

論文内容の要旨

博士論文題目 円偏光硬 X 線を用いた共鳴磁気反射率測定による
TM/FeGd/TM 三層膜 (TM=Fe, Co) の磁化過程

氏 名 児玉謙司

(論文内容の要旨)

論文の内容は二つのテーマから構成されている。一つは元素選択的な磁気構造および磁化過程を研究するために共鳴 X 線磁気反射率法を開発すること、もう一つはその手法を用いて Fe/FeGd/Fe および Co/FeGd/Co 三層膜の磁気物性、特に Gd 磁化ベクトルの磁化過程を明らかにすることである。

磁性体の磁化過程を研究する実験手法として、現在最も利用されているのが振動試料型磁力計、超伝導磁束量子干渉計を用いた測定である。また表面に特化した手法としては磁気光学効果を用いた磁気測定がある。単一の磁性元素からなる薄膜の磁性を調べるにはこれらの手法で十分であるかもしれない。しかし、磁気物理の研究対象として重要であるだけでなく、磁気デバイス作製においても重要な役割を果たす交換バイアス効果や間接交換結合などを示す磁性薄膜は、必ず“ヘテロ構造”である。即ち複数の磁性層および非磁性層により構成される。また実際の磁性デバイスは“基板上”に作られており機能の保持、向上のため下地層や保護層が設けられ、本質的な部分は“埋もれた膜”になっている。厚い基板上に作られた表面から埋もれた場所の磁性を研究する手法は基礎的な磁性研究の分野だけでなく、デバイス開発を行なう立場からも待ち望まれていた。

申請者はこの要請に対し円偏光硬 X 線を用いた共鳴磁気反射率法を提案した。この測定法は小角領域において鏡面反射された X 線強度の円偏光ヘリシティによる差が共鳴元素の磁気構造を直接的に反映することを利用している。磁気反射率プロファイル測定から共鳴元素の深さ方向の磁気構造を決定できる。また、散乱角を固定した条件で磁気反射率の磁場依存性を測定することにより、共鳴元素のベクトル磁化曲線を得ることができる。硬 X 線を用いるので X 線侵入長が十分に深く、軟 X 線では測定が困難な 10 nm より深い場所の磁気情報を得ることができる。またヘリシティ反射強度差は吸収強度差と異なりシグナルの大きさは共鳴元素の量に必ずしも比例するわけではないので、磁気円二色性では測定が困難な磁性元素層が薄い二層、三層膜の測定が可能である。この

ように円偏光硬 X 線を用いた共鳴磁気反射率法は実際のデバイス構造に近い形状の磁性膜の磁性研究法として有効な手法となる可能性がある。

このような考えから、申請者は人工フェリ磁性体である Fe/FeGd/Fe 三層膜を試料として GdL₃ 端円偏光硬 X 線を用いた共鳴磁気反射率測定を行ない、測定の有効性について検証を行なった。印加磁場を X 線進行方向に平行および垂直に設定し、磁気反射率ヒステリシスを測定することにより、Gd の磁化反転過程が、Gd モーメントの一方向回転により進むことを明らかにした。また、Fe/Au/Fe 三層膜、Au/Fe 二層膜の Au の磁気反射率プロファイル測定結果を示し、この方法が二層、三層膜の磁気構造の研究に有用であることを示した。さらに、実用デバイスで用いられる強磁性 CoFe/反強磁性 MnIr 交換バイアス膜の反強磁性層の界面数原子層に誘起された非補償 Ir 磁気分極に由来する磁気反射率ヒステリシスの測定結果を示し、高感度磁気測定としても有効であることを示した。これら、一連の測定により、円偏光硬 X 線を用いた共鳴磁気反射率法が、厚い基板上に成長した磁気数層膜の元素選択的な磁性を研究する上で有力な研究手法になることを実証した。

磁気物理の成果としては、マクロな磁化曲線の挙動が類似する Fe/FeGd/Fe 三層膜と Co/FeGd/Co 三層膜に共鳴 X 線磁気反射率法を適用して、これらの膜中における Gd 磁気モーメントの磁化過程が全く異なることを明らかにした。Fe/FeGd/Fe 膜では、Gd の磁化過程は磁化ベクトルの一方向回転で進むこと、Co/FeGd/Co 膜では、磁場に垂直な方向の Gd 磁気モーメントは、磁化過程を通じてゼロであり、Gd 磁化ベクトルは時計回り成分と反時計回り成分が等確率で存在することを明らかにした。さらに、Gd 磁気モーメントの回転モードが異なる原因が膜面内方向の磁気異方性エネルギーの大きさおよび角度依存性であることを明らかにした。従来の研究において、理論モデルでは Gd 磁気モーメントが一方向回転することを仮定していたが、実験的に一方向回転であるか否かを決定する有効な測定手段がなかった。新規に開発した共鳴 X 線磁気反射率ヒステリシスの測定により、Gd 磁気モーメントが一方向回転することが実験データにより明瞭に示されたこと、回転方向を決める要因を明らかにしたことは、この分野における新規で重要な研究成果である。

(論文審査結果の要旨)

交換バイアス効果、間接交換結合などは、磁気物性の研究対象として重要であるだけでなく、磁性デバイスの基礎となる現象である。このような現象を示す磁性膜は“ヘテロ構造”をしており、一般に厚い基板上に成長した複数の磁性層や非磁性層によって構成される。ヘテロ構造を構成する埋もれた層の磁性を元素選択的に調べる汎用性のある測定法の開発が、基礎的な磁性研究の分野だけでなく、デバイス開発を行なう立場からも待ち望まれていた。本研究は、このような要請にこたえる測定法として、円偏光硬X線を用いた共鳴磁気反射率法を提案し、元素選択的な磁化過程の測定、元素選択的な磁気構造決定という観点から研究を行なっている。測定例とその結果として以下の3つが示されている。1. Fe/FeGd/Fe 膜や Co/FeGd/Co 膜を試料として、各元素の共鳴X線磁気反射率ヒステリシスを測定し、元素選択的なベクトル磁化過程を決定した。2. Fe/Au 膜と Fe/Au/Fe 膜を試料として、Au L_3 端共鳴X線磁気反射率プロファイルを測定し、二つの試料の Au 層の磁気構造の違いを検出した。3. 強磁性/反強磁性二層膜の反強磁性層界面数原子層に誘起された磁化の磁気ヒステリシス測定に成功し、この方法が、高感度の測定法であることを示した。このような測定例から、共鳴X線磁気反射率法が、実際の磁性デバイス構造に近い形状の磁性膜の磁性を研究する手法として新規で有力な方法であることを実証した。

また、物質科学としての研究成果として、通常の磁化曲線が類似の挙動を示す Fe/FeGd/Fe 膜と Co/FeGd/Co 膜の Gd 磁気モーメントのベクトル磁化過程が全く異なることを明確に示し、その原因が、面内方向の磁気異方性エネルギーの大きさおよび角度依存性の相違であることを明らかにしたことがあげられる。これまでは、特定の元素の磁化ベクトルの回転方向を実験により決定することは困難であったが、共鳴X線磁気反射率ヒステリシス測定により回転方向を決定したことが、この分野の研究に新たな視点を導入した。

本研究によって有用性が実証された共鳴X線磁気反射率法は、磁性物理の基礎研究に利用できるだけでなく、磁性デバイスなどの応用研究にも広く利用することができるため、磁性薄膜研究の発展に大きく寄与することが期待できる。以上の点から、本論文は博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認められる。