

長谷川 剛

(独)物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・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. 研究実施の概要

半導体トランジスタの微細化限界以降に適用可能な演算素子の提供を目指して、原子の移動を制御して動作する不揮発性3端子型素子「アトムトランジスター」の開発を行う。プロジェクト2年目となる今年は、イオン伝導体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て素子構造を作製し、その動作特性を評価した。その結果、高いオンオフ比と極低リーク電流での3端子動作に成功した。ゲート電圧領域の選択により、揮発性と不揮発性の2種類のオン状態を実現できることも分かった。このほか、スイッチング動作に対応した電子状態変化の評価などの研究を進めた。平成23年度は、これらの成果に基づき、動作電圧の低減など、各要素技術に関する素子構造の試作とその特性評価、ならびに、メカニズムの解明に関する研究を実験・理論両面から進めていく。

§2. 研究実施体制

(1)「長谷川」グループ

- ① 研究分担グループ長:長谷川 剛 (物質・材料研究機構国際ナノアーキテクトニクス研究拠点、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 研究分担グループ長: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 研究分担グループ長: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

§3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

1. アトムトランジスタ構造の開発

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研究を進めた。その結果、極めて低いゲートリーク電流値で 3 端子動作させることに成功した²⁾。また、用いるゲート電圧領域に依存して、揮発性と不揮発性の 2 種類のオン状態が存在することも分かった。ゲート電極材料として銅を用いた場合の測定例を図1に示す。なお、酸化タンタルの膜厚は 20nm である。ゲート電圧を 1.5V 以下の領域で掃引すると、揮発性のスイッチング動作が起こる。例えば図 1(a)では、ゲート電圧の増大に伴って 1.3V 付近でドレイン電流が増大している。このオン状態は、ゲート電圧がゼロに戻る前の 0.7V 付近で消失した。電圧ゼロでオフ状態に戻ってしまうことから、観察されたスイッチング動作は揮発性であると判断される。ドレイン電流の変化量から、オンオフ比は 10^6 と見積もることができる。一方、ゲート電圧の掃引領域を3Vまで広げると、2段階のスイッチング動作が確認できた(図1(b))。すなわち、1.2V 付近におけるドレイン電流の増大(増大幅: 10^6)と 2.7V 付近における増大(増大幅: 10^2)である。この 2 回目のスイッチングが起こった場合は、ゲート電圧がゼロになってもオン状態が保持され、オフ状態にするためには、負のゲート電圧を印加する必要があることも分かった。したがって、この 2 回目のスイッチングによって実現されたオンオフ比 10^8 のスイッチング動作は不揮発性であると判断される。同様の現象は、ゲート電極材料として銀を用いた場合にも観測された。図 2 に、銀をゲート電極材料として用いた場合の揮発性、不揮発性の各動作に対するスイッチオン電圧とスイッチオフ電圧の測定結果を示す。この結果は、ゲート電圧領域の選択によって、揮発性と不揮発性の選択動作が可能であることを示している。なお、揮発性動作では、 10^4 回の繰り返し耐性の測定にも成功した。

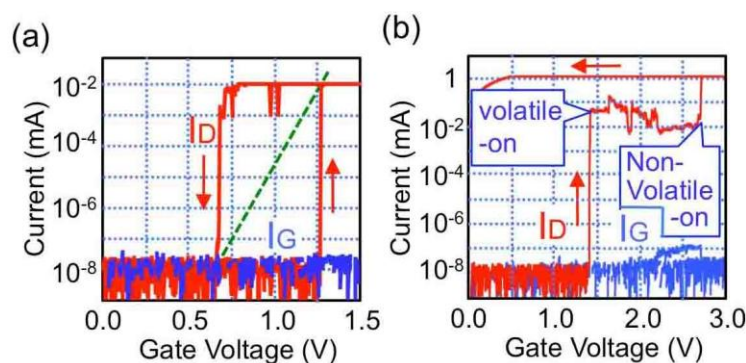


図1 アトムトランジスタの動作結果
(a)揮発性動作、(b)不揮発性動作

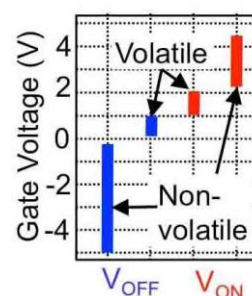


図2 揮発性/不揮発性
動作のゲート電圧分布

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を解明するための基礎的な研究を行った。微視的構造の解明では、その場 X 線分光法を用いることにより、印加電圧に依存した電極と酸化タンタル界面における分極現象の観測に成功した。その結果、ゲート電圧印加によって金属イオンが酸化タンタル内に供給されることや、成膜時に決定される Ta/O 比によって Cu の溶解挙動が大きく異なることが、電子状態の実時間測定からも明らかとなった。また、研究項目「アトムトランジスター構造の開発」で見いだされた 2 種類のオン状態に対応した微視的構造についても、構造とその形成・消滅のメカニズムのモデル化を進めた。その結果、少なくとも、不揮発性のオン状態は酸化タンタル中に供給された金属イオン(原子)によって実現されていると考えるのが妥当であるとの結論に達した。この結論は、不揮発性のオン状態にあるソース・ドレイン間抵抗の温度依存性が金属的な挙動を示した²⁾ことから、その妥当性が裏付けられた。

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た。原子移動を制御する 2 端子素子である原子スイッチが不揮発性動作を示すことから、本プロジェクト開始当初は、アトムトランジスターの動作も不揮発性動作となることを予測していた。しかしながら、既存の半導体トランジスタの代替を考えた場合、従来の回路技術をそのまま利用できる揮発性動作の方が望ましい。この意味で、研究項目「アトムトランジスターの開発」において、ゲート電圧の領域を制御することで揮発性動作を実現できたことは意義深い。一方で、不揮発性動作、すなわち、メモリ動作も選択的に実現できることから、本アトムトランジスターは、不揮発ロジック回路などの新しいアーキテクチャーの実現にも貢献できる可能性が高いことも明らかになった。

§4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. Tohru Tsuruoka, Kazuya Terabe, Tsuyoshi Hasegawa and Masakazu Aono, “Forming and switching mechanisms of a cation-migration-based oxide resistive memory”, Nanotechnology, Volume 21, Number 42, pp.425205, 2010 (DOI:10.1088/0957-4484/21/42/425205)
2. Tsuyoshi Hasegawa, Yaomi Itoh, Hirofumi Tanaka, Takami Hino, Tohru Tsuruoka, Kazuya Terabe, Hisao Miyazaki, Kazuhito Tsukagoshi, Takuji Ogawa, Shu Yamaguchi and Masakazu Aono, “Volatile/Nonvolatile Dual-Functional Atom Transistor”, Applied Physics Express, vol. 4, pp. 015204-1-3, 2011 (DOI:10.1143/APEX.4.015204)

(4-2) 知財出願

- ① 平成22年度特許出願件数(国内 1 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 1 件)