

論文の内容の要旨

論文題目 **Study on electric-field control of magnetism
in transition metal/oxide stacked structures**
(遷移金属/酸化物積層構造における磁性の電界制御に関する研究)

氏 名 平井 孝昌

背景

電界効果とは絶縁層を介して材料に電界を印加し、材料表面の電子濃度や電子構造を変化させることで材料物性を制御する技術である。一般的には半導体トランジスタで広く利用されている電界効果であるが、強磁性体を材料とした際の電界による物性制御、すなわち磁性の電界制御も、強磁性金属材料を中心に精力的な研究が行われている。この手法の最大の特徴は電氣的制御でありながら電荷の充放電分の電力しか要しないため、従来手法である電流磁場やスピントランスファーを用いた磁化制御手法に比べて極めて低い電力消費で駆動することにある。さらに近年には、磁場や電流では制御ができなかったキュリー温度などの磁気パラメータの電界制御も観測されており、電界効果による磁性制御は新たな磁気現象の制御技術としても注目を集めている。しかし、磁性の電界制御の機構は未だ不明瞭な点も多く、界面効果な故か従来制御手法よりも制御量が小さい現状にある。よって、本博士論文では、遷移金属/酸化物絶縁層の超薄膜積層構造を有する系において、電気輸送測定や磁化測定、X線測定等を通して、様々な磁気現象の制御と機構解明及び効果増大のための材料設計方針の確立を目的として研究を行った。

研究結果

I. Pt/酸化物構造における磁気異方性の電界制御

磁気異方性は磁性体の磁化容易方向を決定するパラメータであり、磁気異方性の電界制御は無磁場下における磁化反転を誘起する手法として期待されている。一般的には強磁性金属 (Fe, Coなど) が電極材料に用いられるが、近年、強磁性層と絶縁層間に非磁性重金属を挿入した系でも磁気異方性の電界制御が取り組まれている。本章では強磁性Coと酸化物間に数原子層のPtを挿入した系において、室温ではCo電極と同程度の磁気異方性の電界制御効率を示しながら、低温ではCo以上の効率を示し7倍程度急増することを見出した。さらに、Co電極では生じない電極膜厚依存性を観測した。さらに、Ptに接触する酸化物種を変えることで、キャパシタンスの差以上に電界制御効率が大きく変化することを初めて明らかにした。また、X線分光測定によるPt内部の磁気モーメントの調査からは、Pt界面の電子状態が隣接する酸化物種側を変えることでも巨大に制御できる可能性を見出した。

II. Co/HfO₂構造における磁気異方性/磁気相転移の電界制御

電界効果デバイスでは、一般的な機構である電荷蓄積効果による界面電子状態変調とは別に電気化学的な効果 (例. 酸化還元効果) も生じ得るとされている。この2つの効果は駆動速度や電界変調量などが大きく異なるため、これらの支配度を制御し、切り分けることが重要な課題となっている。本章では、ホール測定と磁化測定による磁気特性評価と高周波電圧によるキャパシタンス測定から、酸化物絶縁層HfO₂の作製温度を変えることで、電荷蓄積効果を起源とする素子と電気化学効果を起源とする素子が切り替わることを明らかにした。

III. Co/HfO₂構造における交換バイアスの電界制御

交換バイアス効果とは強磁性体と反強磁性体の接合系において発現し、系に一方方向の磁気異方性が付与される現象である。交換バイアス磁場の電界制御は磁気異方性の電界制御同様、無磁場磁化反転への応用が期待されているが、現状はマルチフェロイック物質などを用いた電気磁気効果由来の交換バイアス制御しか報告されていない。本章では、表面自然酸化したCo電極において、交換バイアス磁場の電界制御を観測した。さらに、電界効果の振舞いと温度依存性及び磁気モーメントの調査から、本機構が電気化学効果や電気磁気効果ではなく、電荷蓄積による電子状態変化であることを明らかにした。

IV. Co/Pd/HfO₂構造におけるスピン軌道トルクの電界制御

スピン軌道トルク (SOT) とは非磁性金属/強磁性体構造に対し膜面内方向に電流印加した際、スピンホール効果やラシュバ効果を通して強磁性体にスピン注入が生じ、磁化

にトルクが生じる現象のことを指す。これは電界効果と並んで次世代の磁化反転手法として期待されており、SOTの増大に向けた原理の理解が求められている。SOT増大の指針の一つとして非磁性金属と強磁性体間における酸化物層(酸素イオン)の挿入が提唱されている。本章では、Pd/Co/Pd系に電気化学効果が生じるHfO₂絶縁膜を用いて電界を加え、SOTの測定を行った。上部Pdの膜厚依存性から、一般的な理解である膜厚変化によるスピホール効果由来のSOT変調とは別に、Co/PdまたはPd/HfO₂界面への酸素導入によるスピン蓄積由来のSOT変調が大きく寄与していることを示唆する結果を得た。