

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2010～2014

課題番号：22224005

研究課題名(和文)多自由度放射光X線二色性分光による強相関系界面新規電子相の研究

研究課題名(英文) Novel electronic phases at interfaces of strongly correlated materials studied by soft x-ray dichroism with multi-degrees of freedom

研究代表者

藤森 淳 (FUJIMORI, Atsushi)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：10209108

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 161,600,000円

研究成果の概要(和文)：異種の強相関物質がつくる界面、超格子、超薄膜が新規物性を示す現象が近年注目を集めているが、界面、超薄膜の体積が試料全体に比べ小さいため、通常の物性測定が不可能か必要な精度が得られないことが多い。一方、軟X線放射光を用いた分光測定はナノスケールの検出深さをもつため、上記の試料に適した手法である。本研究では、界面新規電子相の本質である物性の異方性を、放射光X線の偏光、印加磁場方向を自由に変えることのできる分光測定系を開発し、系統的に調べることを目的とした。本装置と薄膜作製その場分光測定装置を併せて、酸化物界面、超格子、超薄膜の金属-絶縁体転移の観測、量子化準位の観測、磁気異方性の検出に成功した。

研究成果の概要(英文)： Interfaces, superlattices, and ultra-thin films consisting of different correlated electron materials have attracted intensive interest in recent years because of their novel physical properties that are not present in the constituent materials. However, because their volumes are tiny compared to the volumes of the samples, conventional measurements of the physical properties are difficult or impossible. On the other hand, spectroscopic measurements using synchrotron radiation in the soft x-ray region are powerful tools because of their probing depths on the nanometer scale. In the present project, we have developed a measurement system in which the light polarization and the applied magnetic field direction can be varied independently. By combining this system with our in-situ photoemission measurement system, we have successfully observed novel metal-insulator transitions, quantized levels, and magnetic anisotropies of oxide interfaces, superlattices, and ultra-thin films.

研究分野：数物系科学

キーワード：遷移金属酸化物 界面 超薄膜 軟X線磁気円二色性 光電子分光 線X線二色性

1. 研究開始当初の背景

異種の物質がつくる界面、超格子、超薄膜の電子状態と物性は、近年、物性物理学の分野で大きな興味を惹いてきた。特に、遷移金属酸化物を中心とする強相関物質の界面では、界面を形成するそれぞれの物質のどちらとも異なる新しい電子相の出現（絶縁体間の界面における金属状態の出現、非磁性体間の界面における強磁性の出現等）、全く異なった物性を持つ物質が形成する界面における電子相の共存・競合（超伝導体と強磁性体など）が報告され、反転対称性の破れによる新規物性（ラシュバ分裂、スピン三重項超伝導の混成など）も注目されていた。これらの界面、超格子、超薄膜の物性研究には、これまで我々のグループが立ち上げ、進めてきた酸化物薄膜試料のその場（in-situ）光電子分光測定が次々と新しい知見を広げていた。

一方、輸送現象、磁気、光学応答の測定も行われていたが、界面、超薄膜は試料全体の体積に比べて体積分率が非常に小さいため、測定が不可能であるか、必要な精度で測定ができなかった。とくに磁気測定は、中性子散乱は言うに及ばず、通常の帯磁率測定においても、界面や超薄膜の微小磁化をバルクや基板の大きな磁化・反磁化と分離して測定することは非常に困難であった。これに対して、X線磁気円二色性(XMCD)、X線磁気線二色性(XMLD)など放射光軟X線を用いた分光は、数nmから100nmの検出深さをもつため、超薄膜や埋もれた界面の電子状態・磁性を元素選択的・軌道選択的に高感度で調べることが可能であった。しかし、異方性が本質的な意味を持つ界面、超薄膜を、磁場方向・偏光方向を自由に変えてXMCD、XMLD測定を行うことはほとんど行われていなかった。

2. 研究の目的

本研究の開始に当たって目標としたのは、磁場方向と偏光方向を独立に制御できる多自由度XMCD、XMLD測定系を開発し、同じく放射光を用いた角度分解光電子分光法(ARPES)と組み合わせ、酸化物界面や超薄膜に出現する新しい電子状態のスピン・軌道・電荷の振る舞い、異種の物質間の界面に現れる新規電子状態を解明することであった。

また、新しく開発された本測定系を、異方性の大きい強相関物質（銅酸化物・鉄系酸化物超伝導体など）の研究の強力なツールとして利用することも目標のひとつに設定した。

3. 研究の方法

高エネルギー加速器研究機構(KEK)の放射光施設(Photon Factory)で立ち上げ中であった高速偏光スイッチング軟X線アンジュレータ・ビームラインと、本研究課題で立ち上げる磁場方向を自由に制御できるベクトル型超伝導磁石(銅酸化物高温超伝導体を使用)を用いた二色性測定装置とを合わせて、世界に類のない

多自由度で情報量の多いXMCD、XMLD実験を立ち上げ(図1)界面、超格子、超薄膜の研究を行った。

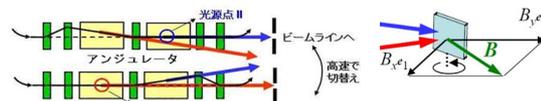


図1: 多自由度X線二色性測定系の模式図。左: 2台のアンジュレータを用いた偏光スイッチング、右: ベクトル型超伝導マグネットの磁場と試料回転。

ARPES測定は、レーザー-MBE装置を用いて作製した酸化物薄膜単結晶試料をin-situ測定で行った。このために、レーザー-MBE装置と光電子分光装置を超高真空中で連結した複合装置の建設・改良を行い、さらには本装置に低温でフェルミ面を計測するための5軸マニピュレーターを設計し導入した。この装置を用いて、原子レベルで構造を制御した様々な強相関酸化物ヘテロ構造、酸化物量子井戸構造を作製し、そのスペクトルをin-situで測定し電子状態を解析した。

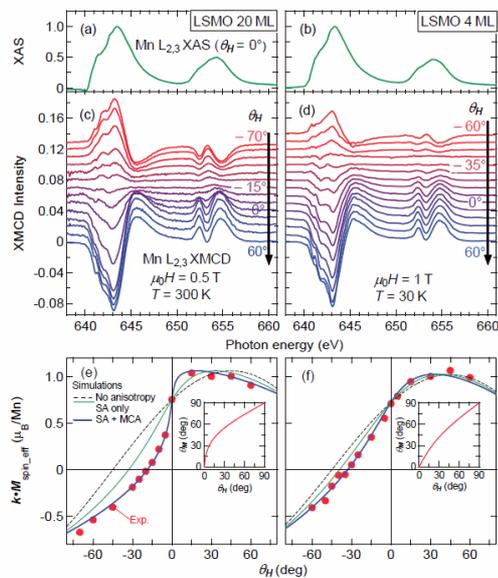


図2: $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ (LSMO) 薄膜の $\text{Mn L}_{2,3}$ 吸収端 XMCD。(a),(b): XAS スペクトル。(c),(d): 様々な磁場角度 θ_H に対する XMCD スペクトル。XMCD 強度の磁場方向依存性と、形状磁気異方性 (SA) 結晶磁気異方性 (MCA) を取り入れたシミュレーションの比較。挿入図は θ_H と磁化角度 θ_M の関係。

4. 研究成果

(1) 界面、超薄膜の特異なスピン、軌道状態: レーザー-MBE 法により原子レベルで構造を制御した強相関酸化物ヘテロ構造を作製し、磁性と軌道状態の薄膜化による変化、基板圧力の影響、界面効果を XMCD を主とした軟 X 線吸収分光により明らかにした。

強磁性金属 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ (LSMO) 薄膜の磁場方向依存 XMCD 測定により、スピン偏極した Mn 3d 電子の空間分布の異方性、軌道磁気モーメントの異方性、およびそれらと結晶磁気異方性の関係を明らかにした。スピン偏極した Mn 3d 電子の異方性は SrTiO_3 基板からの引っ張り圧力から予想される方向で、この異方的スピン分布とスピン-軌道相互作用で結晶磁気異方性が説明されることを示した(図 2)。さらに磁気線二色性 (XMLD) 測定により、スピン分極がスピン-軌道相互作用を通じて軌道を変形させることを示した。圧縮圧力を及ぼす他基板についても同様な研究を行い、磁性薄膜の磁気異方性に関する統一的理解を進めてゆく予定である。

強磁性体 NiFe_2O_4 (NFO) と強誘電性体 BaTiO_3 (BTO) からなる多層膜における電気-磁気結合の増強機構を調べるため、XMCD 測定を行って元素選択的な磁性を測定した。エピタキシャル応力により Ni と Fe の磁気モーメントが同時に増大すること、NFO/BTO 界面における Ni 磁気モーメントの減少と電気-磁気結合の増強の間に強い相関があることがわかった。これを説明するモデルとして、界面における Ni 原子の拡散が NFO 層と BTO 層間の結合を増大させる機構を考えた。本研究の手法は複合材料の界面の研究に有用で、今後も利用されていくものと期待される。

SrTiO_3 基板上に作製した強磁性 SrRuO_3 薄膜の垂直磁気異方性の起源を明らかにするために、様々な膜厚の SrRuO_3 薄膜の XMCD の測定を行った。バルク SrRuO_3 と比べて大きな軌道磁気モーメントが存在すること、膜厚の減少に伴って軌道磁気モーメントがさらに増大することを見出し、スピン軌道相互作用と基板応力を考えて説明した。光電子分光とクラスターモデル解析からは、Ru 4d と酸素 2p 軌道の間非常に強い混成が明らかになった。

保磁力が小さいことが応用の妨げになっている LSMO 薄膜において、保磁力増大の効果をもたらす Ru 添加、Co 添加の働きを明らかにするために、Ru 添加、Co 添加 LSMO 薄膜の XMCD 測定を行った。いずれの置換元素も d 電子が有限の軌道磁気モーメントを持つこと、基板圧力のもとで軌道磁気モーメントが誘起され磁気異方性が増大することが保磁力増大の原因であると結論した。今後は磁場方向依存 XMCD を系統的に測定することによって、磁気異方性の起源に関するより詳細な情報が得てゆく。

基板応力により様々な磁気秩序を示す $\text{Ca}_{1-x}\text{Ce}_x\text{MnO}_3$ 薄膜の相図を XMCD 測定の助けを借りて決定した。 $\text{Ca}_{1-x}\text{Ce}_x\text{MnO}_3$ 薄膜は、基板からのエピタキシャル応力で様々な磁性と軌道

秩序を示し、それぞれ特徴的な磁気異方性を示すが、常磁性の強い基板を用いなければならないことが多く、 $\text{Ca}_{1-x}\text{Ce}_x\text{MnO}_3$ 自体の磁気測定は不可能であった。我々は、強い常磁性を示す NdAlO_3 等の基板上に成長した $\text{Ca}_{1-x}\text{Ce}_x\text{MnO}_3$ の磁気異方性を Mn 内殻 XMCD の磁場方向依存性測定により調べ、 $\text{Ca}_{1-x}\text{Ce}_x\text{MnO}_3$ 薄膜の相図を確定することができた。とくに、磁場印加方向を変えた時の XMCD 強度の変化から磁気異方性を調べ、異なった磁気相を区別することができた。本研究の手法は、通常の磁気測定が困難な薄膜試料でも XMCD で調べる新しいアプローチとして、今後も利用されていくものと思われる。

ハーフメタル・ホイスラー合金 Co_2MnGe と絶縁体障壁 MgO からなる磁気トンネル結合の磁気抵抗の Co と Mn 組成に対する強い依存性の原因を、Co と Mn の XMCD 測定により調べた。組成比を制御した Co_2MnGe と MgO の接合を作製し、Co と Mn の元素選択磁性を XMCD で調べることによって、過剰 Co がスピン磁気モーメントを増大させる一方でフェルミ準位の電子のスピン偏極度を減少させるというシナリオを支持する結果を得た。今後、磁場方向依存 XMCD の測定し、磁気異方性の起源を探っていく。

強磁性半導体薄膜 $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ 、 $\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x\text{As}$ の電子状態、磁性を ARPES、XMCD、共鳴非弾性 X 線散乱 (RIXS) を用いてミクロなレベルから調べた。 $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ の RIXS の結果は、ドーブされたホールが Mn^{2+} イオンと複合体を作り、それらの波動関数が重なって不純物バンドが形成されることが示唆された。また、n-型強磁性半導体として注目されている $\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x\text{As}$ の薄膜試料を用いて XMCD と ARPES を行い、温度の低下とともに超常磁性クラスターが形成されることを見出した。強磁性半導体の不均一で複雑な磁性の研究に元素選択的な手法である XMCD が非常に有効であることが明らかになったので、他の強磁性半導体に対しても同様な測定を進めて行く。

(2) 強相関薄膜、量子井戸の電子状態の観測：
レーザー-MBE 法により原子レベルで構造を制御した強相関酸化物ヘテロ構造を作製し、その界面電子状態を光電子分光法により直接決定した。特に、酸化物ヘテロ界面および酸化物量子井戸構造に発現する新規な 2 次元電子状態に焦点を当て、下記の成果を得た。

金属性酸化物 SrVO_3 および LaNiO_3 超薄膜において、膜厚に依存した金属-絶縁体転移を光電子分光により観測し、詳細に調べた。バンド幅制御の一つの方法として、膜厚を変化させる次元性制御を開発、確立した。 SrTiO_3 基板上に原子レベルで膜厚を制御して作製した SrVO_3 超薄膜の in-situ 光電子分光を行い、その結果バルクの元素置換系 $\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{VO}_3$ では実現されない金属-絶縁体転移 (MIT) を

実現した。理論計算との比較より、観測された MIT が3次元から2次元への次元性低下に由来した MIT であることを明らかにした。同様の研究を LaNiO_3 にも拡張し、定性的に同様な結果を得た。これらより、金属性酸化物の超薄膜化に伴う絶縁体化が普遍的な現象であることを示した。

強相関量子井戸を用いて、2次元フェルミ流体の異常な量子化準位と電子相関制御を実現した。膜厚を制御した SrVO_3 の量子井戸を作製して in-situ ARPES を行った結果、人工構造による強相関電子の2次元閉じ込めと、その量子化準位の観測・制御に初めて成功した。観測された量子化準位は従来の量子井戸の理論で基本的に理解できたが、軌道選択的量子化準位の形成、サブバンドに依存した有効質量の増強という強相関効果による特異な現象を見出した(図3)。

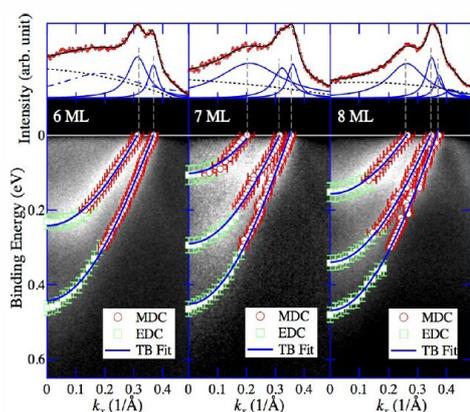


図3. SrVO_3 量子井戸の ARPES スペクトル。上: フェルミ準位上の運動量分布曲線。下: 量子化されたバンド構造。

高温超伝導体に類似の電子状態が理論的に予想されている LaNiO_3 (LNO)/ LaAlO_3 超構造に関連して、LNO 超薄膜の電子状態の膜厚依存性を光電子分光により測定した。結果は理論的予測とは異なり、膜厚約 3-5 ML で金属から絶縁体に転移することがわかった。動的平均場理論 (DMFT) に基づくスペクトルの解析から、この金属-絶縁体転移は表面・界面におけるバンド幅の減少により引き起こされていると結論した。さらに、XAS の線二色性測定より、この絶縁体状態はバルクの RNiO_3 ($R = \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}, \dots$) で見られる電荷不均化状態ではないことがわかった。電荷不均化の抑制は基板からの応力により構造相転移が抑制されたからと考えられる。さらに、電荷不連続の有無による LNO 界面の電子状態の違いについて調べるために、電荷不連続がある SrTiO_3 および電荷不連続のない LaAlO_3 基板上に作成した LNO 薄膜について同様の測定を行った結果、電荷不連続の有無によって超薄膜領域の界面電子状態に明確な違いがあることが明らかになった。

酸化物接合界面におけるバンドオフセットを決定した。界面におけるバンドダイアグラムに関して、ショットキー接合や p-n 接合といった従来の半導体物理の枠内で理解できるかどうかという重要な問題に答えるために、 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ (強磁性金属)/ Nb:SrTiO_3 (n 型半導体) ショットキー接合、および LaMnO_3 (p 型 Mott 絶縁体)/ Nb:SrTiO_3 (N 型半導体) p-n 接合を作製し、バンドダイアグラムを光電子分光により決定した。その結果、従来のショットキー接合理論の枠内でバンドダイアグラムを理解できるものの、界面の終端面の違いに起因した界面ダイポールの形成を見出した。p 型半導体的に振る舞う Mott 絶縁体 LaMnO_3 と n 型 Nb:SrTiO_3 の接合界面については、半導体における p-n 接合理論でよく記述できることを明らかにした。

典型的な強相関モデル物質である金属性酸化物 SrVO_3 薄膜の ARPES 測定を行い、数 eV の広いエネルギー範囲で自己エネルギーの決定に成功した。従来にない高品質のエピタキシャル成長 SrVO_3 薄膜試料を用いて ARPES スペクトルを精密に測定し、新しい計算ループを開発して電子-格子相互作用、電子間相互作用による伝導電子の自己エネルギーを広いエネルギー範囲で求めた。従来、高温超伝導体の自己エネルギーの特異な形状が超伝導機構と関連して議論されてきたが、 SrVO_3 の自己エネルギーも類似の構造を示し、超伝導との関連はもっと慎重に議論すべきことが示された。

フント結合に起因する伝導電子の特異な振る舞いが理論的に予測されている一連の「フント金属」のひとつである d^2 電子系 SrMoO_3 の薄膜試料について、硬 X 線光電子分光実験を行い電子状態を調べた。電子比熱が増強するなど強い電子相関を持つにも関わらず、スペクトル形状には強い電子相関効果は見られなかった。この結果は、フント結合を取り入れた DMFT 計算によりよく説明され、 SrMoO_3 が「フント金属」であることが実証された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 71 件)

M. Kitamura, M. Kobayashi, E. Sakai, R. Takahashi, M. Lippmaa, K. Horiba, H. Fujioka, and H. Kumigashira: Determination of band diagram for a p-n junction between Mott insulator LaMnO_3 and band insulator Nb:SrTiO_3 , Appl. Phys. Lett. 106, 061605--1-5(2015), 査読有. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4908570>

G. Shibata, K. Yoshimatsu, E. Sakai, V. R. Singh, V. K. Verma, K. Ishigami, T.

Harano, T. Kadono, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Sawa, H. Kumigashira, M. Oshima, T. Koide, and A. Fujimori: Thickness-dependent ferromagnetic metal to paramagnetic insulator transition in $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ thin film studied by x-ray magnetic circular dichroism, Phys. Rev. B 89, 235123--1-5 (2014), 査読有.
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.89.235123>

V. K. Verma, V. R. Singh, K. Ishigami, G. Shibata, T. Harano, T. Kadono, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.-J. Huang, C. T. Chen, Y. Zhang, J. Liu, Y.H. Lin, C-W. Nan, and A. Tanaka: Origin of enhanced magnetoelectric coupling in $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{BaTiO}_3$ multilayers studied by x-ray magnetic circular dichroism, Phys. Rev. B 89, 115128--1-7(2014), 査読有.
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.89.115128>

M. Kobayashi, H. Niwa, Y. Takeda, A. Fujimori, Y. Senba, H. Ohashi, A. Tanaka, S. Ohya, P. N. Hai, M. Tanaka, Y. Harada, and M. Oshima: Electronic excitations of a magnetic impurity state in the diluted magnetic semiconductor $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$, Phys. Rev. Lett. 112, 107203--1-5 (2014), 査読有.
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.107203>

T. Harano, G. Shibata, K. Ishigami, Y. Takashashi, V. K. Verma, V. R. Singh, T. Kadono, A. Fujimori, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, T. Koide, H. Yamada, A. Sawa, M. Kawasaki, Y. Tokura, and A. Tanaka: Role of doped Ru in coercivity-enhanced $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ thin film studied by x-ray magnetic circular dichroism, Appl. Phys. Lett. 102, 222404--1-4(2013), 査読有.
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4808090>

E. Sakai, M. Tamamitsu, K. Yoshimatsu, S. Okamoto, K. Horiba, M. Oshima, and H. Kumigashira: Gradual localization of Ni 3d states in LaNiO_3 ultrathin films induced by dimensional crossover, Phys. Rev. B 87, 075132--1-8 (2013), 査読有.
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.87.075132>

藤平 潤一, 内田公, 藤平誠一, 古瀬充穂, 岡野真, 淵野修一郎, 門野利治, 吉松公平, 藤森淳, 組頭広志, 小出常晴: 超高真空 3 軸ボア付伝導冷却型 YBCO ベクトルマグネット装置の開発, 低温工学 48 5 号 233-237 (2013), 査読有. <http://doi.org/10.2221/jcsj.48.233>

V.R. Singh, V.K. Verma, K. Ishigami, G. Shibata, T. Kadono, A. Fujimori, D. Asakura, T. Koide, Y. Miura, M. Shirai, G.-f. Li, T. Taira, and M. Yamamoto, Effects of off-stoichiometry on the spin polarization at the $\text{Co}_2\text{Mn Ge}_{0.36}/\text{MgO}$ interfaces: X-ray magnetic circular dichroism study, Phys. Rev. B 86, 144412--1-6, 2012, 査読有.
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.86.144412>

S. Aizaki, T. Yoshida, K. Yoshimatsu, M. Takizawa, M. Minohara, S. Ideta, A. Fujimori, K. Gupta, P. Mahadevan, K. Horiba, H. Kumigashira, and M. Oshima, Self-energy on the low- to high-energy electronic structure of correlated metal SrVO_3 , Phys. Rev. Lett. 109, 056401--1-5, 2012, 査読有.
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.056401>

M. Minohara, K. Horiba, H. Kumigashira, E. Ikenaga, and M. Oshima: Depth profiling the potential in perovskite oxide heterojunctions using photoemission spectroscopy, Phys. Rev. B 85, 165108--1-6, (2012), 査読有.
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.85.165108>

K. Yoshimatsu, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Yoshida, A. Fujimori, and M. Oshima: Metallic quantum well states in artificial structures of strongly correlated oxide, Science 333, 319-322 (2011), 査読有.
DOI: 10.1126/science.1205771

Yoshimatsu, T. Okabe, H. Kumigashira, S. Okamoto, S. Aizaki, A. Fujimori and M. Oshima: Dimensional-crossover-driven metal-insulator transition in SrVO_3 ultrathin films, Phys. Rev. Lett. 104, 147601--1-4(2010), 査読有.
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.147601>

[学会発表](計 189 件)

藤森淳: ARPES と XMCD から見た強磁性半導体の電子構造と磁性, 第 19 回半導体スピン工学の基礎と応用 (PASPS-19), 東京大学武田ホール(東京都文京区), 2014 年 12 月 15-16 日).

A. Fujimori: Self-energy from the low to high energy scales in the correlated metal SrVO_3 , International Workshop on Strong Correlations and Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy (CORPES13),

DESY, Hamburg(Germany), July 29-August 2, 2013.

H. Kumigashira: Unusual behavior of quantum-well subbands in transition-metal oxide thin films, 40th Conference on the Physics&Chemistry of Surface&Interface, aikoloa, Hawaii(USA), Jan. 20-24, 2013.

A. Fujimori: Magnetic anisotropy of spintronic materials studied by XMCD, 4th APCTP-IACS Joint Conference on Physics of Novel and Emerging Materials, Pohang(China), Oct. 29-31, 2012.

組頭 広志: In-situ 放射光電子分光による強相関酸化物の表面・界面研究, 日本物理学会(2012年年度大会) 関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス(兵庫県西宮市) 2012年3月24-27日)

H. Kumigashira: Metallic quantum well states in artificial structures based on strongly-correlated oxide, 18th International Workshop on Oxide Electronics, Napa, CA (USA), Sep. 26-28, 2011)

A. Fujimori: Photoemission and x-ray absorption spectroscopy of manganite thin films and interfaces, 2011 Villa Conference on Complex Oxide Heterostructures (VCCOH-2011), Las Vegas(USA), April 21-24, 2011.

〔図書〕(計1件)

H. Wadati and A. Fujimori: X-ray spectroscopic studies of conducting interfaces between two insulating oxides, Chapter 11 (pp. 309-324) in "Functional Metal Oxides New Science and Novel Applications" edited by S. B. Ogale, T. V. Venkatesan, and M. Blamire (Weiley-VCH Verlag, Weinheim, 2013).

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 磁場発生装置および磁気分光測定装置
発明者: 古瀬充穂, 岡野眞, 淵野修一郎, 藤森淳, 門野利治, 藤平潤一, 藤平誠一, 内野公, 藤平秀幸

利権者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2012-41922 号

出願年月日: 平成 24 年 2 月 28 日.

国内外の別: 国内

〔その他〕

(1)ホームページ等

東京大学理学系研究科 藤森研究室:

<http://wyvern.phys.s.u-tokyo.ac.jp/f/Research/xmcd/xmcd.htm>

東京大学大学院理学系研究科 HP

<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2011/22.html>

東京大学大学院工学系研究科 HP

<http://www.t.u-tokyo.ac.jp/tpage/release/2011/071903.html>

<http://d.hatena.ne.jp/ut-tlounge/201107>

<http://d.hatena.ne.jp/TodaiGC0E/20110811>

高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 HP

<http://legacy.kek.jp/ja/news/highlights/2011/072117/>

<http://legacy.kek.jp/ja/news/press/2011/071502/>

(2)新聞掲載

日刊工業新聞, 平成 23 年 7 月 15 日朝刊

日経産業新聞, 平成 23 年 7 月 15 日朝刊

6. 研究組織

(1)研究代表者

藤森 淳 (FUJIMORI, Atsushi)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号: 10209108

(2)研究分担者

組頭 広志 (KUMIGASHIRA, Hiroshi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授

研究者番号: 00345092

小出 常晴 (KOIDE, Tsuneharu)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・准教授

研究者番号: 10150012

(H23年度まで分担者として参画)