

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 電界効果型ナノ構造光機能素子の集積化技術開発

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点)

研究代表者

鯉沼 秀臣 (東京大学 新領域創成科学研究科、客員教授)

主たる共同研究者

松本 祐司 (東京工業大学 応用セラミックス研究所、准教授) (研究開始2005.4～)

福元 博基 (東京工業大学 資源化学研究所、助教)

角谷 正友 ((独)物質・材料研究機構 材料信頼性領域、主幹研究員)

和田 恭雄 (東洋大学学際・融合科学研究科、教授)

3. 研究内容及び成果

### チーム全体概要

酸化物と有機・分子性半導体について、構造を原子レベルで制御する汎用性の高い薄膜技術確立し、明確な構造物の電子・光・磁気物性を組織的に探索することが本プロジェクトの基本的課題である。エネルギー変換を始めとする新たな機能材料・デバイスへの応用が期待されているこれらの素材は、多様な構成元素の組み合わせ、化学結合、立体構造を有し、それに伴って多様な物性、機能を発現しうる。しかし、通常の半導体に比べてはるかに遅れている高純化・プロセス技術は、そのポテンシャルの十分な開花を妨げてきた。機能発現の基本である価電子制御においても、微量不純物のドーピングで目的が達成できるシリコンや化合物半導体よりも多くの難しさがある。純度の高い単結晶育成やドーパントの置換固溶の難しさ、電子準位のミスマッチ等の問題が大きい。不純物添加による構造の乱れを避けて電子物性を制御する方法として、電界効果によるキャリア誘起の可能性および構造と機能の相関についても検討した。研究手法においても、ナノテクノロジーに加えて、代表者らが開発してきたコンビナトリアル固体材料技術を拡張し、スピードと革新性を有するシステム開発を世界に先駆けて展開した。

本プロジェクトの領域は、素材的にもプロセス的にも応用的にも非常に広い範囲にわたる。主要な目標を以下の3点に設定し、材料・プロセス・デバイスの研究者をバランスよく配置し、広範な適用性・戦略性を有するシステム開発を重点テーマとして含む点にも本プロジェクトの特徴がある。

取り扱う材料、プロセスの複雑性・多様性に起因する大量の反応・構造制御パラメーターの最適化問題を100倍速くすることを目指し、コンビナトリアルテクノロジーを積極活用する集積化システムを設計・試作した。

新たに合成した 共役分子を含む有機物や酸化物単結晶の表面・界面、及び薄膜成長をナノレベル制御する技術を世界に先駆けて開発した。

上記技術により明確なナノ構造体を作製し、電界効果による物性制御と新たな光・電子機能を探索し、機能素子への応用展開の可能性を追求した。

### メインチームの主な成果

(東京大学 鯉沼・伊高グループ、東京工業大学 松本グループ)

1) モジュール型ラボラトリーの提案と構築

様々な新機能材料の発見やデバイス構造の高度複雑化に伴い、各々の材料に適した様々な製膜法が必要となり、状況に応じてシステムを組み替える必要がある。また、表面敏感な薄膜の測定には大気に曝すことなく測定する必要がある。外径 203mmのフランジによる超小型ユニットをベースとし、製膜から測定をモジュ-

ルで結合する新システムを構築した。

## 2) TiO<sub>2</sub> 表面の超平坦化と新電子機能

原子レベル平坦性基板は、高品質薄膜の作製や原子レベルでの表面現象の解明に欠かせない。化学・熱処理によって TiO<sub>2</sub> 単結晶基板の原子レベル平坦化に初めて成功した。

### 2.1 ルチル・アナターゼの作り分け

SrTiO<sub>3</sub> 基板とサファイア基板の使い分けにより、TiO<sub>2</sub> のルチル・アナターゼを作り分けに成功し、結晶構造に起因した電子物性制御が可能となった。

### 2.2 室温透明強磁性体 Co ドープ TiO<sub>2</sub> の機構解明

Co ドープ TiO<sub>2</sub> の機構解明を推し進め、キャリア誘起の現象であることを突き止めた。

### 2.3 TiO<sub>2</sub> を活性層とする新規電界効果トランジスタの作製

TiO<sub>2</sub> は光触媒や太陽電池への応用だけではなく、電子・磁性材料としても注目を集め始めているが、TiO<sub>2</sub> の電界効果デバイスの研究報告例はこれまでに無かった。上記の原子レベル平坦性基板を用いることにより TiO<sub>2</sub> 電界効果トランジスタの動作に初めて成功した。

### 2.4 二酸化チタンヘテロ構造の創製と新現象・機能探索

原子レベル平坦化技術をベースにして、超親水化に与える表面ナノ不純物効果や二酸化チタン光触媒の異常膜厚・添加剤効果などを見出した。また放射光光電子分光を通して遷移金属添加二酸化チタン薄膜の電子状態を明らかにした。

## 3) 分子性固体における分子層エピタキシー、電界効果デバイスの作製の開発

### 3.1 世界最高移動度の分子性固体 n 型半導体電界効果トランジスタ

ペンタセン単分子層バッファーは基板の分子ぬれ性を改善し、その上に堆積する C<sub>60</sub> 薄膜の結晶性を画期的に向上させることを見出し、世界最高の n 型電界効果移動度 (5cm<sup>2</sup>/Vs) を有する FET の作製に成功した。

### 3.2 連続波レーザー MBE による分子層エピタキシー

赤外線半導体レーザーを用いた連続波レーザー MBE 法の開発を進め、共役半導体 C<sub>60</sub> 薄膜の成長過程における RHEED 振動の観察に初めて成功した。

## サブチームの成果

### 1) 分子エレクトロニクスを指向した 共役有機新物質の探索と電子物性開発

(東京工業大学 福元グループ)

共役有機分子の分子設計とその合成法の確立を進め、共役オリゴマー薄膜の電子・光特性ならびに分子構造解析と FET 特性評価を行った。

### 2) 内部電界効果による無機半導体薄膜の新機能探索 (物質・材料研究機構 角谷グループ)

溶液処理による窒化物薄膜の極性制御法を開発した。極性制御は今後の界面デバイスの作製において重要となる技術である。また、ワイドギャップ半導体である窒化物薄膜の光触媒効果を新たに見出した。一方では、レーザー基板加熱法を取り入れた有機金属化学堆積法を用いて酸化亜鉛発光デバイス用薄膜の高品質化に成功した。

### 3) 有機ナノ構造機能素子と集積化技術の開発 (東洋大学 和田グループ)

半導体プロセスを駆使して分子ナノデバイス指向の超平坦基板を作製した。ナノスケール電極によるペンタセン単一結晶粒・結晶粒界抵抗の測定やグラフォエピタキシーによる有機分子の配列制御、単一分子特性評価用ナノ電極作製技術の開発を行った。

## 4. 事後評価結果

4 - 1 . 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況  
得られた成果を以下にまとめる。

原著論文発表(国内誌 0 件、国際誌 236 件)、その他の著作物・総説、書籍 87 件

学会招待講演(国内会議 39 件、国際会議 76 件)

学会口頭発表(国内会議 184 件、国際会議 69 件)ポスター発表(国内会議 12 件、国際会議 97 件)

国内特許出願 (21 件)、海外特許出願 (6 件)

受賞 7 件、新聞報道 8 件

以上のように、学会発表、総説執筆、マスコミ発表等は極めて活発で、原著論文数は十分に満足できるものである。また、インパクトファクターが6以上の論文が 12 報含まれており、得られた成果が高い注目を浴びていることもわかる。あえて難を言うならば、グループの規模に比して高インパクトファクターの論文数がもう少しあれば一層よかったと思われる。研究代表者 鯉沼秀臣氏は、酸化物室温透明磁性体の発見とその後の希薄磁性酸化物(スピントロニクス)研究に対して、各分野で引用件数の多い論文執筆者に送られる Japan Research Day & Research Front Award 2007 Excellence in Emerging Research Fronts トムソンサイエンティフィック(2007 年 9 月)を受賞しており、得られた成果が高い注目を集めていることがわかる。

更に、特許出願件数も 27 件と多く、特に海外出願 6 件は、その内容の高さを示している。

#### 4 - 2 . 成果の戦略目標・科学技術への貢献

高性能有機トランジスタや原子レベル平坦化基板、光触媒に関する新現象発見などの興味深い結果が得られており、今後の発展が期待されるレベルにある。ZnO 発光素子や透明磁性材料、太陽電池など光機能素子、エネルギー材料への展開は、まだ今後の研究方向次第であり、更なる発展が望まれる。

さらに、他の研究チームと異なって、コンビナトリアル技術やデスクトップラボラトリーシステムなどのような手段・方法論における成果も含まれている。かなり広い枠組みでの研究を進めてきていることによって、当座の目標が見えにくく、若干、散漫な印象を受けるとの指摘もあるが、それぞれの得られた成果を個々に見れば十分高いレベルにある。例えば、皆が料理の腕を競い合う中で、鋭い包丁や鍋などの道具にまで立ち戻ってこだわりを見せた研究とも言える。これらの 道具 自体が、ものづくり研究を画期的に高速化する世界戦略ツールとなる可能性が高い。得られた萌芽的成果の“選択と集中”をはかり、死の谷を渡って、次のダーウィンの海に繰り出し、新大陸発見にまで歩みを進めて欲しい。

科学技術の進歩が期待される成果として、透明磁性酸化物の進展、界面現象・電界効果に基づく新しい物性応用、有機分子エレクトロニクスにおける構造と機能の理解が挙げられ、社会・経済の発展が期待される成果・展開として、ZnO 発光素子の実用化、薄膜新技术を用いた有機分子メモリ、太陽電池への展開、出願特許を活かしたコンベンチャーへの進出がある。

#### 4 - 3 . その他の特記事項(受賞歴など)

研究代表者は、装置開発に関する井上春成賞、酸化物の機能開発に関する向井賞を受賞しており、本プロジェクトとかなり密接な関係がある内容である。また International Workshop on Oxide Electronics や International Combinatorial Workshop の2つの国際会議を創設し、年々活性化しているこれらの分野のリーダーとして世界に認知され、国際交流に貢献した。