

氏名	Du Ye
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第 7929 号
学位授与年月日	平成 28年 9月 23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	

Current-perpendicular-to-plane Giant Magnetoresistance Devices Using Heusler Alloy Ferromagnetic Layers and New Materials as a Spacer Layer

(ホイスラー合金強磁性層と新規スペーサー層を用いた垂直電流磁気抵抗素子)

主査	筑波大学教授	Ph.D.	宝野和博
副査	筑波大学教授	博士(工学)	三谷誠司
副査	筑波大学教授	理学博士	関口隆史
副査	筑波大学教授	理学博士	黒田眞司

論 文 の 要 旨

審査対象論文は次世代高密度ハードディスクドライブの再生ヘッド用磁気センサーとして期待されている面直電流磁気抵抗素子の磁気抵抗比を、高いスピン分極率をもつ強磁性ホイスラー合金と新規スペーサー材料を組み合わせ高出力化した研究結果を報告している。本論文は7章から構成されている。まず、第1章は序論であり、本研究の背景となるデータストレージ（磁気記録）における巨大磁気抵抗素子の役割が述べられている。かつてハードディスクの再生ヘッド用磁気センサーとして使われた電流面内巨大磁気抵抗(CIP-GMR)と、今後さらなる高密度化とともに必要となる面直電流巨大磁気抵抗(CPP-GMR)の原理が述べられている。また CPP-GMR の高出力化のために有効と考えられる Co 基ホイスラー合金のハーフメタル性についての基礎が述べられている。第2章では本研究に用いたホイスラー合金選択の理由、薄膜作製法、微細加工法、薄膜評価法、磁気抵抗測定法が記述されている。第3章では $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{0.5}\text{Ge}_{0.5})$ ホイスラー合金を強磁性層として、AgMg ならびに AgZn 合金をスペーサー層として用いたエピタキシャル CPP 擬似スピバルブ (PSV) デバイスを試作した結果と、その磁気抵抗測定結果が述べられている。10 nm の CFGG 層と 5nm の AgZn スペーサー層の CPP-PSV を 630°C でアニールした結果、 $\Delta RA=21.5 \text{ m}\Omega\mu\text{m}^2$ 、 $\text{MR}=59.6\%$ もの室温 MR 特性が得られた。10 K の測定温度では、MR 比は 200.0% ($\Delta RA=59.8\text{m}\Omega\mu\text{m}^2$) にも増大、発表当時最高の MR 出力であった。STEM-HAADF と EDS により素子断面を解析した結果、この大きな MR の増大は 630°C でのアニールで AgZn 層から Zn が CFGG 層を拡散する過程で、CFGG 層の $L2_1$ 規則化が促進された結果であることを明らかにした。Zn の拡

散を利用して L_{21} 規則化を促進して、ホイスラー合金のスピン分極高める方法は、CPP-GMR 素子だけでなく、他のスピントロニクス素子にも応用できることから、技術的に極めて重要な発見であると述べている。

実用的素子では MgO 単結晶のような高価な基板を用いることができないことから、第4章では熱酸化 Si を基板として <001> 配向する MgO バッファ層上に CFGG 強磁性層と Ag スペーサー層が <001> 配向した多結晶 PSV 素子を作製下結果を述べている。このようにして作製された CFGG/Ag/CFGG 多結晶 CPP-PSV は $\Delta RA \sim 6 \text{ m}\Omega\mu\text{m}^2$, $MR=16\%$ の MR 特性を示し、多結晶素子としては最も高い MR 出力である。このようにホイスラー合金を用いた CPP-GMR で高い MR 出力が得られるようになって来たが、RA 値が $0.03 \text{ }\Omega\mu\text{m}^2$ 程度と最適値の $0.1 \text{ }\Omega\mu\text{m}^2$ よりも一桁小さいという問題が残っていた。最近酸化半導体をスペーサーとして用いたホイスラー合金系 CPP-GMR 素子で最適に近い RA で高い MR 出力得られるという報告があることから、第5章では $\text{Mg}_{0.2}\text{Ti}_{0.8}\text{O}$ 酸化物をスペーサーとして用いた CPP-GMR 素子の伝導特性を報告している。 $\text{Cr}(10)/\text{Ag}(100)/\text{CFGG}(10)/\text{Ag}(1)/\text{MTO}(t_{\text{sp}})/\text{Ag}(1)/\text{CFGG}(10)/\text{Ag}(5)/\text{Ru}(8)$ (nm, $t_{\text{sp}} = -2.5$ nm) 多層膜を (001)MgO 単結晶基板上に室温で堆積した CPP-MR 素子で $\Delta RA=100\sim 250 \text{ m}\Omega\mu\text{m}^2$, $MR=46\text{-}15\%$ の MR 特性がえられたことを報告している。最高のデバイスは、これまでに報告された CPP-GMR 素子の最大 ΔV_{max} 値よりも3倍以上高い 60 mV が得られたことを報告している。薄い Ag 層が CFGG / MTO の界面に挿入された場合にのみ、このような高い MR 出力が観察されたが、詳細な電子顕微鏡観察結果から、高い MR 出力は MTO スペーサー層に多数形成された Ag のナノチャンネルを介した電流狭窄効果であることが解明された。このように MTO スペーサーを用いた CPP-GMR 素子は、最適な RA 値で高い電圧出力を出せることから、次世代高密度ハードディスク用再生ヘッド用磁気センサーとして有望であると報告している。

審 査 の 要 旨

[批評]

本論文は最適な熱処理で高い L_{21} 構造を持つときにスピン分極率が高くなると報告されている $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{0.5}\text{Ge}_{0.5})$ ホイスラー合金を強磁性層として、様々なスペーサーとその結晶方位で面直電流巨大磁気抵抗 (CPP-GMR) 比を高めようとした研究結果を報告している。これまでホイスラー合金との CPP-GMR で一般的に使われてきた Ag に変えて、B2 構造を持つ AgZn 合金をスペーサーとして用いたところ、 630°C アニール後に $MR=59.6\%$, $\Delta RA=21.5 \text{ m}\Omega\mu\text{m}^2$ という、従来の最高記録を更新する高い MR 比が得られた。詳細な TEM 解析の結果、これは当初目指したバンドマッチングによるものではなく、Zn の拡散により $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{0.5}\text{Ge}_{0.5})$ ホイスラー合金が高い規則度の L_{21} 構造に規則化したためであることが分かった。一般にハードディスク用 CPP-GMR センサーは多結晶の (011) 配向のホイスラー合金層が使われるが、結晶配向による MR 比の影響はこれまで検討されることがない。そこで、本研究では MgO ならびに MgTiO の (001) 配向を利用して、 $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{0.5}\text{Ge}_{0.5})$ ホイスラー合金層を (001) 配向させた CPP-GMR 素子を作成し、(001) 配向素子でより高い MR 比が得られることを実験的に示した。これは多結晶 CPP-GMR における配向依存性を示した初めての研究結果であり、多結晶 CPP-GMR 素子の高出力化のために有用な知見を与えている。最後に、MgTiO をスペーサーとして用いた CPP-GMR で $MR=15\text{-}46\%$, $RA=100$

- $250 \text{ m}\Omega \mu\text{m}^2$ の特性が得られることを報告している。この RA 値は再生ヘッド用磁気センサーとして最適の値に近く、従来の金属スペーサーではカバー出来なかった RA 値を酸化物スペーサーで実現できることを示している。また TEM 観察の結果、MTO と $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{0.5}\text{Ge}_{0.5})$ ホイスラー合金層に挿入した Ag が MTO スペーサーにナノスケールの伝導パスを構成し、これが高 MR 最適 RA の原因であることを示した。これらの成果は CPP-GMR 素子をハードディスク用磁気センサーとして応用していくための高出力化に有望なイノベーションを含んでおり、工学的価値は高い。

[最終試験結果]

平成 28 年 9 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。