

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420279

研究課題名(和文) TEM - STMその場計測による抵抗変化メモリの動作機構解明

研究課題名(英文) Investigation on Switching Mechanism of Resistive RAM using in-situ TEM-STM

研究代表者

有田 正志 (Arita, Masashi)

北海道大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：20222755

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：抵抗変化メモリ(ReRAM)がbeyond CMOSを目指して研究・開発されている。その動作原理の解明は最重要課題であり、電気化学に基づくモデルの提唱はあるが、不明な点が多い。本研究では、その場透過電子顕微鏡法により金属フィラメント型ReRAM内の微細構造を実時間観察した。その結果、高抵抗 低抵抗(Set, Reset)の動作時には大きな変化はなく、追加の通電により大きな構造変化の生じる事が分かった。ナノ領域での変化が抵抗スイッチに寄与している。大きな構造変化はスイッチ箇所の不安定化、金属イオンの固溶を促進し、劣化を生じた。Set, Reset時の投入電力バランスが安定動作に重要であると言える。

研究成果の概要(英文)：Resistive memory (ReRAM) has been intensively investigated as a non-volatile memory satisfying beyond CMOS technology. Elucidation of its switching mechanism is the most important issue for practical use of ReRAM. While an operation mechanism based on electrochemistry has been proposed, details are obscure. In this work, the in-situ TEM was applied to solve this problem, where real-time observations of the microstructure were performed on metallic-filament-type ReRAM. It was clarified that the metallic filament shows no remarkable change at the switching moment between high (HRS) to low (LRS) resistance states (Set and Reset). Switching occurs locally in nanometer scale. Remarkable change of the filament occurs with additional current flow. Large change of the filament induces instability of the switching position and dissolution of metallic ions into the switching layer, and it generates device degradation. The power balance at Set and Reset is important for stable ReRAM operation.

研究分野：電気電子工学

キーワード：抵抗変化メモリ 電子顕微鏡 電子・電気材料 電子デバイス・機器 ナノ材料

1. 研究開始当初の背景

半導体メモリの微細化が進んでいるが、集積化、アクセス速度、省エネ等に問題を抱えている。そのため新概念の不揮発メモリが期待されている。抵抗変化メモリ(ReRAM)はその一例であり、電圧印加により高抵抗(HRS)と低抵抗(LRS)の切換・保存ができるため不揮発メモリとなる。ReRAMの動作ウィンドウは広く、また簡単な構造を有するためナノサイズにできる可能性がある。このような特長から、ReRAMに関する研究が基礎、応用の側面から数多くなされている。

ReRAM材料として遷移金属酸化物、Cu-固体電解質などを中心に多くの系が調べられ、その動作は単極動作のunipolar型と双極動作のbipolar型に分類されている。動作モデルとして「導電フィラメント」、「ショットキー障壁」などの提案があるが、近年はフィラメント型のbipolarが主流である。酸化物系では酸素空孔、Cu-固体電解質系ではCuのフィラメントが形成/破断を繰り返してReRAM動作が生じると言われている。前者はValence Change Memory(VCM)、後者はElectrochemical Metallization Memory(ECM)またはConductive Bridging RAM(CBRAM)と呼ばれている。しかし、どのような物理的現象が抵抗スイッチに寄与しているかは未だ混沌とした状況にある。

以上を背景としてスイッチ前後の透過電子顕微鏡(TEM)観察が行われ、導電フィラメントが確認された。しかし直接的には、TEM内での動作を調べる『その場実験』(in-situ TEM, 走査トンネル顕微鏡STMと同種機能を備えるためin-situ TEM-STMとも言う)が注目されている。近年その研究例は増加しており、スイッチ時の結晶構造変化(Joss:Phys.Rev.B, 2008), TEM内スイッチ計測(Fujii:Mater.Sci.Eng.,2010), 構造変化時のフィラメント形成(Kwon:Nat.Nano.,2010), フォーミング時のフィラメント形成(Fujii:J.Appl.Phys., 2011), フィラメントの形成と消失(Fujii: Appl.Phys.Lett., 2011)等の報告がある。フィラメント形成、酸素の増減、イオン移動に関して分かりつつあるが、繰り返しReRAMスイッチの報告例は無く、現象の統一見解・分類、動作機構の理解は不十分である。

本研究開始以前のin-situ TEM研究報告は主にフィラメント形成過程についてである。一方、フィラメント破断や繰り返しスイッチ動作時の内部構造変化など、実デバイス動作を念頭においた報告は無い。「動作機構が複数あり得る」、「電気特性の複雑さ」、「標準的なTEM-STM市販ホルダーの性能がReRAM研究に不十分」などがその理由として挙げられる。ReRAMではHRS→LRSのSetスイッチ時に電流が急増するため回路の浮遊容量による過電流が流れ、デバイス破壊が生じ得る。回避のためには試料直近に抵抗やFETを設置したTEM-STMホルダーが必要であるが、これを満足するホルダーは存在しない。

2. 研究の目的

以上を踏まえて本研究では、我々がこれまでに培ってきたTEM-STM技術をReRAM研究に応用して、電圧印加時の抵抗変化に付随する構造変化を動的に直視・分析し、その動作機構を明らかにする事を目的とする。研究対象はCBRAM型ReRAMのCuフィラメント動作である。特に繰り返し抵抗スイッチをTEM内で実現し、デバイス特性劣化に関する知見を得ることを重視する。これらの実験研究を行うために、上述の特殊TEM-STMホルダーシステムの開発も行った。

3. 研究の方法

本研究の内容は以下の4項目からなる。すなわち

- (1) その場観察用の積層型ReRAM試料の作製法開発(イオンシャドー法)
- (2) 特殊TEM-STMホルダーシステムの開発
- (3) CBRAM型ReRAMにおけるCuフィラメントの動的観察と抵抗スイッチ動作機構
- (4) 繰り返しスイッチによるReRAMデバイス特性劣化機構の動的調査

である。動的観察にはJeol JEM2010(200kV, $C_s=0.5$ mm)用に開発したin-situシステムを用いて、FETによる電流制限を適宜行い、主には電流-電圧(I-V)スイッチ特性を評価した。測定は全て室温、真空中($\sim 10^{-5}$ Pa)で行った。測定試料はTiN/Si基板上にスパッタ成膜したPt/Cu/MoO_x, Pt/Cu/WO_x等の積層CBRAMであり、主には下記に示すイオンシャドー法によりTEM試料へ加工した。一部の試料については通常のFIB加工も行った。また必要に応じてFEI Titan3G(300kV, C_s -free)により試料の分析を行った。結果の一部は、ナノテクノロジープラットフォーム事業(北海道大学, 九州大学), 物質・デバイス領域共同研究事業(大阪大学)を利用して行われた物である。

4. 研究成果

- (1) その場TEM試料作製法の開発

過去の研究においては、針状に加工した導電基板(下部電極BE)に抵抗スイッチ層を堆積して、プローブ(上部電極TE)をピエゾ駆動で接触させることにより、in-situ TEM用ReRAM試料としていた(Fig.1a)。この手法では極微小領域での動作が可能になるが、TEが可動プローブであるために力学的な試料破壊が生じ易く、また作り込みReRAMデバイスの模擬構造になっていない。ReRAM積層膜(TE/Switching-layer/BE)のTEM試料加工法として収束イオンビーム法(FIB)が挙げられる。しかしReRAMがSetスイッチ時に電氣的破損を起こし易い事を考慮すると、より簡便に多量のin-situ TEM試料を作製できる手法が望まれる。本研究では簡便な断面TEM試料作製法であるイオンシャドー法に注目して、in-situ TEM用ReRAM試料の作製法へ改良・応用した。

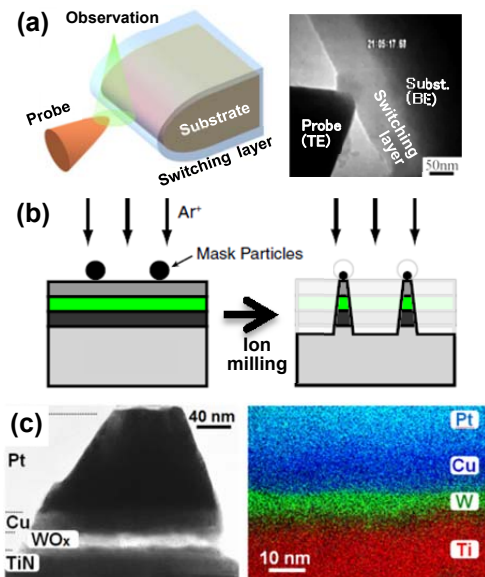


Fig.1 (a) 従来の in-situ TEM 試料 (Fujii:J.Mater.Res., 2012), (b) 積層型 ReRAM の in-situ TEM 試料作製法 (論文②), (c) TEM 像と EDX 像. (論文④)

まず ReRAM/Si 基板を薄片(100 μm ×2.5mm)に切断し, ReRAM 側に直径 10~30 μm のカーボン粒子を付着させる. これを約 1 時間イオンミリング(Ar^+ , 5kV, 1mA) することにより, カーボン粒子の真下に, 直径数百 nm 以下の針状 ReRAM 試料を作製できる(Fig.1b). 得られた試料の TEM 像を Fig.1c 左図に示す. この例では直径 200nm 程度であり, 実デバイスと同等のサイズが得られている. Fig.1c 右図はエネルギー分散型 X 線(EDX)マッピングである (ただし FIB 加工した試料) である. 明瞭な積層構造を確認できており, in-situ TEM によるフィラメント観察が可能である.

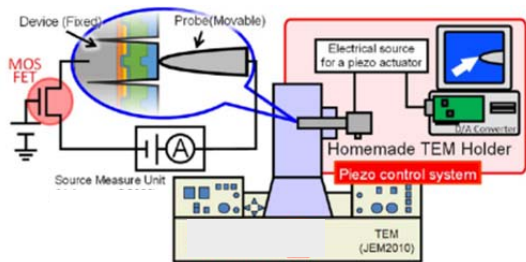


Fig.2 開発した FET 搭載 TEM ホルダーシステムの概念図. (学会②)

(2) TEM その場観察システムの開発

ReRAM 実験用に TEM-STM ホルダーを開発した. mm オーダーの粗動, 10 μm の微動ストロークを有する. 二軸傾斜機能を備えており, ReRAM 積層界面近傍の観察を可能とした. 基本的な設計は現在の市販品と同様であるが, 試料近傍に FET を搭載している点で異なる. FET のゲート電圧制御により, Set スイッチ時の過電流を抑制する機能を持たせた. ReRAM デバイス直下への FET 設置は実デバイス回路で採用されている手法であり, これを再現するホルダー構造であると言える. システム概略図を Fig.2 に示す. デバ

イス上部電極側に測定用プローブを接触させ, Si 基板を接地した状態で Cu(TE)にバイアス電圧を印加して電気計測を行った. 装置開発が目的では無いため統計データをとってはいないが, FET 未使用の場合と比較してデバイス破損頻度は減少した.

(3) CBRAM 型 ReRAM の抵抗スイッチとデバイス内微細構造変化

TEM 内で得られた I-V 曲線の例を Fig.1a に示す (Pt/Cu/MoO_x/TiN). デバイスは直径 350 nm, 電流制限は 400 μA である. Pt/Cu(TE)に印加する正電圧を増加すると, 電流値が徐々に増加した後, 約 2.6V で急激な電流上昇が見られた(Set). その後, 電圧極性を反転させ -3V まで変化させたところ, -1.5~-2.0V 付近で弱くはあるが二段階の抵抗上昇 (電流減少)を確認できた. これが LRS→HRS の Reset スイッチである. この結果が in-situ TEM に特有のものでないことを確認するために, 同じ積層の(TEM 用でない)作り込みデバイスを作製し, I-V スイッチ曲線を測定した(Fig.1b). この場合のデバイスサイズは直径 16 μm であり, in-situ TEM 試料よりかなり大きい Set 電圧は低くなっているが, 双方の曲線は明瞭なヒステリシスの bipolar 型 ReRAM 特性を示している. TEM 内での結果が実デバイスの基本特性を再現していると言える. 従って, 下記のデバイス内微細構造変化は TEM 実験に特殊な物ではなく, 実デバイス内で生じている変化を反映していると考えられる.

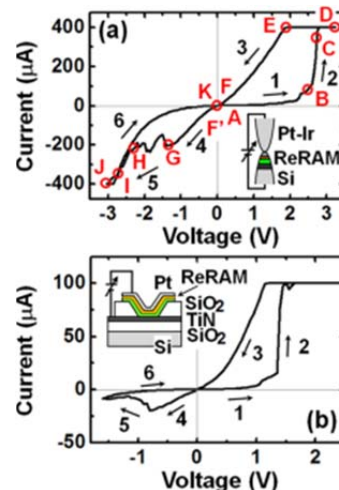


Fig.3 (a) TEM 試料, (b)作り込みデバイスの ReRAM 電流-電圧スイッチング曲線. (論文③)

比較的小電流での Cu/MoO_x/TiN のスイッチを Fig.4 に示す (制限電流: 50 μA). ここで TiN 表面は酸化されており(ox-TiN), 白い線状の TEM コントラストを示す. 初期状態(HRS)で Cu が既に MoO_x に入り込み, BE の上に析出物を形成していた(TEM 像の p). そのためデバイス初期化の Forming は必要なかった. Set, Reset 動作後に余分な電圧印加をせず 0V に戻す操作を行ったところ, 1.2V 付近の Set, -1.5V 付近の Reset を安定して繰り返した.

状態2においては、TEM 像に大きな変化は認められない。一方、状態3においては、Cu析出物が下側に伸びox-TiNに入り込んで、TiN に繋がるフィラメント(太さ 3-5nm)を形成する様子が確認できる。この状態は電圧極性を入換えた状態5でも保持されていた。Reset スイッチ後の状態6, 7ではこのフィラメント状コントラストが消えた。

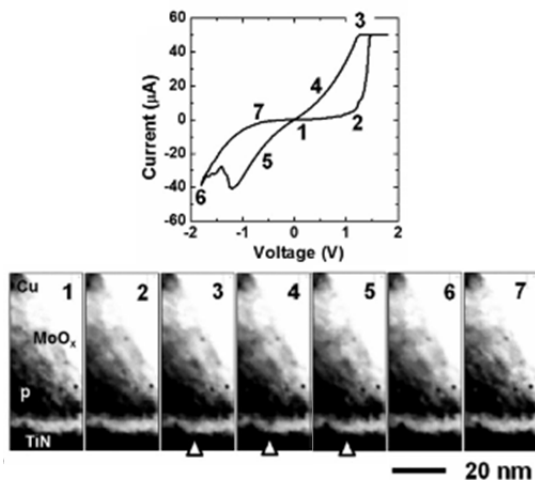


Fig.4 低電流による抵抗スイッチ時の MoO_x/TiN 界面におけるコントラスト変化。(論文①)

一連の結果からこの ReRAM で生じた変化をまとめると Fig.5 のようになる。この試料においては TiN 表面に酸化層があるため、実質的には MoO_x/ox-TiN の二層スイッチ層になっていると言える。また初期の段階で MoO_x 中に Cu 析出物が存在しているため、MoO_x 中には Cu イオンが多く溶け込んでいると考えられる。正電圧を Pt/Cu に加えることにより Cu 析出物が成長すると共に、ox-TiN 層に入り込み Cu フィラメントを形成し TiN(BE) と繋がる(Set)。この段階においても、析出物は Cu(TE)まで成長する必要は無い。MoO_x 層内には Cu が固溶していると考えられるので、Cu フィラメント-Cu(TE)間の電気伝導は Cu イオンの移動によるイオン伝導が担っていると思われる。しかし、析出物の増加量を考えるとそれだけでは不十分であり、酸素空孔、電子、水分に起因する OH⁻ による伝導も寄与する複雑な機構になっていると予想される。Reset では ox-TiN 中のフィラメントが消失する。小電流の抵抗スイッチはこの ox-TiN 中のフィラメント形成・消失が担っており、フィラメントは Cu 側から現れ、TiN 側から消失する。この形成・消失は、液体電解質の電気化学反応のアナロジーである「フィラメントモデル」では説明できない現象である。同種の結果は SiO₂ や ZrO₂ においても報告されており、過去に提案されたように金属 Cu の酸化還元速度とイオン移動度との兼ね合いで決まる可能性がある (Yang: Nat.Comm., 2014)。いずれにしても、現実のデバイスの伝導は、電子、酸素イオンも絡んだ複雑な物になっていると考えられる。電気特性の詳細な検討を今後行っていく必要がある。

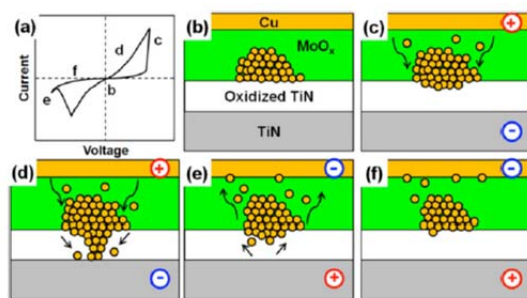


Fig.5 MoO_x/TiN 近傍のスイッチ現象のモデル。(論文①)

MoO_x 層内のフィラメント変化は電流増加によって明瞭に観察された。制限電流を 400 µA とした Fig.3a に対応する TEM ビデオ画像を Fig.6 にまとめる。Set 過程の状態 A, B は HRS であり、像には変化がない。急激な Set 直後の状態 C では Cu フィラメントの核が TiN(BE)近傍に現れた。制限電流にほぼ近い電流が流れているものの、両電極を繋ぐコントラストが確認されない。これは Fig.4 と同様の現象である。その後の正電圧印加(ここでは over-Set と呼ぶ)により、フィラメントは TiN(BE)から Cu(TE)へ向けて成長し、フィラメントの架橋が終了した。これは「フィラメントモデル」で予想されるフィラメント成長過程に合致している一方、Fig.4 の ox-TiN 中の成長とは異なる。Set 動作終了の 5 分後に Reset 動作を開始した。LRS は保持されており、TEM 実験には十分な保持特性 (Retention)を確認できた Reset 曲線は凸凹しているが、これは TEM 外での報告例においても見られる現象であり、フィラメント切断による Reset が Set ほどはシンプルな現象でない事を示唆している。Reset 直後の状態 H では大きな構造変化が TEM 像中に確認できない。Fig.4 で示したように、Reset スイッチは局所的に発生していると考えられる。更に負電流を増加し続ける (over-Reset) と、TiN 界面付近で MoO_x 中のフィラメントが破断し、Cu 電極に向かって消失していった (状態 I, J)。この現象は広く信じられているモデルとは少々異なる。TiN(BE)表面には ox-TiN 層があり、そのため抵抗が高い。よってジュール熱による影響が大きくなると考えられる。この昇温に伴い Cu の MoO_x 層への溶解が促進され、Cu 電極へ向けて加速度的にフィラメントの収縮が生じたと理解できる。これまでに報告されている CBRAM デバイスの多くでは、100µA 級以上の Reset 電流を用いている。真の物理化学的描像が何であれ、Reset 動作がジュール熱の影響を受けていることは間違いない事であろう。Cu フィラメントの形成・消失プロセスは、デバイス履歴によって、何種類かに分類される。スイッチ層への Cu の溶出度合、極薄絶縁層(ここでは ox-TiN)の追加挿入の影響、電子・酸素空孔などによる電気伝導への寄与など、実デバイスにおけるスイッチは単純な物ではなさそうである。今後の更なる詳細な検討が必要であろう。

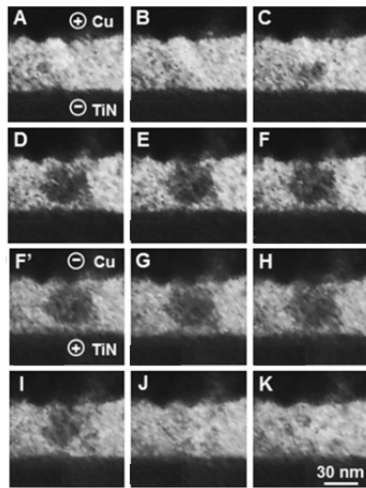


Fig.6 Cu/MoO_x の Set/Reset 過程における TEM その場観察結果 (Fig.3a に対応). (論文③)

(4) 特性劣化と内部微細構造

以上のように、抵抗スイッチは微小領域で生じ、抵抗スイッチ直後には Cu フィラメントの大幅な成長や消失は認められない。追加の通電により成長・消失が増長されると考えられる。フィラメント成長は LRS の低抵抗化や保持特性向上につながると考えられるし、消失は HRS の高抵抗化を促すため HRS/LRS のいわゆるメモリウィンドウを広げることにつながると同時に多値メモリへも応用できる。しかし、数百 μA もの電流を流すことによりデバイスは劣化していく。この節では in-situ TEM 内で行ったデバイス劣化試験について述べる。これは繰り返し ReRAM スイッチの実現により、初めて可能になった。

制限電流を増加させながら行った、連続した Set/Reset における Set 後の TEM 像を Fig.7 に示す。ここでは over-Reset 操作を行い、Set 動作で現れたフィラメントを消している。Fig.7a は初期 HRS であり、このコントラストは試料外形に起因する。1 回目のスイッチ ($200\mu\text{A}$) では幅 7nm のフィラメントが形成された (Fig.7b)。その後の電流上昇につれ、フィラメント幅は $35, 45, 100\text{nm}$ へと増加するとともに、フィラメント位置が不規則に変化した (Fig.7c-e)。これは over-Reset によりフィラメントをほぼ消失したため、核として機能する残留物量が減り、このことによりフィラメント形成位置が不安定になったものと考えられる。このように過度の Reset 電流は抵抗スイッチを不安定にする。

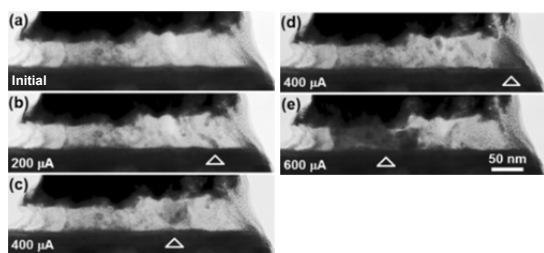


Fig.7 フィラメント消失する繰り返し Set/Reset におけるスイッチ箇所の変化. (MoO_x,論文③)

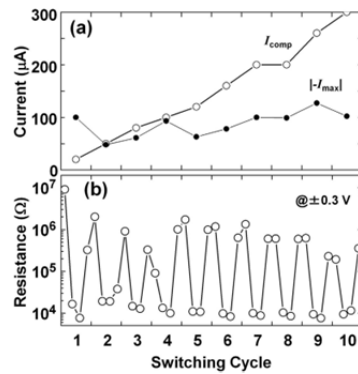


Fig.8 Set 加速試験操作(Cu/WO_x). (a) Reset 電流が増加し、(b) over-Reset のないスイッチでは抵抗比の低下 (HRS failure) が生じる. (論文②)

他方、over-Reset の抑制もまた繰り返し劣化 (endurance failure) を生じ得る。一例を Fig.8,9 に示す。ここでは Cu/WO_x-CBRAM の対して投入電力を増加させながら Set 動作を繰り返す、over-Reset の無い Reset 動作を行った。これは一種の加速試験と言える。制限電流(I_{comp})の増加に伴い Reset に必要な電流($-I_{\text{max}}$)が増加し、徐々に強いフィラメントの形成されていることが分かる (Fig.8a)。これは多値メモリに繋がる重要な実験結果である。2桁程度の抵抗比が繰り返し得られてるが、スイッチ回数を重ねるごとに抵抗比が徐々に低下している。このことは CBRAM においてのみならず生じており、Set/Reset のアンバランスにより生じると言われている。Fig.9 に一連の Set 後の TEM 像を比較した。これを見ると I_{comp} の増加を伴う繰り返し動作により、Cu はフィラメント以外の WO_x 層中にも侵入しており、特性劣化を引き起こしていることがわかる。Set 電力と Reset 電力のバランス制御が繰り返し特性の向上に重要であるという事が実験的に示されたと言える。このように in-situ TEM 手法の故障解析への応用はデバイス開発に重要な知見を与える。

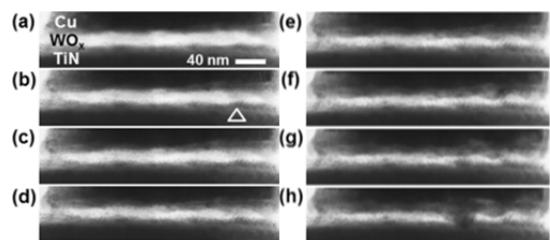


Fig.9 特性劣化時の観察結果(Cu/WO_x). スイッチ層への Cu の侵入が見られる. (論文②)

(5) TEM 内におけるデバイス特性評価

上記の研究を更に一歩進めた事項として、 $30, 70\text{nm}$ 級の Cu:固体電解質/極薄絶縁層からなる ReRAM デバイスを作製し、実際の使用条件を念頭においた in-situ TEM 実験を行った。その結果、 $40\mu\text{A}$ 以上の電流で数か月におよぶ保持特性が得られるものの、TEM 像でフィラメントを確認できるのは $100\mu\text{A}$ を超

える電流でのスイッチ操作の場合であることが分かった。またパルス駆動測定も可能であり、TEM内でも10万回以上の繰返し書換え特性が評価できた。これらの評価性能をまとめたのが、Table 1である。高速な時間分解能がビデオ画像のフレームレイトで制限される以外は、多くの項目で高い評価が可能であることがわかる。詳細は学会発表②の proceedingsを参照して頂きたい (DOI: 10.1109/IMW.2015.7150312)。

Table 1 ReRAM デバイス研究における in-situ TEM の性能評価。(学会②)

TEM評価項目	評価結果	実現例	
スイッチ特性	I-V 特性	GOOD	
	Pulse 測定	GOOD	
	Endurance	GOOD	10万回
	Retention	OK	~10 ⁶ sec
TEM評価	解像度	GOOD	~1 nm
	時間分解能	LIMITED	ビデオ周波数
	材料分析	GOOD	EDX等

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 20 件)

- ① M. Arita, Y. Ohno, Y. Takahashi, Switching of Cu/MoO_x/TiN interface, Phys. Stat. Sol. A, 査読有, Vol.213, 2016, 306-310. DOI: 10.1002/pssa.201521414
- ② M. Arita, A. Takahashi, Y. Ohno, A. Nakane, A. Tsurumaki-Fukuchi, Y. Takahashi, Switching operation and degradation of resistive random access memory composed of tungsten oxide and copper investigated using in-situ TEM, Sci. Repts., 査読有, Vol.5, 2015, 17103 -1-9. DOI: 10.1038/srep17103
- ③ M. Kudo, M. Arita, Y. Ohno, Y. Takahashi, Filament formation and erasure in molybdenum oxide during resistive switching cycles, Appl. Phys. Lett., 査読有, Vol.105, 2014, 173504-1-4. DOI: 10.1063/1.4898773
- ④ M. Kudo, M. Arita, Y. Ohno, T. Fujii, K. Hamada, Y. Takahashi, Preparation of resistance RAM samples for in-situ TEM experiments, Thin Solid Films, 査読有, Vol. 533, 2013, 48-53. DOI: 10.1016/j.tsf.2012.10.102

[学会発表] (計 64 件)

- ① (Invited) M. Arita, Y. Takahashi, Switching operation in resistive RAM composed of solid electrolytes studied by in-situ TEM, 3rd Internat. Multidis. Microsc. Microanal. Cong. (InterM), Oct. 20, 2015, Oludeniz (Turkey).
- ② M. Kudo, M. Arita, Y. Takahashi, K. Ohba, M. Shimuta, I. Fujiwara, Visualization of conductive filament during write and erase cycles on nanometer-scale ReRAM achieved by in-situ

TEM, 2015 IEEE 7th Internat. Memory Workshop (IMW), May 19, 2015, Monterey (CA, USA).

- ③ M. Arita, Y. Ohno, M. Kudo, Y. Takahashi, Growth and shrinkage of conductive filament in Cu/MoO_x ReRAMs, 2014 Internat. Conf. Solid State Dev. Mater. (SSDM), Sept. 9, 2014, Tsukuba Internat. Cong. Center, Tsukuba (Ibaraki).
- ④ (Invited) M. Arita, Y. Takahashi, Observation of ReRAM switching by means of TEM/STM, 第 61 回応物春季講演会, 青学大 (神奈川県, 相模原), 2014 年 3 月 18 日.
- ⑤ M. Kudo, Y. Ohno, K. Hamada, M. Arita, Y. Takahashi, Observation of filament formation and rupture in Cu/MoO_x ReRAMs, 224th Electrochem. Soc. Meeting (ECS), Oct. 30, 2013, San Francisco (CA, USA).

[図書] (計 1 件)

- ① M. Arita, K. Hamada, Y. Takahashi, K. Sueoka, T. Shibayama, The Transmission Electron Microscope – Theory and Applications, K. Maaz (ed.), InTech, 2015, 35-68 (第 2 章). DOI: 10.5772/60651

6. 研究組織

(1) 研究代表者

有田 正志 (ARITA, Masashi)
北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号: 20222755

(2) 研究分担者

高橋 庸夫 (TAKAHASHI Yasuo)
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 90374610

末岡 和久 (SUEOKA Kazuhisa)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 60250479

柴山 環樹 (SHIBAYAMA Tamaki)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・教授
研究者番号: 10241564

(4) 研究協力者

工藤昌輝 (KUDO, Masaki), 大野裕輝 (OHNO, Yuuki), 高橋謙仁 (TAKAHASHI, Akihito), 平田周一郎 (HIRATA, Shuichiro), 村上暢介 (MURAKAMI, Yosuke), 越智隼人 (OCHI, Hayato), 米坂瞭太 (YONESAKA, Ryota), 武藤恵 (MUTO, Satoshi), 中根明俊 (NAKANE, Akitoshi), 廣井孝弘 (HIROI, Takahiro), 勝村玲音 (KATSUMURA, Reon), 森雄司 (MORI, Yuji)