

	ほんだ なおき	
氏名(本籍)	本多直樹	(愛知県)
学位の種類	博士(情報科学)	
学位記番号	情博第167号	
学位授与年月日	平成12年9月14日	
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当	
研究科、専攻	東北大学大学院情報科学研究科(博士課程)システム情報科学専攻	
学位論文題目	Co-Cr系垂直磁気記録ディスクの高分解能・低ノイズ化に関する研究	
論文審査委員	(主査)	
	東北大学教授 中村 慶久	東北大学教授 根元 義章
	東北大学教授 荒井 賢一	東北大学教授 高橋 研
	(工学研究科)	(工学研究科)

論文内容要旨

第1章 緒論

情報技術の最近における発展は目覚ましいものがあるが、その情報技術の中にあつて情報記録技術は重要な基盤技術の一つである。その情報記録技術の中核をなすハードディスク装置は驚異的な進歩をとげているが、最近、従来技術では熱磁気緩和現象による物理的限界が見え始めてきた。このブレークスルーとして垂直磁気記録方式が再び脚光を浴びているが、MRやGMRヘッドのような最近の高感度再生ヘッドに対応した、高分解能かつ低ノイズな垂直磁気記録媒体の設計指針は必ずしも明確とは言えず、その確立が渴望されていた。

本論文では、面記録密度 50 Gbit/in² 以上を可能とするハードディスク装置を実現するための垂直磁気記録ハードディスク媒体の設計指針を確立し、さらに将来の 100 Gbit/in² 以上の高密度化についても展望した。このための、500 kFRPI 以上の高分解能、かつ 0.25 μm 以下の狭トラック幅に対しても十分な高 S/N を示す垂直磁気記録ディスクの設計指針とその実現方法の提案を要素技術の実証と共に行った。

第2章 垂直磁気記録ディスクの磁気特性

本章では垂直磁気記録ディスクにおける磁気構造と磁気特性の関係について考察し、高分解能・低ノイズ化に必要な微粒子化と磁氣的孤立化に必然の抗磁力の増大を指摘した。さらに、垂直磁気記録媒体においても粒子間の磁氣的な相互作用により磁化反転機構が変化しマクロな磁気特性が変化するが、特に M-H ループの傾きにより粒子間の交換力の評価が可能であることを明らかにした。これによりノイズとの関係が強い磁区寸法の相対的な評価が可能となった。即ち、マクロな磁気特性の評価からミクロな磁気構造についての知見が得られるという実用上の有用性を初めて指摘した。

第3章 媒体ノイズの決定因子

第3章から第5章では垂直磁気記録媒体を高分解能・低ノイズ化するための設計指針について検討した。本章では垂直磁気記録媒体のノイズ源モデルとして、図1に示すビット間の微細逆磁区モデルを提案し、これに基づき媒体ノイズの理論的な解析を行いマクロな磁気特性だけを用いたノイズパラメータ、 P_N を導出した。即ち、

$$P_N = \alpha \cdot M_s \cdot \delta^{3/2} \cdot (1-SQ)^{1/2}. \quad (1)$$

ここに、 α :垂直方向M-Hループ傾きパラメータ($4\pi M_r/H_c$ 、 M_r :残留磁化、 H_c :抗磁力)、 δ :媒体膜厚、SQ:垂直方向角型比(M_r/M_s 、 M_s :飽和磁化)である。実際の媒体でのノイズとこのパラメータとは良い相関を示し、また、ノイズ源モデルから予想されたノイズスペクトラムも実験的に確認され、ノイズ源モデルおよびそれに基づく解析結果の正しさを実証した。このノイズ解析から、低ノイズ媒体はM-Hループの傾きが小さく $1/4\pi$ であることと、角型比SQが大きく1であることが理想であることを明らかにした。また、このような低ノイズ性の条件を満たした高出力媒体の持つべきM-Hループを明らかにした。

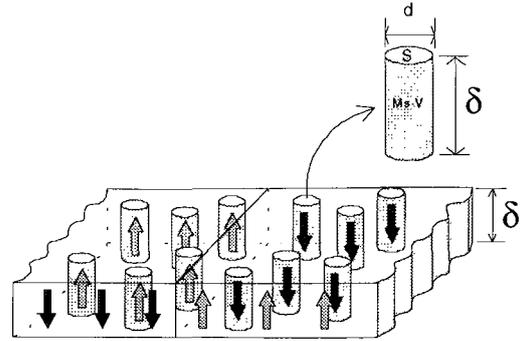


図1. 垂直磁気記録媒体のノイズ源モデル。

第4章 記録分解能の決定因子

本章では高分解能記録のための記録ヘッドと記録媒体について記録シミュレーションにより検討した。簡易シミュレーションでも媒体中の反磁界をM-Hループの傾きとして取り込むことでリングヘッド記録の記録特性を説明できることを明らかにした。その過程で、提案した媒体のノイズを下げる一つの条件であるループ傾き $1/4\pi$ では、飽和記録や記録分解能の点では十分条件とはなり得ないことを示した。媒体ノイズとのトレードオフとなるが、むしろ媒体内の粒子間交換結合の適度な導入、即ち、M-Hループの傾きを大きくすることにより記録特性としての飽和記録への感度、記録分解能の点では劇的に改善できることを提示し、人工格子膜媒体を用いた実験でそれを確認した。さらに、交換結合を導入しても磁区構造が微細であれば低ノイズ性と記録特性の両立が可能であり、これは媒体を微粒子化することで実現できる可能性があることを示した。即ち、粒子寸法の議論以上に、記録転移形成には磁区寸法や磁区構造が支配要因であることを初めて提示した。また、厚い軟磁性裏打ち層を設けた2層膜媒体に単磁極ヘッドで記録する場合には、記録磁界の傾斜がリングヘッドの2倍ほどになると見積もられ、媒体のループ傾きを2倍にすることと同等の効果が期待できる。

第5章 熱磁気擾乱と磁気緩和現象

本章では垂直磁気記録媒体の熱磁気緩和について、単一の磁化反転エネルギーに基づく解析を行い、Co-Cr系垂直磁気記録媒体では反磁界により角型比が1より小さいため、熱磁気緩和の影響を受け易い抗磁力の変化がそのまま残留磁化の変化として反映されてしまうことを明らかにし、これを実験的にも確認した。さらに、高磁気異方性膜で得られる残留磁化の熱磁気安定性には角型比が1であることの寄与が大きいことを人工格子膜を用いた実験より明らかにし、Co-Cr系垂直磁気記録媒体では角型比を大きくすることが、エネルギー比を大きくすること以上に熱磁気緩和の影響を抑制することに有効であることを明らかにした。また、垂直磁気記録方式の特長の一つとして、熱磁気緩和による再生出力の時間減衰が高密度記録ほど抑制される作用を、反磁界の記録密度依存性による角型比の増大による効果として理解できることを明らかにした。これより、垂直磁気記録媒体の高密度記録時の熱磁気緩和は反磁界補正後のM-Hループに基づき見積もりしてよく、高分解能を確保できる粒径10 nm、膜厚25 nmの垂直磁気記録媒体は現実的な記録ヘッドによる書き込みが可能な抗磁力で、かつ残留磁化の熱磁気安定性を保ち得ると見積もった。

第6章 高分解能・低ノイズCo-Cr系ディスクのスパッタ作製

本章では前3～5章での解析を基に、初めに目標とすべきCo-Cr系垂直磁気記録ディスクの磁気特性を表1に示すように、粒径 $d=10$ nm以下、磁区寸法～粒径、抗磁力 $H_c=5$ kOe以下、飽和磁化 $M_s=350$ emu/cm³以下、角型比SQ=1、ループ傾きパラメータ $\alpha>1$ 、ただし、磁区寸法の増加を抑えながらできるだけ大きな値とする(単層膜では $\alpha=5$ 、2層膜では $\alpha=3$ が目標値)、という設計方針を提示した。次に、この設計指針に基づきCo-Cr系スパッタ膜媒体の作製を検討し、Nb添加により初めて $\alpha\sim 1$ 、角型比SQ ~ 0.8 の低ノイズ媒体の条件に近い垂直磁気記録ディスク媒体を開発した。ただし、磁区寸法は100 nm程度と目標に比べ1桁近く大きな値

である。さらにPtを加えた4元系合金媒体で、ループ傾きパラメータ $\alpha \sim 1.5$ 、かつ磁区寸法も、目標値に比べればまだ大きい、Co-Cr-Nb膜に比べ半分ほどに微細化し、低ノイズ性と高分解能性を高めた媒体を開発できた。

第7章 Co-Cr系高角型比垂直磁気記録ディスクの高密度記録特性

本章では低ノイズ・高分解能を目指して開発した高Cr組成Co-Cr膜、Co-Cr-Nb膜、およびCo-Cr-Nb-Pt膜のノイズと記録特性を測定し、実現可能な記録密度について検討した。Co-Cr-Nb膜媒体は高Cr組成Co-Cr膜媒体に比べ、ノイズパラメータから予想された通りの12 dBの低ノイズ化を確認できた。しかし、この低

ノイズ性によっても達成可能な記録密度は5 Gbit/in²ほどと見積もった。さらに、Ptを添加した4元合金膜媒体では、ノイズの増加なしにループ傾きの増加に対応した3 dBほどの出力増加が得られ、再生ヘッドの分解能向上と合わせ、達成可能な記録密度は13 Gbit/in²と見積もった。さらに、この4元系膜では極薄の軟磁性裏打ち層を設けることにより、狭ギャップ長リングヘッド記録と狭シールドギャップ長GMRヘッド再生により、S/Nと分解能からは24 Gbit/in²の記録まで可能と結論した。

一方で、リングヘッド記録に比べより記録磁界の傾斜が急峻となる2層膜媒体への単磁極ヘッド記録を検討した。4元合金系膜を単純に2層膜化しても磁区寸法の肥大化が生じ、ノイズが激増することが分かった。そこで中間層の導入を検討し、単層膜に近い記録層を得ることができた。さらに、Pt量の検討と記録ヘッドの検討により、S/Nと再生波形の分解能からは最大60 Gbit/in²程度の面記録密度の達成が可能であるとの結論を得た。この面記録密度の達成は、狭トラック幅の単磁極ヘッドによる記録パターンからも支持された。さらに、角型比を1近くにすることで熱磁気緩和による再生出力の時間減衰率を実用的な値とできることを確認した。100 Gbit/in²の記録に向けては本研究で明らかにした設計指針に従い、できるだけループ傾きを大きくするため適度な交換力を保持したまま磁区寸法を微細化する必要があるが、Pt添加で示されたように基本的には微粒子化により達成可能と考えられることを示した。また、熱磁気安定性の保持のため異方性磁界の増加が必要であるが、これも材料的にはPtを多く含むCo-Cr基合金で達成可能と見通されることを示した。

さらに、1000 kFRPIに迫る超高密度記録信号の検出に成功している。これは垂直磁気記録方式によれば今後の研究の進展により1 Tbit/in²記録を実現できる足がかりを与えるものである。これには、より高い磁気異方性を持つ材料、即ちCo/PdやFePtなどの導入が必須であるが、このような超高密度記録が実現されるとハードディスク装置のコンピュータ用途以外の新しい分野への普及が加速され、一般社会生活にも大きな変革をもたらす可能性があることを指摘した。

第8章 結論

当初の目標、50 Gbit/in²の記録密度のための十分な高S/N化を実現するための、高分解能・低ノイズ垂直磁気記録ディスクの設計指針を示すことができた。これらの指針は今後の記録媒体の高密度化への基本方針として極めて有用であると考えられる。さらに、将来の記録密度1 Tbit/in²を目指した超高密度ハードディスク装置の実現のためには、接触記録方式や、マルチトラック記録、リニアトラッキングなどの媒体以外の新技術の確立や、微粒子型以外の記録媒体の導入が今後の課題と考えられる。

表1. 目標とする膜構造と磁気特性。

項目	目標値	理由、備考
膜厚, δ	< 50 nm	最大 H_c となる膜厚 ノイズ、分解能
粒径, d_g	10 nm	分解能 (500 kFRPI)
磁区寸法, d	10 nm	ノイズ、分解能
角型比, SQ	1	ノイズ、熱磁気緩和
抗磁力, H_c	3~5 kOe	熱磁気緩和
飽和磁化 M_s	>3 kOe ($\delta=50$ nm)	$H_c > 2.8$ kOe for $M_s=250$ emu/cm ³
	>4 kOe ($\delta=25$ nm)	$H_c > 4.0$ kOe for $M_s=350$ emu/cm ³
ループ傾斜, α	< 240 emu/cm ²	SQ=1 ($\alpha \cdot H_c/4\pi$, $\alpha=1$, $H_c=3$ kOe)
	< 360 emu/cm ³	SQ=1 ($\alpha \cdot H_c/4\pi$, $\alpha=1.5$, $H_c=3$ kOe)
ループ傾斜, α	1	ノイズ
	~5 for SL	分解能
	~3 for DL	分解能

論文審査の結果の要旨

ハードディスク装置は高度情報化社会における莫大な情報を蓄積・保存する中心的な装置として位置付けられるもので、その面記録密度の飛躍的な向上が求められている。著者はハードディスク装置の主要な構成要素である磁気ディスク媒体に着目して、垂直磁気記録方式における新たな記録理論を展開し、現用ハードディスク装置の5倍強にあたる100Gbits/inch²を越える面記録密度の可能性を理論・実験の両面より検討した。本論文はその成果をまとめたもので、全文8章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、Co-Cr系垂直磁気記録ディスク媒体の微細構造と磁気特性の関係について考察し、媒体を構成する磁性粒子間の交換結合の強さをヒステリシス曲線の保磁力近傍の傾きから評価することを提案している。これはマクロな磁気特性からミクロな磁気粒子間の相互作用についての知見を得る手段を提供するもので、実用上有用である。

第3章では、垂直記録媒体のノイズ源が局所的なビット内での磁化反転であることを指摘し、媒体磁気粒子間の交換結合を切断することにより低ノイズ化が実現されることを、理論解析に基づき明らかにしている。

第4章では、計算機シミュレーションにより、高分解能記録を達成するための媒体条件としてはヒステリシス曲線に於ける保磁力近傍での磁化の傾きを大きくすることが効果的であることを指摘している。

第5章では、熱エネルギー擾乱による垂直磁気記録媒体の記録ビットの減磁について、理論と実験の両面から議論し、磁気ディスク媒体の残留磁化と飽和磁化との比を1とすることで記録ビットが安定に保持されることを示している。

第6章では、第3～5章の結果をもとに高記録密度対応垂直磁気ディスク媒体の設計指針および磁気特性に求められる諸元を提示し、これらを満たす垂直ディスク媒体の試作を行っている。これまでのCoとCrの2元薄膜に、NbとPtを添加することでその磁気特性が各諸元を満足することを明らかにしている。これは応用上重要な成果である。

第7章では、試作した垂直ディスク媒体の記録性能を測定し分解能やSN比の評価を通し、達成可能な面記録密度を具体的に見積もっている。その結果、軟磁性裏打ち層を配した二層膜媒体化や急峻な記録磁界を発生する単磁極ヘッドを用いることにより、100Gbits/inch²の超高密度記録が可能となることを示している。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、垂直磁気記録方式を用いるハードディスク装置の磁気ディスクについて、高密度化のための磁気特性と微細構造を理論と実験から明らかにし、100Gbits/inch²を越える面記録密度実現の可能性を提示したもので、システム情報科学及び磁気工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。