

氏名	具志 俊希
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第 8953 号
学位授与年月日	平成 31年 3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	Mn ₄ N thin films for spintronics applications based on current-induced domain wall motion (電流誘起磁壁移動に基づくスピントロニクス応用に向けた Mn ₄ N 薄膜の物性評価)

主査	筑波大学教授	博士(工学) 末益 崇
副査	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	博士(工学) 柳原 英人
副査	筑波大学教授	博士(工学) 大野 裕三

論 文 の 要 旨

審査対象論文は、レアアースを使わない新しいスピン移行トルク材料の候補として、フェリ磁性体 Mn₄N の可能性を追求するものである。第 1 章では、本論文の背景としてスピントロニクス研究の現状と課題が述べられ、高速動作かつ低消費電力を可能とする磁気メモリの実現には、垂直磁気異方性を示し、さらに、自発磁化の小さい磁性体が必要であることが述べられ、本論文の目的が示されている。スピントロニクスにおいては、磁性体の磁気モーメントの向きの制御が重要であり、約 10 年前までは外部磁場で磁気モーメントを制御していたが、現在はスピン偏極した電子の注入によるスピン移行トルクへと変わっており、近い将来、スピン軌道トルクによる磁気モーメントの制御へと変わることが予想されていると述べられている。しかし、そのような磁性体には、Gd や Nd などのレアアースが使われており、元素戦略の視点から問題となっており、このため、垂直磁気異方性を示し、且つ、自発磁化が比較的小さく、資源の豊富な元素で構成されるフェリ磁性体 Mn₄N に着目したと述べられている。

第 2 章では、本論文に登場する磁壁に関連して、第 3 章より登場する専門用語の意味と物理が詳しく解説されている。磁壁に蓄えられるエネルギーの表式が示され、磁壁がどのように生成するか、さらに、スピン移行トルクおよびスピン軌道トルクの物理が詳しく解説されており、磁性細線における電流誘起磁壁移動の報告例が紹介されている。特に、自発磁化が小さく、スピン分極率が大きい磁性材料がスピン移行トルクに適していることの理由が詳しく説明されている。

第 3 章では、分子線エピタキシー法により、厚さ 10nm の Mn₄N 膜を MgO(001)および SrTiO₃(001)基

板にエピタキシャル成長し、結晶性および磁気特性の視点から両者が比較されている。まず、 ω スキャン X 線回折法により、基板面直方向の c 軸の配向性が詳しく調べられ、 Mn_4N 膜との格子不整合率が小さい $\text{SrTiO}_3(001)$ 基板において、002 反射の半値幅が 0.14 度と小さく、 $\text{MgO}(001)$ 基板上の結果と比べて約 1/20 の大きさであることが明らかにされている。また、磁気特性の評価において、 $\text{SrTiO}_3(001)$ 基板上の Mn_4N 膜では角型比が 1 であり、磁化の反転が急峻であること、一方、 $\text{MgO}(001)$ 基板上の Mn_4N では 0.8 であることから、基板により磁気特性が異なることが明らかにされている。さらに、 Mn_4N 膜の磁区サイズを調べたところ、 $\text{MgO}(001)$ 基板では数 μm であるのに対し、 $\text{SrTiO}_3(001)$ 基板では数 mm と 3 桁も違うことが明らかにされている。

第 4 章では、 $\text{SrTiO}_3(001)$ 基板上にエピタキシャル成長した Mn_4N 膜を Ar イオンミリング装置により、幅 $1\mu\text{m}$ の磁性細線に加工し、パルス電流を流すことで磁壁の移動を行い、移動速度を評価した。その結果、電流密度が $1.2 \times 10^{12} \text{A/m}^2$ において、磁壁の移動速度は 935m/s に達した。この大きさは、外部磁場を印加せず、また、スピン軌道トルク等の補助を受けない場合の室温で得られた値として、世界最高速であると述べられている。また、移動度も $7.1 \times 10^{-10} \text{m}^3/\text{C}$ に達し、この値も従来値よりも大きいことが示されている。さらに、電気伝導率のスピン分極率については、0.8 と見積もられることが示された。この値も、磁性材料の中で、極端に大きいといえる。

第 5 章では、磁壁のさらなる高速移動の可能性として、 Mn_4N に Ni をドーピングして、Mn 原子の一部を Ni 原子に置換した $\text{Mn}_{4-x}\text{Ni}_x\text{N}$ 膜の分子線エピタキシー法による薄膜成長と磁気特性が述べられている。 Mn_4N はフェリ磁性体であり、単位胞で見た場合、角と面心位置の Mn 原子は、磁気モーメントが逆向きになっている。Ni 原子を添加したところ、 $x=0.25$ のとき、自発磁化は Mn_4N 膜の 1/10 にまで極端に低下し、異常ホール効果測定により、 $x=0.1$ と 0.25 では、ホール電圧の符号が反転したことが示されている。この現象は、Ni 原子が角位置の Mn 原子を置換したことで説明できることが示され、 $x=0.18$ で磁化が 0 になること、つまり、このときに磁壁の移動速度は格段に大きくなると予想されると述べられている。また、Ni 原子がどのサイトを置換したかについては、X 線磁気円二色性測定により明らかにできると説明されている。

以上より、フェリ磁性体 Mn_4N 膜で、他の材料では到達できない高い磁壁移動速度を達成し、さらに、磁壁移動速度が大きくなる可能性を示したことで、 Mn_4N が新規スピントロニクス材料として高い可能性をもつことが示されたと結論付けられている。

審 査 の 要 旨

[批評]

ありふれた元素で構成される Mn_4N において、外部磁場等のアシスト無しに、世界最高速のスピン移行トルクが示されたことは高く評価できる。これにより、スピン移行トルクが再び見直される可能性が高いといえる。 Mn_4N は昔から知られている材料であるが、薄膜成長の歴史は浅く、特に、 Mn_4N との格子不整合率が小さい $\text{SrTiO}_3(001)$ 基板を用いた研究は初めてであり、これにより、異方性磁気定数の大きな高品位の Mn_4N エピタキシャル膜の成長に成功したといえる。

Mn_4N よりも格段に高速の磁壁移動が期待されると述べられた $\text{Mn}_{4-x}\text{Ni}_x\text{N}$ 膜については、自発磁化の大きさは、 $x=0.2$ 付近で磁化補償点が存在すると考えられる。このため、磁化の視点からは、Ni 添加により磁

壁の高速動作が期待できる。しかし、Ni 添加によりスピン分極率が低下することも考えられるため、今後の研究の進展が待たれる。

〔最終試験結果〕

平成31年2月14日、数理物質科学研究科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。