

審査の結果の要旨

氏名 姜 淼

本論文は、**Ultra-efficient full magnetization switching by spin-orbit torque in a ferromagnetic single layer**（単一強磁性層におけるスピントルクによる超高効率磁化反転）と題し、全6章より成り、英文で書かれている。

本論文では、III-V 族強磁性半導体（Ferromagnetic Semiconductor）である (Ga,Mn)As の単結晶垂直磁化膜を作製し、(Ga,Mn)As の単一強磁性膜に電流を流すことでスピントルク（Spin-orbit torque, SOT）を発生させ、SOT によるきわめて高効率・低電流密度で磁化反転を起こさせることに成功し、その機構を明らかにした研究成果を述べている。

第1章は「Introduction（序論）」であり、スピントロニクスと不揮発性メモリ技術、書き込みのための磁化反転の手法としてスピントルク（SOT）に関する研究背景、本論文の目的を述べている。その中で先行研究について述べ、本論文の位置づけと研究目的を示している。

第2章は「Efficient full SOT switching in a (Ga,Mn)As single layer ((Ga,Mn)As 単一層における効率的な SOT による磁化反転)」と題し、強磁性半導体(Ga,Mn)As 垂直磁化膜のエピタキシャル成長と物性評価、磁化反転測定のためのホール素子の作製、SOT による磁化反転の測定と SOT の評価、および Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式による磁化ダイナミクスの計算モデルについて述べている。

第3章は「Temperature and external magnetic field dependence on the SOT switching in a (Ga,Mn)As single layer ((Ga,Mn)As 単一層における SOT 磁化反転の温度依存性と外部磁場依存性)」と題し、厚さ 7nm の(Ga,Mn)As 単一垂直磁化膜に電流を流すことで SOT に磁化反転を起こさせ、その温度依存性と外部磁場依存性を系統的に測定した結果について述べている。通常の SOT による磁化反転では、強磁性金属(FM)層とスピントルク相互作用が強い非磁性金属(NM)層から成る二層構造において NM 層に電流を流すことで発生した純スピントルクを FM に注入ことによって FM の磁化を反転させるが、本研究では単一の(Ga,Mn)As 強磁性層に電流を流すだけで磁化反転を起こさせることに成功した。また、 180° 磁化反転を起こす臨界電流 J_C が $3.4 \times 10^5 \text{ A cm}^{-2}$ というこれまでの SOT 磁化反転で報告された J_C に比べて 2桁程度も低いきわめて高効率の磁化反転を達成した。このような高効率の SOT 磁化反転は、(Ga,Mn)As におけるバルク結晶構造の非

対称性による Dresselhaus スピン軌道相互作用、高品質単結晶、高いスピン偏極率によって得られたものであると理由づけている。

第4章は「Artificial suppression of the field-like term (フィールドライク・トルクの人工的抑制)」と題し、前章の研究を拡張し、を示した。(Ga,Mn)As 単一垂直磁化膜の膜厚を 5 ~ 20 nm の範囲で変えた素子を作製し、系統的に SOT 磁化反転を調べた。膜厚を厚くすると J_C は低くなり 15 nm で $J_C = 4.6 \times 10^4 \text{ A cm}^{-2}$ という前章の最小値よりさらに低い値が得られた。膜厚依存性と電流の方向依存性の実験および LLG 方程式を用いた解析から、高効率の SOT 磁化反転のためには、ダンピングライク・トルク(damping-like torque, DLT)を増強しフィールドライク・トルク(field-like torque, FLT)を抑制することが有効であること、(Ga,Mn)As の膜厚が厚い場合には電流の不均一性によるエルステッド磁場によって FLT が低減したため非常に低い J_C が得られた可能性を示唆した。

第5章は、「Electrical field control of SOT switching (電界による SOT 磁化反転の制御)」であり、前章までに用いた SOT 磁化反転測定のためのホール素子にゲート電極を付けた電界効果トランジスタ構造を作製し、ゲート電圧 V_g 印加により、 J_C が変化する (V_g が+の場合には J_C が減り、 V_g が-の場合には J_C が増える) ことを示した。

第6章は、「Conclusions and outlook (結論と展望)」であり、本論文で得られた結果のまとめと今後の展望を述べている。

以上これを要するに、本論文では、不揮発性メモリなどの磁気デバイスおよびスピントロニクスデバイスで不可欠な磁化反転を効率よく行う方法として有望なスピン軌道トルク(SOT)による磁化反転現象に着目し、強磁性半導体 (Ga,Mn)As の垂直磁化膜を作製し、(Ga,Mn)As 単一磁化膜に電流を流すことで SOT を発生させ、従来より 2 桁以上も低い電流密度できわめて高効率の磁化反転を起こさせることに成功して、その機構を明らかにしたものであり、スピントロニクスおよび電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は、博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。