

長谷川 剛

(独)物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクニクス研究拠点  
主任研究者

3端子型原子移動不揮発性デバイス「アトムトランジスター」の開発

## § 1. 研究実施体制

### (1)「長谷川」グループ

① 研究代表者:長谷川 剛 (物質・材料研究機構国際ナノアーキテクニクス研究拠点、主任研究者)

#### ② 研究項目

- ・アトムトランジスター構造の開発
- ・ロジック応用に関する研究

### (2)「山口」グループ

① 主たる共同研究者:山口 周 (東京大学大学院工学系研究科、教授)

#### ② 研究項目

- ・スイッチング現象の実験的解明に関する研究
- ・ロジック応用に関する実験的研究

### (3)「渡邊」グループ

① 主たる共同研究者:渡邊 聡 (東京大学大学院工学系研究科、教授)

#### ② 研究項目

- ・スイッチング現象の理論的解明に関する研究
- ・ロジック応用に関する理論的研究

## § 2. 研究実施の概要

本研究では、ゲート電極から金属原子(イオン)を供給し、ソース・ドレイン電極間をショートさせることで動作する3端子型不揮発性デバイス「アトムトランジスター」の開発を行っている。これまでに、ゲート電極材料として銅ないし銀を、イオン拡散材料として酸化タンタルを、ソースおよびドレイン電極材料として白金を用いることで、電流・電圧特性評価による動作実証を行ってきた。その動作原理から、アトムトランジスターには、不揮発性動作に加えて、低電圧・超低消費電力での動作が期待されている。平成25年度は、アトムトランジスターの詳細な動作原理とその特徴を明らかにするための実験的および理論的研究を行うとともに、得られた知見を基に、目標とする性能を実現するための素子構造の最適化を行った。

アトムトランジスターの動作では、ゲート電極から供給された金属イオンが対向するソース・ドレイン電極近傍で過飽和(それ以上、イオンとして溶け込めない状態)に達することで、金属原子として析出、電流経路を形成すると考えている。平成25年度は、この現象を実験的に観測するための測定系および素子構造の開発を行った。その結果、印加するゲート電圧の極性(正・負)に対応して、電極近傍における伝導領域の出現と消滅を確認することができた。伝導領域は電極端から出現し、次第に広がっていくことが確認された。本結果は、ソース・ドレイン電極間隔の縮小化が低電圧動作やスイッチング時間の短縮実現に有効であることを示しており、素子構造最適化の指針とした。アトムトランジスターの開発では、如何に効率良く(低電圧で)金属イオンを輸送するかも課題のひとつである。昨年度までに、イオン拡散材料中におけるプロトンやOH基の存在が、金属イオンの輸送に必要な電圧を下げることを示唆する実験結果を得ていた。今年度は、これを理論的に検証した。その結果、イオン拡散材料である酸化タンタル表面における銅イオンの拡散が、酸化タンタル表面にプロトンやOH基が存在することで容易になることが理論的にも証明された。

以上の知見を基に、ソース・ドレイン電極間隔を従来の5nmから2nmに縮小した素子構造作製プロセスを開発した。

本研究では、金属原子の析出によって伝導経路が形成される上述のアトムトランジスターに加えて、酸素イオンの拡散によって伝導経路が形成されるタイプの素子開発も進めている。正の金属イオンに対して、負の酸素イオンを用いれば、逆極性のゲート電圧で動作する不揮発性の3端子型素子を実現できる可能性があることが理由である。昨年度は、イオン拡散層として酸化タンタルを用いた素子構造を試作して、その動作実証に成功した。今年度は、スイッチング現象の実験的解明を目的として、酸化タンタル薄膜を始めとする金属酸化物の酸化・還元過程を、光電子分光法によりその場観察した。その結果、酸化・還元反応の挙動が、電極材料だけでなく、イオン拡散場となる酸化膜材料にも大きく依存していることが明らかになった。本知見は、プロトン・ドーピングや異なる金属酸化物の多層薄膜をイオン拡散層として用いることで、低電圧動作や繰り返し耐性の向上を実現できる可能性を示唆しており、最終年度における開発指針として活かしていく。

以上、平成25年度は、当初の開発目標を実現するために必要なスイッチング現象の実験的・理論的解明を行い、得られた知見を具現化するための素子構造の開発を進めた。

### § 3. 成果発表等

#### (3-1) 原著論文発表

##### 論文詳細情報(国際)

- 1 T. Tsuruoka, T. Hasegawa, I. Valov, R. Waser, and M. Aono, "Rate-limiting processes in the fast SET operation of a gapless-type Cu-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> atomic switch", AIP Advances, vol. 3, No. 3, pp. 032114-1-7, 2013 (DOI: 10.1063/1.4795140).
- 2 Q. Wang, Y. Itoh, T. Hasegawa, T. Tsuruoka, S. Yamaguchi, S. Watanabe, T. Hiramoto, and M. Aono, "Nonvolatile three-terminal operation based on oxygen vacancy drift in a Pt-Ta<sub>2</sub>O<sub>5-x</sub>/Pt, Pt structure", Appl. Phys. Lett., vol. 102, No. 23, pp. 233508-1-5, 2013 (DOI: 10.1063/1.4811122).
- 3 Q. Wang, Y. Itoh, T. Tsuruoka, T. Hasegawa, S. Watanabe, S. Yamaguchi, T. Hiramoto and M. Aono, "Two types of on-state observed in the operation of a redox-based three-terminal device", Key Eng. Mater., vol. 596, pp. 111-115, 2014 (DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.596.111).
- 4 T. Tsuchiya, S. Miyoshi, Y. Yamashita, H. Yoshikawa, K. Terabe, K. Kobayashi, and S. Yamaguchi: "RedOx Reaction at Carbon/Amorphous Tantalum Oxide Thin Film Hetero-interface Probed by In situ Hard X-ray Photoemission Spectroscopy," Solid State Ionics, 253(2013), 110-118.
- 5 T. Tsuchiya, S. Miyoshi, Y. Yamashita, H. Yoshikawa, K. Terabe, K. Kobayashi, and S. Yamaguchi: "Room Temperature RedOx Reaction by Oxide Ion Migration at Carbon/Gd-Doped CeO<sub>2</sub> Hetero-interface Probed by an In-situ Hard X-ray Photoemission and Soft X-ray Absorption Spectroscopy," Sci. and Tech. of Adv. Materials, Sci. Tech. Adv. Mater. 14(2013) 045001 (12pp) [doi:10.1088/1468-6996/14/4/045001].
- 6 B. Xiao, T. Gu, T. Tada and S. Watanabe, "Conduction paths in Cu/amorphous-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Pt atomic switch: First-principles studies", J. Appl. Phys. Vol. 115, No. 3, pp. 034503-1-7, 2014 (DOI: 10.1063/1.4861724).

#### (3-2) 知財出願

- ① 平成25年度特許出願件数 (国内 1 件)
- ② CREST 研究期間累積件数 (国内 3 件)