

氏名（本籍地）	小野田 浩成
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第 9783 号
学位授与年月日	令和 3年 3月 25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	

異なる磁気異方性主軸を有するスピネルフェライト二層膜における電気磁気効果の研究

主査	筑波大学教授	博士(工学)	柳原英人
副査	筑波大学教授	博士(工学)	末益 崇
副査	筑波大学教授(連係大学院)	博士(工学)	三谷誠司
副査	高エネルギー加速器研究機構教授	博士(理学)	雨宮健太

論 文 の 要 旨

スピネルフェライトはキュリー温度が高いものが多く、この点でスピントロニクス材料として魅力的な物質群である。なかでもコバルトフェライト(CFO)は、大きな磁気弾性効果を示すことで知られ、薄膜化する際の基板との格子不整合を利用することで大きな一軸の磁気異方性を示すことが確認されている。本研究では、絶縁体かつ室温で垂直磁気異方性を示す CFO 薄膜についてそのスピントロニクス材料への展開を詳細に検討した。

はじめに、CFO 薄膜の一軸磁気異方性の最大化を試みた。膜全体に均一な歪を導入するために、CFO の膜厚を 5nm とし、下地であるスピネル構造 Mg_2SnO_4 (MSO) の格子定数を成膜時の Sn ターゲットの投入電力を変えることで制御した。逆格子マップ測定の結果から、すべての試料について、CFO には均一な歪が導入されていること、および Sn ターゲットの増加に伴い CFO に導入された歪量が単調に増加し、最も大きな歪を導入した試料では $60\text{Merg}/\text{cm}^3$ 程の巨大な一軸の磁気異方性が誘導されていることを確認した。このような大きな格子歪が導入された場合でも、誘導される磁気異方性は、磁気弾性効果の現象論の枠組みで定量的に説明可能であった。 Co^{2+} についての 1 イオンモデルを拡張したクラスター計算によると、CFO 薄膜ではより大きな格子歪を導入することで、誘導磁気異方性を最大値は $90\text{Merg}/\text{cm}^3$ 程度まで増大可能であることが明らかになった。

次に、サイクロイド型スピン構造によって生じる非線形電気磁気効果が人工的なねじれたスピン構造においても発現しうるか検証を行った。まず、磁気異方性主軸が異なる 2 層膜を作製し、その界面にねじれたスピン構造が生じることを確認した。垂直磁化膜として CFO、膜面内磁化膜としてマグヘマイト(GFO)を選択した。CFO については、組成が $Co:Fe=1:23$ 、 $1:3$ の 2 つの組成について試みた。CFO 層が $Co:Fe=1:23$ の組成をもつ CFO/GFO 2層膜構造について、偏極中性子線反射率測定を行ったところ、電場による有意な磁化の変化は確認できなかった。そこで CFO 層の膜厚を変え膜面垂直方向における磁化過程を調べたところ、CFO 層の膜厚が増加しても残留磁化の増加が確認されなかった。すなわち、

CFO 層は磁化のピン留め層として機能しておらず、そのため電場効果が現れなかったものと考えられる。一方で、より強い磁気異方性を持つ CFO (Co:Fe = 1:3) と GFO の組み合わせからなる2層膜において、深さ分解 XMCD 測定を行ったところ、無磁場の状態でも界面と表面とではスピンの向きが異なっていることが分かった。斜入射条件で電場印加実験を行ったところ、脱出深度が深いところでは XMCD スペクトルに差は見られなかったが、脱出深度が浅いところでは、電場の極性によってスペクトル形状が大きく異なった。ただし、表面近傍のスピンの向きが反転するほどの変化は観測されなかった。この結果は人工的に作製したサイクロイド型スピン構造においても非線形電気磁気効果が発現し得ることを実証するものであり、電気磁気効果の結合係数を増大させることで、スピントロニクス分野における新たな磁化反転機構の候補となりうる現象であることを示した。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

この博士論文の前半では、下地結晶との格子不整合を利用して、磁気弾性効果を通じ CFO 薄膜の磁気異方性を制御し、その結果希土類磁石並みに増大しうることを実証している。格子歪に比例して磁気異方性が増大する現象そのものは現象論的には十分理解されているものであるが、この研究では数%という巨大な格子歪が導入された場合でも、磁気弾性効果の線形性が破綻しないことを実証している。このことは、CFO に限らず磁性材料の磁気異方性を中心とした性能向上に向けた指針を与えるものである。また、論文中で示された磁気異方性定数は、遷移金属酸化物のそれとしてはおそらく最大であり、小野田氏が本研究を通じて確立した CFO 薄膜の誘導磁気異方性の制御手法の重要性を示している。後半では、垂直磁気異方性を有する良質な CFO 薄膜と GFO を組み合わせることで、その界面付近に人工的にねじれたスピン構造を導入し、期待される非線形電磁磁気効果の発現についてその有無を実験的に検証している。深さ分解 XMCD 測定により、界面付近にねじれたスピン構造が生じていることを確認した。さらに電圧を印加することでスピン構造の変調に伴う XMCD スペクトルの変化を確認したと主張している。室温における電気磁気効果が確認されれば、磁気物理のみならず、スピントロニクスの分野においても大きなインパクトがある研究成果である。実験結果は明らかな電圧依存性を示しているが、その再現性、定量性についてははっきりしていない。今後詳細について明らかにすべき点は少なからず残されているが、本博士論文でのアプローチ、すなわち異なる磁気異方性主軸を有する強磁性二層膜においてねじれたスピン構造を人工的に導入した系において電気磁気効果が発現している可能性を示した意義は学術的にも大きいと考える。

〔最終試験結果〕

令和3年2月22日、数理工学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。

ならないことから、それ以後の文章中においても、文末を例えば「～を行った。」等の表現ではなく、「～を行ったものである。」、「～を行っている。」等の表現にしてください。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

論文の要旨と審査の要旨は、併せて2000～4000字で記入して下さい。

〔最終試験結果〕

令和 年 月 日、数理物質科学研究科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()の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。

学位論文審査報告書は、別途電子ファイル(ワードで作成)も支援室あて提出して下さい。