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_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (工学)　　氏名　工藤　昌輝

審査担当者　主　査　教　授　高橋 庸夫
副　査　教　授　末岡 和久
副　査　特任教授　山本 眞史
副　査　准教授　有田 正志

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）

近年の半導体デバイスは、携帯端末の需要が高まり、省エネ化の要請が大きくなっている。このような中で、データ保持にエネルギーを要さず、高速に再機能化できる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。この領域はフラッシュメモリが担ってきたが、微細化の進行とともに蓄積する電子数が減少し、高集積化と状態保持の両立が難しくなってきた。加えて、高電圧が必要な上に、書き込み速度が遅いという欠点もあり、新規不揮発性メモリの開発が要請され、その候補が、抵抗変化型メモリ (ReRAM) である。

ReRAM は、文字通り抵抗が変化する特性をメモリとして用いている。絶縁体を金属の電極で挟み込んだ構造をしており、電圧を印加することで絶縁体の抵抗が変化し、電圧印加解除した後も保持される。単純な構造のため、微細化が可能で大容量メモリに適し、ナノ秒オーダーでの高速な動作が可能なことから、補助記憶階層だけではなく、主記憶階層をも不揮発性メモリで置き換えることも可能である。このように優れた特性を有する ReRAM であるが、その動作原理の解明が困難なことが実用に向けての最大の問題である。これまで、局所的な導電パス (フィラメント) の形成・切断により抵抗変化が発生するモデルなどが提案されているが、全て推定で、確認されていない。特に、実際に抵抗変化に対応した構造の変化などを観察した研究はほとんどないのが現状である。

本論文ではナノメートルスケールの観察が可能な透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いた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ている。この手法では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。本論文の特筆すべき点は、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。抵抗変化現象は非常に高速であるため、抵抗変化時の電流制限が重要で、メモリセルを破壊せずに観察を行うことは非常に難しい。これを回避するため、他の類似の研究では、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。本論文では、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、TEM の中で、外部で測定したのとほとんど同じ特性評価を可能とした。すなわち、抵抗変化のみならず、抵抗の保持特性やパルス駆動による繰返しの書込み・消去特性の評価なども可能にしている。このような研究は他に行われた例はなく、今後の ReRAM の実用化に向けて、信頼性の評価をも可能にする全く新しい研究となっている。

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ている。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ている。

第 2 章では本研究の実験方法をまとめている。本研究では TEM 内で微細な試料の測定を行うために、MOSFET を搭載した ReRAM 評価に適した新たな TEM 試料ホルダーを作成について示している。また、簡便な方法で多くの微細な ReRAM 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成プロセスを開発について示している。

第 3 章では簡易試料作成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ている。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を TEM その場観察より確認し、負電圧印加時にはどちらも抵抗値は高抵抗に戻ることを示し、TEM の中での ReRAM 動作を示している。詳細な検討から、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という結論を得ている。加えて、これまでのモデルとは異なる現象を多々見出しており、動作原理に関する新たな知見を得ている。

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ている。この二層 ReRAM では 16Gb 級のメモリセルと同様の構造をもつ最小 30 ナノメートルのセルを作成し評価している。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を確認している。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ている。

第 5 章は本論文の総括について述べている。

これを要するに、著者は、抵抗変化型メモリ (ReRAM) のサンプル作成手法と透過型電子顕微鏡 (TEM) における微細デバイスの評価法を構築し、実用に近い領域の ReRAM デバイスの動作中の構造変化を可視化することに成功し、その動作原理を解明するとともに、構築した手法の有効性を実証した。今後の多様なデバイスの開発への貢献が大きいと考えられる。

よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。