

氏 名	Qingyi Xiang
学 位 の 種 類	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 8809 号
学位授与年月日	平成 30年 9月 25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審 査 研 究 科	数理物質科学研究科
学 位 論 文 題 目	Voltage-Controlled Magnetic Anisotropy and Spin-Dependent Resonant Tunneling in Cr/Ultrathin-Fe/Oxide Quantum Wells (Cr/Fe 超薄膜/酸化物量子井戸における電圧制御磁気異方性とスピン依存共鳴トンネル効果)

主 査	筑波大学教授(連係大学院)	博士(工学)	三谷 誠司
副 査	筑波大学教授(連係大学院)	Ph. D.	宝野 和博
副 査	筑波大学教授(連係大学院)	理学博士	宇治 進也
副 査	筑波大学教授	博士(工学)	柳原 英人

論 文 の 要 旨

本論文は、次世代の磁気ランダムアクセスメモリの基礎技術を創出するために、強磁性金属を用いた量子井戸構造や、それを用いた垂直磁化の強磁性トンネル接合を創製し、垂直磁気異方性の電圧制御やスピン依存共鳴トンネル特性を調べたものである。コンピューティングデバイスの低消費電力化や人工知能関連の計算処理の重要性が高まってきていることから、それに資する磁気ランダムアクセスメモリの次世代技術を開拓し得る本研究は、スピントロニクス分野の重要テーマの一つと位置付けることができる。

磁性を用いた不揮発メモリ素子の高集積化や高速動作において、垂直磁気特性を有することはほぼ必須となりつつあり、本研究では、まず、高品位の Cr/Fe/酸化物系の量子井戸において垂直磁化を実現することを行っている。酸化物として、当該分野で一般的な MgO を用いることに加え、近年、新規酸化物バリア層として注目を集め始めているスピネル系酸化物(MgAlO)を用いることも検討している。MgAlO は Fe との格子整合性に優れ、実際に本研究では MgO の場合よりも明瞭な量子井戸効果を観測することに成功している。垂直磁気異方性については、MgO の場合と比較してやや小さいが、約 $1\text{MJ}/\text{m}^3$ という十分大きな垂直磁気異方性エネルギーを実証している。Cr/Fe/MgAlO 構造を構成要素とする強磁性トンネル接合での量子井戸効果に関しては、電流電圧特性に量子井戸準位を介した明瞭なコンダクタンスピークを得ていることに加え、量子井戸効果によるトンネル磁気抵抗効果の増大現象も確認している。この量子井戸によるトンネル磁気抵抗効果の増大は、以前より理論的に予測されており、ある程度の実験結果も

報告されてきた。しかしながら、本研究では初めて室温においてゼロバイアス条件よりも大きな磁気抵抗効果を有限バイアスで実現しており、世界に先駆ける成果となっている。

この研究で得られた高品位量子井戸を内包する強磁性トンネル接合では、トンネル接合の電気伝導における興味深い現象も見出されている。一般にトンネル接合の電気伝導では、その温度係数(TCR)は負であるが、それが共鳴準位付近で符号反転する様子が観測されている。コヒーレントトンネル効果と呼ばれる現象が共鳴準位近傍に集中していることから理解することが可能であり、応用技術に向けた新機能創成だけではなく、基礎的な物理現象の理解という意味でも成果を得ている。

本論文のハイライトは得られた垂直磁気異方性に及ぼす電圧効果であり、Cr/Fe/MgAlO (または MgO) /Fe 系トンネル接合において系統的な測定評価を行っている。まず、Cr/Fe/MgO/Fe 系の先行研究と同様の結果を得るとともに、より集中的な測定評価により、Cr/Fe/MgO/Fe 系での非線形の電圧制御磁気異方性特性が 0.1V 近辺での磁気異方性の極小現象に起因することを解明している。更には、Cr/Fe/MgAlO/Fe 系トンネル接合で電圧制御磁気異方性特性が量子井戸ピークと関連して著しい非線形性を示すことを発見している。十分な発現メカニズムの解明には至っていないが、新規性の高い現象を見出すとともに、局所的な特性としては 400 fJ/Vm に迫る非常に大きな電圧制御磁気異方性特性を得たものである。

論文の構成としては、第1章はイントロダクションであり、トンネル磁気抵抗効果や垂直磁気異方性の基礎について述べている。加えて、従来の磁性体を用いた量子井戸の研究に言及するとともに、量子井戸を介したスピン依存共鳴トンネル効果の基礎について記述している。また、磁気異方性の電圧制御とは何かということについて言及し、応用に向けてどのような特性が必要であるかについて述べている。

第2章は、実験方法であり、薄膜成長、微細加工、構造評価法、磁気測定法、トンネル磁気抵抗やトンネル磁気抵抗効果を用いた電圧制御磁気異方性特性の評価方法などを概説している。

第3章は酸化物バリアに MgO を用いた場合の結果がまとめられている。特段の新規性はないが、先行研究を再現することに加え、一層詳しい測定を行うことで非線形現象の起源を議論している。電圧制御磁気異方性特性の測定評価方法は組み入っているが、ここで従来の研究をよく再現したことで、本研究全体の精度・信頼性が示されている。

第4章では、Cr/Fe/MgAlO 構造の界面垂直磁気異方性の結果をまとめている。アニール温度依存性などの基礎データを示す他、関連する物性として、磁気ダンピングの結果も示してある。

第5章は、Cr/Fe/MgAlO/Fe 系トンネル接合の量子井戸効果とトンネル磁気抵抗効果をまとめている。量子井戸に起因するコンダクタンスの共鳴ピークについて詳しく示すとともに、トンネル磁気抵抗比のバイアス電圧依存性を系統的に測定評価することで、共鳴トンネル効果によるトンネル磁気抵抗比の増大という重要な結果を得ている。トンネルコンダクタンスのバイアス電圧依存性および温度依存性の系統的なデータも示し、電気抵抗の温度係数(TCR)の特異なバイアス電圧依存性に言及している。

第6章は、この研究のハイライトであり、Cr/Fe/MgAlO/Fe 系トンネル接合による電圧制御磁気異方性に関する実験結果がまとめられている。垂直磁気異方性の Fe 層厚依存性や、量子井戸準位と強い相関をもつ電圧制御磁気異方性の非線形現象の系統的な測定結果が示されている。種々の解析結果や検討内容も記述されている。

第7章は本論文の結論である。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

本論文では、界面磁気異方性の電圧効果に及ぼす量子井戸の効果を実験的に明らかにしており、非常に新規性の高い成果を得ている。電圧制御磁気異方性特性は、未解明な部分が多く、現在理論も含め基礎研究が活発に行われているが、本研究はこの問題全般への寄与が高いと思われる。同時に、電圧制御磁気異方性は次世代の磁気ランダムアクセスメモリ技術として注目を集めており、本研究で得た 400 fJ/Vm に迫る大きな効果は応用面からの重要性も持ち合わせていると考えられる。

主題となる電圧制御磁気異方性のみならず、大きな界面磁気異方性の実現、高品位量子井戸構造の創成、量子井戸によるトンネル磁気抵抗効果の増大などの成果もスピントロニクス分野での目立った成果であり、論文全体として高い価値が認められる。加えて、上記の成果は Fe 層厚を連続的変化させるという薄膜成長技術を研究にうまく取り込んだこと、電圧制御磁気異方性特性の測定方法を効率的に行う方法確立したことなど、実験技術を進歩させたことにもよっている。界面磁気異方性の電圧効果に関して、幅広い基礎的実験から新規現象の発見までを収めた特筆すべき論文である。

〔最終試験結果〕

平成30年8月4日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。