

機関番号：12601

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2007～2010

課題番号：19684010

研究課題名（和文） 強相関酸化物量子井戸構造のフェルミオロジー

研究課題名（英文） Angle-resolved photoemission study on Fermi surface of quantum well structures based on strongly correlated oxides

研究代表者

組頭 広志 (KUMIGASHIRA HIROSHI)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：345092

研究成果の概要（和文）：

原子レベルで構造を制御した強相関酸化物量子井戸構造を用いて、新奇な2次元電子流体状態を創成・制御することを目的として研究を行った。その結果、強相関酸化物を用いた量子井戸構造を用いることにより、世界に先駆けて強相関電子の2次元閉じ込めとその制御に成功した。さらに、その量子化状態を角度分解光電子分光により特定し、「軌道選択的量子化」や「量子化準位の有効質量発散」といった強相関電子に特有の現象と考えられる奇妙な振る舞いを見いだした。

研究成果の概要（英文）：

The quantum confinement of strongly correlated electrons in artificial structures provides a platform for studying the behavior of correlated Fermi-liquid states in reduced dimensions. The successful creation and control of metallic quantum well states in artificial structures of a strongly correlated oxide reveals the unique behavior of two-dimensional electron liquid states, characterized by the orbital-selective quantization originating from the anisotropic orbital character of the V 3d states and unusual band renormalization of the subbands near the Fermi level, that reflect complex interactions in the quantum well.

交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費       | 間接経費      | 合計         |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2007年度 | 9,900,000  | 2,970,000 | 12,870,000 |
| 2008年度 | 1,900,000  | 570,000   | 2,470,000  |
| 2009年度 | 1,900,000  | 570,000   | 2,470,000  |
| 2010年度 | 1,900,000  | 570,000   | 2,470,000  |
| 年度     |            |           |            |
| 総計     | 15,600,000 | 4,680,000 | 20,280,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：(1) 光電子分光 (2) 強相関エレクトロニクス (3) 表面・界面物性 (4) 強相関電子系 (5) 量子井戸 (6) 酸化物超構造 (7) 酸化物ヘテロ構造 (8) 酸化物薄膜

## 1. 研究開始当初の背景

銅酸化物の高温超伝導に代表される層状酸化物が示す特異物性は、低次元性と結び付いた強相関電子状態にその起源をもつ。層状酸化物の結晶構造を絶縁層（電荷供給層）で

2次元的な伝導層を挟み込んだ構造をもつ自然量子井戸構造ととらえると、低次元強相関物性への最も直接的なアプローチとして、酸化物量子井戸構造を用いることで低次元電子状態を任意に制御し、その物性変化を調

べるという研究に行き着く。つまり、この強相関酸化物量子井戸構造で発現する低次元電子状態を直接観測することは、低次元強相関酸化物の示す特異物性の機構解明に直接結び付くと考えられる。しかしながら、原子レベルで制御された表面・界面を持つ酸化物量子井戸構造を作製した例はほとんどなく、また、作製した量子井戸構造の電子状態を精密に評価できる電子分光装置もなかった等の理由により、研究開始当初においては酸化物量子井戸構造を利用した物質探索・物性制御は萌芽的段階にあった。

## 2. 研究の目的

本研究では、レーザー分子線エピタキシー法（レーザー-MBE 法）により原子レベルで構造を制御した「強相関酸化物量子井戸構造」を作製し、この量子井戸構造を用いて新規な低次元電子状態をデザインする。そして、このフェルミ面トポロジーを高分解能角度分解光電子分光法（ARPES）により直接決定し、物性との相関関係を明らかにすることにより低次元強相関物性を明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

酸化物量子井戸構造を作製し、その場 (*in-situ*)での ARPES 測定を行うためには、レーザー-MBE 装置と光電子分光装置を超高真空下で連結した複合装置が必要である。そのため、本研究ではこれを可能とする「レーザー-MBE + *in-situ* ARPES 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量子井戸構造を作製し、その電子状態を *in-situ* で解析した。

## 4. 研究成果

本研究では、レーザー-MBE 法により原子レベルで構造を制御した「強相関酸化物量子井戸構造」を作製し、その電子状態を光電子分光法により直接決定することで、新規な低次元電子状態をデザインすることにある。本研究課題では「酸化物超構造界面」で発現する新規な2次元電子状態にターゲットを絞って研究を行い、下記の成果を得た。

**(1) バンド絶縁体  $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$  界面で発現する異常な金属層の起源解明:**  $\text{LaO}$  電荷供給層からの $\delta$ ドーピングによる界面2次元電子状態形成が示唆され話題を呼んでいる、バンド絶縁体  $\text{LaAlO}_3$  と  $\text{SrTiO}_3$  とのヘテロ界面について測定を行った。その結果、バンド絶縁体界面で発現する金属層の起源として、これまで提案されてきた界面数層における「電荷移動」現象ではなく、極性  $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$

界面の電荷不整合による電位発散を防ぐために  $\text{SrTiO}_3$  の酸素欠損により生じたキャリアが界面に形成されるノッチ構造に蓄積されることがその起源であることを明らかにした。

**(2)  $\text{SrVO}_3$  超薄膜における次元性制御金属・絶縁体転移:** バンド幅制御による金属・絶縁体転移 (MIT) の起源を調べるための新たな手法として、酸化物量子井戸構造による次元性制御 MIT というアプローチを開発した。具体的には、伝導性酸化物である  $\text{SrVO}_3$  超薄膜を  $\text{SrTiO}_3$  基板上に作製し、その膜厚を原子レベルで制御してその場光電子分光を行った。その結果、元素置換 ( $\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{VO}_3$ ) では MIT が報告されていないペロブスカイトV酸化物において膜厚依存の MIT を観測した。さらに、その実験結果を理論計算と比較することにより、観測された MIT が次元性の低下 (3次元から2次元) に由来した MIT であることを明らかにした。

**(3) 強相関量子井戸構造を用いた2次元フェルミ流体の制御と異常な量子化準位の特定:** 膜厚をデジタル制御した強相関酸化物  $\text{SrVO}_3$  量子井戸構造を作製し、その電子状態を調べるために *in-situ* ARPES を行った。その結果、世界に先駆けて強相関酸化物人工構造による「強相関電子」の2次元綴じ込めと、その量子化準位の観測と制御に成功した。さらに、観測された量子化準位は基本的には従来の量子井戸の理論で説明できることを明らかにした。しかしながら、この強相関量子井戸構造における量子化状態には、1. 軌道選択的量子化準位が形成される、2. サブバンドの有効質量がフェルミ準位近傍で増強する、といった強相関2次元フェルミ液体状態を反映した特徴的な振る舞いを示すことを見出した。これらの結果は、「強相関酸化物人工構造における金属量子井戸状態」という内容で *Science* 誌に掲載が決定している。

## 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33件)

### 1. Metallic Quantum Well States in Artificial Structures of Strongly Correlated Oxide

K. Yoshimatsu, K. Horiba, H. Kumigashira\*, T. Yoshida, A. Fujimori, and M. Oshima  
*SCIENCE, in press.* (査読有り)  
<http://www.sciencemag.org/>

### 2. Dimensional-Crossover-Driven Metal-Insulator Transition in $\text{SrVO}_3$ Ultrathin Films

K. Yoshimatsu, T. Okabe, H. Kumigashira\*, S.

Okamoto, S. Aizaki, A. Fujimori, and M. Oshima  
*Phys. Rev. Lett.* **104**, 147601 [1-4] (2010). (査読有り)

**3. Pressure-induced change in the electronic structure of epitaxially strained  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  thin films;** K. Horiba, A. Maniwa, A. Chikamatsu, K. Yoshimatsu, H. Kumigashira, H. Wadati, A. Fujimori, D. Nomoto, S. Ueda, H. Yoshikawa, E. Ikenaga, J. J. Kim, K. Kobayashi, and M. Oshima  
*Phys. Rev. B* **80**, 132406[1-4] (2009). (査読有り)

**4. Yoshimatsu et al. Reply ;** K. Yoshimatsu, R. Yasuhara, H. Kumigashira\*, and M. Oshima  
*Phys. Rev. Lett.* **102**, 199704[1] (2009). (査読有り)

**5. Thickness dependent electronic structure of  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$  layer in  $\text{SrTiO}_3/\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3/\text{SrTiO}_3$  heterostructures studied by hard x-ray photoemission spectroscopy;** K. Yoshimatsu, K. Horiba, H. Kumigashira\*, E. Ikenaga, and M. Oshima  
*Appl. Phys. Lett.* **94**, 071901[1-3] (2009). (査読有り)

**6. Origin of metallic states at the heterointerface between the band insulators  $\text{LaAlO}_3$  and  $\text{SrTiO}_3$ ;** K. Yoshimatsu, R. Yasuhara, H. Kumigashira\*, and M. Oshima  
*Phys. Rev. Lett.* **101**, 026802[1-4] (2008). (査読有り)

[学会発表] (計 17 件)

**1. 「In-situ photoemission studies on oxide heterostructures」**

組頭広志 (招待講演)

日本物理学会 第 63 回年次大会、2008 年 3 月 23 日、近畿大学 (東大阪) キャンパス

**2. Interfacial Electronic Structure of Perovskite Oxide  $\text{ABO}_3/\text{SrTiO}_3$  Heterojunctions**

Hiroshi KUMIGASHIRA (招待講演)

The IUMRS International Conference in Asia 2008, December 12, 2008, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan

**3. Synchrotron radiation studies of oxide surfaces**

Hiroshi KUMIGASHIRA (招待講演)

6th International Workshop on Oxide Surfaces, January 19, 2009; Schladming, Austria

**4. 「その場放射光電子分光による強相関酸化物超構造の電子状態研究」**

組頭 広志 (招待講演)

日本物理学会第 64 回年次大会、2009 年 3 月 27 日、立教大学

**5. In-situ Photoemission Studies on Oxide Heterostructures**

Hiroshi KUMIGASHIRA (招待講演)

2009 Villa Conference on Complex Oxide Heterostructures (VC-COH)  
September 16, 2009, Ritz Carlton - St. Thomas, USVI

**6. In-situ photoemission studies on oxide heterostructures**

Hiroshi KUMIGASHIRA (招待講演)

11-th International Conference on Electronic Spectroscopy and Structure (ICESS-11), October 8th, 2009, Nara, Japan

**7. In-situ photoemission studies on artificial oxide structures**

Hiroshi KUMIGASHIRA

The 5<sup>th</sup> The Asia-Oceania Forum for Synchrotron Radiation Research (AOFSSR) Workshop, July 8th, 2010, POSCO international Center, Pohang, Korea.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

〔その他〕  
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

組頭 広志 (KUMIGASHIRA Hiroshi)  
東京大学・大学院工学系研究科・准教授  
研究者番号：345092

(2) 研究分担者

なし ( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

なし ( )

研究者番号：