



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	動的電子顕微鏡観察法による抵抗変化メモリの動作特性とナノ構造変化に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	武藤, 恵
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14590号
Issue Date	2021-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/81402
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Satoshi_Muto_review.pdf, 審査の要旨



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 武藤 恵

審査担当者 主 査 教 授 末岡 和久

 副 査 教 授 植村 哲也

 副 査 教 授 村山 明宏

 副 査 准教授 有田 正志

学位論文題名

動的電子顕微鏡観察法による抵抗変化メモリの動作特性とナノ構造変化に関する研究
(Study on operation property and nano-structural evolution of resistive random access memory by
means of *in situ* electron microscopy)

近年のビッグデータや IoT の普及とともに、低消費電力で効率的な情報処理が求められている。その一方で、トランジスタの微細化限界が近づいていると言われ、今後を見据えた新たな素子の開発が必要となっている。種々の新規素子が提案されているが、その候補の一つが抵抗変化メモリ (ReRAM) であり、次世代不揮発メモリとして研究されている。

ReRAM は絶縁体を金属電極で挟み込んだキャパシタ構造を持ち、印加電圧の極性や大きさで制御した抵抗値が情報として保存される。ReRAM は高集積性、電圧印加を止めても記録保持される不揮発性、高速動作などの特長を持ち、種々の応用が検討されてきた。近年では、連続的な抵抗値も保存できるアナログメモリ動作が注目され、ニューラルネットワークのハードウェア用素子としての研究が進められている。また、DRAM と SSD との速度差を埋めるストレージクラスメモリとしても研究されている。どちらも今後の効率的な情報処理にとって重要な要素となっている。

ReRAM の基本動作はフィラメントと呼ばれる導電パスの形成/破断に依っている事が、電気特性評価、透過電子顕微鏡 (TEM) 観察などにより分かってきたが、フィラメント形成の詳細、アナログ動作や動作不安定性、劣化や破壊の原因に関する知見が乏しい現状にある。今後の特性・信頼性向上のためには、メモリ動作時におけるフィラメントおよびその周辺部分の微細構造変化をナノレベルで理解することが重要である。

これに対して、本論文では、Cu 電極を用いた金属フィラメント型の ReRAM を例にとり、TEM を用いた動的観察法 (その場観察法) を用いて、抵抗変化現象と素子内部の構造変化との相関を詳細に調べている。平面型構造を用いることによりナノスケールの評価を可能にし、フィラメント形成前の初期化過程における Cu の析出と、その後の抵抗変化と特性劣化について議論している。次に、特性が異なる二種類の抵抗変化層を比較することにより、デジタル的变化、アナログ的变化の違いを議論している。前者では明瞭なフィラメント形成が生じる一方、後者ではフィラメント形成が必ずしも必要でないことを示している。また、フィラメント成長には電流が重要であること、電界や熱によって引き起こされた素子内での Cu の広がり特性劣化につながることを指摘している。

以下に論文の構成を述べる。

第 1 章は序論である。抵抗変化メモリ研究の経緯、素子の概要、応用先について説明した後、現状での問題点と本研究の目的について述べている。

第2章では実験手法を述べている。本研究で重要となる平面型 ReRAM 試料の作製について詳細に示した後、TEM その場観察システムについて説明している。

第3章では Cu-WO_x 系 ReRAM における初期化過程とその後のメモリ動作についての評価結果をまとめ、議論している。正電圧印加した Cu 電極から絶縁体内へと Cu が拡散して低抵抗化するという、電気化学的に予想される結果を実験的に実証している。その際に、絶縁層内には微小な Cu 析出が出現し、その後の安定したデジタル動作に繋がること、また、繰り返し動作を行うことにより、Cu の大量導入が急速な特性劣化を引き起こすことを示している。これらを踏まえて、ReRAM の動作開始には絶縁膜への Cu 導入が必要であり、またその量が初期化後の特性に大きな影響を与えるという結論を得ている。

第4章では性質の異なる2種類の絶縁体 (WO_x と MoO_x) を用いた2種類の ReRAM を比較している。急峻な抵抗変化を示す場合にはフィラメント形成を伴う大きな構造変化が観察される一方で、緩やかな抵抗変化の場合には構造変化が微小であるという結果を得ている。得られたビデオ画像の解析を通じて、デジタル/アナログ抵抗変化動作の制御性が、絶縁膜内部への Cu 供給と移動に由来すると結論づけている。

第5章では素子内部での Cu 移動に焦点を当て、フィラメント形成過程と周辺への Cu 拡散について議論している。フィラメント成長速度が動作電流値や電圧掃引速度に大きく依存することを実験的に明らかにし、また、メモリ動作領域外への Cu 移動が ReRAM の特性に大きく影響することを指摘している。

第6章では本研究を総括している。

これを要するに、著者は、抵抗変化メモリの動作を動的顕微鏡法により評価・解析した。平面型構造の採用によって、Cu 移動をリアルタイムでナノスケール解析し、メモリ動作に関わるフィラメント形成過程、抵抗変化中の微細構造変化をメモリ動作と関連付けて可視化し、その詳細な動作の理解を与えた。今後のナノデバイス研究へ貢献するところ大である。

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。