

# 戦略的創造研究推進事業 CREST

## 研究領域

「二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に  
資する基盤技術の創出」

## 研究課題

「二次元界面場により創出される新規材料物性の  
機能化の研究」

## 研究終了報告書

研究期間 2014年10月～2019年3月

研究代表者：鳥海 明  
(東京大学大学院工学系研究科 教授)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

チーム全体としては両者でもっとも協力して注力したのは強誘電性  $\text{HfO}_2$  に関するものである。これは当初から両グループで情報を交換しながら研究開発を進めた。東大グループは材料特性を丹念に調べることに当初から注力し、各種典型的なドーパントによる強誘電体相の安定化に対してシステマティックに調べ、他に類をみない強誘電体  $\text{HfO}_2$  に関する一般的な傾向をつかむことができた。外部では各論、あるいはある一つのドーパントに関して説明ための理解が多数を占める中で、東大グループの結果は他とは類をみない形で一般化を議論することができた。こういう結果が後に必ずや重要な考え方に結びつくと思えるものである。実際に、 $\text{HfO}_2$  が何故強誘電体になるということに関しては、理論も実験の後追いが多く、極めて重要な考え方を与えることができたと考えている。一方で AIST グループでは、強誘電性  $\text{HfO}_2$  を持つ FET の試作と強誘電性を取り込んだ TCAD という意欲的な取り組みを行い、現実の強誘電体特性を見ていただけではわからない FET 特性に関する詳細に関して探求してきた。さらには実際に強誘電体を使うときにどのように実現したらよいかという点においてイオン注入技術や強誘電体の分極量調整技術など斬新な方向性で結果を実証してきた。最終年度に近づくにつれて、両者から負性容量素子に関する取り組みに関して従来にはない斬新な理解、解析がなされるようになり、本 CREST を行うことによってまさに両グループが知恵を絞って研究をすすめた結果と自信を持って言える。この負性容量効果は世界的に先端電子デバイスの中でも極めてホットに議論されている領域であり、実際に使えるのかどうかという観点で議論されている中で、我々のチームでは負性容量と呼ばれるものの本質にいかに関わるかという点に焦点を絞り、そのキャッチーなワードにまどわされない方向で実験・議論が進んだと考えている。東大グループはこの現象を電荷のバランスで捉え、AIST グループはエネルギーで捉えてそれぞれの現象を追求した。これらの結果は、代表者から見ると同じことを異なる物理量で表現しているだけであると思っている。これぞまさしく単独グループではなく複数グループでチームを組んで行った面白さであると思う。さらに東大グループはこの強誘電体  $\text{HfO}_2$  の応用先として、いわゆる FeRAM はともかくとして、トンネル接合メモリへの応用、あるいは酸化半導体を使ったメモリ FET への応用などを概念としてではなく実証という形で示すことができた。これらの多方面からの成果は短期間に大きく前進することができたプロジェクトであったことを示していると思う。

東大チームでは金属・絶縁体転移を起こす  $\text{VO}_2$  材料に注目した研究も強く進めた。この研究は世界的に Mott 転移材料として歴史は長い、すべてが物性研究で終わっており、それを使いこなそうという試みはほとんど無かった。本 CREST 研究ではともかくこの転移を外因的に制御したいという方向で研究を進め、固体素子として世界ではじめてゲート誘起の金属・絶縁体転移を実証した。この事は応用上もさることながら、この転移を引き起こすことによってどんなことを実現できるかを探る極めてよいプラットフォームを築けたことが本 CREST プロジェクトにおけるもっとも重要な成果であると思う。予想外の発見として、高ドレインバイアス条件でゲート電圧に対する極めて急峻な金属化転移を実現できたことをあげられる。これに関してはエンジニアリングとして構築するところまで至っていないが、プラットフォームができあがっていたのでまさに発見することができた結果であると言える。さらに FET の微細化によってゲート誘起転移を急峻に引き起こすことを可能であることを明らかにした。これは相転移にともなうドメインサイズとチャネルサイズが近くなってきたことによる数個のパーコレーションパスによって決まる電気伝導が観測されたと考えられる。これは従来の半導体デバイスによって使われてきたスケールリング則とは異なり、材料の特徴的サイズとチャネル長との関係から決まる縮小則であり、今後の半導体デバイス高機能化に対する新しい方向性を与えるものと言える。

またこれら一連の結果は今後のニューロモルフィック素子の基盤技術として極めて重要であることがわかってきた。それはこの素子特性が熱発生と電氣的応答の関係の中で生まれており、結果として履歴を持つ電子デバイスの基礎になるという点からである。これに関して今後

はメンバーの一人が“さきがけ”研究としても続けられ、また新しい展開となると確信する。

さらにヘテロ界面制御の研究においては、現在の FET のオン電流を抑制しているもっとも大きな要因の一つであるコンタクト抵抗をいかに減少させるかという点に関するショットキー障壁形成機構に関する研究を進めた。この部分は東大グループでは本 CREST 以前から力を入れて注力してきたものであるが、本 CREST においてもヘテロ界面制御研究の一環として進め、画期的な方向で解を提案することができた。それはコンタクト抵抗を本質的に決定する物理要因であるショットキー障壁を Fermi-level pinning という観点から制御しようというものであり、今までにまったく提案されてこなかったまったく新しい考え方である。これも金属・半導体というヘテロ界面を 2 次元系界面の対象として捉え直し、技術的に実証した結果であり、本 CREST を進めさせていただいたことによるまさに大きな成果の一つと言える。

## (2) 顕著な成果

### < 優れた基礎研究としての成果 >

#### 1. 強誘電性薄膜 HfO<sub>2</sub> 形成に関する研究

概要:

この成果は材料物性的なものであり、電子デバイスの性能向上にすぐに結びつくものではないが、強誘電性 HfO<sub>2</sub> という材料をデザインしていく上では欠かせない基礎的結果であると言える。そのもっとも重要な部分は、強誘電性は HfO<sub>2</sub> が本来持っている性質であり、HfO<sub>2</sub>、ZrO<sub>2</sub> という材料の構造相転移にかかわる基本的な性質であることを示している。この考え方は強誘電性だけではなく広範囲な材料特性制御の指標になることが予想される。

#### 2. 負性容量効果の研究

概要:

材料の機能性をどのように制御していくかという極めて優れた例になっている。負性容量効果そのものをデバイスに使えるかどうかは、どのようなデバイスをどのような条件で使うかということにも依存しているが、過去に散々議論されてきた強誘電体特性をその性質を見直すことによってまったく新しい見方ができるという点で、その概念の波及効果は大きい。この概念は我々のオリジナルではないが、その捉え方・実証に関しては我々のチームで新しく見えてきた部分であり今後の科学技術へのインパクトは大きい。

#### 3.

概要: 金属・半導体に界面における Fermi-level pinning 機構に関する研究

本技術の目的は極めて現実的な課題であるが、研究対象としての Fermi-level pinning 制御に関しては極めて基礎的な問題である。過去に多くの研究がなされてきたが、本 CREST で進めた金属側の電子数に焦点をあてるという考え方は全く報告例のない斬新なものであり、画期的な制御手法である。そして実際に Si と Ge というきわめて pinning が強い系に適用し、その効果を実証できたことによる界面の理解に対するインパクトは極めて大きい。

### < 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

#### 1. 負性容量効果の CMOS デバイス特性への影響に関する研究

概要:

負性容量素子に関しては、当初より強誘電体特性を TCAD に持ち込むという姿勢で開発がなされたことによって、デバイス適用の場合の現実的な側面に関して多大な貢献をすることができた。特に逆 DIBL と呼ばれるような負性容量効果を使うと DIBL の軽減が観測されるというようなことを実験結果が報告される前に TCAD から予測し極めて当初から斬新で見通しをもった

開発をすることができた。

## 2. 金属・絶縁体転移の応用に関する研究

概要:

金属・絶縁体転移を固体素子によってゲートで制御する三端子素子を可能にしたという点で、きわめて有力な研究プラットフォームができたと言える。このことは今後の科学技術イノベーション、特に本機能を次世代ニューロモルフィック素子への展開へとつながる成果と言える。また従来、物性研究の対象でしかなかった材料を、電子デバイス応用の領域に引き出し、新しい可能性を引き出したという点で画期的な研究成果と考えている。

## 3. ヘテロ界面制御とその応用に関する研究

概要:

基礎的側面と重複するが、金属・半導体界面におけるコンタクト抵抗の低減はあらゆるデバイスにおいて喫緊の課題であり、そのために従来に報告例のない制御の道が残されているということを実証したという意味で極めて科学技術イノベーションを引き起こす成果と言える。コンタクトはいかなる半導体デバイスにおいても共通の課題であり、広範な部分で今回の考え方を適用できるものと考えられる。

<代表的な論文>

1. Hiroyuki Ota, Junichi Hattori, Hidehiro Asai, Tsutomu Ikegami, Koichi Fukuda, Shinji Migita, and Akira Toriumi, "Design of steep-slope negative-capacitance FinFETs for dense integration: Importance of appropriate ferroelectric capacitance and short-channel effects", *Jpn. J. Appl. Phys.* **57**, 04FD03 (2018).
2. T. Yajima, T. Nishimura, and A. Toriumi, "Positive-bias gate-controlled metal-insulator transition in ultrathin VO<sub>2</sub> channels with TiO<sub>2</sub> gate dielectrics," *Nature Com.* **6**, 10104 (2015).
3. T. Nishimura, T. Yajima, and A. Toriumi, "Reexamination of Fermi level pinning for controlling Schottky barrier height at metal/Ge interface," *Applied Physics Express* **9**, 081201 (2016).

## § 2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ① 「鳥海」グループ

研究代表者: 鳥海明 (東京大学大学院工学系研究科, 教授)

研究項目

- ・強誘電体  $\text{HfO}_2$  薄膜の研究
- ・負性容量効果および金属絶縁体転移効果の研究
- ・機能性トンネル接合の研究

#### ② 「右田」グループ

主たる共同研究者: 右田 真司 (産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門, 上級主任研究員)

研究項目

- ・強誘電体  $\text{HfO}_2$ -FET の動作実証
- ・負性容量効果トランジスタの検証

### (2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

特になし