

氏名	熊谷 静 似
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成10年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)応用物理学専攻
学位論文題目	再生磁気ヘッド用磁気抵抗素子に関する研究
指導教官	東北大学教授 宮崎 照宣
論文審査委員	主査 東北大学教授 宮崎 照宣 東北大学教授 松原 史卓 東北大学教授 島田 寛 東北大学助教授 加藤 宏朗

論 文 内 容 要 旨

第1章 序論

情報社会と言われる現代、コンピュータの普及や情報のデジタル化によって情報量は益々増加し続けている。このような状況の中で、磁気記録技術は、記録密度、容量、コストの点で他の媒体より優れており、特にハードディスク装置(HDD)は、コンピュータ用の外部記録装置として中心的な役割を担っている。しかし、継続的に求められている高性能、大容量化の要求に応える為には、更なる高記録密度を達成する必要がある。その結果、再生用磁気ヘッドはインダクティブ型からより高感度な磁気抵抗効果(MR)型へと移行している。MRヘッドの再生感度を支配しているのは、磁気抵抗変化率(MR比)である。現在MRヘッドに使用されているパーマロイの場合で高々3%、スピバルブ(SV)型のGMRでは、最大で約10%のMR比が得られている。しかしながら、今後も求められる高記録密度化に応えるには、より大きなMR比を示す磁気抵抗材料をヘッドへ応用することが必要である。近年、20%を超える大きなMR比を示す材料として、多層膜GMR材料とトンネル磁気抵抗効果(TMR)材料が注目されている。しかし前者については、構造及び磁化機構の複雑さと磁界感度の点で、後者については素子作製の困難さと常温での大きなMR比が最近まで報告されていなかった点で、それぞれヘッド化の研究が遅れている。特にTMR材料については、これをヘッド化しようとする報告はまだほとんどない。

本論文では、多層膜GMR材料をヘッド化し、プロセス負荷に対する耐久性、期待される出力向上の検証及びヘッド動作特性を明らかにした点について記述している。また、TMRについて磁気ヘッドとして必要な耐熱性、温度依存性および電圧依存性等の基本的特性を実際のヘッド構造に近いSV型の素子を作製することにより検証し、再生用ヘッド材料としてのTMR材料の有用性を示す。

第2章 実験方法

試料の成膜は、電子ビーム蒸着あるいはマグネトロンスパタリングで行った。微細素子の作製にはフォトリソグラフィを、またSV型TMR素子の作製についてはマスクパッタを用いた。磁性膜の磁化測定には振動試料型磁力計を用い、TMR素子ではKerrヒステリシスループトレーサにより素子中心部のヒステリシスループを測定した。磁気抵抗の測定には直流4端子法を用い、MR比を $(R_{\max}-R_s)/R_s \times 100$ (%)で定義した。ここで R_{\max} は最大の抵抗値、 R_s は最大磁界印加時の抵抗値である。またMR曲線で抵抗変化(dR)が半分値となる磁界の大きさ($H_{s, \text{half}}$)を求めMR比/ $H_{s, \text{half}}$ を磁界感度Sと定義した。更にAMRと多層膜GMR材料についてはヘッド化を行い、電磁変換特性を測定した。

第3章 AMR ヘッドの作製と評価

NiFeのMR比および保磁力 H_c に対する膜厚および熱処理の影響を調べ、膜厚500Åの場合に260℃のアニールを行うことで、ヒステリシスが非常に小さい状態でMR比2.3%を実現した。また、この条件により成膜したNiFeの軟磁気特性は下地の構造、特に表面粗さに大きく影響を受けることを明らかにした。下地の表面粗さを抑える必要から、バイアス導体より先にNiFeを成膜する方法を考案し、表面粗さを1/3に改善し、それに伴って H_c も0.51Oeと低減することを示した。さらに、塗布型のSiO₂を使用することで表面性が向上し H_c を低減できることを実証し、熱プロセスを加えた後において0.4Oe以下の H_c を実現し、ヘッドとして満足できる特性を得た。しかし、この構造では、システム側からの制約から定められるバイアス導体の膜厚を薄くする必要があることから、これまでに用いられていたTiの約1/3の比抵抗を示すMoを使用することでこれを回避した。また、バイアス導体をAMR膜の上層に配する特徴を生かし、AMR膜と接する面には拡散防止膜として機能する材料を、その上には比抵抗の低い金属を積層する二層化構造を提案した。このようにして作製したAMRヘッドにおいて、保磁力が小さく歪みの少ない出力波形が得られ、出力(S/N)は51.3dB、二次高調波歪み(SHD)は-25dB以下と、実際のシステムに十分対応可能であることを示した。更に、多層膜GMRやTMR材料についてヘッド材料として必要な特性の抽出を行い、二つの材料についてヘッド化のための実験方針を明確にした。

第4章 多層膜GMRのヘッド特性

多層膜GMRは大きなMR比から、次世代の再生用磁気ヘッド材料として期待されているが、大きな動作磁界を必要とすることが懸念されている。これに対して非磁性層の厚さを非磁性層膜厚対MR比の第二ピークに設定し、磁界感度を向上させる方法が考えられている。また、薄い金属膜を積層した構造から、耐熱性の問題も指摘されており、プロセスの熱的な負荷や途中で加わる応力などへの影響を調べる必要がある。しかし、実際のヘッド出力については報告も少なく、従来のAMR単層膜の構造で適切な磁界応答が得られるのか疑問である。

そこで、将来の高記録密度に対応できるか否かの見極めと、そのための設計指針を得るために、実際に多層膜GMR材料を使用した再生用磁気ヘッドを作製し検討した。その結果、Fe₂₀Co₃₀Ni₅₀/Cu多層膜は磁性膜を15Å、Cuを21Å、積層数を15層とすることでMR比12.5%、磁界感度が0.74%/OeとNiFeの約0.2%/Oeと比較して高い再生出力を期待できる特性が得られた。この膜に対してベークやエッチング、更に加圧接着などの工程を行ったが、MR比の大きな劣化はみられず比較的良好な状態を維持していることが明らかとなり、現行のプロセスでもヘッド化が可能であることを示した。この多層膜GMRヘッドの出力はFig.1(a)のような出力波形を示し、AMRの出力(Fig.1(b))に比べ単位電流当たり2倍の大きさであり、高記録密度に対応できる可能性を確認した。しかし、MR比が12%とAMRの3倍以上であるにもかかわらず出力が2倍程度あることを考えるとヘッド内部でのMR比の低下が考えられる。この原因としてはセンス電流の自己バイアス効果による反強磁性的配列の乱れが考えられる。また、ガラス上の素子から予想されるバイアス磁界に対して、実際のヘッドでは約2倍のバイアス磁界

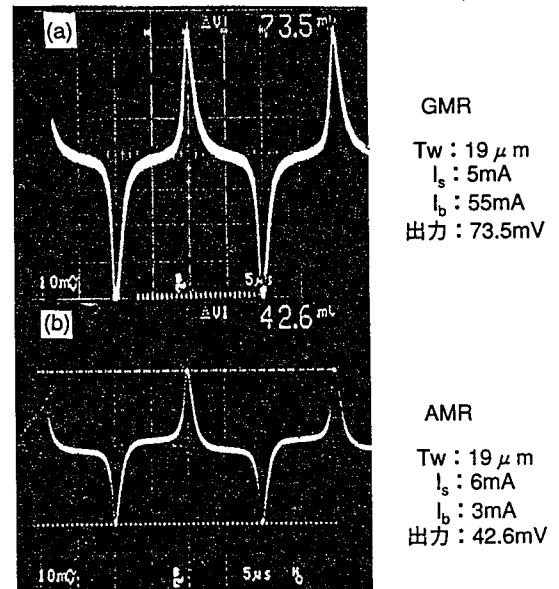


Fig.1 多層膜GMRおよびAMRヘッドの出力波形

(a): GMRヘッド、(b): AMRヘッド

強度が必要になることが判明した。この原因として、磁性多層膜構造に起因して素子の厚さ方向のバイアス磁界が不均一な分布を示し、バイアス導体近傍のみに磁界が優先的に印加され、離れた部分には十分なバイアス磁界が印加されないことが考えられる。このように多層型 GMR では、その大きな MR 比により高出力なヘッドを実現できる可能性を実証したが、実際に動作させるためには、動作時のセンス電流低減や膜厚方向で均一なバイアス印加方法を考案する必要があることが判明した。多層膜に均一なバイアス磁界を印加する為には、永久磁石等による方法があるが、技術的な困難が予想され今後の課題と考える。

第 5 章 TMR 素子の作製

メタルマスクを用いて $100 \times 100 \sim 500 \times 500 \mu\text{m}^2$ の接合面積を有する NiFe(188 Å)/Co(33 Å)/Al₂O₃(8~16 Å)/Co(26 Å)/NiFe(188 Å)/FeMn(450 Å)/Ta(200 Å) 接合素子を作製した。この素子は最大で約 28 % の TMR 比を示し、これは今までに報告された TMR 比のなかで最も大きい。この原因は界面に分極率の高い Co を用いたことと、一方向性異方性を持つ反強磁性膜からの層間結合磁界によって pin 層の磁化の分散が小さくなり、free 層との間で理想的な磁化の反平行配列が実現されているためと考えられる。この TMR 比の大きさは SV 型 GMR の 10 % 程度と比較しても十分に大きく、構造的に SV 型 GMR と殆ど同一であることから、今後の高密度磁気記録に於ける再生ヘッドとして対応できることを示した。また、絶縁層となる Al 膜厚が 10~13 Å の間で TMR 比が 10 % を越えることを示し、200~300 °C の間の磁場中アニールによって TMR 比がピークを持つことを明らかにした。更に 250 °C のアニールにより、接合の耐電圧が向上し、磁気ヘッドとして使用する際に問題のない範囲であることを初めて明らかにした。アニールは TMR 比の温度依存性にも影響を及ぼし、300 °C でアニールした素子の接合は 418 K(145 °C) 以上の耐熱性を有することを明らかにした。これらアニールによる諸特性の向上は Al の酸化促進による障壁高さの向上と安定化が要因と考えられる。一方、ヘッド動作を考慮して、耐熱性、耐電圧性が向上する温度が反強磁性層(FeMn)のブロック温度よりも高い事を利用した 2 段階の磁場中アニールにより、free 層と pin 層の磁化容易軸を直交させる実験を行った。Fig.2 に異方性制御を行う前(実線)と後(破線)での MR 曲線の full loop(a) と minor loop(b)を示す。制御後は印加磁界に対して抵抗が比較的線形に応答することを示し、磁気ヘッドの動作特性の一部を初めて明らかにした。ついで SV 型 TMR 素子では、電流が膜面に対して垂直に流れることを応用し、新規な再生用磁気ヘッドの構造を提案した。この構造は、TMR 特有の高抵抗に起因する Johnson 熱ノイズをも回避でき、TMR のヘッド化への可能性を示した。

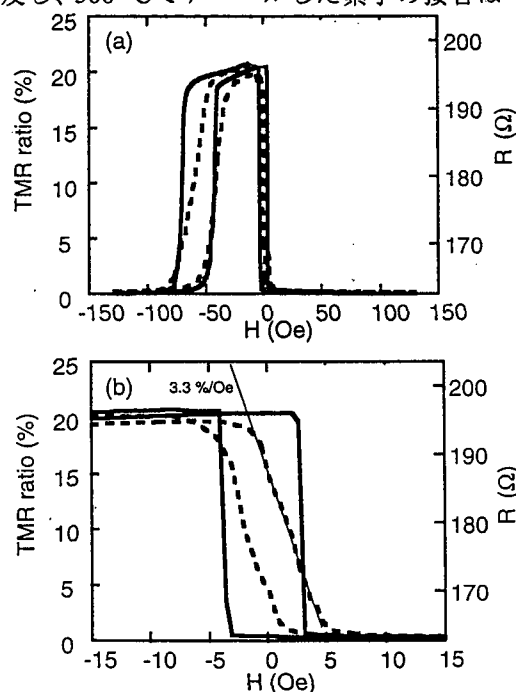


Fig.2 TMR 素子の MR 曲線 full loop(a) と minor loop(b)
実線：異方性制御前 破線：異方性制御後

第 6 章 総括

AMR、多層膜 GMR、SV 型 TMR と異なる 3 種類の磁気抵抗材料について、磁気ヘッドへの応用という観点で研究を行った。まず AMR ヘッドの理解を踏まえて、この成果を多層膜 GMR や SV 型 TMR の研究に生かした。次に、次世代の再生用磁気ヘッドへ応用が期待されている多層膜 GMR と SV 型 TMR について検討し、再生ヘッドとして応用する場合の問題点を明らかにし、特に TMR については具体的なヘッド設計の指針を示した。

審査結果の要旨

多層膜GMR材料とトンネル磁気抵抗効果(TMR)材料は、次世代の再生用磁気ヘッド材料として期待されている。しかし前者については、構造及び磁化機構の複雑さと磁界感度の点で、後者については素子作製の困難さと常温での大きなMR比が最近まで報告されていなかった点で、それぞれヘッド化の研究が遅れている。特にTMR材料については、これをヘッド化しようとする報告はまだほとんどない。本論文は、多層膜GMR材料をヘッド化し、プロセス負荷に対する耐久性、期待される出力向上の検証及びヘッド動作特性を明らかにした成果とTMRが安定に出現する条件を見だし、磁気ヘッドとして必要な耐熱性、温度依存性および電圧依存性等の基本的特性を実際のヘッド構造に近いSV型の素子を作製することにより検証して、再生用ヘッド材としてのTMR材料の有用性を示した研究成果を纏めたもので、全文5章よりなる。

第1章は序論である。第2章では、薄膜ヘッドを実際に作製する際に必要となる微細加工を中心に、試料の作製方法を述べている。

第3章では、実際に市販されているシステムに対応したAMRヘッドの作製について述べている。NiFeのMR比を大きくする膜厚や熱処理の条件を見だし、その軟磁気特性は下地の構造、特に表面粗さに大きく影響を受けることを明らかにした。下地の表面粗さによる影響を回避するためにバイアス導体を上層に配する特徴を生かし、NiFeと接する面には拡散防止膜として機能する材料を、その上には比抵抗の低い金属を積層する二層化構造を提案した。さらに多層膜GMRやTMR材料についてヘッド材として必要な特性の抽出を行い、二つの材料に対し実験を行うための指針を示している。

第4章では、多層膜GMR材料によるヘッド作製について述べている。多層膜GMR材料において、成膜方法の工夫により、MR比12.5%、磁界感度0.74%/Oeの特性を実現した。さらに、この膜に対してヘッド化を試み、大きなMR比の劣化を生じること無くヘッド化することが可能であり、単位電流当りAMRヘッドの2倍の出力を示すことを明らかにした。この結果は、多層膜GMRを用いたヘッドが今後の高記録密度に対応できることを実証した点で、応用的に興味ある知見である。更に、センス電流の自己バイアス効果による反強磁性的配列の乱れによりヘッドの内部でMR比が低下すること、および、磁性多層膜構造により膜厚方向でバイアス磁界の不均一が生じるために、過大なバイアス電流を必要とすることを示した。このことは、今後の実用化に向けての問題を明確にした点で意義がある。

第5章では、実際のヘッド構造に近いSV型TMR素子を作製し、TMR比、熱的安定性、温度依存性について述べている。作製した素子のTMR比は最大で約28%であり、これは今までに報告されたTMR比のなかで最も大きな値であることを示した。また、酸化後に絶縁障壁となるAlの厚さが10～13Åの場合に、200～300℃の間の磁場中アニールによってTMR比が向上することを明らかにした。更に250℃のアニールにより、接合の耐電圧が向上し、ヘッドとして使用する際に問題のない範囲であることを明らかにした。アニールは温度依存性にも影響を及し、300℃でアニールした素子の接合は418 K(145℃)以上の耐熱性を有することを示した。さらに、free層とpin層の磁化容易軸を直交させ、印加磁界に対して抵抗が線形に応答することを明らかにし、再生用ヘッドに必要な動作特性の一部を明らかにした。以上の結果は、TMRを再生用ヘッドとして応用する場合、必要となる基本的な特性が実用上問題無いことと、現在使用されているAMRヘッドよりも高い出力が期待できることを示唆しており、TMR材料による高性能な再生用ヘッド実現の可能性を明らかにした点で、応用的に興味ある知見である。また、SV型TMR素子では、電流が膜面に対して垂直に流れることを応用し、新規な再生用ヘッドの構造を提案した。この構造は、高抵抗に起因するJohnson熱ノイズをも回避でき、TMR効果を利用した実際のヘッド設計に指針を与えるという点で、興味ある知見である。

第6章は総括である。

以上、要するに本論文は、多層膜GMRとTMRの2種類の磁気抵抗材料について、再生用ヘッドとして応用する場合の可能性と問題点を明らかにし、特にTMRについては具体的なヘッド設計の指針を与えたもので、応用物理学とりわけ磁気記録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(工学)の学位論文として合格と認める。