

Ru スペース層によって反強磁性結合した強磁性層のベクトル磁化過程と Ru 層内誘起磁気分極

Vector Magnetization Processes of Ferromagnetic Layers Antiferromagnetically Coupled by a Ru Spacer and Induced Magnetic Polarization in the Ru Layer

細糸信好、児玉謙司、小池 崇、山岸隆一郎

Nobuyoshi Hosoi, Kenji Kodama, Takashi Koike, Ryuichiro Yamagishi

奈良先端科学技術大学院大学

Nara Institute of Science and Technology

Ru スペース層による間接交換結合はハードディスクの性能向上に役立っているが、間接交換結合が生じる原因については、Cu や Au スペース層と異なり、ほとんど分かっていない。我々は、透過法 XMCD では測定が困難である Si 基板 /F1/Ru/F2 構造 (F1, F2 は強磁性層) の元素選択的な磁化測定法を開発し、磁性層のベクトル磁化過程を調べた。また、現在、円偏光が利用できない Ru K 吸収端 (22.117 keV) の共鳴磁気散乱を直線偏光を利用して測定し、Ru 層内に磁気分極が存在することを確認した。

The interlayer exchange coupling through the Ru spacer is utilized to improve the performance of the hard disks. However, unlike the case of Cu and Au spacers, the origin of the interlayer coupling is not known well. We have developed the method of element-specific magnetization measurements for the structure of Si substrate/F1/Ru/F2 (F1 and F2 are ferromagnets), where the transmission XMCD technique cannot be applied, and investigated the vector magnetization processes of ferromagnetic layers. In addition, we have measured the resonant magnetic scattering at the K-edge of Ru (22.117 keV), where no circularly polarized x-rays are now available, with using the linearly polarized x-rays, and confirmed the magnetic polarization in the Ru layer.

背景と研究目的

非磁性層によって隔てられた強磁性層間に働く間接交換結合は、基礎研究の対象として重要であるだけでなく、ハードディスクの磁気ヘッドや磁気記録媒体などの性能向上に役立っている。振動的な間接交換結合を説明するモデルとしては、Cu や Au の電子状態を

念頭においた RKKY モデルや量子井戸モデルがある。Ru も強い反強磁性的な間接交換結合を生じるが、その機構については議論がなされていない。非磁性層の磁気的な電子状態が振動的な間接交換結合の発生に重要な役割を担っていると考えられるが、強磁性層の大きな磁化の影響を受けずに非磁性層の磁性を

実験的に調べるのは容易ではない。我々は、共鳴 X 線磁気散乱が元素選択的であることに着目し、高感度な円偏光共鳴 X 線磁気回折法を開発して Gd/Cu¹⁾, Co/Cu, Fe/Cu, Fe/Au 多層膜などの非磁性層内の磁気分極分布を実験的に調べてきた。より正確に言うと、共鳴 X 線磁気回折で求まるのは、磁気散乱振幅の分布である。この方法は磁気ブラッグ反射を測定するので、周期的な積層構造をもつ多層膜にしか適用できない。他方で、磁気デバイスとして重要なのは基板に数層程度の磁性層や非磁性層が存在する構造である。このような磁気数層構造から磁性情報を引き出すために共鳴 X 線磁気反射率プロファイルや磁気反射率ヒステリシス測定法を開発した [1][2]。本研究課題では、これらの方法を Co/Ru/Co や Co/Ru/Fe 三層膜の磁性層の磁気構造や磁化過程の研究に用いる。

以上の測定はすべて円偏光 X 線を使うことが前提である。現在、BL39XU では 16 keV 以上の円偏光は利用できない。Ru の K 吸収端は 22.117 keV であるので、Ru の磁性を調べるのに従来開発した方法は利用できない。このため、本研究では Ru の磁性を調べるため直線偏光を利用した磁気散乱法を試みることにした。

実験

測定は BL39XU の Huber ゴニオメータを用いて行なった。Fig. 1 に円偏光、Fig. 2 に直線偏光を用いた場合の配置を示す。円偏光を用いる共鳴 X 線磁気反射率測定では、ダイヤモンド移相子を用いて、直線偏光を + あるいは - ヘリシティを持った円偏光に変換する。磁場を X 線進行方向に印加して、ヘリシティを

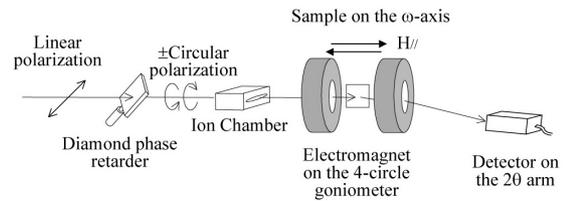


Fig. 1 Experimental settings for magnetic reflectivity and hysteresis measurements with circularly polarized x-rays.

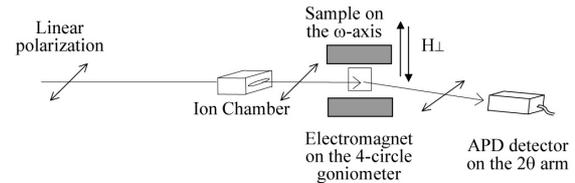


Fig. 2 Experimental settings for magnetic diffraction measurements with linearly polarized x-rays.

1 秒間隔で切り換えながら $\theta - 2\theta$ スキャンを行い、ヘリシティと磁場が平行 (+)、または反平行 (-) の条件で反射率プロファイル $I^{\pm}(2\theta)$ を測定する。検出器は、 3×10^6 cps までの高計数率計測が可能な APD 検出器を用いた。和信号 $I^{+}(2\theta) + I^{-}(2\theta)$ から通常の (純電荷散乱) 反射率プロファイルが、差信号 $I^{+}(2\theta) - I^{-}(2\theta)$ から磁気反射率プロファイルが得られる。磁気反射率ヒステリシスの測定では、 $\omega - 2\theta$ を大きな磁気反射率が得られる角度に固定して、磁場を変化させる。磁気散乱信号が微弱であるため、検出器として Si フォトダイオード検出器を用い、偏光変調法²⁾を利用して S/N を向上させた。

直線偏光を用いる磁気散乱測定では、入射 X 線の偏光ベクトルを散乱面内にとり、散乱面に垂直に磁場を印加する。磁場の方向を切り換えながら $\theta - 2\theta$ スキャンを行い、反射率プロファイル $I^{\pm}(2\theta)$ を測定する³⁾。この配置では、磁気散乱強度は $\sin^2 \theta$ に比例する。したがって、大きな磁気散乱強度を得るには

散乱角 2θ を大きく取る必要がある。この条件を満たすため、Co/Ru 多層膜の hcp Ru 002 反射とその衛星反射を測定の対象とした。

結果、および、考察

磁性層に関する測定

Fig. 3 に Co/Ru/Fe 三層膜の磁気反射率プロファイルを示す。a) は Co 吸収端、b) は Fe 吸収端近傍で測定した。この試料は磁性層が反強磁性結合を示し、残留磁化はほぼ零であることを VSM による磁化測定で確認している。磁気反射率測定は、1 kOe の磁場を印加して磁化が飽和した状態で行なった。電荷散乱に対する磁気散乱強度が最大でも 0.05% 程度しかないため、必ずしも S/N の良いデータではないが、角度依存性を読み取ることができる。今後、電荷散乱プロファイル、磁気散乱プロファイルの解析を行う予定である。

Fig. 4 は Co K 吸収端近傍で測定した磁気反射率ヒステリシスである。生データは +500 Oe と 500 Oe で信号の絶対値が一致しないの

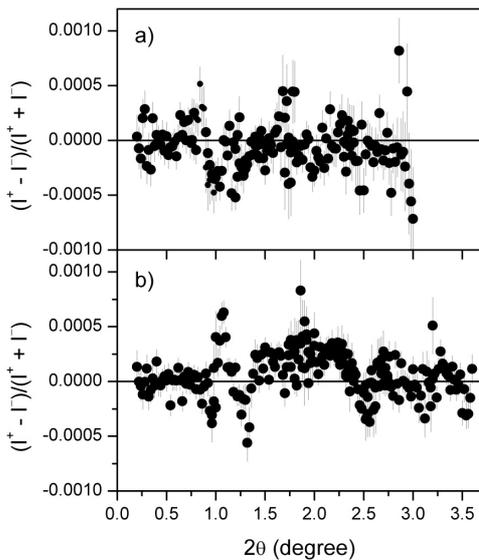


Fig. 3 Resonant magnetic reflectivity profiles of antiferromagnetically coupled Co(50 Å)/Ru(18 Å)/Fe(42 Å) trilayer film measured with x-ray energy of a) 7721 eV (Co K-edge) and b) 7114 eV (Fe K-edge).

で、一定の値を引いて原点回りに対称的なデータが得られるようにした。設定した角度での磁気散乱信号の符号が負であったため、通常の M-H 曲線と符号が異なるが、基本的には Co 層の磁化過程を見ていると考えられる。一つのヒステリシスデータ測定は約 1 時間かかる。Fig. 5 は Fe K 吸収端近傍で測定した同様のデータであり、Fe 層の磁化過程を見ていると考えられる。平行磁化成分は Co 層、Fe 層ともに残留磁化がほとんど零である。反強磁性的な磁気結合の存在を考慮すると、Co 磁化と Fe 磁化は反平行に配列し、ともに

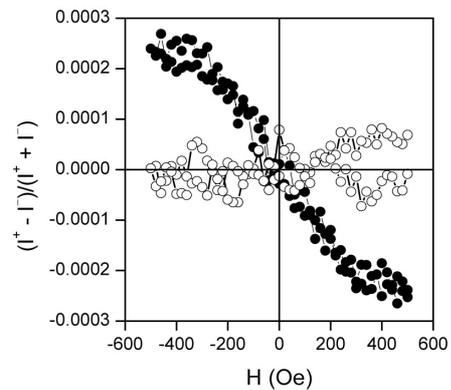


Fig. 4 Resonant magnetic reflectivity hysteresis measured near the Co K-edge at $2\theta = 1.02^\circ$. Black circles correspond to the parallel component of the Co magnetization and white circles to the perpendicular component.

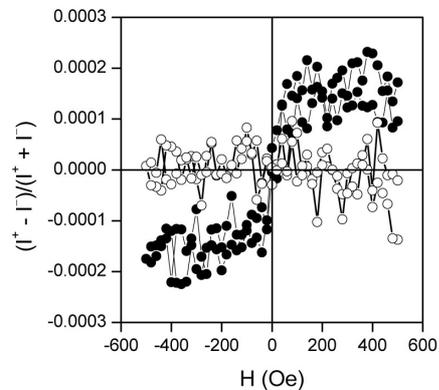


Fig. 5 A similar plot to Fig. 4 measured near the Fe K-edge at $2\theta = 1.48^\circ$. The data correspond to the magnetization of the Fe layer.

磁場と垂直な配置を取っていると考えられる。もし飽和状態から Co 磁化が時計回り、Fe 磁化が反時計回り（あるいはその逆）に回転すると、零磁場状態でも垂直成分が観測されるはずである。しかし、データが示すように、垂直成分は磁場にかかわらずほとんど零である。これは、飽和状態から反平行磁化状態に移行する際に、Co 層、Fe 層にそれぞれ磁区を生じ、時計回りに回転する磁区と反時計回りに回転する磁区が同量存在することを示している。このような挙動を明瞭に観測するには、入射 X 線のビーム径を絞った測定が必要になる。

非磁性層に関する測定

直線偏光を用いた共鳴磁気散乱測定を行うため、サファイヤ基板 /Nb バッファ上に [Co(18 Å)/Ru(16 Å)] 15 多層膜をエピタキシャル成長させた。この試料は、hcp Ru 002 主反射の周りに多層膜の周期構造に由来する衛星反射を生じる。Fig. 6 は +1 衛星反射の共鳴磁気回折を測定した結果である。約 1 時間のスキャンを 8 回測定し、各データを足し合わせた。磁化を反転させるために 2.0 kOe の

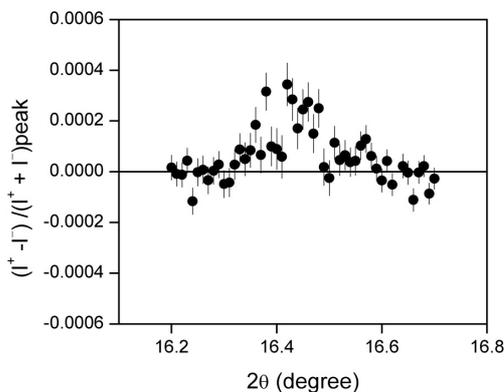


Fig. 6 Resonant magnetic diffraction peak of a Co/Ru multilayer measured with linearly polarized x-rays of 22119 eV (Ru K-edge). The peak is a +1-satellite of the Ru(002) main peak.

外部磁場を印加した状態で測定している。電荷散乱に対して $3.5 \cdot 10^{-4}$ 程度の磁気散乱が明瞭に観測されている。このことは、Ru 層内に磁気分極が誘起されていることを示している。

今後の課題

今回の測定で、共鳴磁気反射率ヒステリシス測定や直線偏光を利用した共鳴磁気回折測定などの測定に成功し、Ru をベースとした交換結合系を研究する手法は十分確立したといえる。反強磁性結合により正味の残留磁化が零になる Co/Ru/Fe 三層膜は、隣り合う磁性層の磁化過程を分離してベクトルの的に測定できる可能性があるが、今回の測定では、多磁区構造の生成のために磁場に垂直な磁化成分を測定することができなかった。この点は、今後試料作製法を改善して、再度測定を行う予定である。Ru に関しては、今後、主反射と複数の衛星反射の磁気回折を測定することにより、磁気分極分布を決定し、Co/Cu や Fe/Au 系のような典型的な振動的間接交換結合系と比較を行なう。

参考文献

- 1) N. Hosoito and T. Ohkochi, J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 3060.
- 2) M. Shuzuki, N. Kawamura, M. Mizumaki, A. Urata, H. Maruyama, S. Goto and T. Ishikawa, Jpn. J. Appl. Phys. **37** (1988) L1488.
- 3) K. Namikawa, M. Ando, T. Nakajima and H. Kawata, J. Phys. Soc. Jpn. **54** (19885) 4099.

論文発表状況・特許状況

- [1] K. Kodama, N. Hosoito, Y. Hayasaki, T.

Ohkochi and K. Ishibashi, SRI2006 (ポスター発表).

- [2] K. Kodama, N. Hosoi, Y. Hayasaki, T. Ohkochi, K. Ishibashi and T. Koike, ICMFS2006 (ポスター発表).

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。