



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Co基ホイスラー合金薄膜を用いた電流面直型巨大磁気抵抗素子におけるスピン依存伝導特性〔論文内容及び審査の要旨〕
Author(s)	井上, 将希
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14128号
Issue Date	2020-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/78614
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Masaki_Inoue_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 井上 将希

審査担当者 主 査 教 授 末岡 和久

副 査 教 授 富田 章久

副 査 特任教授 高橋 庸夫

学位論文題名

Co 基ホイスラー合金薄膜を用いた電流面直型巨大磁気抵抗素子におけるスピン依存伝導特性
(Spin-dependent transport properties of current perpendicular-to-plane giant magnetoresistance
devices with Co-based Heusler alloy thin films)

近年のデジタル情報量の爆発的増大に伴い, 大容量 Hard Disk Drive (HDD) の需要がますます高まっている. HDD の大容量化に伴い, 磁気再生ヘッドに搭載されている磁気センサーは高感度化と小型化が図られてきた. 現行の HDD の read head としては, MgO トンネルバリアと CoFeB 強磁性電極からなる強磁性トンネル接合 (MTJ) を用いた TMR head が用いられている. しかしながら, TMR head では素子面積 A の低減につれ, 素子抵抗 R が増大する結果, 高速応答が困難となり, また, ノイズの発生も大きくなる. そのため, 次世代磁気再生ヘッドには, 低い RA 積と高い磁気抵抗 (MR) 比の両立が求められており, 現行の MgO-MTJ を用いた TMR head では次世代の大容量 HDD において必要とされる低い RA 積を達成することは困難である. 一方, MgO トンネル層を非磁性金属で置き換えた, 強磁性電極/極薄非磁性層/強磁性電極の 3 層構造からなる膜面垂直通電型巨大磁気抵抗 (Current Perpendicular-to-Plane Giant Magnetoresistance ; CPP-GMR) 素子では, 全層が金属からなる素子構造のため, 素子抵抗の低減に関しては有利であるが, MTJ に比べ MR 比が低く, 高感度化が困難である.

MR 比を増大させるにはスピン偏極率の大きな強磁性体を用いることが有効であり, そのため, ハーフメタル材料が有望視されている. この材料は, フェルミレベルにおいて一方のスピン方向についてのみ状態を有し, 他方のスピンバンドにエネルギーギャップを有するため, 伝導電子のスピン偏極率が 100% となる. 中でも Co_2YZ (Y: 遷移金属, Z: 主族元素) の化学式で表わされる Co 基ホイスラー合金はキュリー温度が室温より十分高いことから, 室温でも他の強磁性材料に比べ, 高いスピン偏極率が期待できる. しかしながら, 多元化合物である同物質群は, 組成の揺らぎや原子配置の乱れによりその物性が大きく変化することが知られており, ハーフメタル性を活用するには, 組成や構造欠陥の適切な制御が必要となる. 申請者の所属する研究室では, Co 基ホイスラー合金を用いた MTJ の研究において, Co 原子が Y サイトを置換する構造欠陥がハーフメタル性を大きく阻害することを実験で明らかにするとともに, Co_2MnSi や $\text{Co}_2(\text{Mn,Fe})\text{Si}$ の Mn 組成を化学量論比よりも大きくすることで, その構造欠陥の発生を防ぎ, MR 比の増大につながることが示されている. これにより, Mn-rich 組成の Co_2MnSi や $\text{Co}_2(\text{Mn,Fe})\text{Si}$ を用いた MTJ にて比較的高い TMR 比が実証され, 特に $\text{Co}_2(\text{Mn,Fe})\text{Si}$ では世界最高値となる 2610% (4.2K) の MR 比が実証されている. 一方, CPP-GMR 素子においては, これら構造欠陥のスピン依存伝導特性に及ぼす影響について十分明らかになっていない.

以上の背景から、本研究の目的は、Co 基ホイスラー合金を用いた CPP-GMR 素子におけるスピン依存伝導特性に対する薄膜組成依存性を明らかにすることである。そのため、異なる Mn 組成を持つ CMS、もしくは、異なる Ge 組成を持つ $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga},\text{Ge})(\text{CFGG})$ を強磁性電極に用いた CPP-GMR 素子を作製し、MR 特性や磁気的カップリングの強さに対する薄膜組成の影響について系統的に調べている。

本論文は全 6 章から構成されている。各章の要旨は以下の通りである。

第 1 章では本研究の背景と目的について述べている。

第 2 章では CPP-GMR 素子の作製方法、スピン依存伝導特性の測定法を含む実験方法について述べている。

第 3 章では CMS を用いた CPP-GMR 素子の MR 特性に対する Mn 組成依存性について述べている。 $\text{Co}_2\text{Mn}_\alpha\text{Si}_{0.82}$ を用いた CPP-GMR 素子の Mn 組成 α を Mn-deficient な $\alpha = 0.62$ から Mn-rich な $\alpha = 1.45$ まで系統的に変化させた素子を作製し、その MR 比が Mn 組成とともに単調に増加することを見出した。このことは、GMR 構造においても Mn-rich 組成にすることで Co_{Mn} アンチサイトの抑制によるハーフメタル性の増強が確認されたことを意味し、本手法が MTJ 同様、GMR 素子においても有効であることがわかった。しかしながら、このとき得られた最大の MR 比は室温にて 20.7% であり、Mn-rich 組成の有用性は限定的であった。

この原因を明らかにするために、第 4 章では、CMS を用いた CPP-GMR 素子の MR 特性およびスピン移行トルクスウィッチング特性の、Mn 組成依存性、CoFe 挿入層の効果、および温度依存性を評価した。その結果、CMS 層中の Mn が Ag スペースに拡散することにより、上下の CMS 層間に磁気的結合が生じ、完全な反平行状態が形成されにくいこと、および、スペース層におけるスピン拡散長が低下することが原因で、MR 比の向上が妨げられていることを明らかにした。このことから、スペース層への Mn 拡散を防ぐことが高い MR 比の実現には重要であるとの知見を得た。

第 5 章では、Mn 拡散の影響を排除するため、Mn を含まないホイスラー合金として CFGG に着目し、CFGG の組成制御による MR 特性への影響について調べている。具体的には、 $\text{Co}_2\text{Fe}_{1.03}\text{Ga}_{0.41}\text{Ge}_\gamma$ に対して Ge-deficient 組成である $\gamma = 0.24$ から Ge-rich 組成となる $\gamma = 1.06$ まで系統的に変化させた素子、および、 $\text{Co}_2\text{Fe}_{1.06}\text{Ga}_{0.44}\text{Ge}_{\gamma'}$ に対して $\gamma' = 1.24$ と 1.48 の素子をそれぞれ作製し、MR 比の Ge 組成依存性を評価した。その結果、MR 比は Ge 組成が 1.06 まではほぼ単調に増加することが示され、特に Ge-rich 組成の $\gamma = 1.06$ において RA 積: $0.105\Omega \cdot \mu\text{m}^2$ 、MR 比: 55.6% の素子特性が得られ、素子抵抗と MR 比の観点から 2 Tbit/inch² の次世代 HDD の要求水準を満たす性能が得られている。

第 6 章は本論文の要約と結論を述べている。

以上を要約すると、本論文は、Co 基ホイスラー合金の非化学量論的組成の MR 特性に対する影響を明らかにすることにより、その優れたハーフメタル特性を CPP-GMR 素子において活用する上で有益な知見を実験的に明らかにしたものであり、これは電子デバイス工学の進展に寄与するところ大である。

よって著者は北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格のある者と認める。