

氏名	Ikhtiar
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第 7927 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	数理工学科学研究科
学位論文題目	

Spin-dependent Transport in Magnetic Heterostructures: Ohmic and Tunneling Regimes  
(オーミックならびにトンネル磁性ヘテロ構造におけるスピン依存伝導)

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
副査	物質・材料研究機構	主任研究員	葛西伸哉

## 論文の要旨

審査対象論文は、次世代超高密度磁気記録用再生ヘッドとしての磁気センサーの可能性を検討するために、オーミックならびにトンネル磁性ヘテロ構造におけるスピン依存伝導の実験的検討を行った結果を報告している。第1章では、現在使われているMgOをバリアとしたトンネル磁気抵抗(TMR)素子では、高いTMRを維持しながら素子抵抗を $1 \text{ m}\Omega\mu\text{m}^2$ 以下に低減することが難しいために、将来 $2 \text{ Tbit/in}^2$ 以上の高密度磁気記録に対応できなくなるという技術的課題が述べられている。本論文ではこのような技術的背景を解決するために2つのアプローチを提案し、それを実験的に検証した結果が述べられている。第2章では本研究で用いた薄膜作製法と微細加工法の説明に加え、試料ならびに素子の評価法の概要が述べられている。第3章では、現行のMgOをバリアとしたTMR素子で高抵抗の原因となっているMgO障壁のバンドギャップを下げるために、MgOにTiをドーブした $\text{Mg}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}$ をトンネル障壁とした $\text{FeCoB}/\text{Mg}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}/\text{FeCoB}$ トンネル磁気抵抗素子を試作し、そのスピン依存伝導特性を評価した結果がのべられている。 $\text{Mg}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}$ バリア層を極薄にして抵抗面積積RAが $20 \text{ m}\Omega\mu^2$ 以下となった低抵抗素子で、MgOバリアよりも $\text{Mg}_{0.9}\text{Ti}_{0.1}\text{O}$ バリアを用いたTMR素子の方が、高いTMRを示すことを明確に示した。つまり、 $1 \text{ m}\Omega\mu^2$ 以下のRAが必要とされる再生ヘッド用磁気センサーやSTT-MRAM用TMR素子には $\text{Mg}_{0.9}\text{Ti}_{0.1}\text{O}$ バリアに優位性があることを示している。第4章は高密度磁気記録に必要とされる狭ギャップ磁気センサーとしての面内スピバルブの可能性を検討した理由とその実験結果が述べられている。通常の強磁性材料を用いて面内スピバルブを作製しても高いスピン信号は期待されないため、ここではスピン分極率の高い $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{0.5}\text{Ge}_{0.5})$ ホイスラー合金を強磁性ワイヤーとして選択した理由が述べられており、

さらにこの実験の成否を握る面内スピバルブの微細加工法が詳細に記載されている。これらの面内スピバルブから得られたスピン信号は従来のオーミック界面を持つ面内スピバルブとしては最大の値で、それらの結果を理論式にフィッティングすることにより $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{0.5}\text{Ge}_{0.5})$ のスピン分極率とCuのスピン拡散長を検討している。第5章は前章で記述された面内スピバルブのスピン信号の測定結果とその測定温度依存性についての結果が述べられており、スピン信号の異常な温度依存性の起源が考察されている。第6章は本論文のまとめと将来展望が記述されている。

本論文は、将来高密度磁気記録を達成していく上で、必ず直面する磁気センサーの技術的課題を分析し、それを解決するための2つの可能性を検討した。 $\text{Mg}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}$ バリアによる低RA領域でのMgOバリアよりも高いTMRの実現は磁気記録用ヘッドのみならず、磁気抵抗ランダムアクセスメモリ用TMR素子応用としても検討の価値があることを明らかにしている。さらに面内スピバルブに高スピン分極率のホイスラー合金を導入することにより、高いスピン信号を2層ヘテロ構造で実現できることを実験によってその検証している。

#### [批評]

本論文は高密度ハードディスクドライブでの再生ヘッド用の低抵抗磁気センサーの実用化を目指して、2つのアプローチによる低抵抗磁気抵抗素子開発の可能性を検討している。まずは、一般的に高感度センサーとして使われているMgOバリアを用いた磁気トンネル接続(MTJ)の素子の低抵抗化の研究である。MgOのバンドギャップを低減させる効果のあるTiをMgOにドーブした $\text{Mg}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}$ をトンネルバリアとしたTMR素子を作製し、その磁気抵抗値、素子抵抗RAとそれらの構造を評価した。その結果、 $\text{Mg}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}$ バリアは $20\ \Omega\mu\text{m}^2$ 以下のRA値でMgO基のTMR素子よりも高いTMR値を発現することを見出した。また、これらの素子の構造を収差補正走査型電子顕微鏡により詳細に観察することにより、MTOが低RA領域でより高いTMR値を発現するメカニズムを検討した。

もう一つのアプローチはスピン分極率の高い $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{0.5}\text{Ge}_{0.5})$ とCuの細線のオーミックコンタクトで構成される面内スピバルブの試作と、その磁気伝導特性の測定である。 $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{0.5}\text{Ge}_{0.5})$ ホイスラー合金を強磁性層とした面内巨大磁気抵抗素子(CPP-GMR)は、最近の研究により非常に高いMR比を実現できることが報告されているが、CPP-GMR構造では再生ヘッドの狭ギャップ化を実現することが困難である。そこで将来 $2\ \text{Tbit/in}^2$ を超えるHDDの再生ヘッドとしての可能性を検討するために、 $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{0.5}\text{Ge}_{0.5})/\text{Cu}$ を面内で構成した面内スピバルブを試作し、それが十分に高いスピン信号を出すことを示した。これはホイスラー合金面内スピバルブの応用の可能性を示す研究である。

これら2つのアプローチは応用上重要な低抵抗磁気抵抗素子の低抵抗化、狭ギャップ化の指針を示す研究であり、それらの工学的価値は高い。

#### [最終試験結果]

平成28年8月22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。