

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360278

研究課題名(和文) 酸化物/金属ヘテロ界面のナノイオニクス現象の解明と制御

研究課題名(英文) Elucidation and control of nanoionics phenomena at oxide/metal heterointerfaces

研究代表者

鶴岡 徹 (Tsuruoka, Tohru)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・主幹研究員

研究者番号：20271992

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：ナノイオニクス現象と呼ばれる、酸化物薄膜中の金属イオン伝導と金属/酸化物界面の固体電気化学反応を利用した原子スイッチ型抵抗変化メモリの動作機構の解明と機能化の研究を行った。原子間力顕微鏡と透過型電子顕微鏡によるメモリ内に形成される伝導性フィラメントの実空間計測、電気化学的な測定による金属/酸化物界面の酸化還元反応の詳細と酸化物の吸湿効果の解明、量子化コンダクタンスとシナプス動作の実証を行った。

研究成果の概要(英文)：We have investigated the switching mechanism and functionalities of Cu,Ag/Ta2O5/Pt atomic switch-type resistance change memories based on the transport of metal ions in oxide thin films and electrochemical reactions at metal/oxide interfaces, which are called 'nanoionics phenomena'. We performed real-space observation of a conducting filament formed in the memory by atomic force and transmission electron microscopies, elucidation of detailed redox reaction at metal/oxide interfaces and moisture absorption effects of oxides by electrochemical methods, and demonstration of conductance quantization and synaptic behavior.

研究分野：ナノイオニクスを利用した抵抗変化メモリと次世代デバイスの開発

キーワード：酸化物 カチオン伝導 酸化還元反応 ナノイオニクス 量子化コンダクタンス シナプス動作

### 1. 研究開始当初の背景

シリコンをベースにしたフラッシュメモリや DRAM のダウンスケーリングが物理的限界に到達しつつある近年、新しい概念に基づいたメモリ技術の開発が世界中で進められている。多くの新しい技術の中で、抵抗変化素子は次世代メモリの筆頭候補として位置づけられている。固体中のカチオン伝導を利用する「原子スイッチ型メモリ」は、固体電気化学反応を利用してナノスケールの電極間の金属架橋の構築と溶解により抵抗スイッチ動作する素子である。原子スイッチは当初走査型トンネル顕微鏡のトンネルギャップを利用して動作実証された(ギャップ型原子スイッチ)。その後、金属/酸化物/金属の MIM 構造でも同様の現象が観測され、デバイス応用の観点から注目を集めている(接合型原子スイッチ)。このナノ薄膜中のイオン伝導と電極界面の酸化還元反応(イオニクス現象)に基づく抵抗変化素子は、高い ON/OFF 抵抗比、優れたスケーラビリティ、低消費電力など多くの利点を有する。しかし、動作原理には未解明な部分も多く残されており、完全なスイッチ動作の制御にはほど遠いのが現状である。

### 2. 研究の目的

本研究は酸化物/金属ヘテロ界面のイオニクス現象をナノスケールで解明する手法を確立し、それを駆使して酸化物イオニクス素子の本質的な動作原理を解明する。3年間の研究機関で、以下の達成目標を掲げる。

- 1) プローブ顕微鏡と電子顕微鏡を組み合わせ、積層構造中の金属架橋の実空間計測を試みる。
- 2) 陽極と陰極界面の酸化還元反応の詳細とナノ薄膜中のイオン伝導機構を解明し、スイッチ動作特性を制御するためのヘテロ界面設計の指針を確立する。
- 3) 2 値の抵抗変化だけでなく、ナノギャップ型原子スイッチで観測された量子化コンダクタンスと学習機能が、接合型原子スイッチでも観測および制御可能かどうかを明らかにする。

### 3. 研究の方法

酸化タンタル( $Ta_2O_5$ )をモデル材料として、Cu, Ag/ $Ta_2O_5$ /Pt 素子を  $SiO_2/Si$  基板上に作製した。金属電極は電子線蒸着法で、 $Ta_2O_5$  は RF スパッタないしは電子線蒸着法で堆積した。 $Ta_2O_5$  膜の厚さは 8~20nm である。Cu 電極表面の酸化を防ぐために、Pt 層で終端した。素子形状は異なるパターンの金属マスクを重ね合わせてクロスポイント構造を形成し、接合サイズは測定の必要に応じて  $5\mu m \times 5\mu m$  から  $50\mu m \times 50\mu m$  の範囲で変えた。

素子の電流-電圧 (I-V) 特性は雰囲気制御が可能な真空プローバと半導体評価装置 (Keithley 4200SCS/F) を用いて評価した。電気的な測定は、大気中、真空中、および制

御された湿度下で行った。電流検出型の原子力顕微鏡 (C-SFM) の観察は、集束イオンビームで作製した導電性カンチレバーを用いて大気中で行った。測定後、試料をすぐに薄片化し透過型電子顕微鏡 (TEM) の観察を行った。

サイクリックボルタンメトリ (CV) 測定には、高入力インピーダンスを持つソース/メジャーユニット (Keithley 6430) を用いた。量子化コンダクタンスおよび学習機能の観測には、ソース/メジャーユニット (Agilent B2900) を自作のプログラムで制御した。

### 4. 研究成果

Cu/ $Ta_2O_5$ /Pt 構造に構築された金属架橋を実空間するために、まず C-AFM を用いて架橋位置の同定を試みた。AFM 内で作製した直後の素子の Cu 電極に正のバイアス電圧を印加すると、初期高抵抗 (OFF) 状態から低抵抗 (ON) 状態に SET される (図 1 (a, b))。この最初の SET 操作を一般的にフォーミングと呼び、最初の金属架橋の構築に対応する。フォーミング前後の素子接合表面のトポグラフィと電流像を同時に計測し、それらの変化を調べた。結果の一例を図 1 (c, d) に示す。図 1 (c) はフォーミング後の AFM 像である。素子接合表面の右上部にフォーミング前には観測されなかった小さな突起が見られる。同時に取得した電流像 (図 1 (d)) には、この突起の位置に電流のピークが観測された。これはフォーミングによって構築された金属架橋に対応すると考えられる。

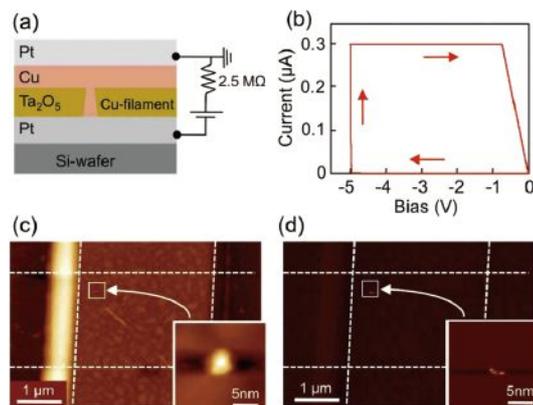


図 1 Cu/ $Ta_2O_5$ /Pt 素子の C-AFM 観察

C-AFM 測定から同定した位置で素子を切り出し、その断面を TEM で観察した。結果を図 2 に示す。断面 TEM 像 (図 2 (a)) には、Pt 電極上にドーム型の構造が見られる。同時に取得したエネルギー分散型 X 線分析像 (EDX) (図 2 (a)~(c)) からは、ドーム構造では Cu の濃度が高く、Ta の濃度が低くなっていることがわかった。このことから、ドーム構造は Pt 電極上に形成された Cu の安定核と考えられる。Cu 電極近傍の金属架橋は TEM から観測できなかった。安定核の上に細い架橋が構築されていると考えられる。これらの結果は、SET 動作が Pt 電極上の Cu の核形成と成長に

よる金属架橋の構築に由来するという従来からの我々が提案してきたモデルの正当性を示唆している。

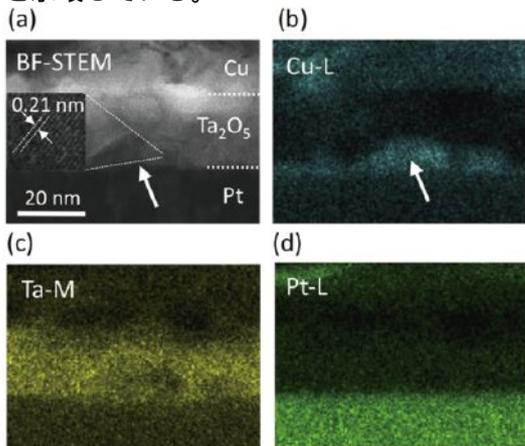


図2 フォーミング後の断面 TEM 像(a)と EDX 像(b~d)

これまで、酸化物のような高抵抗な試料系では、電極界面の固体電気化学反応に由来したイオン電流を観測することは困難であると考えられてきた。しかし、特定の条件下では、金属/酸化物電極界面の酸化還元反応に対応したイオン電流が測定できることを見いだした。図3 (a)は電子線蒸着膜を用いた Cu/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(20nm)/Pt 素子の CV 曲線である。素子がフォーミングしないよう -2~+2V 以下の範囲でバイアス電圧を掃印した。この測定は2端子で行っており、参照電極がそのため厳密な酸化還元電位を決めることはできない。しかし、定性的な議論は有効である。水溶液系の Cu の標準酸化還元電位は Cu<sup>+</sup>/Cu (E<sup>0</sup>=0.52V) , Cu<sup>2+</sup>/Cu<sup>+</sup> (E<sup>0</sup>=0.34V) , Cu<sup>2+</sup>/Cu<sup>+</sup> (E<sup>0</sup>=0.16V) であることから、Cu<sup>+</sup> Cu<sup>2+</sup> の酸化反応が最も起こりやすいことが予想される。しかし、初期状態の素子の Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 膜中には Cu<sup>+</sup> は存在しないため、最初のバイアス掃印では Cu<sup>+</sup> Cu<sup>2+</sup> Cu<sup>+</sup> Cu<sup>2+</sup> の順に酸化反応が起こり、それらに対応した電流ピークが観測される。引き続き負バイアス掃印では Cu<sup>+</sup> Cu<sup>+</sup> Cu<sup>2+</sup> Cu<sup>+</sup> Cu<sup>2+</sup> Cu<sup>+</sup> の順に還元反応が起こり、それに伴う電流ピークが観測される。2回目以降のバイアス掃印では、Cu<sup>+</sup>が Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 膜中に存在するため最初に Cu<sup>+</sup> Cu<sup>2+</sup> の酸化反応に起因した電流ピークが明瞭に観測される。

観測された酸化還元電流から Randles-Sevcik 方程式を用いて、反応によって生成されたイオンの濃度  $c_{ion}$  とその拡散係数  $D$  を見積もった。バイアス掃印の速度の関数としてプロットした  $c_{ion}$  と  $D$  の関係を図3 (b) に示す。遅い掃印速度では実効的な酸化反応時間が長くなるため、生成されるイオンの濃度は高くなる。そのため、イオン間相互作用が強くなり、拡散係数は下がる。一方、掃印速度が速くなると、生成されるイオンの濃度は低くなり、弱くなったイオン間相互作用のために拡散係数は上がる。このような振る舞いは、

母体の Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 膜が濃縮溶液のような環境を提供することを意味しており、吸着水の重要性を示唆している。得られた拡散係数から見積もったイオン移動度は、120nm 厚の膜に対して行った熱拡散の実験から見積もられた値よりも7桁程度高く、酸化物薄厚をナノスケール化することによって高いイオン伝導性が発現されることを示している。

酸化還元電流と Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 膜の膜密度は密接な関係がある。膜密度の現象に伴い酸化還元電流は大きくなり、フォーミング電圧は低くなり。これは、低い膜密度ではポラスな膜により多くの水分が吸着するために、電極界面の酸化還元反応とイオン伝導が促進されると考えられる。

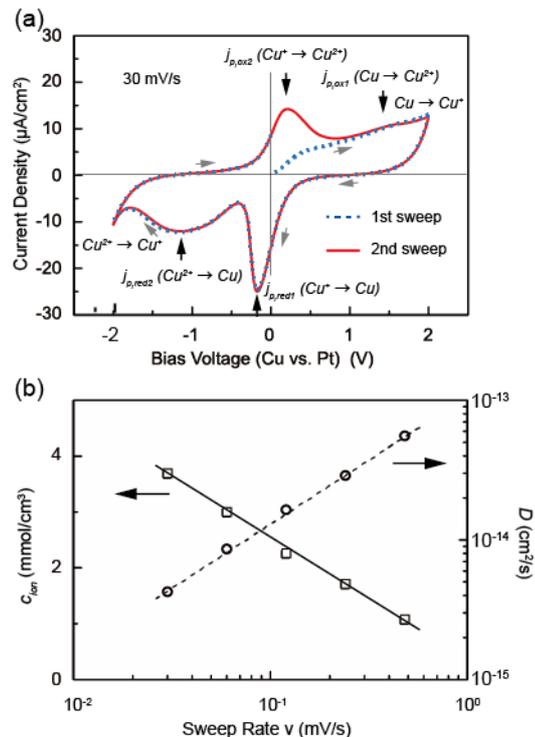


図3 Cu/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Pt 構造の CV 曲線(a)とイオン濃度  $c_{ion}$  と拡散係数  $D$  のバイアス掃印速度依存性(b)

Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 膜の吸湿挙動の影響をより詳しく見るために、制御された湿度下で CV 測定を行った。図4 (a)は相対湿度を5%から85%まで変化させたときの CV 曲線である。低湿度ではイオン電流ピークは小さく、酸化還元反応が抑えられている。湿度の上昇とともにイオン電流は大きくなる。還元電流ピークから見積もったイオン濃度  $c_{ion}$  は湿度の上昇とともに増大する(図4 (b))。これらの結果は、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 膜の吸湿により Cu の酸化還元が促進されることを示唆している。一方、拡散係数  $D$  は湿度の上昇とともに始め減少する。これはイオン濃度の増大に伴うイオン間相互作用のためであると考えられる。しかし、40%以上の湿度では、 $D$  は逆に大きくなる(図4 (c))。高い湿度では吸着水が H<sup>+</sup> と OH<sup>-</sup> に解離するため、プロトン伝導が寄与する可能性がある。

図4 (a)の還元ピークの位置は湿度の上昇とともに正バイアス側にシフトして45%以上ではあまり変わらない。このことは、反応の律速過程が母体酸化膜の吸湿によって変わる可能性を示唆しており、更なる研究が必要である。

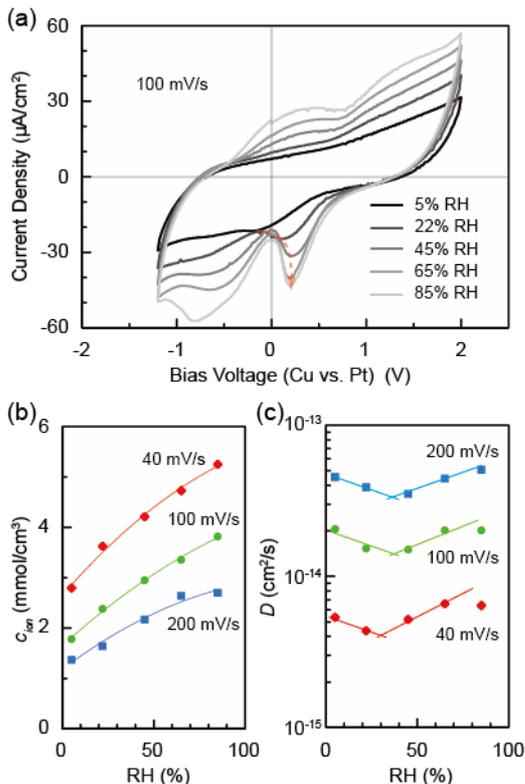


図4 異なる湿度下で測定したCV曲線(a)と湿度の関数として見積もった $c_{ion}$ (b)と $D$ (c)

他の抵抗変化素子には見られない、原子スイッチ特有の動作は量子化コンダクタンスと学習機能である。これらの特徴は研究の初期段階でギャップ型原子スイッチにおいて観測されたが、MIM接合型原子スイッチでも同様の動作が実現できるかは長い間わからなかった。本研究では、 $Ag/Ta_2O_5(8nm)/Pt$ 構造を用いて、この特徴的な振る舞いの観測に成功した。

$Ag/Ta_2O_5/Pt$ 素子も $Cu/Ta_2O_5/Pt$ 素子と同様に、バイアス電圧の掃印下ではバイポーラ型の抵抗スイッチ動作(正バイアスでSET動作, 負バイアスでON状態からOFF状態へのRESET動作)を示す。ただし、 $Ag$ 電極の場合は $Cu$ 電極に比べてSET電圧は0.3V程度と低くなる( $Cu$ 電極の場合は1~1.5V程度)。この素子に、OFF状態で0.1V程度の一定電圧を印加して電流の時間応答を測定すると、電流はステップ状に増加した。その状態から-0.1V程度の負の一定電圧を印加すると、電流は再びステップ状に減少して、最終的に元のOFF状態に戻る。1つのステップ高さはコンダクタンスで見ると、単一原子ポイントコンタクトのコンダクタンス( $=77.5\mu S$ )に相当し、 $Ta_2O_5$ 膜中でポイントコンタクトが形成されていることがわかった。

上記の結果に基づいて、パルス電圧印加でコンダクタンス状態の制御を試みた。図5はその一例を示す。まず、 $Ag$ 電極に正のパルス電圧列(振幅0.3~0.7V, パルス幅20ms)を連続して印加したときの素子コンダクタンスの時間応答である。パルスの振幅や時間幅を調整することによって、素子コンダクタンスをステップ状に変化させることができる。図5(a)では、入力パルスの振幅を徐々に大きくすることで $9G_0$ までコンダクタンスを上げている。次に、その状態から負のパルス電圧列を印加すると、素子コンダクタンスはステップ状に減少し、最終的に元のOFF状態に戻る。この振る舞いは繰り返し観測することができる。

図5(b)はパルス電圧印加後の素子コンダクタンス状態をヒストグラム表示したものである。 $G_0$ の整数倍を中心にした分布になっていることがわかる。すなわち、 $Ta_2O_5$ ナノ薄膜中に原子ポイントコンタクトを有する金属架橋が形成され、その接点の太さは入力電圧の条件によって制御できることを示している。この結果は、MIM構造の素子を原子スイッチと呼ぶ妥当性を実証している。

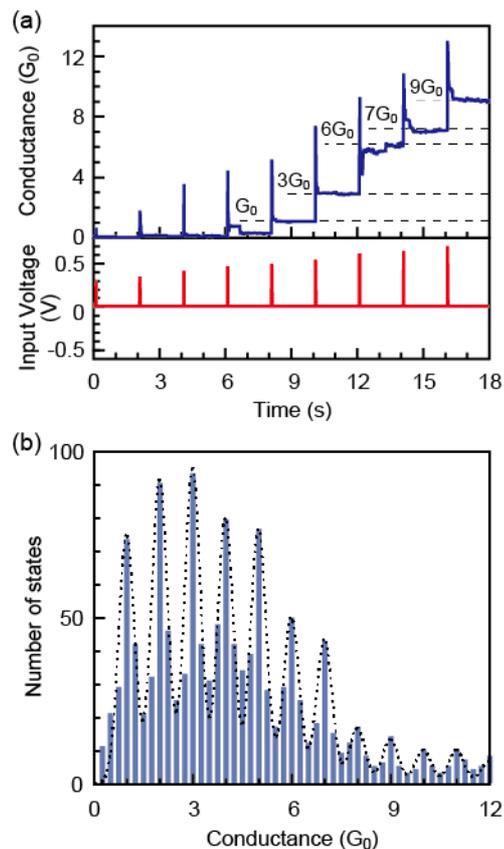


図5  $Ag/Ta_2O_5/Pt$ 素子におけるパルス電圧印加による素子コンダクタンスの変化(a)とコンダクタンス状態のヒストグラム表示(b)

素子のコンダクタンス状態は入力パルスの時間間隔に対して大きく変わることも見いだした。図6(a)は、振幅0.4V, パルス幅20msの電圧パルスを2s間隔で連続して10回印加したときのコンダクタンス応答である。

0.4Vの単一パルスでは素子をSETすることができないため、パルス印加で増大したコンダクタンスは印加後すぐにゼロに戻ってしまう。一方、図6(b)は同じ電圧パルス列を0.2s間隔で入力したときのコンダクタンス応答である。短い時間間隔でパルス列を入力すると、コンダクタンスは一時的な増大を繰り返しながら次第に $G_0$ の整数倍に安定していき、パルス入力後も一定時間その状態を保持する。これは入力頻度に応じて伝達効率を増大させるシナプスの長期増強現象と同様の振る舞いである。パルス入力後のコンダクタンス維持時間は、現状では30sから2分程度であるが、パルス入力条件を最適化すればさらに長くすることが可能である。

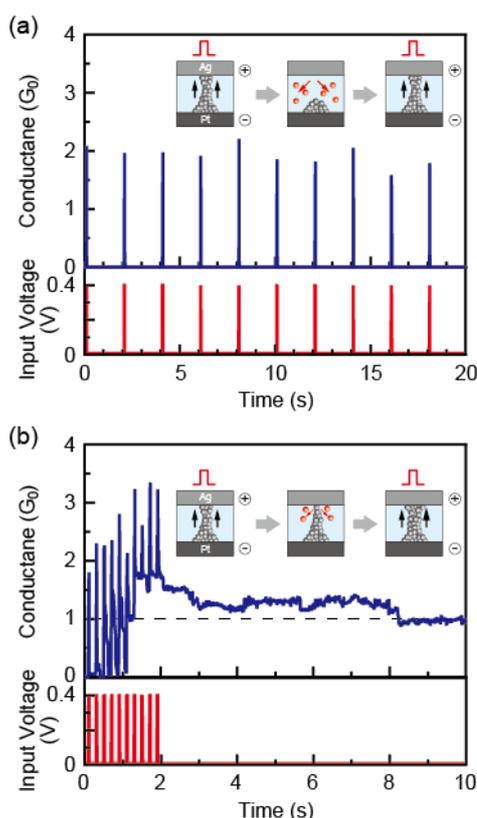


図6 連続パルス入力において観測される長期増強現象。(a)低頻度入力時、(b)高頻度入力時。

このようなシナプスの動作を従来の半導体回路で実現しようとする、10個以上のトランジスタと制御ソフトウェアのプログラミングが必要となる。また、消費電力も膨大なものになってしまう。原子スイッチはこのシナプスの学習機能をプログラミング無しで1個の素子で模倣可能であるため、ニューロモルフィックコンピューティングの構成要素としての応用が期待できる。ただし、動作の安定性は低いため、更なる素子の改良が必要である。

## 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12件)

Identification and roles of nonstoichiometric oxygen in amorphous  $Ta_2O_5$  thin films deposited by electron beam and sputtering processes, C. Mannequin, T. Tsuruoka, T. Hasegawa, M. Aono, Appl. Surf. Sci. 385 (2016) 426 (査読有)

Composition of thin  $Ta_2O_5$  film deposited by different methods and the effect of humidity on their resistive switching behavior, C. Mannequin, T. Tsuruoka, T. Hasegawa, M. Aono, Jpn. J. Appl. Phys. 55 (2016) 06GG08 (査読有)

Humidity effects on the redox reactions and ionic transport in a  $Cu/Ta_2O_5/Pt$  atomic switch structures, T. Tsuruoka, I. Valov, C. Mannequin, T. Hasegawa, R. Waser, M. Aono, Jpn. J. Appl. Phys. 55 (2016) 06GJ09 (査読有)

Redox reactions at  $Cu, Ag/Ta_2O_5$  interfaces and the effects of  $Ta_2O_5$  film density on the forming process in atomic switch structure, T. Tsuruoka, I. Valov, S. Tappertzhofen, J. van den Hurk, T. Hasegawa, R. Waser, M. Aono, Adv. Funct. Mater. 25 (2015) 6347 (査読有)

Nanosecond fast switching processes observed in gapless-type,  $Ta_2O_5$ -based atomic switches, T. Tsuruoka, T. Hasegawa, M. Aono, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1729 (2015) 1 (査読有)

Position detection and observation of a conducting filament hidden under a top electrode in a  $Ta_2O_5$ -based atomic switch, A. Nayak, Q. Wang, Y. Itoh, T. Tsuruoka, T. Hasegawa, L. Boodhoo, H. Mizuta, M. Aono, Nanotechnology 26 (2015) 145702 (査読有)

Synaptic plasticity and memristive behavior operated by atomic switches, T. Tsuruoka, T. Hasegawa, M. Aono, Proc. of 2014 14th International Workshop on CNNA (2014) 1455 (査読無)

Generic relevance of counter charges for cation-based nanoscale resistive switching memories, S. Tappertzhofen, I. Valov, T. Tsuruoka, T. Hasegawa, R. Waser, M. Aono, ACS Nano 7 (2013) 6396 (査読有)

Quantized conductance and neuromorphic behavior of a gapless-type  $Ag-Ta_2O_5$  atomic switch, T. Tsuruoka, T. Hasegawa, K. Terabe, M. Aono, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1562 (2013) 725 (査読有)

Rate-limiting processes in the fast SET operation of a gapless-type  $Cu-Ta_2O_5$

atomic switch, T. Tsuruoka, T. Hasegawa, I. Valov, R. Waser, M. Aono, AIP Adv. 3 (2013) 032114 (査読有)  
Impacts of temperature and moisture on the resistive switching characteristics of a Cu-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-based atomic switch, T. Tsuruoka, T. Hasegawa, K. Terabe, M. Aono, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1430 (2012) 901 (査読有)  
Conductance quantization and synaptic behavior of a Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-based atomic switch, T. Tsuruoka, T. Hasegawa, K. Terabe, M. Aono, Nanotechnology 23 (2012) 435705 (査読有)

[学会発表](計 16 件)

Redox reactions and metal ion transport in Cu(Ag)/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Pt atomic switch structures, T. Tsuruoka, I. Valov, T. Hasegawa, R. Waser, M. Aono, MNC 2015, 2015.11.12, Toyama International Conference Center (Toyama)  
Structural property of amorphous thin Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films deposited by different methods and its impact on their resistive switching characteristics, C. Mannequin, T. Tsuruoka, T. Hasegawa, M. Aono, MNC 2015, 2015.11.11, Toyama International Conference Center (Toyama)  
Impact of film density on the switching characteristics of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-based atomic switches, C. Mannequin, T. Tsuruoka, T. Hasegawa, M. Aono, SSDM 2015, 2015.9.28, Sapporo Convention Center (Hokkaido)  
Operation mechanism and novel functions of gapless-type atomic switches based on metal oxide and polymer thin films, T. Tsuruoka, Trend in Nanotechnology 2015, 2015.9.8, Toulouse (France)  
Effects of the oxide film density on the resistive switching characteristics of atomic switches, C. Mannequin, 鶴岡徹, 長谷川剛, 青野正和, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 2015 年 3 月 14 日, 東海大学 (伊勢原)  
Nanosecond fast switching processes observed in gapless-type Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-based atomic switches, T. Tsuruoka, T. Hasegawa, M. Aono, 2014 MRS Fall Meeting, 2014.12.2, Boston (USA)  
Cu(Ag)/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 界面の酸化還元反応とフォーミングに対する Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 膜密度の影響, 鶴岡徹, I. Valov, 長谷川剛, R. Waser, 青野正和, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 2014 年 9 月 19 日, 北海道大学 (北海道)  
Synaptic plasticity and memristive behavior operated by atomic switches, T.

Tsuruoka, 4th Memristor and Memristive Symposium, 2014.7.29, University of Notre Dame (USA)

酸化ナノ薄膜を用いた原子スイッチ型抵抗変化メモリとその応用, 鶴岡徹, 長谷川剛, シリコンテクノロジー分科会第 173 回研究集会, 2014 年 6 月 19 日, 名古屋大学 (名古屋)

Synaptic plasticity observed in a gapless-type atomic switch using a thin Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> film, T. Tsuruoka, T. Hasegawa, K. Terabe, M. Aono, IUMRS-ICEM2014, 2014.6.13, Nangang Exhibition Hall (Taipei)

Cu-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 原子スイッチにおける SET 動作の律速過程, 鶴岡徹, 長谷川剛, I. Valov, R. Waser, 青野正和, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 2014 年 3 月 19 日, 青山学院大学 (相模原)

Atomic switch: Resistance change memory based on cation transport and redox reactions in oxide thin layers, T. Tsuruoka, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 2014 年 3 月 18 日, 青山学院大学 (相模原)

Controlling the synaptic plasticity of gap- and gapless-type atomic switches, T. Tsuruoka, Discussion Workshop on New Horizons in Electrochemistry, 2013.8.27, Capri (Italy)

Quantized conductance and neuromorphic behavior of a gapless-type Ag-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> atomic switch, T. Tsuruoka, T. Hasegawa, K. Terabe, M. Aono, 2013 MRS Spring Meeting, 2013.4.3, San Francisco (USA)  
Ag/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Pt 構造における量子化コンダクタンスとシナプス的な振る舞い, 鶴岡徹, 長谷川剛, 寺部一弥, 青野正和, 第 73 回応用物理学会秋季学術講演会, 2012 年 9 月 14 日, 松山大学 (松山)

Resistive switching memory based on nanoscale cation transport in oxide films, T. Tsuruoka, Collaborative Conference on Materials Research 2012, 2012.6.25, Seoul (Korea)

[図書](計 1 件)

Atomic switches, K. Terabe, T. Tsuruoka, T. Hasegawa, A. Nayak, T. Ohno, T. Nakayama, M. Aono, Resistive Switching, edited by D. Ielmini and R. Waser (Wiley 2016) p.515-545.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鶴岡 徹 (TSURUOKA TOHRU)  
国立研究開発法人物質・材料研究機構  
国際ナノアーキテクトニクス研究拠点  
主幹研究員  
研究者番号: 20271992