HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	抵抗変化型不揮発メモリセル動作時の内部構造と抵抗変化に関する研究［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	工藤, 昌輝
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11522号
Issue Date	2014-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/57272
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Masaki_Kudo_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学　位　論　文　内　容　の　要　旨

博士の専攻分野の名称　　博士（工学）　　氏名　工藤　昌輝

学　位　論　文　題　名

抵抗変化型不揮発メモリセル動作時の内部構造と抵抗変化に関する研究
（Real Time Observation of Inner Structure and Switching Properties of Non-Volatile Resistive Switching Memory Cells）

近年、スマートフォン等の携帯端末の高性能化に伴い、不揮発性半導体メモリに対する需要が急速に高まっている。これに対し、フラッシュメモリはムーアの法則を上回るペースで高集積化を進め、この需要に対応してきた。しかし、フラッシュメモリの電子を浮遊ゲートに蓄積することで記憶を行う原理上、微細化の進行とともに浮遊ゲート内の電子数が減少し、高集積化と状態保持の両立が難しくなってきている。そこで、電子の蓄積に依存しない新たな動作原理による新規不揮発性メモリの開発が急務となっている。その有力候補の一つとなっているのが、抵抗変化型メモリ (ReRAM) がある。

ReRAM は絶縁体を金属の電極で挟み込んだ単純な構造において、両電極間に電圧を印加することで絶縁体の抵抗値が変化し、電圧印加解除した後も抵抗値が保持されることを利用して不揮発性メモリとして動作する。単純な構造を有するため超高集積化が可能で、またナノ秒オーダーでの高速な動作が得られることから単純にフラッシュメモリが用いられている補助記憶階層での置き換えだけではなく、主記憶階層を不揮発性メモリで置き換えることも可能であり、現行コンピュータアーキテクチャの記憶階層を大きく変えることも期待できる。このように非常に優れた特性を有する ReRAM であるが、次世代不揮発性メモリとして注目されたのが 2000 年代に入ってからであり、まだその動作原理が明確に解明されていないことが最大の問題である。抵抗変化現象は電気伝導特性から、抵抗変化現象が局所的な導電パスの接続・切断により抵抗変化が発生するフィラメント型や電極界面全体における酸素欠損または電荷の蓄積による界面型によるものであると推定されているが、実際にその様子を直接観察した研究はほとんどない。

本研究では透過型電子顕微鏡 (TEM) その場観察法を使用することで抵抗変化現象の直接観察を行った。TEM は試料の構造変化をナノメートルスケールで観察することが可能であり、また電気伝導特性の評価を像観察と同時に行うことも容易である。本研究において特筆すべき点は実際のメモリセルに使用される材料およびデバイス構造を有する ReRAM に対し TEM その場観察を実現したことにある。ReRAM の抵抗変化現象は非常に高速に発生するために抵抗変化時の電流制限が重要であり、メモリセルを破壊せずに観察を行うことは非常に難しく、本研究のような TEM その場観察を用いている他研究では実用的な ReRAM 動作とはかけ離れた材料や構造において検証を行っている。本研究では電流制限用 MOSFET を搭載する TEM 用試料ホルダーを作成し、確実に電流制限をかけられるようにしたところ、実用的な ReRAM における抵抗変化現象の観察に成功した。このような研究は他に行われた例はなく、新しい研究である。

以下に、本論文の各章の概要を述べる。

第 1 章は本論文の序論である。不揮発性メモリの現状および ReRAM におけるこれまでの研究経緯について述べる。また、ReRAM における最大の課題は動作原理が不明瞭な点であるが、現在ど

のような動作原理が提唱されているかについてまとめる。
第 2 章では本研究の実験方法をまとめる。本研究では TEM 内で微細な試料の測定を行うために専用の TEM 試料ホルダーを作成し使用した。また、簡便な方法で多くの微細試料を作成するためにイオンシャドー法を応用した新たな試料作製プロセスを開発した。この章ではこれらを詳細、および ReRAM の評価方法について述べる。
第 3 章では簡易試料作製プロセスにより作成した Cu / WOx および Cu / MoOx ReRAM における評価結果をまとめる。どちらの材料系においても Cu 電極への正電圧印加により絶縁層が低抵抗状態へ変化し、その際に絶縁層内に導電フィラメントが形成されることが TEM その場観察より確認された。負電圧印加時にはどちらも抵抗値は高抵抗に戻った。しかし、TEM 観察からは Cu / MoOx ではフィラメントが完全に消失するのに対し、Cu / WOx ではフィラメントがそのまま残存した。一見異なる現象が発生しているように見えるが、Cu / MoOx も高抵抗への変化の過程を確認したところ、高抵抗化が発生した瞬間にはフィラメントは残存しており、フィラメントの消失が抵抗変化後に発生していることが分かった。このことより、どちらの系においても抵抗変化はフィラメント全体の形成・切断ではなく、非常に微小な一部分の接続・切断により発生していることを示した。
第 4 章ではイオン供給層と極薄絶縁層の二層の抵抗変化層で構成される ReRAM における評価結果をまとめる。この二層 ReRAM はリソグラフィーと集束イオンビーム (FIB) を用いることで実際のメモリセルと同様の構造をもつ最小 30 ナノメートルのメモリセルを作成し評価した。TEM 像観察とエネルギー分散型 X 線分光法による分析より抵抗変化は極薄絶縁層内への銅フィラメントの形成・切断によるものであることが確認された。そのフィラメントのサイズは数 nm と非常に小さく、ReRAM が将来の微細化による高集積化においても有望なメモリであることを示した。
第 5 章は本論文の総括について述べる。