

「機能調和酸化物新機能材料創製に関する研究」

1. 研究概要

(H9年～H11年第I期、H12年～H13年第II期)

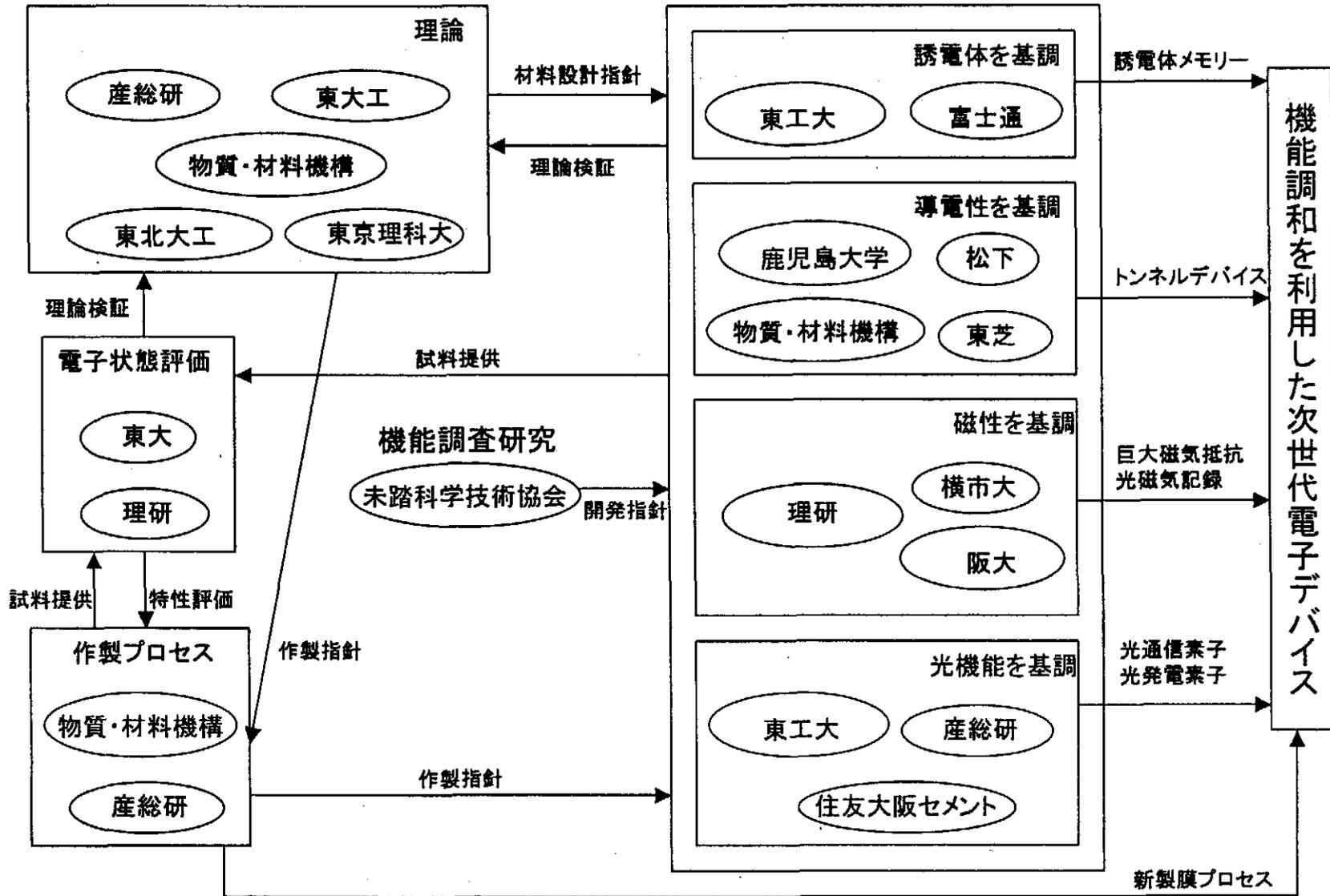
研究代表者: 川合真紀(理化学研究所) 他18機関

| 研究の概要・目標 | 諸外国の現状等 | 研究進展・成果がもたらす利点 |
|---|---|---|
| <p>1 何を目指している</p> <p>遷移金属(Ti, Cu, Nb等)の複酸化物を用いた次世代の電子材料開発のための基盤技術の確立を目指す。</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px 0;"> <p>2年後の目標</p> <ul style="list-style-type: none"> ・機能調和設計システムの開発 ・機能調和発現のための原子層構造創製システムの開発 ・調和機能の解析・評価システムの確立 </div> <p>2 何を研究している</p> <p>機能調和酸化物という共通概念のもと、物質設計に向けた理論研究や機能調和発現に向けたナノスケールでの物質制御を研究している。</p> <p>3 何が新しいのか</p> <p>材料全体の機能の高度化あるいは新機能の発現を目指すために、<u>機能調和酸化物</u>という新しい概念を導入した点。</p> <p>機能調和酸化物とは？</p> <p>異なる物性をもつ遷移金属酸化物を原子層レベルで調和よく界面制御した物質接合により、材料全体で調和よく機能性を発揮できるようにした材料。</p> | <p>1 我が国の水準及び諸外国の現状</p> <p>機能調和酸化物の概念はわが国で生まれたものであり、酸化物を対象とした研究(基礎研究から応用研究に至るまで)は日本がその先端を走っていると考えてよい。しかしながら、近年欧米においても類似の研究に着手しており、わが国も一層研究を加速させる必要がある。</p> | <p>1 世界との水準の関係</p> <p>機能調和酸化物研究に不可欠な酸化物薄膜材料の研究についてはトップレベルを維持できる。</p> <p>2 波及効果</p> <p>○計算手法の改善により、遷移金属酸化物のような電子相互の相関性が強い系、あるいは表面・人工格子等の原子配列の周期性の途切れる系に対しても理論計算が可能となり、材料設計が容易になる。</p> <p>○種々の金属酸化物の単結晶表面を原子レベルで平坦化出来るようになり、極めて平坦な薄膜の形成が可能となった。</p> <p>→原子レベルでの接合界面が広くでき、人工格子デバイス実用化への寄与が期待できる。</p> <p>○電子構造変化の評価およびそれに基づく積層構造の最適化により、バルクや単層状態より優れた機能性新材料物質設計のための基盤データが得られ、遷移金属酸化物の電子構造パラメータの系統的かつ精密な決定による物質設計を支援できる</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>次世代電子材料開発に資する 基盤技術の確立</p> <ul style="list-style-type: none"> ・種々の薄膜形成技術の高度化 ・物性評価手法の高度化 ・新機能素子の開発 |

機能調和酸化物新機能材料創製に関する研究 第Ⅱ期体制図

機能発現基礎

機能発現に関わる物質制御



2. 所要経費一覧

第I期

単位(千円)

| 研究項目 | 担当機関等 | 研究担当者(責任者) | 平成9年度経費 | 平成10年度経費 | 平成11年度経費 | 第I期経費総額 |
|--------------------------|-------------------------|------------|---------|----------|----------|---------|
| 1. 理論・設計技術に関する研究 | | | 41,771 | 33,103 | 29,467 | 104,341 |
| (1)酸化物格子の非経験的電子構造計算 | 科学技術庁無機材料研究所 | 新井正男 | 25,195 | 18,271 | 19,868 | 63,334 |
| (2)不安定解析による物質発現機構 | 通産省工技院物質工学工業技術研究所 | 長嶋豊兵 | | | | |
| (3)酸化物格子の成長過程シミュレーション | 東京理科大学理工学部 | 浜田典昭 | 9,957 | 7,865 | 4,938 | 22,760 |
| | 東北大学工学部 | 宮本明 | 6,619 | 6,967 | 4,661 | 18,247 |
| 2. 材料創製技術に関する研究 | | | 112,099 | 113,034 | 74,254 | 299,387 |
| (1)酸化物人工格子制御形成技術 | | | | | | |
| ①原子エピタキシャル成長による形成機構 | 理化学研究所 | 川合真紀 | 31,791 | 31,221 | 28,323 | 91,335 |
| ②状態を制御した分子線による合成過程制御 | 科学技術庁金属材料技術研究所(株)松下電器産業 | 矢田雅規 | 28,340 | 28,100 | 6,429 | 62,869 |
| ③多元薄膜蒸着技術による積層形成 | 科学技術庁無機材料研究所 | 瀬恒謙太郎 | 17,722 | 15,857 | 14,078 | 47,657 |
| ④圧力におけるインターグロス形成 | 科学技術庁無機材料研究所 | 室町英治 | 3,148 | 8,358 | 5,436 | 16,942 |
| (2)機能酸化物積層構築技術 | | | | | | |
| ①新規高強誘電体人工格子の制御形成 | 大阪大学産業科学研究所 | 田畑仁 | 21,698 | 20,093 | 14,044 | 55,835 |
| ②化学/物理変調による光・電子機能発現 | 東京工業大学応用セラミックス研究所 | 川副博司 | 9,400 | 9,405 | 5,944 | 24,749 |
| 3. 構造・評価技術に関する研究 | | | 80,369 | 81,129 | 70,568 | 232,066 |
| (1)酸化物格子の表面・界面構造評価 | | | | | | |
| ①導電性酸化物におけるヘテロ界面制御 | 通産省電子技術総合研究所 | 寺田教男 | 26,255 | 24,547 | 18,809 | 69,611 |
| ②酸化物超薄膜の表面構造制御と機能 | 通産省物質工学工業研究所 | 野副尚一 | 10,591 | 12,975 | 10,720 | 34,286 |
| (2)酸化物格子の電子構造評価 | | | | | | |
| ①光電子分光法による電子構造・物性評価 | 東京大学大学院 | 藤森 淳 | 11,997 | 13,944 | 14,364 | 40,305 |
| ②高分解能レーザー計測による電子構造・物性の評価 | 理化学研究所 | 宗像利明 | 12,613 | 12,210 | 13,166 | 37,989 |
| (3)酸化物格子の機能・特性評価 | | | | | | |
| ①光機能の評価と制御 | 通産省電子技術総合研究所 | 仁木栄 | 7,844 | 7,372 | 5,408 | 20,624 |
| ②機能調和薄膜作製とその電気・磁気的特性 | 横浜市立大学 | 小川恵一 | 11,069 | 10,080 | 8,101 | 29,250 |
| 4. 材料適用周辺技術に関する研究 | | | 78,689 | 72,944 | 55,724 | 207,357 |
| (1)機能調和酸化物の材料適用性評価 | (社)未踏科学技術協会 | 栗野常久 | 21,130 | 19,086 | 17,376 | 57,592 |
| (2)強誘電体ヘテロ接合素子 | 東京工業大学 | 吉本護 | | | | |
| (3)素子機能を単位胞に内在する層状酸化物 | (株)富士通 | 吉田親子 | 19,682 | 18,328 | 14,185 | 52,195 |
| (4)導波路型光機能素子 | (株)東芝 | 池川純夫 | 19,173 | 17,518 | 16,156 | 52,847 |
| | (株)住友大阪セメント | 永田裕俊 | 18,704 | 18,012 | 8,007 | 44,723 |
| 5. 研究推進 | | | 208 | 209 | 271 | 688 |
| 所要経費(合計) | | | 313,136 | 300,418 | 230,284 | 843,838 |

第Ⅱ期

単位(千円)

| 研究項目 | 担当機関等 | 研究担当者 (責任者) | 平成12年 度経費 | 平成13年 度経費 | 第Ⅱ期 経費総額 |
|-----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|--------------|-------------|
| 1. 機能発現基礎に関する研究 | | | 85,574 | 55,071 | 140,645 |
| (1) 物質理論・基礎解析 | | | | | |
| ① 酸化物格子の表面・界面電子構造 | 物質・材料研究機構 | 新井正男 | 7,826 | 4,810 | 12,636 |
| ② 大規模並列分散電子状態計算による局所表面構造の研究 | 産業総合技術研究所 | 長嶋雲兵 | 4,793 | 3,519 | 8,312 |
| ③ 応答関数を用いた物質設計 | 東京理科大学理工学部 | 浜田典昭 | 5,287 | 3,906 | 9,193 |
| ④ 多成分酸化物格子の結晶成長シミュレーション | 東北大学大学院 工学研究科 | 宮本 明 | 5,159 | 3,222 | 8,381 |
| ⑤ 電子相関効果を取り入れた酸化物格子の物性解析 | 東京大学大学院 工学研究科 | 石原純夫 | 4,023 | 3,881 | 7,904 |
| (2) 制御・評価 | | | | | |
| ① 作製プロセス基礎 | | | | | |
| i) 表面反応から見た作製プロセス基礎 | 産業総合技術研究所 | 野副尚一 | 9,657 | 5,944 | 15,601 |
| ii) ビーム制御による作製プロセス基礎 | 物質・材料研究機構 | 矢田雅規 | 19,263 | 11,666 | 30,929 |
| ② 評価基礎 | | | | | |
| i) 光電子分光法による電子構造・物性の精密評価 | 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 | 藤森 淳 | 17,605 | 10,875 | 28,480 |
| ii) 2光子光電子分光法による電子構造の評価 | 理化学研究所 | 宗像利明 | 11,961 | 7,248 | 19,209 |
| 2. 機能発現に関わる物質制御 | | | 150,967 | 90,264 | 241,231 |
| (1) 誘電体を基調とする機能調和物質制御 | | | | | |
| ① 誘電体ヘテロ接合・ナノ構造制御 | 東京工業大学 応用セラミックス研究所 | 吉本 護 | 16,056 | 9,600 | 25,656 |
| ② 強誘電体高密度メモリデバイス | 富士通(株) | 吉田親子 | 11,322 | 6,338 | 17,660 |
| (2) 導電性を基調とする機能調和物質制御 | | | | | |
| ① 伝導デバイスに向けての原子層エンジニアリング | 松下電器産業(株) | 瀬恒謙太郎 | 10,450 | 6,330 | 16,780 |
| ② 微視的ヘテロ界面制御による伝導性制御 | 鹿児島大学 | 寺田教男 | 22,414 | 13,479 | 35,893 |
| ③ 原子層エンジニアリングによる超伝導特性制御 | (株)東芝 | 池川純夫 | 10,463 | 6,310 | 16,773 |
| ④ インターグロス層の制御による伝導機能制御 | 物質・材料研究機構 | 室町英治 | 7,929 | 4,805 | 12,734 |
| (3) 磁性を基調とする機能調和物質制御 | | | | | |
| ① ナノスケール人工格子による新規素子 | 大阪大学 産業科学研究所 | 田畑 仁 | 17,687 | 10,583 | 28,270 |
| ② 欠陥制御による電化・スピン秩序の制御 | 横浜市立大学 | 小川恵一 | 8,049 | 4,893 | 12,942 |
| ③ 表面界面に現れる電子スピン特性 | 理化学研究所 | 川合真紀 | 22,419 | 13,514 | 35,933 |
| (4) 光機能を基調とする機能調和物質制御 | | | | | |
| ① ワイドギャップ酸化物の光・電子制御 | 東京工業大学 応用セラミックス研究所 | 細野秀雄 | 8,164 | 4,822 | 12,986 |
| ② 光学物質複合構造における光機能の制御 | 産業総合技術研究所 | 仁木 栄 | 8,019 | 4,794 | 12,813 |
| ③ 光機能応用のための強誘電体結晶基板制御 | (株)住友大阪セメント | 山本 太 | 7,995 | 4,796 | 12,791 |
| 3. 機能調和システム基盤技術のための調査研究 | (社)未踏科学技術協会 | 栗野常久 | 8,201 | 5,936 | 14,137 |
| 4. 研究推進 | 文部科学省研究振興局 | | 262 | 531 | 793 |
| 所要経費(合計) | | | 245,004 | 151,802 | 396,806 |

3. 研究成果の概要

課題名(研究代表者):機能調和酸化物新機能材料創製に関する研究(川合 真紀)

【研究目標の概要】

近年、Si を代表とするエレクトロニクスデバイス分野では、集積技術が進歩し、素子の小型サイズ化により、その性能向上を実現してきた。しかし、デバイス性能向上のためのさらなる小型サイズ化は、異なる性質をもつ物質間の接合を原子層レベルで制御する必要を生じさせた。従来の Si を代表とする半導体デバイスでは物性の異なる材料を接合するとき、結晶構造も異なるので、原子層レベルでの最適制御に関して未だ解決すべき問題が多い。ペロブスカイト型遷移金属酸化物の特徴の一つは、同一の結晶構造を保ちながら、含まれる遷移金属の種類を変えることにより強誘電体から超伝導体に至るまでの多彩な電子物性を示すところにある。ペロブスカイト型遷移金属酸化物では異なる機能を有する物質を原子層レベルで接合することが可能であり、各々の異なる機能を調和よく原子層レベルで接合するには適した物質系であるといえる。

遷移金属を含む複酸化物系物質群の際だった特徴の一つは、強い電子間相互作用(電子相関効果)を示すことである。従来の電子機能材料が電子の持つ電荷の自由度だけを活用していたのに対し、これらの物質群は電子のスピンと電荷が複合した物性を示すことが知られており、より多彩な物性や機能発現が期待できる。

電子相関効果は、格子歪や格子内の元素置換、隣接する原子層からのキャリアの導入等により制御可能であり、人工格子による新規物質探索や既存の半導体デバイスとの組み合わせによる新しい機能発現の可能性が期待できる。

本課題の第 I 期研究は、機能調和探索と位置付け、機能調和酸化物形成のための要素技術の確立と、基礎物性の確認を行った。ここでの成果を踏まえ、第 II 期研究では機能発現のための基盤技術の確立をめざす。本研究を実施するに当たり、①機能発現基礎研究、②機能発現に関わる物質制御研究、および、③機能調和システム基盤技術の調査研究の3研究項目を設定し、これらの研究項目を有機的に融合して機能調和酸化物材料研究を実施する。

【研究成果の概要】

「機能調和酸化物新機能材料創製に関する研究」第Ⅱ期に相当する平成12年度～13年度の研究は、Ⅰ期に続き立木 昌(物質・材料研究機構)を推進委員長として実施された。第Ⅰ期は、機能調和探索と位置付け、機能調和酸化物形成のための要素技術の確立と基礎物性の確認を行った。その成果をふまえて、第Ⅱ期では、機能発現のための基盤技術の確立を目指し、1)機能発現基礎研究、2)機能発現に関わる物質制御、および、3)機能調和システム基盤技術の調査研究の3つの研究班を組織し、これらの研究班の有機的な融合により研究を実施した。以下にその成果を示す。

第Ⅰ期で開発した高速化量子分子動力学法に基づく結晶成長シミュレータを用いて電子移動、化学反応を伴う酸化物結晶成長のシミュレーションを行い、酸化物格子形成を精密制御する上での指針とした。酸化物格子の形成、積層構造の構築に関しては、まず、酸化物の最表面構造を走査プローブ顕微鏡法により解析するとともに、収束イオンビーム、活性酸素ビーム等を用いた積層界面の状態密度の制御や界面相の変質抑制、状態制御酸素ビームによる精密酸素制御等によって酸化物薄膜を積層する表面・界面のマイクロな状態の精密な制御を行った。これにより、Y系超伝導酸化物のc-軸積層型接合、結晶方位の制御されたITO/CeO₂/Si系MIS型ショットキー接合、YFeO₃上CoFe/Cu人工格子のスピンバルブ型デバイス作製等、これまで困難であったヘテロ接合、積層構造構築を実現し、機能調和酸化物のマクロ特性を飛躍的に向上させられた。また、第Ⅰ期で開発したパルスレーザー堆積(PLD)法、レーザーアブレーション法、分子線エピタキシー(MBE)法、スパッタリング蒸着法等の種々の気相成長法に、活性酸素ビームや状態制御酸素分子ビーム等の精密酸化制御と酸化物格子形成条件の最適化を施すことにより、薄膜化が困難とされてきた機能調和酸化物の薄膜化に成功し、機能を発現させたり、あるいは従来の機能を格段に向上させるに至った。その成果の数例を以下に示す。

- ・ (La, Ba)MnO₃系薄膜の精密制御形成により多結晶バルク材に比して2倍の磁気抵抗(MR)効果を実現し、室温で酸化物における最高値(45%)の巨大磁気抵抗効果を達成
- ・ Si/CeO₂/ITO ダブルヘテロ接合の室温形成により、太陽電池セルとして10%を越える高変換効率を達成
- ・ 非冷却型高感度赤外イメージセンサーへの応用が期待されるSmNiO₃薄膜の金属-絶縁体相転移を室温以上で実現
- ・ Sm_{1-x}Sr_xMnO₃, Bi_{1-x}Sr_xMnO₃等のMn系酸化物の薄膜化と理論的に匹敵する最大磁化、大きな磁気抵抗等の機能発現を達成

- ・原子レベルで制御して積層された $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CoFe}$ の3層構造素子において室温で10%以上の大きな磁気抵抗特性を実現し、磁気抵抗効果を示す伝導デバイスとしての基本動作を実現

一方、薄膜化とは別に、超高压合成法、高酸素圧合成法によるバルク機能調和酸化物作製においては、金を含む新しい超伝導体($\text{AuBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{11}$, $T_c=99\text{K}$)、Ru-1212系磁性超伝導体($T_c=43\text{K}$)等いくつかの新しい機能調和酸化物を発見した。

また、機能調和酸化物の新機能発現、デバイス化に向けて戦略的・組織的な取り組みを行った。理論計算による機能調和酸化物の電子構造解析や機能発現に果たす電子相関効果の役割の解明、ならびに高分解能光電子分光法、2光子光電子分光法等を用いた電子構造、電子物性解析に基づき、新機能発現の設計指針をたて、機能調和酸化物格子の精密な制御形成によりその機能発現を実証した。これらの中にはデバイスとして実用可能に近いものもいくつかある。以下にその成果を示す。

- ・ Mn 酸化物は、キャリア濃度を変化させることにより磁性、電気伝導が変化することに着目し、Mn 酸化物と光学体 SrTiO_3 あるいは n 型半導体 Nb-SrTiO_3 との機能調和ヘテロ積層構造を作製して光や電場により Mn 酸化物のキャリア濃度を制御することを試みた。その結果、光照射や電場による Mn 酸化物の強磁性、超巨大磁気抵抗等の変化を引き起こすことに成功した。この成果は、従来の半導体では電子の流れのみを制御してきたのに対し、機能調和酸化物デバイスでは、電気伝導(電荷)と磁性(スピン)を同時に制御できることを実証するもので、光や電場により磁性や電気伝導特性を制御する新しい情報伝達材料への道を開くものである。
- ・ Mn 系酸化物($(\text{La}, \text{Ba})\text{MnO}_3$)薄膜において、基板・薄膜界面の格子歪みを利用して電子構造を制御することにより、室温で MR 比45%という酸化物における最高値の超巨大磁気抵抗効果を達成することにも成功した。界面格子歪みによるスピン制御を通じて、従来低温、高磁場でのみ発現していた機能を室温で発現可能にしたことは、基礎科学のみならず、機能性酸化物の応用上の意義も非常に大きい。
- ・ 機能調和酸化物の基本設計指針である、同一構造による pn 接合の実現を目指し、ともにデラフォサイト構造である p 型 CuAlO_2 薄膜と n 型 AgInO_2 薄膜の作製を実現した。さらに、界面での格子ミスマッチによる歪みを解消するため、単一物質による pn 接合を目指し、 CuInO_2 の不純物制御により、単一物質での p 型化および n 型化にも成功した。これらの結果、界面で構造的に調和がとれた pn 接合デバイス作製への道が開かれた。

また、プロジェクトの進展の過程で、いくつかの問題点の解明がなされた。

- ・ 酸化物格子の形成過程において、基板や成長膜とその表面に吸着した原子・分子間に電荷移動が生じると表面に応力が発生すること、また、その応力により酸化物格子の形成過程や形成速度が変化することが明らかとなった。この応力をモニターし、制御できれば、酸化物格子の制御形成や応力に誘起される機能発現を制御できることを実証した。
- ・ FRAM 形成プロセスにおいて問題となっている水素による強誘電特性の劣化について、第I期で確立した SPM(走査型プローブ顕微鏡)圧電歪み測定法等を用いて水素劣化した PLZT キャパシタの強誘電特性をドメインレベルで調べ、空間電荷のトラップに起因する分極状態の部分的なピニングが起きていることを突き止める等、その劣化機構を解明した。
- ・ 高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の電子構造の精密解析の結果、電子構造に対するストライプの揺らぎが超伝導臨界温度を低下させることが明らかとなった。
- ・ 超伝導膜のバッファ層や層間絶縁膜としてよく使われる $\text{CeO}_2(001)$ 配向膜が島状成長する問題は、低酸化力・高成長温度、Ce の3価希土類元素置換等により解決できることを突き止めた。
- ・ 第一原理による電子構造計算から、蛍石型ブロックを持つ高温超伝導関連物質でのホールドープが困難な原因が解明された。

こうした問題点の解明は、今後の応用展開への大きな支柱となる。

以上、第II期においては、当初の予想以上の大きな成果が得られた。本プロジェクトで掲げた「機能調和酸化物による新機能発現」というコンセプトに対する確信と機能調和酸化物によるデバイス応用の展望に対する確かな手応えを得るに十分な成果が得られたと考える。

4. 研究成果公表等の状況

【研究成果発表等】

第Ⅰ期

| | 原著論文による 発表 | 左記以外の 誌上発表 | 口頭発表 | 合計 |
|----|---------------|---------------|------|------|
| 国内 | 10件 | 34件 | 276件 | 320件 |
| 国外 | 206件 | 27件 | 96件 | 329件 |
| 合計 | 216件 | 61件 | 372件 | 649件 |

第Ⅱ期

| | 原著論文による 発表 | 左記以外の 誌上発表 | 口頭発表 | 合計 |
|----|---------------|---------------|------|------|
| 国内 | 74件 | 44件 | 341件 | 459件 |
| 国外 | 208件 | 13件 | 149件 | 370件 |
| 合計 | 282件 | 57件 | 490件 | 829件 |

(注：論文件数は、既発表論文数を記載し、投稿中の論文については括弧書き（内数）で記載）

【特許等出願等】

31 件（国内30件、国外 1件）

【受賞等】

7件（国内 7件、国外 0件）

1. 川合真紀：第16回猿橋賞、「固体表面における化学反応の基礎研究」、1996年5月
2. 久保利隆：日本表面科学会奨励賞、「MgO(100) 表面上にエピタキシャル成長したチタン酸化物表面形態の研究」、日本表面科学会、2001年11月28日
3. 吉本 護；手島記念財団発明賞、「表面特性を改善するサファイア単結晶基板の熱処理方法」、2001年3月19日
4. 田畑 仁：(財)丸文研究交流財団 研究奨励賞「レーザー-MBE法による強誘電体/強磁性体機能調和人工格子の創成」、平成13年

5. 田中 秀和、日本MRS 奨励賞、「Novel Functional Magnetic Oxide Artificial Lattices in Strongly Correlated Electron System」 H12年12月
6. 田中 秀和、応用物理学会 第10回講演奨励賞、「強相関電子系 (La,Ba)MnO₃/Sr(Ti,Nb)O₃-n接合における磁気輸送特性の室温電場制御」 H13年3月
7. 岩田拓也：応用物理学会講演奨励賞「ZnOSe自然超格子の発見」 2002年3月

【主要雑誌への研究成果発表】

第II期

| Journal | IF値 | 件数 | 合計 |
|-----------------------------------|--------|----|--------|
| IEEE Trans.Appl.Superconductivity | 0.791 | 3 | 2.373 |
| Physica B | 0.893 | 7 | 6.251 |
| Physica Status Solidi | 1.035 | 3 | 3.105 |
| Jpn, J. Appl. Phys. | 1.157 | 30 | 34.71 |
| Thin Solid Films | 1.16 | 6 | 6.96 |
| Appl. Surf. Sci. | 1.222 | 8 | 9.776 |
| Solid State Commun. | 1.271 | 7 | 8.897 |
| J. Crystal Growth | 1.375 | 3 | 4.125 |
| Physica C | 1.489 | 16 | 23.824 |
| Diamond and Related Materials | 1.591 | 2 | 3.182 |
| J. Phys. Soc. Jpn. | 1.943 | 5 | 9.715 |
| J. Appl. Phys. | 2.18 | 12 | 26.16 |
| Surface Science | 2.198 | 7 | 15.386 |
| Phys. Rev. B | 3.085 | 21 | 64.785 |
| J. Chem. Phys. | 3.301 | 8 | 26.408 |
| J. Phys. Chem. B | 3.388 | 4 | 13.552 |
| Appl. Phys. Lett. | 3.906 | 18 | 70.308 |
| Phys. Rev. Lett. | 6.462 | 5 | 32.31 |
| Science | 23.872 | 1 | 23.872 |
| Nature | 25.814 | 2 | 51.628 |