. Matsumoto K. Shono	Trans. Magn. Soc. Japan, Vol. 2, pp. 23-27 (2002)	第3章
3	Suppression of Spike Noise from FeCSi Film for Backlayer of Double-Layered Perpendicular Magnetic Recording Medium	H. Kawano T. Morikawa K. Matsumoto K. Shono	Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 42, pp. 4307-4312 (2003)	第4章
4	Effect of Non-Magnetic Intermediate Layer on Film Structure, Magnetic Properties, and Noise Characteristics of FeCSi Soft Magnetic Multilayers	H. Kawano T. Morikawa K. Matsumoto K. Shono	J. Magn. & Magn. Mater., Vol. 271, pp. 165-171 (2004)	第4章
5	Magnetic Anisotropy in FeSiC Soft Magnetic Thin Film	H. Kawano T. Morikawa K. Matsumoto K. Shono	Trans. Magn. Soc. Japan, Vol. 4, pp. 117-120 (2004)	第4章
6	Air Gap Dependence of Write and Read Characteristics in Magneto-Optical Recording with Solid Immersion Lens	H. Kawano A. Chekanov K. Matsumoto K. Ozaki R. Sbiaa T. Suzuki	IEEE Trans. Magn., Vol. 37, pp. 1409-1411 (2001)	第5章
7	Improvement of Recording Density of Amorphous TbFeCo Magnetic Recording Layer on FeC Soft Magnetic Back Layer	K. Matsumoto H. Kawano T. Morikawa K. Shono	Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 41, pp. L691-L693 (2002)	第6章
8	Improved Recording Resolution of Amorphous RE-TM Alloy Perpendicular Magnetic Recording Media	H. Kawano T. Morikawa K. Matsumoto K. Shono	J. Magn. Soc. Japan, Vol. 27, pp. 870-876 (2003)	第6章

本論文に関するその他の発表論文

No.	論文題目	著者名	発表誌名
1	Aluminum Wiring on the Polymer Blend Dielectric Film	M. Sasaki N. Hayashi H. Kawano M. Tani E. Horikoshi T. Sato	Proceedings of the 1st Pan Pacific Microelectronics Symposium pp. 87-92 (1996)

審査結果の要旨

本論文は、大容量、低コスト、高速データ転送を可能にする高性能磁気媒体の開発を目的として、高飽和磁束密度と低磁気ノイズを兼ね備えた Fe-C 系軟磁性裏打ち膜、および高い磁気異方性エネルギー密度をもつ Tb-Fe-Co 系非晶質磁気記録膜の作製プロセス、構造、磁気特性について行った実験的研究の結果をまとめたもので、以下のような成果を得ている。

(1) 共スパッタ法により Fe-C 系二元合金膜から成る軟磁性膜の膜構造、磁気特性およびノイズ特性について調べ、C 含有量の増大にともなって高飽和磁束密度 (19kGauss) を維持したまま、膜構造、磁気ドメインが微細化し、媒体ノイズが低減すること、および半径磁気異方性の発想によりスパイクノイズが抑制されることを明らかにした。とくに、媒体ノイズは保磁力に強く依存し、媒体ノイズを抑制するためには数 0e 以下の保磁力が好ましいことを、およびスパイクノイズは異方性磁界に強く依存し、スパイクノイズ振幅を抑制するためには 200e 以上の異方性磁界が好ましいことを示した。

(2) 共スパッタ法により作製した Fe-C-Si 三元系合金軟磁性膜の膜構造、磁気特性およびノイズ特性について調べた。その結果、ネール磁壁構造が優勢な軟磁性薄層と薄い非磁性中間層を交互に積層することにより、大きな飽和磁束密度 (16kGauss) と小さな媒体ノイズを維持したまま、スパイクノイズ振幅をさらに抑制することができることを明らかにした。

(3) 回折限界を超える Solid Immersion (SIL) 光学系を用いて、Tb-Fe-Co 三元系非晶質合金磁性膜に熱磁気記録を行ない、微小マーク形成について調べた。開口数 (NA) が 1.46 の SIL 光学系を用いることにより、 $0.2\mu\text{m}$ の微小短マークの形成が可能であることを示した。

(4) Tb-Fe-Co 三元系非晶質合金膜を磁気記録層として、軟磁性裏打ち層と記録層の間に極薄多中間層を設けることによる記録分解能の向上を検討した。Fe-C 系合金膜を軟磁性膜裏打ち膜とし、その上に SiN、Cr、Ag 合金、および C の極薄層を順次積層することにより、微細な島状構造をもつ多層中間層を形成できることを示した。この微細構造は非晶質 Tb-Fe-Co 系磁気記録層の磁壁ピンニングサイトとして機能、記録分解能の向上に大きく寄与すること明らかにした。これにより、従来の中間層を用いた場合に比べて、大幅な記録分解能指数 (D50) の改善 (100kFCI) を実現した。

以上の研究成果は、熱揺らぎ耐性に優れた高い記録分解能を持つ新しい 2 層膜垂直磁気記録媒体の実現への道を開くもので、磁気記録媒体の高性能化に寄与するとともに

に、今後の磁気記録技術の発展に大きく貢献することが期待される。また、申請者が自立して研究活動を行うのに十分な能力と学識を有することを証したものである。

3.本委員会は、本論文の審査ならびに学力確認試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。