

「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

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。プロジェクト開始の今年度は、モデル材料を用いた素子構造の試作とその動作特性評価を行い、微細化や低電圧動作を実現するための開発指針を得るとともに、将来的な実用化を目指す上で不可欠なデバイス動作メカニズムの解明やロジック応用に関する基礎的な研究を行った。平成22年度は、これらの成果に基づき、各要素技術に関する素子構造の試作や動作特性測定を行うとともに、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、主任研究者)
- ② 研究項目

- 1)アトムトランジスター構造の開発
- 2)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、教授)
- ② 研究項目

1)スイッチング現象の解明に関する研究

2)ロジック応用に関する研究

(3)「渡邊」グループ

①研究分担グループ長:渡邊 聡(東京大学、教授)

②研究項目

1)スイッチング現象の解明に関する研究

2)ロジック応用に関する研究

§ 3. 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、モデル材料を用いた3端子構造の試作と動作特性評価を行うことで、微細化や動作電圧の低電圧化をはかるための開発指針を得ることを目標とした。原子の移動を制御して動作する2端子型「原子スイッチ」では、硫化物や金属酸化物などのイオン伝導体材料をCuなどの可逆電極とPtなどの不可逆電極で挟むことにより、良好なスイッチング動作を実現できることが分かっている(T. Hasegawa *et al.*, MRS Bulletin 34(12), 929 (2009))。この2端子動作では、可逆電極からイオン伝導体中に供給された金属イオンが対向電極(不可逆電極)側で還元されて析出、2つの電極間に金属フィラメントを形成することで動作すると考えられている。本研究項目では、この原理を利用して、図1に示す構造を試作して動作特性評価を行った。その結果、ゲート電圧の操作によりソース・ドレイン電極間の伝導度制御が可能であることを確認した。

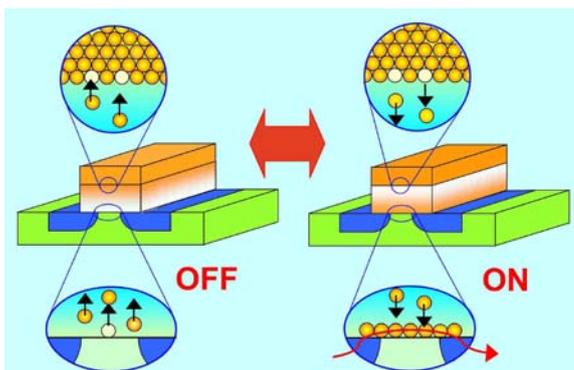


図1 アトムトランジスターの模式図

ゲート電極から注入した金属イオンが対向するソース・ドレイン電極間に伝導経路を形成して動作する。

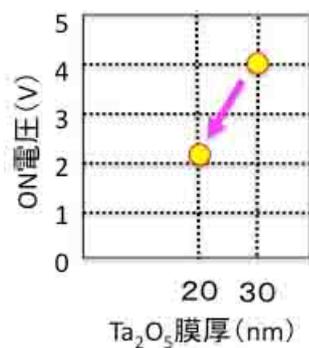


図2 動作電圧の膜厚依存性

イオン伝導体として用いたTa₂O₅の膜厚に依存して、オン動作に必要な電圧が変化。

アトムトランジスターの動作では、金属イオンの拡散とその酸化・還元反応を制御していることから、イオン伝導体膜厚や材料の選択によって動作電圧やスイッチング速度の最適化が可能であると考えられる。図2に、イオン伝導体として酸化タンタルを用いた場合の実験結果を示す。酸化タンタル膜厚によってスイッチオン動作に必要なゲート電圧値が変化していることから、本研究項目における開発指針のひとつが得られた。次年度以降、温度依存性などの測定なども行い、素子構造の開発を進めていく予定である。

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を解明するための手法に関する基礎的な研究を行った。微視的構造の解明では、その場X線分光法を用いた2端子型素子の電子状態計測をスイッチング動作と連動して行ったところ、酸化・還元反応が起こる電極界面における金属イオンの分極計測が可能であることを実証した。この結果は、電子状態計測によってオン状態における伝導経路の微視的構造を明らかにできることを意味している。開発した手法は、3端子型アトムトランジスターにおいても、デバイス動作時における金属イオンの分極状態の実時間計測に適用可能であり、次年度以降、3端子型素子構造の計測に応用していく予定である。形成と消滅のメカニズムの解明に関する研究では、金属イオンの拡散経路と酸化・還元反応のメカニズムを理論的に解明するための基礎的な研究を行った。研究項目「アトムトランジスター構造の開発」においては、アモルファス状のイオン伝導体が素子作製に用いられており、今年度はアモルファス構造に適用可能な計算手法の開発を進めた。次年度以降、実験結果との比較などを行いながら、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仕様抽出とその開発指針の策定を行った。2端子型素子「原子スイッチ」では、おもにメモリ用途として研究・開発を進めてきたため、必要とされる動作回数は有限であった。しかし、ロジック用途の場合、高速で無限回の動作が要求される。このため、動作に伴う歪みの有無など、信頼性に係わる現象について明らかにしておく必要があり、その評価手法に関する検討を行った。その結果、スイッチング動作時における音響信号の検出などが有効であることが分かった。