

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04484

研究課題名（和文）抵抗変化酸化物の原子スケール表面観察を通じた高精度人工シナプス材料の提案

研究課題名（英文）Proposal of high-performance materials for artificial synapses via atomic-scale observations of resistive switching oxides

研究代表者

福地 厚（Fukuchi, Atsushi）

北海道大学・情報科学研究所・助教

研究者番号：00748890

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：電場印加によりイオン移動に基づく抵抗変化現象を示す事が知られるアモルファス金属酸化物において、原子レベルの表面平坦性を持つ超平坦薄膜を作製し、そのプローブ顕微鏡解析を通じて、人工シナプス素子の動作原理として知られるアナログ型（連続的）抵抗変化現象の物理機構を評価した。作製した超平坦 $a\text{-TaO}_x$ 薄膜では、実デバイスと同様の各種のアナログ抵抗変化現象がプローブ顕微鏡測定において直接的に観測され、またその際のイオン移動を数 \AA の分解能で観察する事に成功した。観測されたイオン移動機構を基に、未解明現象であったアナログ抵抗変化現象に対して、その発現機構を駆動力・化学組成などの観点で明確化する事が出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人工シナプス素子をはじめとするニューロモルフィック素子の研究はここ数年において極めて活発化しており、その中でもアモルファス金属酸化物が示すアナログ型の抵抗変化現象は、チップ化への適性の高さなどから人工シナプス素子の原理として応用面で特に有望視され、盛んな研究が展開されている現象である。一方でアモルファス酸化物を用いた人工シナプス素子の近年の研究開発では、その物理機構が未解明であるために十分な特性制御性が得られないことが重大課題として指摘されていたが、本研究の成果はこの問題の解決に直接的に寄与するとともに、素子性能の向上を通じて今後のニューロモルフィック工学全般の進展の一助となる事が期待される。

研究成果の概要（英文）：To elucidate the underlying mechanisms of analog (continuous) resistive switching in amorphous metal oxides, which has gained attention as important principles of electronic synapses, atomically flat thin films of amorphous metal oxides were fabricated by the pulsed laser deposition method, and detailed probe microscopy analysis of analog resistive switching was conducted on the atomically flat surfaces. In the atomically flat amorphous TaO_x films fabricated in this study, three distinct types of analog resistive switching phenomena (current-dependent set, voltage-dependent reset, and voltage-application-time-dependent switching), which have been reported in TaO_x -based resistive switching devices, were directly observed by probe microscopy measurements, and the causal ion migration was visualized in angstrom scale. The observations revealed detailed pathways of the analog resistive switching in amorphous TaO_x and material properties critical for analog type of switching operations.

研究分野：酸化物エレクトロニクス

キーワード：メモリストア アモルファス酸化物 抵抗スイッチング 走査型プローブ顕微鏡法 人工シナプス 非線形伝導現象

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

2010年代後半より脳型コンピューティング関連の研究開発が急速に活発化された事を受けて、本研究課題の開始当初には、生体脳の情報処理機能をハードウェア機能により模倣するための電子デバイスである、ニューロモルフィック素子の研究需要が強く高まっている状況にあった。人工シナプス素子は生体脳における神経細胞間の接合部位である、シナプス部の機能を模倣するためのニューロモルフィック素子であり、2015年以降には関連する研究論文が毎年7000報以上発表される等、極めて盛んな研究開発が試みられている状況にあった。人工シナプス素子における機能要求としては、生体シナプスが示すシナプス間の結合強度の連続的な変化を模倣するために、電気抵抗などに代表される各素子が持つ状態変数を、高い連続性を持って(アナログ的に)変化させる事が求められる。この点において、人工シナプス用途の電子デバイスとして研究開始当初において応用面で最も有望視されていたデバイスは、ReRAMとも呼ばれる金属酸化物をスイッチング材料としたイオン移動型の抵抗変化メモリ素子である。主にTaO_x、HfO_xなどの2元素のアモルファス金属酸化物を金属電極によって挟み込んだ積層構造型素子において、数V程度の電圧を外部から印加する事によって、電圧強度や電圧の印加回数などに依存した、連続的な抵抗変化が発現する事が様々な材料を用いて報告されており、人工シナプス素子としての応用可能性について盛んな議論がなされていた。

一方でそれらの金属酸化物を用いた抵抗変化素子においては、電場による内部のイオン移動が電気抵抗変化の起源である可能性は予測されていたものの、その具体的な物理機構については理解が進んでおらず、さらに人工シナプス素子向けの連続的(アナログ的)な抵抗変化現象に関しては、過度の電気入力によって抵抗変化の連続性が直ちに失われるなど、その機構解析が実験的により高難度となることから、物理機構に関する具体的な知見は極めて乏しい状況にあった。当時報告されていたイオン移動型の抵抗変化メモリにおいては、抵抗変化の連続性や抵抗変化レンジの制御性の乏しさが応用に向けた課題として挙げられていたが、連続的な抵抗変化現象の発生機構が未解明であったために、それらの特性の改善のための明確な指針が存在せず、実用化に向けた素子開発を行うことは困難な状況にあった。一方で言い換えれば、アモルファス金属酸化物に対してアナログ型抵抗変化現象の物理的機構を決定する事が出来れば、酸化物人工シナプス素子の動作特性は応用に向けて大幅な改善が可能になると予測され、実用レベルの特性を持つ人工シナプス素子の開発実現へとつながる事が強く期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的はイオン移動型の電気抵抗変化現象を示すアモルファス金属酸化物に対して、超平坦薄膜試料を用いた原子スケールでの走査型プローブ顕微鏡測定を行う事で、未解決課題となっているアナログ型抵抗変化現象の発生機構を、物理的に解明する事である。それによりアナログ型抵抗変化現象の発現要件(化学組成・材料形状・電圧印加条件)を物理パラメータとして明確化させるとともに、人工シナプス素子としての素子特性を最適化させる材料・素子構造を具体的に提示する。

本研究を開始した当初には、アモルファス金属酸化物においてアナログ型の抵抗変化現象をもたらすと考えられる電場・熱分布による内部イオン移動は、数nmから最小で数オングストロームまでの極めて微小な空間的スケールにおいて発生する事が予測されており、その実験的な解析は一般的な顕微鏡解析法において困難である可能性が指摘されていた。さらに発生母体が非晶質物質であることから、その詳細な解析は実験・計算の両面において多くの手法で困難であり、これらの事が同現象の物理的な理解を妨げる要因となっていた。一方で、それらのアナログ抵抗変化現象に伴う原子レベルでのイオン移動を観測するための方法としては、プローブ顕微鏡法が潜在的に有望であると期待する事が出来る。プローブ顕微鏡法では原子スケールの高い空間分解能が簡便に得られることに加えて、測定法に応じて電気伝導特性やキャリア密度分布を同時に測定することも可能となることから、観測が比較的容易な非アナログ型(不連続型)の抵抗変化現象に関しては2010年ごろから多くの報告において機構解析に用いられてきた実績が有り、また本研究を開始した当初にはアナログ型の抵抗変化現象についても盛んに観測が試みられ始めていた。一方で本研究課題の開始当初においては、プローブ顕微鏡法によりアナログ型抵抗変化現象の実験的な観測が実現された事はそれまでに無く、観測の実現に向けては新たな実験技術の開発・開拓が求められる状況にあった。

当時の走査型プローブ顕微鏡法を用いた抵抗変化酸化物の解析研究においては、一般的に作製が容易な多結晶薄膜や不均一組成を持つアモルファス薄膜を用いて機構解析実験が行われてきた背景があり、その表面には必然的に数nm以上の構造的乱雑さが存在していた。そのためアナログ型の抵抗変化現象の起源として予測される、原子スケールでのイオン移動を膜表面において観察することは、表面構造の観点において困難であった。また多結晶膜・不均一膜を用いた場合には、探針/酸化物膜界面には膜の表面粗さに起因する局所的な電界集中が発生することとなり、印加電圧強度の精密制御が要求されるアナログ型抵抗変化現象の観測は、電気計測の観点においても困難であることが報告されていた。本研究課題ではこれらの背景を基に、アナログ型

の抵抗変化現象をプローブ顕微鏡法により観測するためには、アモルファス酸化物薄膜の表面の高度平坦化が有効となるとの予測を立て、パルスレーザー堆積(PLD)法を用いて原子レベルの平坦性を持つ超平坦アモルファス酸化物薄膜の作製を試みるとともに、作製した薄膜において導電性原子間力顕微鏡(C-AFM)法によるアナログ抵抗変化現象の詳細な特性評価と、イオン移動機構の精密な観測を実現させる事を目指して研究を行った。

3. 研究の方法

PLD 法により室温、酸素分圧 = 10^{-4} – 10^0 Pa の条件下においてアモルファス酸化物薄膜の堆積を行い、作製した薄膜に対して C-AFM 法による局所および走査測定での伝導特性評価と表面構造観察を実施した。製膜に使用した基板は Nb 添加 SrTiO₃ (Nb:STO) (001) 基板であり、Nb のドーパ濃度は 0.005–0.5Wt% である。これらの導電性を持つ Nb:STO 基板を、C-AFM 測定においてはアモルファス酸化物膜に対する下部電極としても使用した。使用した Nb:STO 基板には薄膜の堆積前にバッファードフッ酸による選択的エッチング処理を行うことで、1 単位格子高さステップを持つ周期的ステップアンドテラス構造を表面に形成させている。このステップアンドテラス構造を持った Nb:STO 基板の上にアモルファス酸化物薄膜を堆積させることで、原子レベルで平坦なテラス内部における C-AFM 解析を実施した。作製した酸化物薄膜はアモルファス TaO_x (a-TaO_x) とアモルファス NbO_x (a-NbO_x) の 2 種類であり、膜厚は 3.0–100 nm の範囲である。作製した膜の物性評価は C-AFM 測定に加えて、van der Pauw 法による四端子抵抗率測定と X 線反射率測定、透過型電子顕微鏡観察、X 線光電子分光分析を基に行った。C-AFM 測定時には抵抗変化特性の詳細な評価のために、外部測定機として半導体パラメータアナライザ、ファンクションジェネレータ、およびオシロスコープを探針による測定系に接続して、電気測定を行った。C-AFM によって抵抗変化特性を評価した後のアモルファス酸化物膜に対しては、オージェ電子分光法による数 nm 範囲での局所的な元素分析を行い、アナログ抵抗変化現象が膜の化学組成に対し与える影響を評価した。

4. 研究成果

製膜条件の検討を基に、a-TaO_x、a-NbO_x のいずれにおいても原子レベルの表面平坦性を持つ超平坦薄膜を作製することが出来た。作製した超平坦薄膜においては、完全なアモルファス性の薄膜でありながらも、使用した Nb:STO (001) 基板表面が持つ 1 単位格子ステップアンドテラス構造がほぼ完全にトレースされた表面構造が形成されており、金属イオンと酸化物イオンが構造内に極めて均一に分布している事が示唆されたとともに、C-AFM 法による抵抗変化解析に非常に適した試料を得ることができた。作製した原子平坦 a-TaO_x 薄膜を用いた C-AFM 測定においては、これまでに積層構造デバイスで発生が報告されていた、電流依存型の低抵抗化現象、電圧強度依存型の高抵抗化現象、および電圧印加時間依存型の抵抗変化現象の 3 種類のアナログ型抵抗変化現象を、いずれも C-AFM 測定によって直接観測する事に成功し、またその際の内部イオン移動に関しても、数 nm の分解能での高精度な直接観察が可能となった。さらにアナログ抵抗変化現象の発生時に a-TaO_x 内に発生する組成変化についても、オージェ電子分光測定を基に数値範囲として評価する事に成功している。本研究課題を通して得られた、具体的な知見を以下に示す。

(1) 電流依存型低抵抗化現象

a-TaO_x における電流依存型のアナログ低抵抗化は、複数の臨界電流値を持つ多段階のスイッチング現象である事が示された。a-TaO_x 膜内における伝導経路へのイオンの移動・供給に関する支配的要因は、a-TaO_x 膜内に流れる電流の上昇とともに、電場による面間方向のイオンドリフト、熱拡散による面内方向でのイオン移動、酸素供給層との間での界面電気化学反応の順に段階的に変化することが明らかとなった。このうち特に顕著なアナログ低抵抗化現象が発生するのは、電場の面間ドリフトの段階である。

(2) 電圧強度依存型高抵抗化現象

a-TaO_x における電圧強度依存型のアナログ高抵抗化は、a-TaO_x において相分離を伴わずに発生することが可能な、 $2.0 < x < 2.5$ の組成範囲での電気化学酸化還元反応を支配的要因として発生することが示された。また C-AFM による繰り返し抵抗変化測定の結果から、a-TaO_x におけるこの酸化還元反応は、高い可逆性と連続性を持つ反応であることが示された。これらの本研究の観測結果は、アナログ高抵抗化現象に対して従来予測されていた、電場ドリフトによるイオン移動を基にするモデルとは大きく異なる機構を提示するものであり、今後酸化物による人工シナプス素子に対し特性制御を試みる上で、重要な知見である。また印加電圧の上昇に伴い(6 nm 厚さ膜の場合 3.0 V 以上において)、a-TaO_x 膜内においてはタンタルイオンの面間方向でのドリフト移動が顕著に発生することが観測され、この面間方向のイオンドリフトの発生時には、アナログ型の高抵抗化動作は終焉し、膜内にはイオン蓄積によって特徴的なデンドライト構造が形成されるとともに、電気特性としては実デバイスにおいてオーバーリセットと呼ばれる現象が発現することが明らかとなった。

(3) 電圧印加時間依存型アナログ抵抗変化現象

a-TaO_xにおける電圧印加時間依存型のアナログ抵抗変化現象は、電圧強度依存型においても発生が示唆された、 $2.0 < x < 2.5$ の組成範囲での酸化還元反応を可逆的に誘起することで、抵抗値に高い連続性を持って発現可能である事が示された。またこの電気化学反応を基にしたアナログ抵抗変化現象は、a-TaO_x抵抗変化デバイスの一般的な動作条件においては、数 μ sから数msの比較的遅い抵抗変化速度を持って発生することが明らかとなった。

(4) 高速抵抗スイッチング現象

タンタルイオンの面間方向の電場ドリフトは、アナログ型の高抵抗化現象には重要には寄与しないことが上記の測定によって示されていたが、一方でa-TaO_x膜に対して時間分解能を上昇させた高速度下の電気計測を行った場合には、100 ns以下のスイッチング速度を持つ非アナログ型の高速度抵抗スイッチング現象の要因となる事が明らかとなった。

(5) ストカスティシティ制御

a-TaO_xにおける抵抗変化現象の確率過程性(ストカスティシティ)は、タンタルイオンと酸素イオンの移動方向を変更することで明確に制御する事が可能であり、電極界面にタンタルイオンを蓄積させる条件ではアナログ型の抵抗変化現象、一方で電極界面に酸化物イオンを蓄積させる条件では確率過程型の抵抗変化現象が発現する事が明らかとなった。またこの確率過程型の抵抗変化現象は、a-TaO_x内における酸素組成の減少に起因する準安定相 a-TaO₂の析出を基に発生することが示唆されたとともに、抵抗変化の発生時には膜内に特徴的なコアシェル型の組成・伝導度分布が形成されることが分かった。

「2. 研究の目的」においても述べた通り、プローブ顕微鏡法によるアナログ型抵抗変化現象の機構解析は現在、国内外の多くのグループによって盛んに試みられている状況にあるが、これまでにはアナログ型の低抵抗化現象を電気測定において非可逆的に観測した報告が、数報報告されているのみである。本研究課題では計画終了時までには、実デバイスにおいて報告されてきたa-TaO_xの多様なアナログ抵抗変化現象の多くをプローブ顕微鏡測定において観測する事に成功しており、またその際のイオン移動も数 μ sの分解能で観測することを達成している。本研究課題ではそれらの観測を通じて、アモルファス金属酸化物のアナログ抵抗変化現象の起源に関する非常に直接的な情報が得られたことから、酸化物人工シナプス素子の今後の研究開発において、本研究の成果が特性向上・新規機能開拓の一助となる事が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Tsurumaki-Fukuchi Atsushi, Katase Takayoshi, Ohta Hiromichi, Arita Masashi, Takahashi Yasuo	4. 巻 104
2. 論文標題 Nanoscale Probing of Field-Driven Ion Migration in TaOx for Neuromorphic Memristor Applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 93 ~ 101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/10404.0093ecst	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tsurumaki-Fukuchi Atsushi, Tsubaki Keiji, Katase Takayoshi, Kamiya Toshio, Arita Masashi, Takahashi Yasuo	4. 巻 12
2. 論文標題 Stable and Tunable Current-Induced Phase Transition in Epitaxial Thin Films of Ca ₂ RuO ₄	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 28368 ~ 28374
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.0c05181	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Arita Masashi, Tsurumaki-Fukuchi Atsushi, Takahashi Yasuo	4. 巻 59
2. 論文標題 Filamentary switching of ReRAM investigated by in-situ TEM	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SG0803 ~ SG0803
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab709d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Tsurumaki Fukuchi Atsushi, Tsuta Yusuke, Arita Masashi, Takahashi Yasuo	4. 巻 13
2. 論文標題 Controlled Current Transport in Pt/Nb:SrTiO ₃ Junctions via Insertion of Uniform Thin Layers of TaOx	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 physica status solidi (RRL) Rapid Research Letters	6. 最初と最後の頁 1900136 ~ 1900136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssr.201900136	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計68件（うち招待講演 10件 / うち国際学会 32件）

1. 発表者名 A. Tsurumaki-Fukuchi, T. Katase, H. Ohta, M. Arita, Y. Takahashi
2. 発表標題 Probe Microscopy Analysis of Defect-Driven Analog Memory Functions of TaOx for Neuromorphic Computing
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Tsurumaki-Fukuchi, T. Katase, T. Kamiya, H. Ohta, M. Arita, Y. Takahashi
2. 発表標題 Nanoscale Probing of Field-Driven Ion Migration in TaOx for Neuromorphic Memristor Applications
3. 学会等名 the 240th ECS Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福地 厚, 椿 啓司, 高橋 庸夫, 片瀬 貴義, 神谷 利夫, 有田 正志
2. 発表標題 Ca ₂ RuO ₄ 薄膜における非線形伝導現象の高速化と不連続転移の観測
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福地 厚, 片瀬 貴義, 太田 裕道, 有田 正志, 高橋 庸夫
2. 発表標題 原子平坦アモルファス薄膜を用いたTaOxのアナログメモリ動作過程の直接観察
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Tsurumaki-Fukuchi, T. Katase, H. Ohta, M. Arita, Y. Takahashi
2. 発表標題 Probe Microscopy Analysis of Neuromorphic Resistive Memory Functions of Amorphous Oxide Semiconductors
3. 学会等名 the 12th International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC-12) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福地 厚, 椿 啓司, 石田 典輝, 片瀬 貴義, 神谷 利夫, 有田 正志, 高橋 庸夫
2. 発表標題 Ca ₂ RuO ₄ 薄膜における電流誘起抵抗転移のRu欠損量依存性
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福地 厚, 椿 啓司, 石田 典輝, 片瀬 貴義, 神谷 利夫, 高橋 庸夫, 有田 正志
2. 発表標題 Ca ₂ RuO ₄ エピタキシャル薄膜が示す電流誘起絶縁体-金属転移とその抵抗変化特性
3. 学会等名 第40 回電子材料研究討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福地 厚, 椿 啓司, 石田 典輝, 高橋 庸夫, 片瀬 貴義, 神谷 利夫, 有田 正志
2. 発表標題 Ca ₂ RuO ₄ エピタキシャル薄膜における非線形伝導現象
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福地 厚, 椿 啓司, 石田 典輝, 有田 正志, 片瀬 貴義, 神谷 利夫, 高橋 庸夫
2. 発表標題 Ca ₂ RuO ₄ 薄膜における電流/電場誘起金属絶縁体転移の観測
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Atsushi FUKUCHI, Yusuke TSUTA, Masashi ARITA, and Yasuo TAKAHASHI
2. 発表標題 Systematic Control of Current Transport in Metal/Oxide Schottky Junctions Using Highly Uniform Layers of TaO _x
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (MRM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 有田 正志, 福地 厚, 高橋 庸夫
2. 発表標題 抵抗変化メモリデバイスのナノスケールTEMその場解析
3. 学会等名 日本セラミックス協会東北北海道支部 第 27 回北海道地区セミナー (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Takahashi, M. Sinohara, M. Arita, A. Tsurumaki-Fukuchi, A. Fujiwara, Y. Ono, K. Nishiguchi, and H. Inokawa
2. 発表標題 Characteristics of Si Single-Electron Transistor under Illumination
3. 学会等名 The 236th ECS Meeting 2019年10月16日 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名	Atsushi Tsurumaki-Fukuchi, Keiji Tsubaki, Takayoshi Katase, Toshio Kamiya, Masashi Arita, and Yasuo Takahashi
2. 発表標題	Observation of field-Induced resistive phase transition in Ca ₂ RuO ₄ thin films
3. 学会等名	The 26th International Workshop on Oxide Electronics (iWOE26) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	M. Arita, R. Ishikawa, K. Arima, A. Tsurumaki-Fukuchi, Y. Takahashi, M. Kudo, and S. Matsumura
2. 発表標題	Failure and Recovery of Double-Layer CBRAM Studied by In-Situ TEM
3. 学会等名	2019 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2019) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	M. Arita, A. T.-Fukuchi, Y. Takahashi, S. Muraoka, S. Ito, and S. Yoneda
2. 発表標題	Nanofilaments in Ta-O ReRAM Bit Array Fabricated Using 40 nm CMOS Process
3. 学会等名	2019 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	A. Tsurumaki-Fukuchi, M. Arita, Y. Takahashi
2. 発表標題	Fast and uniform interface reactions of tantalum oxide and their applications into memory devices
3. 学会等名	The 2019 Collaborative Conference on Materials Research (CCMR2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名 Y. Takahashi, A. Tsurumaki-Fukuchi, and M. Arita
2. 発表標題 Operation analysis of resistive switching of CBRAM using in-situ TEM
3. 学会等名 2019 International Conference on Semiconductor Technology for Ultra Large Scale Integrated Circuits and Thin Film Transistors (ULSIC vs. TFT 7) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Arita, A. Tsurumaki-Fukuchi, Y. Takahashi, S. Muraoka, S. Ito, S. Yoneda
2. 発表標題 Nanoscale filaments in Ta-O resistive RAM bit array: microscopy analysis and switching property
3. 学会等名 2019 IEEE 11th International Memory Workshop (IMW 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 有田 正志, 福地 厚, 高橋 庸夫, 村岡俊作, 伊藤 理, 米田 慎一
2. 発表標題 40nm CMOS技術により作製したTa-O系抵抗変化メモリにおける導電フィラメント周辺の酸素分布
3. 学会等名 電子情報通信学会 集積回路研究会 (ICD) (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	有田 正志	北海道大学・情報科学研究院・准教授	
	(Arita Masashi)		
	(20222755)	(10101)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	高橋 庸夫 (Takahashi Yasuo) (90374610)	北海道大学・情報科学研究所・名誉教授 (10101)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	片瀬 貴義 (Katase Takayoshi)	東京工業大学・フロンティア材料研究所・准教授	
研究 協力者	太田 裕道 (Ohta Hiromichi)	北海道大学・電子科学研究所・教授	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関