

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 平井 孝昌

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、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電力消費でデバイス駆動できることにある。しかし、磁性の電界制御の機構は未だ不明瞭な点が多く、従来制御手法よりも制御量が小さいという課題がある。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、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行った研究について報告している。

「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)」と題された本博士論文は七章から構成されている。第一章では、スピントロニクス及び磁性の電界効果の先行研究について詳しくまとめ、議論している。

第二章では、試料作製方法や基本的な評価手法を説明している。

第三章では、Pt/酸化物構造における磁気異方性の電界制御について報告している。磁気異方性は磁性体の磁化容易方向を決定する物理量であり、そ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組み込まれている。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見出した。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大に制御できることを示唆する結果を得ている。

第四章では、Co/HfO₂ 構造における磁気異方性/磁気相転移の電界制御について述べている。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も生じ得る。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・電気化学効果が制御できることを示した。

第五章では、Co/HfO₂ 構造における交換バイアスの電界制御について議論している。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ている。

第六章では、Co/Pd/HfO₂ 構造におけるスピン軌道トルクの電界制御について報告している。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ンホール効果由来の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変調の存在を示唆する結果を得た。

以上をまとめると、本論文は酸化物種により誘電率に関わらず電界効果やSOTが大きく変化することや、交換バイアスが電界により変化することなど、これまで報告のないチャレンジなテーマに取り組み、新たな知見をもたらしたものと評価できる。得られた成果は物性科学・物理工学の発展への貢献が期待されるものであり、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。