

高計数率共鳴 X 線磁気回折システムを用いた Co/Cu/Gd/Cu 人工格子の 磁気構造

Magnetic Structures of Co/Cu/Gd/Cu Multilayers with a Resonant X-ray Magnetic Diffraction System of High Counting Rate

細糸信好、早崎有一、石地耕太朗、児玉謙司、國府竜馬、増井崇人、山崎寛範、橋爪弘雄
N. Hosoi, Y. Hayasaki, K. Ishiji, K. Kodama, R. Kokufu, T. Masui, H. Yamasaki, H. Hashizume

奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology

すでに作製した高計数率磁気散乱計数システムと、Huber 四軸回折計を統合して制御するソフトウェアを開発し高計数率共鳴 X 線磁気回折測定システムを完成した。これを用いて、150 K 付近で磁気補償現象を示す Co/Cu/Gd/Cu 人工格子の Gd L_3 端共鳴磁気回折を室温で測定した。電荷ブレーグピークに対して 10^{-3} 程度の強度を持つ磁気ブレーグ差ピークが観測された。磁気ブレーグ差強度は反射次数に依存する。Gd 層は Co 層の影響を受けて室温で不均一に弱く磁化されていることが明らかになった。

We have developed a software that controls both a high counting rate detector system for magnetic scattering, which we previously made, and a Huber 4-circle goniometer, and completed a measurement system for resonant X-ray magnetic diffraction with high counting rate. Using this system, resonant magnetic diffraction profiles at the Gd L_3 edge were measured at room temperature for a Co/Cu/Gd/Cu multilayer which showed a magnetic compensation at around 150 K. Magnetic difference Bragg peaks were observed with intensities of 10^{-3} order relative to the corresponding charge Bragg peaks. The intensities depend on the Bragg diffraction order. It becomes clear that the Gd layer is nonuniformly and weakly magnetized at room temperature under the influence of the Co layer.

背景と研究目的

強磁性層によって非磁性層に誘起される微小磁気分極は、金属人工格子に見られる磁性層間交換結合などの磁気物性に重要な役割を果たしていると考えられる。しかし、圧倒的に大きな

磁性層の磁気モーメントのために、非磁性層の磁気モーメント、特にその層内分布を観測するのは容易ではない。我々は、共鳴 X 線磁気散乱の元素選択性と位置（深さ）分解能に着目し、Cu K 吸収端共鳴 X 線磁気回折を用いて、Cu を

非磁性層とした強磁性金属人工格子の Cu 層内に誘起された磁気分極を観測することを計画した。磁気散乱回折強度と電荷散乱回折強度の比は 10^{-3} - 10^{-4} 程度と予想される。これは、磁気回折ピークを観測するには、電荷回折ピークを 10^6 - 10^8 カウント以上積算する必要があることを示している。我々は、この条件を満たすために、先に採択されたビームタイムを利用して、アバランシェフォトダイオード (APD) ディテクタと高速フォトンカウンタ SR400 を組み合わせた計数法を開発した(2003A0480- ND3-np/ BL39XU)。最大 10^7 cps での X 線計数が可能である。このテスト時は、APD/SR400 による X 線計数には我々が持ち込んだコンピュータを、Huber ゴニオメータの制御には BL39XU のコンピュータを使用し、両者を RS-232C で結んで測定を行った。しかし、本格的に磁気散乱・回折実験を行うには、これらを統合した測定システムが不可欠であると判断し、ソフトウェアの開発を行った。開発した高計数率共鳴磁気回折測定システムを用いて、Co/Cu/Gd/Cu 人工格子の磁性層、非磁性層の磁気構造の研究を始めた。以下に開発したソフトウェアの概要と、Gd L_3 端共鳴 X 線磁気回折の測定結果を示す。

実験

共鳴 X 線磁気回折実験を効率的に行うには、四軸ゴニオメータの一軸、二軸スキャンコマンドに加えて、各軸を指定の角度に移動する、各軸の現在の位置を取得する、各軸のゼロ点を再定義する、X 線計数率を測定するなどのコマンドが用意されていることが望ましい。また、スキャン中はリアルタイムで散乱プロファイルが図示されることが望ましい。磁気散乱測定では計数データは+ヘリシティと-ヘリシティの対

で測定しなければならない。BL39XU に準備されているソフトウェアは、SR400 と組み合わせて使用することを想定して作られていない。また、上記の条件のすべてを満たしているわけではない。このため、我々は Visual Basic を用いて高速フォトンカウンタ(SR400)と Huber ゴニオメータを制御する磁気回折測定用のソフトウェアを開発した。そのユーザインターフェイスを図 1 に示す (測定中は散乱プロファイルが別ウインドウに表示される)。これによって、ゴニオメータの調整や試料の軸だしを容易に行えるようになった。

Co/Gd 人工格子は Co 層と Gd 層が界面で反強磁的に相互作用するため、Fe/Gd 人工格子と類似の磁気構造変化が期待される¹⁾。Co 層と Gd 層の間に非磁性の Cu 層を挿入していくと、Co-Gd 間の実効的な磁気相互作用は徐々に弱くなっていく。この過程で磁気状態図がどのように変わるか、Co-Gd 間の実効的な相互作用の強さと Cu 膜厚、Cu 磁気分極などの間にどのような関係があるかなどを調べる目的で、Cu 膜厚を変えた試料を作製した。Co(3 nm)/Cu(1 nm)/Gd(3 nm)/Cu(1 nm) 人工格子は 2.5 kOe 磁場中、約 150 K

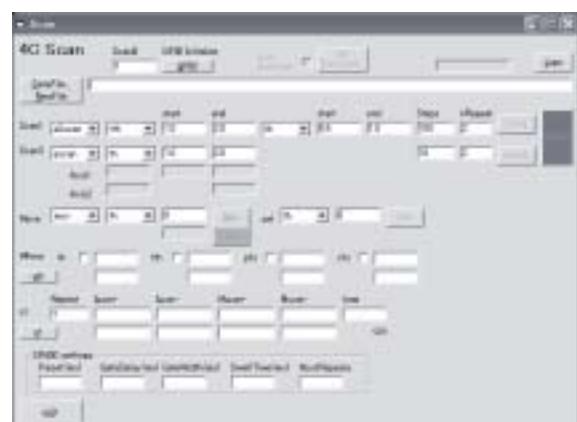


Fig.1. User interface of the software for resonant X-ray magnetic diffraction measurements with a high counting rate counter.

で磁気補償現象を示す。これは、1 nm の Cu 層を通して Co と Gd の間に反強磁性相互作用が働いていることを示唆している。しかし、20 K の M - H 曲線は二段ループを示し、Co-Gd 間の磁気相互作用は弱いというやや矛盾した結果を与える。このような磁気特性を示す Co/Cu/Gd/Cu 人工格子の Gd L_3 端共鳴 X 線磁気回折を室温で測定し、Gd の磁気状態を調べた。磁気散乱成分の分離は、ヘリシティ反転と磁場反転を組み合わせて行った。

結果と考察

図 2 に電荷回折ピークで規格化した磁気回折差シグナル $[I^+(2\theta) - I^-(2\theta)] / [I^+(2\theta) + I^-(2\theta)]_{\text{peak}}$ を示す。 I^+ (I^-) はヘリシティと磁場が平行 (反平行) の場合の回折プロファイルを示す。測定は、永久磁石で 2.5 kOe の磁場を膜面内に印加して行った。この条件では、Co 層は磁気的に飽和している。観測されたピーク強度は 10^{-3} 程度である。また、符号は一次反射が正、二次反射が負である。もし Gd 層が一様に磁化されていれば、ピーク強度は反射次数に依存しない。測定結果は Gd 層が不均一に磁化されていることを示している。Gd 層磁化が飽和に近い状態であれば 10^{-2} 台の大

きさの磁気回折強度が期待される。観測された磁気回折強度は Gd 層磁化が非常に小さいことを示している。Gd/Cu 人工格子の磁気測定から、Gd 層のキュリー温度は 150 K 以下であり、室温では Gd 層は自発磁化を示さないことが分かっている。これらの結果から、Co/Cu/Gd/Cu 人工格子では、1 nm の Cu 非磁性層を通して Co-Gd 間に磁気相互作用が働き、これによって室温でも界面付近の Gd 原子が磁化されていると予想される。今後定量的な解析を進める予定である。

今後の展望

本課題では Cu の共鳴磁気回折を測定する時間がなかったが、我々が開発した APD と SR400 を組み合わせた X 線計数法を用いて APS/ANL で 10^4 台の Cu K 端共鳴磁気回折差ピークの観測に成功している。Cu 層に誘起された微小な磁気分極による共鳴磁気回折を観測することは可能である。Co/Cu/Gd/Cu 人工格子の磁気構造を明らかにするため、今後、温度を変えて Co、Gd、Cu の共鳴 X 線磁気回折プロファイルを測定する予定である。

参考文献

- 1) R. E. Camley and D. R. Tilley, Phys. Rev. B37 (1988) 3413.

論文発表状況・特許状況

- [1] 國府竜馬、石地耕太朗、早崎有一、橋爪弘雄、細糸信好、第 59 回日本物理学会（口頭発表予定）

キーワード

- ・共鳴 X 線磁気散乱

X 線吸収端近傍では電子励起が顕著に起こる

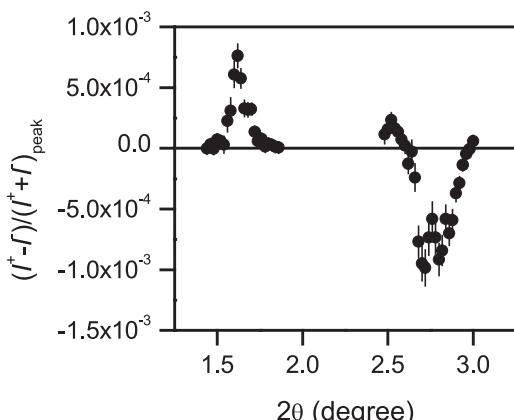


Fig.2. Resonant X-ray magnetic diffraction peaks of a Co/Cu/Gd/Cu multilayer at room temperature in the Co saturation state. The X-ray energy is 7242 eV (Gd L_3 edge).

ため X 線散乱振幅に異常分散項が加わる。このうち、スピンの向きに依存する散乱を共鳴磁気散乱という。磁化反転やヘリシティ反転で電荷散乱振幅と磁気散乱振幅の干渉項を取り出すことができる。