

「次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する
革新材料・プロセス研究」
平成21年度採択研究代表者

H23年度 実績報告

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

- ③ 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)
- ④ 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. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

1. アトムトランジスター構造の開発

本研究項目では、イオン伝導体材料として酸化タンタルを、ゲート電極材料として銅ないし銀を用いた 3 端子構造の試作とその動作特性を行うことで、最終的な目標仕様である高いオンオフ比や低リーク電流、低動作電圧などを実現する指針を得ることを目標としている。今年度は特に、酸化タンタル膜厚制御を含む素子構造の最適化による低電圧動作を目指して研究を進めた。

昨年度までに、酸化タンタル膜厚20nmで動作電圧 1.25V(揮発性動作)が得られていたので、酸化タンタル膜厚を 15nmとした素子構造の作製を行った。図1に、試作した素子構造の断面 TEM 像を示す。酸化タンタルの薄膜化に併せて、ソース・ドレイン電極間の絶縁(SiO_2)膜厚も従来の 10nmから 6nmと薄くしたが、懸念された絶縁性(10 ギガオーム以上)の低下も無かった。現在、動作特性評価を進めているところである。

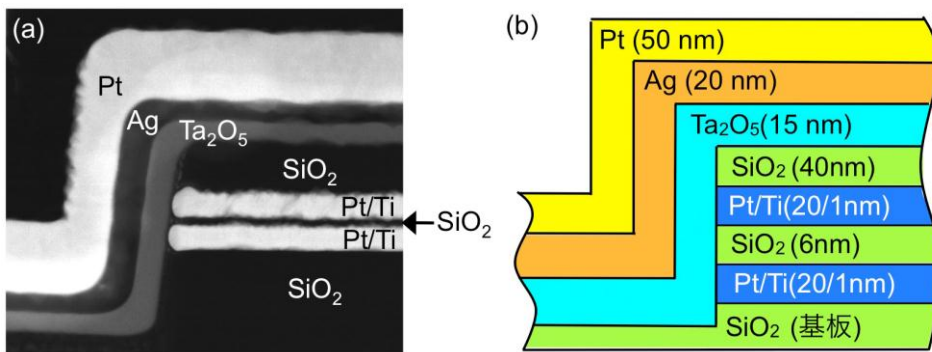


図1 アトムトランジスターの素子構造断面(a:断面 TEM 写真、b:構造模式図)

2. スwitching現象の解明に関する研究

本研究項目では、伝導経路の微視的構造とその形成と消滅のメカニズムの解明を行うことを目標としている。今年度は実験的には、光電子分光法およびレーザーラマン分光法を用いた電圧印加下での電子状態と格子歪みのその場観察を行った³⁾。その結果、酸化タンタル薄膜中におけるタンタル原子の酸化・還元状態変化に対して、プロトン活量が大きく依存していることが判明し、電極材料に銀や銅を用いないタイプのアトムトランジスターを開発する上での大きな指針が得られた。電極材料として銀や銅を用いたアトムトランジスター動作でも、銀イオン(銅イオン)の拡散過程に水分が影響している可能性を示唆する結果が得られており⁴⁾、伝導経路の形成と消滅のメカニズムを探る上での重要な知見が得られたものと考えている。

理論的研究では、電圧印加下における電子状態を計算する手法の開発を行い、酸化タンタル薄膜と銅電極界面における電子状態と静電ポテンシャルの評価に適用した。その結果、いずれもが酸化タンタルの構造(結晶かアモルファスか)や界面付近の構造に依存して大きく変化すること

が分かった。今後、実験的研究で得られる知見も基に、電圧印加状態下での金属イオン等の拡散挙動の解明なども行い、スイッチング現象の解明を進めていく予定である。

3. ロジック応用に関する研究

本研究項目では、アトムトランジスターをロジック回路に応用するための研究を進めている。アトムトランジスターでは、電極材料や構造に依存して形成される伝導経路も異なる。例えば、ゲート電極材料として銀や銅を用いた場合に観測される揮発性と不揮発性の2種類のオン状態では、それぞれに異なるメカニズムによる伝導経路が形成されている。今年度は、ゲート電圧依存性の多様性を増すべく、酸素空孔の移動を制御することで動作するアトムトランジスターの試作を行った。その結果、ゲート電圧10V程度で不揮発性の動作を確認した。今後、動作電圧の低減や、揮発性動作の実現などを目指した研究を進める予定である。

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. Tohru Tsuruoka, Kazuya Terabe, Tsuyoshi Hasegawa and Masakazu Aono, "Temperature effects on the switching kinetics of a Cu-Ta₂O₅-based atomic switch", *Nanotechnology*, vol. 22, pp. 254013-1-9, 2011 (DOI:10.1088/0957-4484/22/25/254013)
2. Takeo Ohno, Tsuyoshi Hasegawa, Tohru Tsuruoka, Kazuya Terabe, James K. Gimzewski and Masakazu Aono, "Short-term plasticity and long-term potentiation mimicked in single inorganic synapses", *Nature Materials*, vol. 10, No. 8, pp. 591-595, 2011 (DOI: 10.1038/NMAT3054)
3. Takashi Tsuchiya, Hideto Imai, Shogo Miyoshi, P-A. Glans, Jing Hua Guo, and Shu Yamaguchi, "X-Ray absorption, photoemission spectroscopy, and Raman scattering analysis of amorphous tantalum oxide with a large extent of oxygen nonstoichiometry", *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 13, pp. 17013–17018, 2011 (DOI: 10.1039/c1cp21310e)
4. Tohru Tsuruoka, Kazuya Terabe, Tsuyoshi Hasegawa, Iliia Valov, Rainer Waser and Masakazu Aono, "Effects of moisture on the switching characteristics of oxide-based, gapless-type atomic switches", *Advanced Functional Materials*, vol. 22, pp. 70-77, 2012 (DOI: 10.1002/adfm.201101846)

5. Takeo Ohno, Tsuyoshi Hasegawa, Alpana Nayak, Tohru Tsuruoka, James K. Gimzewski and Masakazu Aono, "Sensory and short-term memory formations observed in a Ag₂S gapyte atomic switch", Applied Physics Letters, vol. 99, No. 20, pp. 203108-1-3, 2011 (DOI: 10.1063/1.3662390)

6. 長谷川剛、伊藤弥生美、鶴岡徹、青野正和、“アトムトランジスタ”、応用物理、vol. 81, No. 1, pp. 55-58, 2012

(3-4) 知財出願

① 平成 23 年度特許出願件数(国内 1 件)

② CREST 研究期間累積件数(国内 2 件)