

プログラム名：無充電で長期間使用できる究極のエコ IT 機器の実現

PM名：佐橋政司

プロジェクト名：電圧駆動 MRAM タスクフォース

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平成 2 8 年 度

研究開発課題名：

電圧効果の物理機構解明と高効率化のための指針確立

研究開発機関名：

公益財団法人 高輝度光科学研究センター

研究開発責任者

鈴木 基寛

# I 当該年度における計画と成果

## 1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

プログラム前期に構築した高精度 X 線分光測定装置を活用することで、3d 強磁性金属である Fe および Co の X 線磁気円二色性 (XMCD) スペクトルにおける電圧磁気異方性効果をより高精度に検出する。また、大きなスピン軌道相互作用をもつ重金属元素による磁気異方性増大効果や DMI 相互作用に着目し、Pt における MCD 電圧効果の角度依存性測定や EXAFS 測定を行う。集光 X 線ビームを用いることで、最も安定に電圧印加が行える数  $\mu\text{m}$ ~数  $10\mu\text{m}$  の素子サイズの試料に対応する。

- (1) FePt 試料における Pt の硬 X 線 MCD 測定から Pt の電子状態変化の角度依存性を決定し、第一原理計算とも照合することで電圧磁気異方性効果における 5d 金属の役割を解明する。
- (2) FePt 試料における Pt の EXAFS の電圧依存性測定を行い、界面での原子位置変化の有無を 0.1 Å 以下の精度で明らかにする。
- (3) Fe 試料における高精度な軟 X 線 MCD 測定を行い、スペクトルにおける電圧磁気異方性効果を検出する。1%以下の MCD 信号の変化を検出可能とし、電圧による変化が測定精度以下であった場合には、ホール数や磁気モーメント変化の上限値を決定する。

## 2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

### 2-1 進捗状況

#### (1) FePt 試料における Pt の硬 X 線 MCD 測定

集光 X 線ビームおよび前年度までに開発した高精度 X 線分光測定装置を利用し、直径 80 ないし 160  $\mu\text{m}$  の比較的小さいサイズの素子に対しても良好な統計精度の XMCD スペクトルを取得することができた。XMCD 測定の角度依存性から単原子 Pt 膜の磁気モーメントの異方性を評価した。また、前年度に実験結果を得た FePt L1<sub>0</sub> 系について、理論グループの白井先生、辻川先生らの第一原理計算と実験結果との照合を行い、定性的によい一致を得た。以上のように、計画通り順調に進捗している。

#### (2) FePt 試料における EXAFS 測定

前年度までに開発した高精度 X 線分光測定装置は、EXAFS 測定においても有効であった。電圧印加条件での EXAFS 測定を行い、界面での原子位置変位を  $\pm 0.02$  Å の精度で評価した。当初の目標よりも数倍高い精度が得られた。 $\pm 2.6$  V の電圧印加 ( $\pm 0.18$  V/nm の電界に相当) による界面 Pt 原子位置の変位はこの実験精度以内であり、Fe/Pt/MgO 接合の電圧磁気異方性効果には界面 Pt 原子の位置変化が伴わないことを明らかにした。以上のように計画どおり順調に進捗している。

#### (3) Fe 試料における高精度軟 X 線 MCD 測定

前年度に導入した大面積・多素子蛍光 X 線検出器、および今年度に導入した高計数率パルス信号処理回路を組み合わせることで、軟 X 線 MCD スペクトル測定の統計精度を大きく向上した。XMCD

信号の 0.2% の変化まで検出可能となり、目標とした 1% よりも格段に高い性能が実現された。本手法を Fe/MgO 接合試料について適用し、印加電圧による XMCD 信号強度の変化を測定した。その結果、向上した測定精度内でも有意な変化は観測されなかったが、電圧変化の上限値として  $\pm 0.1\%$  以内であることを明らかにした。以上のように、計画通り進捗している。

## 2-2 成果

(1) FePt 試料における Pt の硬 X 線 MCD 測定  
 磁性層として Pt が 1 原子層のみ含まれる Fe(0.5 nm)/Pt(0.2 nm)/MgO/SiO<sub>2</sub> 接合試料を用いることで、より直接的な界面電子状態の観察に取り組んだ。また、この試料では従来のポリイミドに代わり SiO<sub>2</sub> を絶縁層として用いており、界面電界のより定量的な評価が可能である。この試料について、Pt L 吸収端での XMCD スペクトルの角度依存性を測定した(図 1)。この結果から面直および面内磁化方向に対する Pt 磁気モーメントをの異方性を決定した。電圧印加条件下での Pt の元素選択的磁化曲線から電圧誘起磁気異方性の発現を確認した(図 2)。XMCD スペクトルの電圧変化についても予備的な結果が得られており、これまで観察した FePt L<sub>10</sub> 系と同じ傾向の変化(負電圧でモーメントが増大)を示すことが分かった。

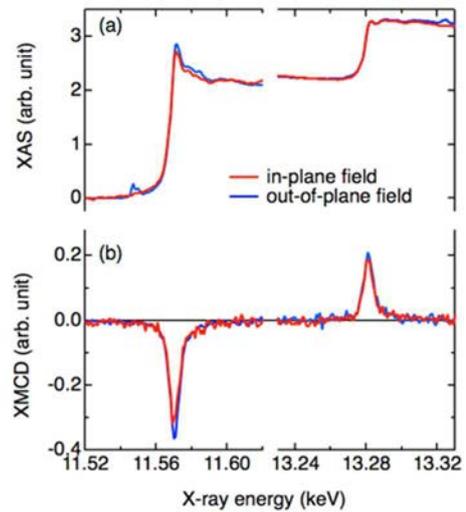


図 1: Fe(0.5 nm)/Pt(0.2 nm)/MgO/SiO<sub>2</sub> 接合試料の Pt L<sub>2,3</sub> 吸収端での (a)XAS および (b)XMCD スペクトル。

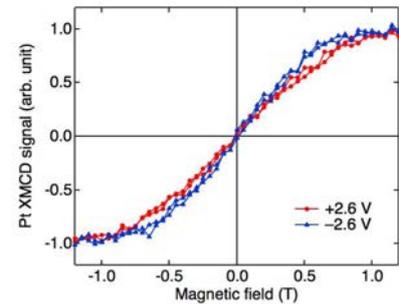


図 2: Fe(0.5 nm)/Pt(0.2 nm)/MgO/SiO<sub>2</sub> 接合試料の Pt の元素選択的磁化曲線。

(2) FePt 試料における EXAFS 測定  
 Fe(0.5 nm)/Pt(0.2 nm)/MgO/SiO<sub>2</sub> 接合試料に対して、電圧印加条件下での EXAFS 測定を行った。得られたスペクトルをフーリエ変換および構造モデルを用いたフィッティングによって解析し、Pt 原子周辺の局所構造変化を評価した。その結果、面内の Pt-Pt 原子間距離はバルク Pt および L<sub>10</sub> FePt 合金の値とよく一致した。一方で Pt-Fe 原子間距離は L<sub>10</sub> FePt の値よりも小さく、膜面垂直方向に静的な構造緩和が生じていることが分かった。図 3 に示すように、 $\pm 2.6$  V ( $\pm 0.18$  V/nm) の電圧印加による原子間距離の変化は、Pt-Pt および Pt-Fe ともに 0.015 Å 以内であった。さらに、Pt-O、Pt-Mg 原子間距離の電圧による変化も測定精度である  $\pm 0.02$  Å 以内であることを明らかにした。このことから、FePt/MgO 接合での電圧磁気

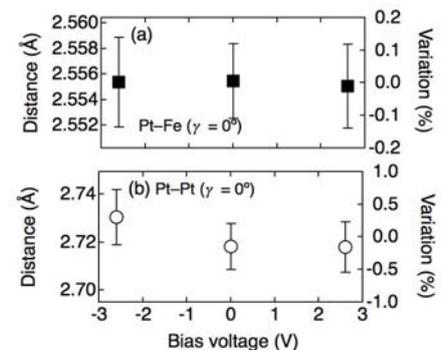


図 3: EXAFS 測定によって評価した、Fe(0.5 nm)/Pt(0.2 nm)/MgO/SiO<sub>2</sub> 接合試料の原子間距離の電圧依存性。(a) Pt-Fe 原子間距離、(b) Pt-Pt 原子間距離の変化。

異方性効果は界面での原子変位を伴わない、純粋な電子状態変化であることが示唆された。

### (3) Fe 試料における高精度軟 X 線 MCD 測定

高精度軟 X 線 MCD 測定の開発を進め、XMCD 信号の $\pm 0.1\%$ の微小な変化を検出することを可能とした。この手法を用いて Fe/MgO 接合試料について Fe L 吸収端での軟 X 線 MCD 測定を行った。測定精度が大幅に向上したにもかかわらず、電圧印加による MCD 信号の有意な変化は観測されなかった。この結果から、Fe の軌道磁気モーメントの電圧による変化の上限値を、 $\pm 0.18$  V/nm の印加電界に対して $\pm 0.3\%$  ( $\pm 5 \times 10^{-4} \mu_B$ )以内と見積もった。この値は、磁気異方性エネルギーが軌道磁気モーメントの変化に相当するとした Bruno モデルからの予測と一致している。

## 2-3 新たな課題など

重元素である Bi を含む FeBi 薄膜試料に対して硬 X 線 MCD 分光測定を試行した。しかし、MgO 基板からのコンプトン散乱が微弱な Bi からの蛍光 X 線信号に重畳し、大きなバックグラウンドとなった。そのため、Bi の XMCD スペクトルを精度よく測定することはできなかった。これは、Bi を観察するためには従来の Pt よりもより高い光子エネルギー X 線を用いる必要があり、コンプトン散乱強度が大幅に増大するためである。これを避けるには、軽元素である Mg や O を含まない材料を基板として用いるか、厚さ数ミクロン以下の非常に薄い基板を使用する方法が考えられる。

## 3. アウトリーチ活動報告

平成 28 年度に、研究開発として行ったアウトリーチ活動はない。