

「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・プロセス開発」
平成21年度採択研究代表者

H24 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

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評価を行うことで、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、低動作電圧などの実現を目指している。今年度は特に、酸化タンタル膜厚の最適化に加えて、ソース・ドレイン電極間隔の縮小化も併せて行うことで、素子動作に必要な酸化・還元反応を小さなゲート電圧で実現することに注力した。その結果、オンオフ比は小さいながらも、数百ミリボルト程度のゲート電圧走査でオンオフ動作を実現することに成功した。図1に、測定結果の一例を示す。図1(a)では、ゲート電圧 225mVでスイッチオン、同-47mVでスイッチオフしている。ゲート電圧を遅く走査すると、オンオフ動作に必要なゲート電圧走査幅はさらに狭くなった(図1(b))。オンオフ動作が確認されたゲート電圧とゲート電圧走査時間の関係を図1(c)に示す。走査速度を遅くすることで、100mV程度の電圧走査幅でオンオフ動作が実現できることが分かった。

本測定結果では、今後解決すべき主な課題が2つある。ひとつはオンオフ比が小さいことであり、これは、オフ抵抗が小さいことに起因している。オフ抵抗が小さくなってしまった原因はソース・ドレイン電極間の絶縁性不良と思われることから、現在、絶縁性を確保すべく素子構造の最適化を行っている。2つめの課題は、動作電圧が電圧走査時間に依存することである。この原因は、必要以上の金属イオンが酸化タンタル中に供給されているために、電圧走査速度を遅くすることで必要以上の酸化・還元反応を抑制せざるを得ないことある。今後、酸化タンタル中に供給する金属イオン量の最適化によって、動作電圧の電圧走査時間依存性の解消、ならびに、動作時間の短縮を実現していく予定である。

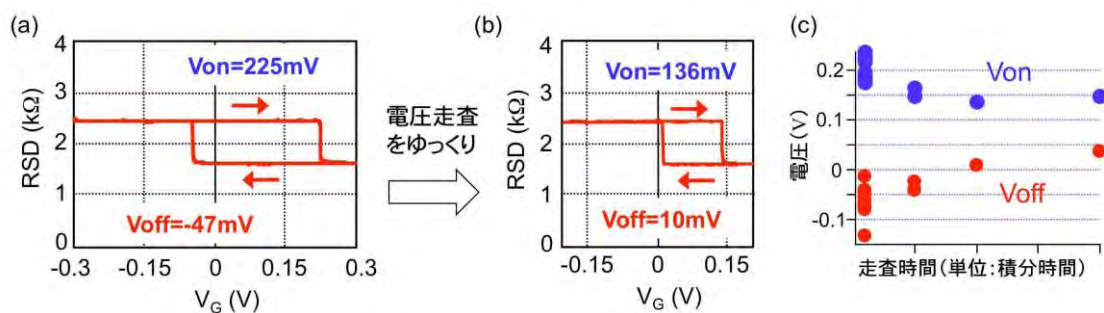


図1 低電圧動作の可能性を示唆するアトムトランジスターの動作結果

2. スイッチング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。実験的解明では、電圧印加下での電極界面近傍における電子状態変化のその場計測を行うとともに、スイッチング動作の電気化学モデルを構築した。その結果、スイッチング動作の律速過程が、ゲート電極からチャンネル領域への金属イオンの輸送過程ではなく、酸化タンタル

層へ供給する銅イオンの生成過程であることが分かった。これを検証するために、ゲート電極界面に不定比性の異なる酸化タンタル層を設けて銅イオンの生成のし易さを変化させたところ、スイッチング動作に必要な電圧が変化した。これらの結果は、材料等の最適化による動作電圧の制御(低電圧化)が可能であることを示している。

理論的研究では、開発を進めてきた計算手法を用いて、アモルファス化した酸化タンタル中における銅ナノワイヤーの伝導度特性や、粒界を想定して酸化タンタル中にナノホールを形成し、そのナノホール中に銅ナノワイヤーを配置した場合の安定性や伝導度特性の解析を進めた。その結果、単原子列では良好な伝導度特性は得られないが、数原子幅のナノワイヤーであれば、良好な伝導度特性を示すことが分かった。実験的解明では、断面電子顕微鏡観察による伝導経路の直接観察を試みているが、オン状態にある素子の観察でも銅フィラメントが観察できていない。これらのことから、伝導経路は、電子顕微鏡でも観察が難しい「細い」ナノワイヤーであることが考えられる。このほか、アモルファス酸化タンタル中の銅イオン拡散の活性化エネルギーの予備的な計算を行った。バルク中の拡散だけでなく、粒界拡散のモデルとして表面拡散についても検討し、特に表面上の吸着水分子の有無による違いについても計算及び解析を進めた。今後、電圧印加下における金属イオンの拡散挙動なども含めて、伝導経路の形成過程とその構造の微視的解明をさらに進めて行く予定である。

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。今年度は、酸素空孔を制御することで動作するアトムトランジスターに関して、そのロジック回路応用の可能性を追求した。具体的には、イオン拡散材料として酸化タンタルを、ゲート電極材料として白金を用いて素子構造を試作、その動作を評価した。その結果、従来の金属イオンを制御して動作するアトムトランジスターと同様、酸素空孔を制御することでも、正のゲート電圧を印加することで不揮発性のスイッチオン動作を実現できることが分かった(図2(a))。酸素空孔を制御するアトムトランジスターでは、これに加えて、負のゲート電圧を印加することでもスイッチオン動作を実現できることが分かった。図2(b)に、その動作結果の一例を示す。正負、両極性のゲート電圧でオン動作を実現できることから、本素子を用いれば、相補的回路の構築が可能となるかも知れない。

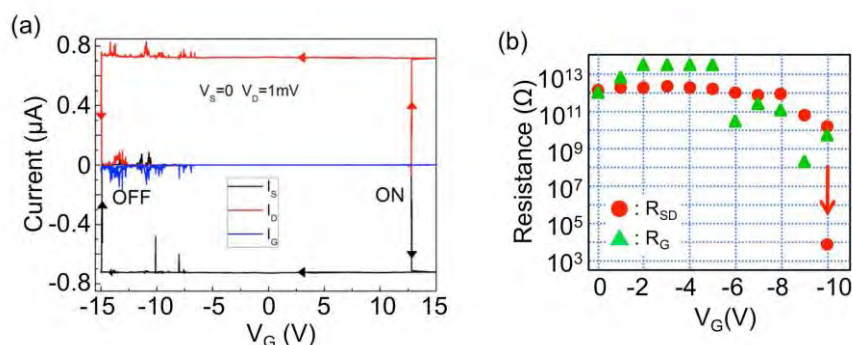


図2 相補的動作の可能性を示唆するアトムトランジスターの動作結果

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. Tohru Tsuruoka, Tsuyoshi Hasegawa, Kazuya Terabe and Masakazu Aono, “Conductance quantization and synaptic behavior in a Ta₂O₅-based atomic switch”, *Nanotechnology*, vol. 23, pp.435705-1-6, 2012 (DOI: 10.1088/0957-4484/23/43/435705).
2. Qi. Wang, Yaomi Itoh, Tohru Tsuruoka, Tsuyoshi Hasegawa, Satoshi Watanabe, Shu Yamaguchi, Toshiro Hiramoto and Masakazu Aono, “Two types of on-state observed in the operation of a redox-based three-terminal device”, *Key Engineering Materials*, (in press).

(3-2) 知財出願

- ① 平成 24 年度特許出願件数(国内 0件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 2件)