

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
平成 26 年度採択研究代表者

H27 年度
実績報告書

鳥海 明

国立大学法人 東京大学大学院工学系研究科
教授

二次元界面場により創出される新規材料物性の機能化

§ 1. 研究実施体制

(1)「鳥海」グループ

- ① 研究代表者:鳥海 明 (東京大学大学院工学系研究科, 教授)
- ② 研究項目
 - ・強誘電体 HfO_2 薄膜の研究
 - ・負性容量効果および電界効果金属絶縁体転移の研究
 - ・機能性トンネル接合の研究

2)「右田」グループ

- ① 主たる共同研究者:右田 真司 (産業技術総合研究所 つくばイノベーションアリーナ推進本部スーパークリーンルーム運営室総括主幹 兼ナノエレクトロニクス研究部門付主任研究員)
- ② 研究項目
 - ・強誘電体の負性容量効果を利用して急峻スイッチングトランジスタを実現するためのデバイス構造・材料の設計
 - ・強誘電体 $\text{Hf}(\text{Zr})\text{O}_2$ をゲート絶縁膜とする急峻トランジスタ試作のための Si 上への $\text{Hf}(\text{Zr})\text{O}_2$ 直接成長

§ 2. 研究実施の概要

H27 年度は両グループとも昨年度の予備実験と予備検討に基づいて、本格的に個々項目に対して検討を行い、具体的な結果に基づいて先を見通す期間と位置づけて研究を進めた。

鳥海グループでは、上記三項目に関して検討に関して実験を進め、それぞれ以下のような新しい発見があった。

強誘電体 HfO_2 に関してはドーピングの違いは何を引き起こしているかに関して詳細に調べた。従来 Yi などの酸素空孔を作りやすいカチオンドーピング、 Si などのネットワーク形成型のカチオンドーピングが広く研究されてきた。そこで、これらの場合と比較すべく、酸素空孔を作りにくいカチオンドーピング、さらにはアニオンドーピング効果に関して詳細に調べた。結果は大変興味深く、 Nb 置換では強誘電性を強く抑制し、 N ドーピングでは、きわめて N 濃度に敏感に応答した強誘電性を発現した。これらの結果は、 HfO_2 の強誘電性に関して、酸素空孔の形成(チャージバランス)とネットワーク構造の形成による構造変化の二つの起源について考える必要があることを示している。一方、PFM (piezo-response force microscopy) による微小領域による強誘電性の評価は膜内の均一性に関する情報を得ることができる。また PFM を使って、分極境界において異なる分極方向を持つ領域のせめぎ合いで分極が減っていくことが観測された。これはリテンション特性の劣化に繋がるが、分極ドメイン境界はその原点になり得ることを示している。

次に VO_2 の進捗に関して述べる。 VO_2 における MIT 効果が電界効果で観測されることは昨年度の報告書で示した。今年度は転移前後での移動度と電子数の変化をホール効果によって調べた。図1に示すように、電子数は確かに約三桁変化することがわかったが、移動度は連続的に少しだけ変化するだけであることがわかった。まさに金属・絶縁体転移が起きている。ただ正確にいうと絶縁体転移というもののキャリア数は 10^{21}cm^{-3} 存在し、単純な意味での絶縁体ではなく縮退した半導体以上の電子数が残存していることには注意する必要がある。

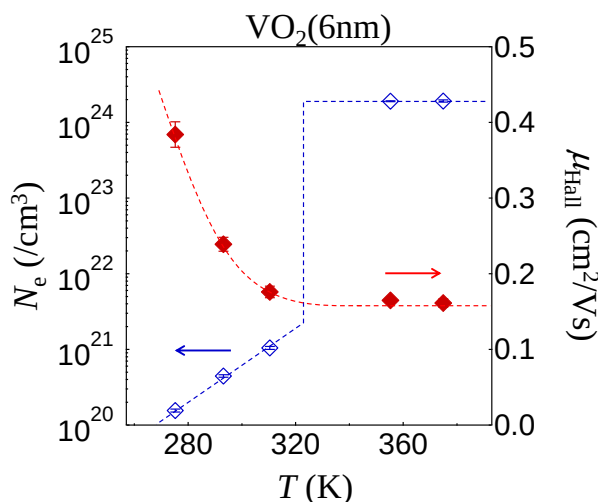


図1 VO_2 の MIT 転移前後における電子数と移動度の変化の温度依存性

右田グループでは、強誘電体の負性容量効果を利用してトランジスタの閾値電圧以下でのドレイン電流の立ち上がり係数(subthreshold swing, SS)を従来トランジスタの物理限界である 60 mV/decade よりも急峻化するための最適なデバイス構造、強誘電体の材料設計指針を検討した。デバイス構造としては、バルク基板上の平面型トランジスタ、silicon-on-insulator(SOI)上の完全空乏型トランジスタ、及び FIN 構造トランジスタ等を検討した。その結果、負性容量を利用して急峻スイッチングトランジスタを実現するためには、極薄埋め込み酸化膜(UT-BOX)を有する SOI 基

板上の完全空乏型トランジスタのように、閾値電圧以下で強誘電体ゲート絶縁膜に効果的にゲート電界を分配できる構造が重要であることが分かった。このような条件を満たすデバイス構造を採用したとき、およそ 40mV/decade に急峻化できる可能性がある。

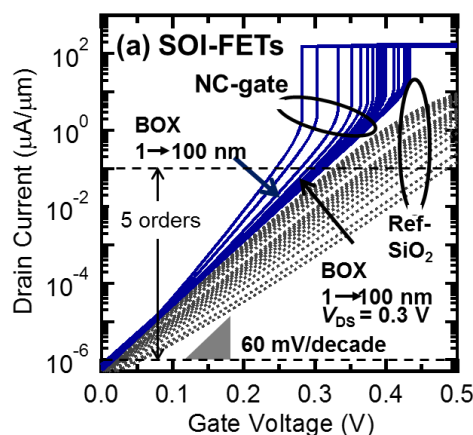


図2 負性容量状態にある強誘電体をゲート絶縁膜として有する完全空乏型 SOI トランジスタの I_D - V_{GS} 特性のシミュレーション例（実線）。埋め込み酸化膜の膜厚をパラメータにしている。破線は SiO_2 ゲート絶縁膜とするトランジスタについての計算例。

H27 年度の代表的論文

- [1] T. Yajima, T. Nishimura, and A. Toriumi, "Positive-bias gate-controlled metal-insulator transition in ultrathin VO_2 channels with TiO_2 gate dielectrics", *Nature Commun.* **6**, 10104 (2015).
- [2] T. Yajima, Y. Ninomiya, T. Nishimura, and A. Toriumi, "Drastic change in electronic domain structures via strong elastic coupling in VO_2 films", *Phys. Rev. B* **91**, 205102 (2015).
- [3] Tomonori Nishimura, Takeaki Yajima, Shinji Migita, Akira Toriumi, "Ferroelectric Properties of Non-Doped Thin HfO_2 Films", *Dig. IWDTF (International Workshop of Dielectric Thin Films)*, p7, Nov. 2, 2015, Miraikan, Tokyo, Japan