



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_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 井上 将希

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)

スピントロニクスは従来のエレクトロニクスで用いられる電子の電荷に加えて、電子のスピンを活用することで従来にない機能を持ったデバイスの創出を目指す分野である。現在、このスピントロニクス分野が注目されている理由として、スピントロニクスデバイスが本質的に、不揮発性、低消費電力性、さらに、書き換え可能な論理機能を有するためである。スピントロニクスデバイスは様々な場面で研究され製品化されているが、特に、ハードディスクドライブ (HDD:hard disk drive) の読み出しヘッドとして古くから使われてきた。現行の HDD の読み出しヘッドは、MgO トンネルバリアと CoFeB 強磁性電極を用いたコヒーレントトンネリングを活用する強磁性トンネル接合 (MTJ:magnetic tunnel junction) が用いられている。HDD の磁気再生ヘッドに MgO 層が用いられているのは、MgO トンネル層によるスピンフィルタ効果により高い磁気抵抗 (MR) 比、すなわち、高感度化が達成できるためである。一方で、TMR(tunnel magnetoresistance) ヘッドでは素子面積 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、次世代磁気読み出しヘッドには、低い RA 積と高い MR 比の両立が求められているが、現行の TMR ヘッドでは次世代の大容量 HDD において必要とされる低い RA 積を達成できない。そこで MgO トンネル層を非磁性金属で置き換えた、強磁性電極/非磁性金属/強磁性電極の 3 層構造からなる電流面直型巨大磁気抵抗 (CPP GMR:current perpendicular-to-plane giant magnetoresistance) 素子に注目が集まっている。CPP GMR 素子は、全層が金属からなる素子構造のため RA 積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。一般的に、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ることが知られている。

スピン偏極率の大きな強磁性体である Co 基ホイスラー合金は MTJ や GMR デバイス、さらに最近では、半導体チャネルへのスピン注入のスピン源としても応用されており、これらのデバイス応用において、優れたデバイス特性が報告されている。一方で、Co 基ホイスラー合金のハーフメタル性を十分に活かすためには、ハーフメタル性に対する構造欠陥を明らかにすることが重要である。Picozzi らは、第一原理計算より、Co 基ホイスラー合金の一種である Co_2MnSi (CMS) において、Co が Mn サイトを置換する Co_{Mn} アンチサイトの影響により、フェルミレベル近傍に少数スピンバンド中に状態を有し、それが CMS のハーフメタル性を阻害することを理論的に明らかにした。これに対し、Ishikawa らは、CMS において Co_{Mn} アンチサイトが Mn-rich な組成では抑制され、ハーフメタル性が向上することを明らかにした。これらの発見により、CMS 電極を用いた CMS MTJs では 4.2 K で 1995% (室温で 354%) という非常に高い TMR 比が実証されている。しかしながら、Co 基ホイスラー合金を用いた CPP GMR 素子における薄膜組成の影響に関する研究は Li らの $\text{Co}_2\text{Mn}(\text{Ge}, \text{Ga})$ についての報告のみである。そのため、ホイスラー合金を用いた CPP GMR 素子では、Co 基ホイスラー合金の利点を十分に活かしていない可能性がある。

これらの背景を基に, 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. このため, 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, Ag をスペーサー層に用いた CPP GMR 素子を作製し, 磁気抵抗 (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た.

この論文は全 6 章からなり, それぞれの章は以下の通りである.

第 1 章では本研究における背景と目的について述べる.

第 2 章では本研究の実験方法について述べる.

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る. 異なる Mn 組成を持つ CMS を強磁性電極に用い, Ag をスペーサー層に用いた CPP GMR 素子を作製し, MR 比に対する薄膜の組成依存性について系統的に調べた. CMS を用いた CPP GMR 素子の MR 比は Mn 組成の増加とともに, 室温で 11.4% から 20.7% まで系統的に増加した. この結果は, Mn 組成が増加するに伴い, Co_{Mn} アンチサイトが抑制されたことによりスピン偏極率が上昇したことを示唆している. この CPP GMR 素子の Mn 組成の増加に伴う MR 比の向上は過去に行われた MTJ 素子と同様の傾向を示している. そのため, 本実験の結果は CMS を用いた MTJ 素子と同様に CMS を用いた CPP GMR 素子でも Mn-rich な組成が, Co_{Mn} アンチサイトを抑制することに有用であることを実証した.

第 4 章では CMS を用いた CPP GMR 素子の磁気的カップリングの起源について述べる. 異なる Mn 組成を持つ CMS を強磁性電極に用い, Ag をスペーサー層に用いた CPP GMR 素子を作製し, MR 特性とスピン移行トルクによる磁化の変化特性 (STT 特性) を比較することで双二次層間結合 (90°coupling) の影響について調べた. その結果, 実験的に (a) Mn 組成の増加とともに 90°coupling の強さが増加すること, (b) CMS 強磁性電極と Ag スペーサー層の間に極薄 CoFe 層を挿入することで, 室温において 90°coupling が抑制されること, (c) 90°coupling の強さは温度に強く依存すること, を明らかにした. これらの結果より CMS を用いた CPP GMR 素子において, Ag スペーサー層に拡散した Mn 原子が 90°coupling の起源であることが分かった.

第 5 章では CFGG を用いた CPP GMR 素子の MR 特性に対する Ge 組成依存性について述べる. 異なる Ge 組成を持つ CFGG を強磁性電極に用いた CPP GMR 素子を作製し, MR 比に対する薄膜組成依存性について系統的に調べた. CFGG を用いた CPP GMR 素子の MR 比は, Ge 組成が増加するにつれて, 室温において 23.1% から 55.6% に増加した. この結果は Ge 組成を Ge-deficient 組成から Ge-rich 組成に増加させることで Co アンチサイトを抑制しスピン偏極率が向上したことを示唆している. この結果は, CMS を用いた CPP GMR 素子と同様の傾向を示しており, CMS を用いた CPP GMR 素子よりさらに高い MR 比を実証した.

最後に第 6 章において本研究のまとめを行う. 本研究では, Co 基ホイスラー合金を用いた CPP GMR 素子におけるスピン伝導特性に対する薄膜組成の影響を調べた. その結果, Mn-rich な組成の CMS を用いた CPP GMR 素子において, Co_{Mn} アンチサイトが抑制されハーフメタル性が向上することを明らかにし, また, 上下の強磁性層間における双二次交換結合の起源が Ag スペーサー層へ拡散した Mn であることを明らかにした. そして, Ge-rich な組成の CFGG を用いた CPP GMR 素子において, Co アンチサイトが抑制されハーフメタル性が向上することを明らかにし, CMS を用いた CPP GMR 素子の MR 比を上回る MR 比を実証した.