



Title	CoxFe _{3-x} O ₄ /Pt界面における磁気近接効果と輸送特性に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	野土, 翔登
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15424号
Issue Date	2023-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/89689
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	NODO_Shoto_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 野土 翔登

審査担当者	主査	教授	島田 敏宏
	副査	教授	上野 貢生
	副査	教授	幅崎 浩樹
	副査	准教授	長浜 太郎

学位論文題名

$\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4/\text{Pt}$ 界面における磁気近接効果と輸送特性に関する研究

電子に実効的な磁場として作用するスピン軌道相互作用は、原子番号の 4 乗に比例して大きくなるため重金属の輸送現象では重要な概念である。重金属ではスピン軌道相互作用によって電流の一部が、スピン角運動量の流れであるスピン流に変換されることが知られている。このスピン流は強磁性体の磁化の向きを変化させることができ、応用上重要である。強磁性体/重金属 (FM/HM) の界面においては様々なスピントロニクス現象が発現する場となっており、界面の輸送特性を評価することは重要である。

一方、FM/HM 界面では輸送特性のようなダイナミクスの他に静的な磁気近接効果の存在が示唆されている。これは界面の HM がわずかに磁化されるという現象で、界面の輸送特性に影響を及ぼすことは容易に想像できるが、十分に研究がされているとは言えない。そこで本研究では、分子線エピタキシー (MBE) 法によって、精密に界面が制御された $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ (CFO)/Pt 二層膜を作製し、Hall 測定や X 線磁気円二色性 (XMCD) 測定によって、磁気近接効果と界面輸送特性の関係を明らかにすることを目的に実験を行った。

本学位論文は全 8 章からなる。第 1 章ではスピントロニクスにおける基本的な概念と先行研究について導入し、本研究の目的について述べた。

第 2 章では本研究で用いた実験方法及び測定方法及び解析手法について言及した。

第 3 章では CFO/Pt 二層膜を MBE 法によって作製し、Pt の蒸着温度を 100 ~ 600 °C の範囲で変化させることで界面構造への影響について検討した。電子顕微鏡による CFO/Pt 界面の観察および、表面敏感な手法で行った Fe, Co の XMCD 測定の結果から 600 °C という高温な Pt の蒸着温度に対しても CFO/Pt 界面では拡散は見られなかった。この結果を踏まえ磁気近接効果という界面効果を議論する上で、低エネルギーな製膜手法である MBE 法を用いた試料の作製についての妥当性について述べた。

第 4 章では作製した CFO/Pt 二層膜における磁気近接効果を、輸送特性と XMCD 測定の 2 種類の方法によって評価した。その結果、輸送特性には異常 Hall 効果という形で Pt に強磁性が誘起されたことを示唆する結果を得た。この異常 Hall 効果にはスピン Hall 磁気抵抗効果 (SMR) という、Pt の誘起磁性とは無関係の効果が重畳する可能性がある。この効果を考慮し解析を行ったところ SMR の寄与は小さく、異常 Hall 効果が Pt の強磁性によるものだと強く裏付ける結果を得た。さらに XMCD 測定によって Pt の製膜温度に依存する形で、Pt の磁気モーメントが観測された。これは Pt の製膜温度による細かな界面構造の違いを反映した結果と考えられる。また異常 Hall 効果との比較により、磁気近接効果は磁気モーメントという磁気特性よりは、異常 Hall 効果などの輸送特性に顕著に現れることを見出した。

第 5 章では磁気近接効果によって Pt に現れる異常 Hall 効果の CFO 膜厚依存性を評価した。一般的に強磁性体は膜厚を数 nm 程度まで薄くすると磁気特性が変化することが知られている。CFO を 6nm 以下の超薄膜にすることで、この効果を評価することとした。バルクの CFO は 520 °C の Curie 温度を持つが、4nm の CFO では Curie 温度が室温以下に低下することを見出した。一方でこの CFO の磁気特性の変化は Pt の異常 Hall 効果にも表れており、磁気近接効果によって Pt に誘起される磁性は強磁性層の磁気状態を強く反映していることを見出した。

第6章では CFO/Pt における磁気近接効果を制御する方法について検討した。Pt は Fermi 準位における状態密度が大きく、金属の強磁性発現条件である Stoner 条件に近い金属であることが知られており、電子構造への変調から強磁性が誘起されると考えられる。実際に Au のような、5d 軌道が閉殻で Fermi 準位における状態密度が小さい金属との比較により、Stoner 条件が磁気近接効果に寄与していることを見出した。これを念頭に置き、磁気近接効果を制御する方法として、イオン液体による電圧の印加を行った。結果として電圧の印加によって Pt のキャリア密度は変化し、異常 Hall 効果も変化することを見出した。また異常 Hall 効果の変化の振る舞いから、電圧の印加によって Pt に誘起される磁性が変化することが示唆された。

第7章では磁気近接効果の材料依存性として Pt と Ir の比較を行った。Ir は Pt と同様に白金族元素であり、磁性材料にも応用されてきたことから、磁気近接効果の存在が期待される。まずは SMR 効果の解析から Ir と Pt のスピン輸送パラメータを求めた。結果として Ir は Pt の 1/3 程度の小さなスピン流変換効率を持つことが明らかになった。一方、Hall 測定の比較では Ir においても異常 Hall 効果が見られ、磁気近接効果が存在することを明らかにした。さらに Ir は Pt の 2 倍以上大きな異常 Hall 効果を示し、符号が逆であるという非自明な結果を得た。これらの結果から、磁気近接効果は Ir の輸送特性を変化させるだけでなく、Ir 単体の時と比べてスピン輸送パラメータが強化されることを見出した。

第8章では本研究の総括について述べた。本研究では CFO/Pt の磁気近接効果を評価し輸送特性への影響についての知見を得た。これらの結果によって、材料単体としてみたときの輸送パラメータは磁気近接効果によって強化されることが期待され、静的な界面効果を利用した新たなスピントロニクスデバイスの設計の指針を与えたと言える。

これを要するに、著者は、単結晶 MgO 基板上に良好な界面を有する $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ (CFO)/Pt 二層膜をエピタキシャル成長することに成功し、重金属である Pt 界面の磁気近接効果とスピン流伝導特性を検討した。さらに電圧印加による電子状態依存性や材料依存性について検討した。本研究は重金属/酸化物磁性体の磁性とスピン流伝導の物性を明らかにし、新機能スピントロニクス薄膜材料および素子開発へ貢献するところ大なるものがある。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あるものと認める。