

成果報告書

「軟X線の高速偏光制御による機能性材料の探求と創製」

(強相関電子系および希薄磁性半導体の解析と探索)

平成23年5月

国立大学法人東京大学

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立大学法人東京大学が実施した平成22年度「軟X線の高速偏光制御による機能性材料の探求と創製」（強相関電子系および希薄磁性半導体の解析と探索）の成果を取りまとめたものです。

1. 委託業務の目的

本委託業務は、タンデム配置の可変偏光アンジュレータとキッカー電磁石を組み合わせること
とで、10 Hz 程度の軟X線の高速偏光スイッチング技術を開発し、ロックイン法による円二色
性・線二色性シグナル検出精度の飛躍的な向上、および波長分散型の偏光依存軟X線吸収分光
法と光電子顕微鏡を組み合わせたりアルタイム位置分解分光を実現することを目的とする。さ
らに、新たな指針に基づく新規材料の創成を目指して、スピントロニクス基礎研究から
実用までをカバーする強相関電子系、希薄磁性半導体、磁性薄膜・多層膜の磁性を解明する
とともに、表面動的過程における種々のサイトでの化学種の量と構造を実時間追跡すること
を目的とする。

このため、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構、国立大学法人東京大学、独
立行政法人産業技術総合研究所、および学校法人慶応義塾は共同して業務を行う。

国立大学法人東京大学では、スピントロニクス材料のうち、強相関電子系および希薄
磁性半導体の解析と探索を行う。

2. 平成22年度（報告年度）の実施内容

2. 1. 実施計画

①強相関電子系および希薄磁性半導体の解析と探索

円偏光放射光ビームラインにおいて、新規スピントロニクス材料の創製につながる磁性のキ
ャラクタリゼーションを行うとともに、本委託業務で開発中の極微小二色性シグナル検出技術
の有効な利用方法を追求する。

(1) 高磁場下における軟X線吸収の磁気円二色性(XMCD)による元素選択的なスピンと軌道の磁
気モーメントの決定を、バルク敏感な蛍光測定にて行えるようにし、試料内部と表面の磁性の
差を調べる。

(2) 軟X線共鳴散乱装置による測定を自動化し、遷移金属の2p-3d及び希土類の3d-4f吸収のMCD
を利用し元素および軌道選択的にナノメートル・オーダーの構造と磁性を同時に決定する実験
を効率的に行えるようにする。

2. 2. 実施内容（成果）

既存の円偏光放射光ビームラインにおいて、すでに稼働中の超伝導磁石装置を用いて、ス
ピントロニクス材料の軟X線吸収磁気円二色性(XMCD)によるキャラクタリゼーションを継続
した。

ハーフメタル金属であるホイスラー合金と絶縁体からなる磁気トンネル接合のモデル系
 $\text{Co}_2\text{MnGe}/\text{MgO}$ および $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{MgO}$ の XMCD 測定を継続した。化学量論比からのずれに対する磁気
モーメントの変化を元素選択的に測定し、過剰 Mn により Mn の磁気モーメントが減少、Co は
変化しないことを見出した。また、巨大磁気抵抗を示すことで注目されている酸化物強磁性
体 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ (LSMO) の薄膜を SrTiO_3 基板上に成長させた試料の磁性の膜厚依存性を XMCD
を用いて調べた。この系は、硬X線光電子分光測定と磁化測定より、6層(ML)以下で金属性
と強磁性が失われることが知られているが、軟X線吸収(XAS)およびXMCDのスペクトル形

状に膜厚依存は見られず，絶縁化が価数変化や軌道秩序によるものではないことが示唆された．XMCD の磁場依存性（図 1）は，膜厚によって常磁性的から強磁性的に連続的に移行していることを示した．

測定系の高度化を目指し，酸化物高温超伝導線材を用いたマグネットをもつ XMCD 測定装置を設計・作製した．将来，このマグネットのつくる磁場に直交する方向の磁場を作り出すマグネットを増設できるようにし，磁場方向を自由に変えた XMCD 測定も行えるようにした．これにより，挿入光源による偏光制御，偏光高速スイッチングに加えて磁場と試料方向も制御して，異方的な磁性の精密測定をおこなうことが可能になる．

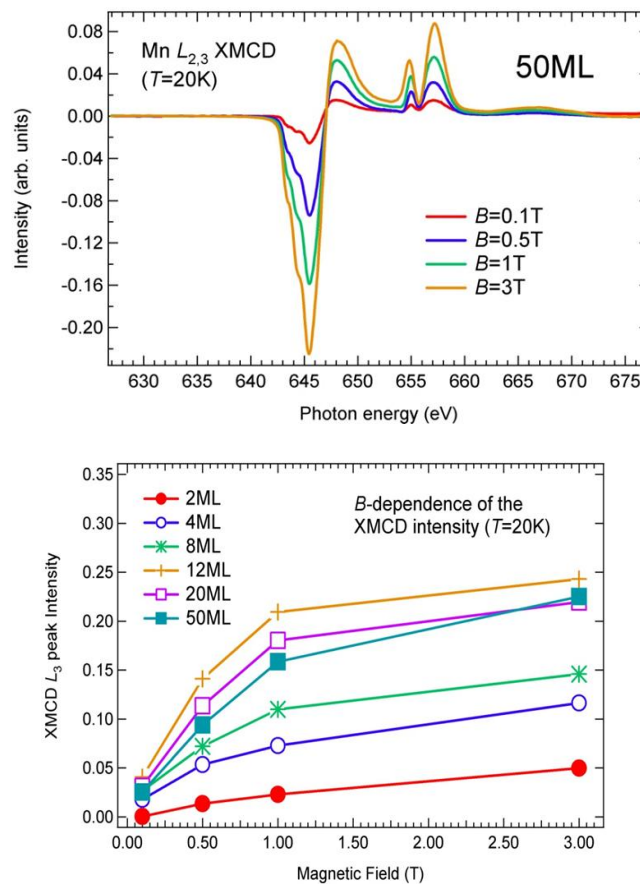


図 1 SrTiO₃ 基板上に成長した La_{0.6}Sr_{0.4}MnO₃ 薄膜の Mn 2p 内殻吸収領域での軟 X 磁気円二色性 (XMCD) . 上 : 様々な磁場で測定した厚さ 50 層 (ML) の薄膜の XMCD スペクトル . 下 : 様々な膜厚の試料の XMCD 強度の磁場変化 . 薄い試料の常磁性的な振る舞いから，厚い試料の強磁性的振る舞いまで連続に変化している . 測定温度はいずれも 20 K .

2. 3. 成果の外部への発表

論文発表

1. D. Asakura, T. Koide, S. Yamamoto, K. Tsuchiya, T. Shioya, K. Amemiya, V.R. Singh, T. Kataoka, Y. Yamazaki, Y. Sakamoto, A. Fujimori, T. Taira, and M. Yamamoto: Magnetic states of Mn and Co atoms at Co₂MnGe/MgO interfaces seen via soft x-ray magnetic circular dichroism study, *Phys. Rev. B* 82, 184419—1-8 (2010).
2. T. Kataoka, Y. Sakamoto, Y. Yamazaki, V. R. Singh, M. Kobayashi, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D. J. Huang and C. T. Chen, D. Asakura, T. Koide, Y. Takeda, T. Okane, and Y. Saitoh: X-ray magnetic circular dichroism study of ferromagnetic Zn_{1-x}Mn_xO (投稿中)

学会, 国際会議発表

1. 芝田悟朗, 石上啓介, V.R. Singh, V.K. Verma, 藤森淳, 小出常晴, 吉松公平, 組頭広志, 尾嶋正治: La_{0.6}Sr_{0.4}MnO₃ 薄膜の軟 X 線磁気円二色性の膜厚依存性, 日本物理学会秋季大会 (大阪府立大学, 2010 年 9 月 23-26 日) .
2. V.K. Verma, V.R. Singh, K. Ishigami, G. Shibata, A. Fujimori, T. Koide, T. Chakraborty, and S. Ray; X-ray absorption spectroscopy and x-ray magnetic circular dichroism study of Fe-doped BaTiO₃, *International Conference on Magnetic Materials (ICMM-2010)* (Saha Institute for Nuclear Physics, October 25-29, 2010).
3. V.K. Verma, V.R. Singh, K. Ishigami, Y. Yamazaki, G. Shibata, T. Kadono, A. Fujimori, T. Koide, S. Chattopadhyay, and T.K. Nath: Study of valence state and magnetic property of Fe in Fe-doped ZnO thin films, *Indo-Japan Seminar on Electronic Structure of Novel Magnetic and Superconducting Materials* (Tokyo University, February 1-2, 2011).
4. G. Shibata, V.R. Singh, V.K. Verma, K. Ishigami, A. Fujimori, T. Koide, K. Yoshimatsu, E. Sakai, H. Kumigashira, and M. Oshima: Thickness dependence of the magnetic properties of La_{0.6}Sr_{0.4}MnO₃ thin films studied by soft x-ray magnetic circular dichroism, 同上.
5. 芝田悟朗, 石上啓介, V.R. Singh, V.K. Verma, 藤森淳, 小出常晴, 吉松公平, 組頭広志, 尾嶋正治: La_{0.6}Sr_{0.4}MnO₃ 薄膜の軟 X 線磁気円二色性の膜厚依存性, 第 24 回日本放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム (つくば, 2011 年 1 月 7-10 日) .
6. V.K. Verma, V.R. Singh, K. Ishigami, Y. Yamazaki, G. Shibata, T. Kadono, A. Fujimori, T. Koide, S. Chattopadhyay, and T. K. Nath: X-ray absorption spectroscopy and x-ray magnetic circular dichroism study of Fe doped ZnO thin films, 日本物理学会第 66 回年次大会 (新潟大学, 2011 年 3 月 25-28 日) .
7. 芝田悟朗, 門野利治, V.R. Singh, V.K. Verma, 石上啓介, 藤森淳, 小出常晴, 吉松公平, 坂井延寿, 組頭広志, 尾嶋正治: La_{0.6}Sr_{0.4}MnO₃ 薄膜の軟 X 線磁気円二色性・線二色性の膜厚依存性, 同上.

2. 4. 活動

2. 5. 実施体制

別表1の通り。

別表1 平成23年度に於ける実施体制

業 務 項 目	担当機関等	研究担当者
① 強相関電子系および希薄磁性半導体の解析と探索	東京大学大学院理学系研究科 東京大学大学院理学系研究科 東京大学大学院理学系研究科 東京大学大学院工学系研究科 東京大学大学院工学系研究科 東京大学大学院工学系研究科 東京大学大学院工学系研究科 東京大学大学院工学系研究科 東京大学大学院新領域創成科学研究科 東京大学大学院新領域創成科学研究科	◎藤森 淳 吉田鉄平 内田慎一 十倉好紀 田中雅明 田畑 仁 組頭広志 高木英典 Harold Y. Hwang