

氏 名	上 口 裕 三
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成 3 年 3 月 28 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 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) 精密工学専攻
学 位 論 文 題 目	Fe/Gd 系人工格子薄膜の磁性と電気伝導
指 導 教 官	東北大学教授 藤森 啓安
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 藤森 啓安 東北大学教授 鎌田 治 東北大学教授 滝本 昇 東北大学教授 齋藤 好民

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

近年, 磁気抵抗効果の応用として高密度磁気記録用ディスクの読み取りヘッド (MR ヘッド) の開発研究が盛んに行われているが, 未だ十分な特性のものは得られていない。そこで磁性体の磁気抵抗効果そのものについての研究が必要不可欠になっており, 物理的機構の解明と同時に, 大きな磁気抵抗効果を示す新奇な物質の探索研究が進展している。そのような中で, 最近研究が活発化している磁性人工格子薄膜は多くの特異な磁性を示すため, その磁気抵抗の効果にも興味深いものがある。

本論文では Fe/Gd 人工格子薄膜が巨大フェリ磁性を示し磁場中でスピントロップを起こすことに着目し, スピントロップと磁気抵抗の関係を系統的かつ詳細に調べることを目的とした。すなわち, スピントロップ時の磁化過程は通常の強磁性体のそれとは異なり, 磁気抵抗効果にも特異性が生ずる可能性があるからである。はじめに磁化過程の詳しい振る舞いを人工格子構造を系統的に変えて調べた。ついで比電気抵抗とスピントロップ時の磁気抵抗の挙動について精密な測定を行い, 磁化との相関を解析した。また, 応用的観点から室温でもスピントロップを起こすことが可能になるように Fe 層の Fe/Gd 副格子と, Gd 層の厚い Gd/Fe 副格子をさらに積層し 2 重構造にした人工格子薄膜を考案し, 室温かつ弱磁場で実現し得る新しいタイプの磁気抵抗素子の開発研究も行った。

第 2 章 実験方法

人工格子薄膜試料の作成には rf スパッタ法を用いた。その構造を X 線回折法により, 磁性を振

動試料型磁力計により、さらに磁気抵抗効果を高感度4端子法によりそれぞれ測定し解析した。なお実験に用いた人工格子薄膜は以下のものである。a) Fe/Gd人工格子薄膜：Fe層厚 (d_{Fe})、Gd層厚 (d_{Gd}) を10Åから100Åの間で変えた $d_{Fe} : d_{Gd} = 1.24 : 1, 1.24 : 3, 3.72 : 1$ の試料。ただし総膜厚は約5000Åとした。b) 2重構造Fe/Gd人工格子薄膜：Fe層の厚いFe/Gd副格子では $d_{Fe} : d_{Gd} = 3 : 1$ 、またGd層の厚いFe/Gd副格子では $d_{Fe} : d_{Gd} = 1 : 3$ とし、長周期 (λ_l) を250Åに固定し短周期 (λ_s) を4Åから100Åの間でかえた試料と、 λ_s を20Åに固定し長周期 λ_l を90Åから490Åとした試料。なお総膜厚は3000Åとした。

第3章 Fe/Gd人工格子薄膜の構造、磁気特性、磁気抵抗

Fe/Gd人工格子薄膜の低角X線回折には人工格子周期に対応したブラッグ反射が観測され人工格子周期構造が明瞭に確かめられた。ただし、界面拡散を考慮したモデルとの比較の結果Fe層とGd層の界面では10~20Å程度の拡散が起こっていることがわかった。

4.2K, 77Kの磁化の磁場依存性の測定を行い図1に示すように磁化が磁場に対して段階的に上昇する現象を見いだした。Fe/Gd人工格子薄膜はFe層のスピンのGd層のスピンの反平行に結合した一種のフェリ磁性になっており、そのために磁場を増加させていくとある磁場でスピントロップを起こし磁化の段階的な増加が起こったと推測される。磁化が上昇する磁場(スピントロップ磁場)は人工周期を増大させると数kOeから100Oe程度まで減少することもわかった。なお、室温ではスピントロップは観測されなかったが、これはGd層の磁化が室温では消失しているためだと

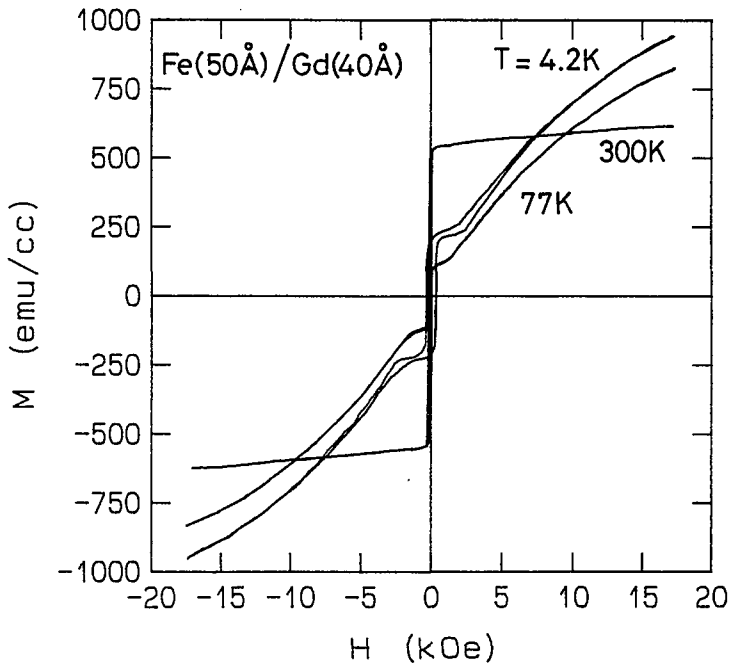


図1 Fe(50Å)/Gd(40Å)の磁化の磁場依存性

考えられる。

次に磁化の温度依存性を測定したところ、磁化はキュリー温度以下の中間温度でいったん減少する特徴的な温度変化を示すことが分かった。これはフェリ磁性に特有の磁化の補償現象と考えられる。また補償温度は人工周期によって変化することが確認されたがこれは Fe と Gd の磁気モーメント S の値が人工周期によって変化するためと推測される。さらに磁化の温度依存性の磁場変化を測定することにより Fe/Gd 人工格子薄膜における 3 つの磁気相 (Fe 整列状態, Gd 整列状態, スピンドロップ状態) の温度, 磁場, 人工周期依存性を明らかにした。

以上のような Fe/Gd 人工格子薄膜のフェリ磁性をモデル計算により検討した。計算は分子場近似により各原子層における磁化の統計平均を求めたのち、各スピンの外部磁場に対してどのように配列するかをゼーマンエネルギーと交換エネルギーの和が最小になるという条件のもとで求めた。得られたスピン分布は一定の磁場依存性を示し、スピンドロップ時には界面から層内にかけて Fe 及び Gd スピンは螺旋状にねじれた配列をすることがわかった。さらに得られたスピン分布の磁場方向成分から磁化を計算し、磁化の磁場依存性ならびに温度依存性を求めたところ実験結果を半定量的に説明できることを知見した。このことより Fe/Gd 人工格子薄膜の特異な磁性は Fe 層と Gd 層間のスピンの長距離にわたって反結合した巨大フェリ磁性に起因していることがわかった。

次に、特異な磁性に付随して現れる磁気抵抗効果についての実験を行った。はじめに比電気抵抗の人工周期依存性を Dimmich の理論にもとづいて解析し、Fe/Gd 人工格子薄膜における比電気抵抗はおもに Fe 層の結晶粒界による電子散乱により決められており、Fe 層と Gd 層の界面における散乱の寄与は小さいことを明らかにした。次いで Fe/Gd 人工格子薄膜の磁気抵抗を測定し、通常の異方性磁気抵抗効果とは異なる磁場依存性を示すことを見いだした。すなわち、図 2 に示すように縦磁気抵抗、横磁気抵抗は磁場の増加に対して上昇、下降を示し、両者はある磁場で交差する

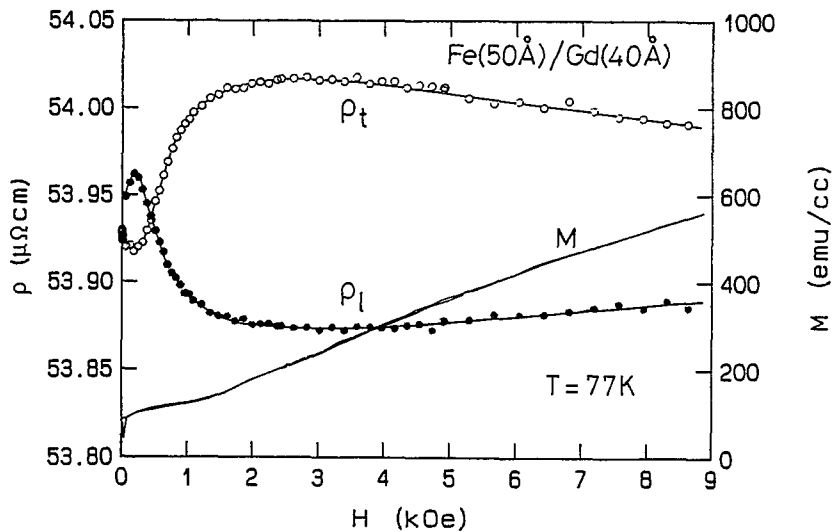


図 2 Fe (50Å)/Gd (50Å) の磁気抵抗の磁場依存性

ことを見いだした。さらに磁気抵抗効果の磁場方向に対する角度変化が磁場の大きさに依存していることも見いだした。このような新奇な磁気抵抗効果はスピントロップ時に螺旋状にねじれた Fe, Gd スピンと伝導電子の相互作用に起因すると考えられる。そこでスピントロップ磁化過程と磁気抵抗変化の対応関係を分子場近似により計算したところ、理論と実験は良い一致を示すことが確認され上記の予測が裏付けられた。

第 4 章 2 重構造 Fe/Gd 人工格子薄膜の構造, 磁気特性, 磁気抵抗

上記に示した Fe/Gd 人工格子薄膜では, 室温においては Gd 層の磁化が消失してしまうためスピントロップ現象及びそれにとともなう特異な磁気抵抗効果は起こらない。これに対して, 応用上の観点からは室温でかつ低磁場でスピントロップを実現させることが望ましい。そこで本章では 2 重構造 Fe/Gd 人工格子薄膜を考案しその実現を試みた。2 重構造 Fe/Gd 人工格子薄膜では Fe 層からの交換相互作用により, Gd 層の磁化が室温でも消失しないことが期待される。

作成した試料の小角 X 線回折から得られた回折線のプロファイルは単純な人工格子薄膜に見られる回折線プロファイルとは異なり, 10 数本のブラッグ反射ピーク強度が 2θ に対して振動的な変化を示す 2 重構造人工格子薄膜に特有のものであることがわかった。そのピーク位置及び強度を解析して 2 重構造人工格子薄膜の λ_1 と λ_s を求めた。

このようにして得られた人工格子薄膜の磁化は確かに室温でスピントロップを起こすことが確認された。ただし λ_s は 56 Å 以下に限られ, λ_s が大きいと室温でスピントロップは起こらない。また磁化の温度依存性を測定した結果, λ_s を変えることにより広範囲にわたって系統的に補償温度を変化させることができた。さらにスピントロップ磁場は, λ_1 を長くするか補償温度を室温近傍に持ってくることにより非常に小さくできることも分かり, 2 重構造人工格子薄膜により室温かつ低磁場でのスピントロップの実現が可能であることが明らかになった。

次に上記磁性の挙動が分子場近似を用いた理論により理解できることをモデル計算により確かめた。ただし λ_s が小さい領域では拡散の効果が無視できず定量的な理解のためには理論に拡散層の効果を取り入れる必要があることがわかった。

最後に磁気抵抗効果の測定を行い 2 重構造人工格子薄膜は, 確かに常温において特徴的な縦磁気抵抗と横磁気抵抗の交差を示すことが明らかになった。なお比電気抵抗は λ_s に対してはほぼ反比例し λ_1 に対してはほぼ一定値を保っていることがわかり, これは Fe 層の結晶粒界における電子散乱が効いているためであると考えられた。

第 5 章 総 括

本章では, Fe/Gd 人工格子薄膜における磁気特性とくに長周期の巨大フェリ磁性の挙動と磁気相状態について得られた結果をまとめた。次いで, スピントロップ時の新奇な磁気抵抗効果について得られた結果をまとめた。

審査結果の要旨

新機能材料開発の観点から、異種原子を層状に積層した人工格子薄膜の研究が進展している。本論文は、磁気応用の観点から3d遷移金属/希土類金属人工格子の長周期フェリ磁性に着目し、それをFe/Gd系に応用して低磁場、室温で磁化がスピフロップを起こすとともに特異な磁気抵抗効果を示す新しいタイプの人工格子について研究した成果をまとめたもので、全編5章より成る。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、Fe/Gd人工格子薄膜をスパッタ法で作製する実験法、得られた試料の構造評価のためのX線回折実験法及び磁化特性と磁気抵抗の測定法について述べている。

第3章では、Fe層厚とGd層厚を約10Åから100Åの間で系統的に変えたFe/Gd人工格子薄膜(膜厚約5000Å)を調べ、まず磁化が磁場に対して段階状に上昇するスピフロップ現象、及び磁化が温度に対して凹状に変化する補償現象を見だし、これらはFeとGd層間の負の交換相互作用と磁場とFeスピン及びGdスピン間の磁気相互作用の競合の結果現れるフェリ磁性磁化現象であることを分子場近似に基づいた理論計算によって明らかにしている。この際、Fe層とGd層内のスピンは磁場によって螺旋状に回転し、そのためにスピフロップが低磁場でも起り得ることを解明している。次に、スピフロップに伴って磁気抵抗効果に異常が起こり、縦効果と横効果が交差することを見だし、その原因も人工格子のスピンの螺旋回転にあることを明らかにしている。これは新しい現象であり注目すべき知見である。

第4章では、応用上の観点から上記現象を室温で発現させるために、室温以上に補償温度を有する2重構造Fe/Gd人工格子を新たに考案しその磁化特性と磁気抵抗効果を調べている。その結果、2重構造の副格子短周期を数10Å以下にし主格子長周期を500Å程度に長くすることにより、100Oe以下の低磁場スピフロップとそれに伴う異常磁気抵抗効果で発現させることに成功している。これは、新しい磁気抵抗素子の開発指針を示しており重要な成果である。

第5章は総括である。

以上要するに本論文は、Fe/Gd人工格子薄膜の磁性と電気的性質を調べ特異な低磁場スピフロップと新しいタイプの磁気抵抗効果を見だし、その微視的機構を解明するとともに人工格子の磁気応用の指針を示したものであり、精密工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。