

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H00248

研究課題名（和文）酸素空孔分布のトポロジー制御を機能原理とするヘテロシナプスプラットフォームの創生

研究課題名（英文）Heterosynaptic platform functionalized by topological control of oxygen vacancy distribution in memristive devices

研究代表者

酒井 朗（Sakai, Akira）

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

研究者番号：20314031

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 35,200,000円

研究成果の概要（和文）：高次脳機能を発現するAIハードウェアの実現に向けて、メモリスタ物質中の酸素空孔分布のトポロジー制御を機能原理とし、他のシナプスと多次元で結び付いたヘテロシナプスからなるデバイス・回路基盤の創生を目指した。還元性アモルファス酸化ガリウム及び酸化チタニウム薄膜を対象に、酸素空孔挙動の実験的・理論的解析を展開し、電気伝導・抵抗変化機構を解明した。2端子キャパシタ型・平面型・クロスバー型、4端子平面型・クロスバー型で多様な次元・ジオメトリでの電界印加が可能なメモリスタを開発することで、人工シナプス素子としてのシナプス重みのゲート変調や連合学習などの高次脳機能を模倣するプラットフォームの構築に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はメモリスタ内の酸素空孔分布トポロジーの変調によって、多様な抵抗状態・抵抗遷移を発現させることに独自性があり、酸素空孔の電界下挙動に関して獲得された学術的知見は、材料種によらない共通メカニズムの理解に通じ、不純物イオンを切り口にした創造的な素子設計指針へと展開できる。また、還元性酸化ガリウムメモリスタで600Kまでの高温動作が実証された成果は新たな次元の産業応用へ繋げられる。さらに、新たに開発された4端子クロスバー型メモリスタは、高度の集積化が可能な構造を有していることから、連合学習等の高次脳機能を模倣できる次世代AIハードウェアへ展開でき、その社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：To realize AI hardware that exhibits higher-order brain functions, we aimed to create a device and circuit foundation consisting of heterosynapses interconnected in multiple dimensions, with the functional principle of controlling the topology of oxygen vacancy distributions in memristive materials. Focusing on reduced amorphous gallium oxide and titanium oxide thin films, we conducted experimental and theoretical analyses of oxygen vacancy behavior and elucidated the mechanisms of electrical conduction and resistance change. By developing memristors that can apply electric fields in various dimensions and geometries, such as two-terminal capacitor-type, planar-type, crossbar-type, and four-terminal planar-type and crossbar-type, we succeeded in constructing a platform that mimics higher-order brain functions, such as synaptic weight gate modulation and associative learning, as artificial synaptic elements.

研究分野：半導体物性工学

キーワード：メモリスタ ヘテロシナプス 4端子 ニューラルネットワーク 酸素空孔 高温動作 クロスバー構造
パプロフ型条件付け連合学習

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

ディープラーニングの台頭が人工知能 (AI) の第三次ブームをもたらし、特化型 AI が様々な局面で展開されるようになってきた。ディープラーニングは脳の神経回路網構造を簡易的に模倣した多階層ニューラルネットワーク (DNN) であり、ノード (ニューロン) を結合するシナプスの信号伝達率 (重み) を変化させて実行する機械学習である。DNN のハードウェアは未だノイマン型コンピュータが主流であるが、近年、これを非ノイマン型コンピュータへ転換していく動きが活発である。用いられる半導体チップに共通する構造は、膨大なデータの入出力と小型集積化の実現に不可欠な、入力配線と出力配線を垂直交差させたクロスバーアレイと、クロスポイントに配置されたシナプス素子である。シナプス素子は DNN ハードウェアの重要な働きの大半を占め、現状では 1 シナプス素子あたり 6 個のトランジスタからなる揮発性メモリデバイス (SRAM) が搭載されている。しかし、AI のデータ処理数が増加の一途を辿る中で、シナプス動作に関わる消費電力の爆発的増大と集積化の制限が懸念されている。これを克服する解として、シナプス素子を単体のメモリスタに置き換える技術がある。一般にメモリスタは 2 つの電極端子に挟まれた金属酸化物等の単純な材料・構造で構成され、電圧の印加条件によってその電気抵抗が不揮発に変化する。シナプス機能として不可欠な可塑性 (信号の入力状態に依存して出力信号が変化する特性) を有し、かつ飛躍的な高速化や低消費電力化等が期待されている。一方、既存のクロスバーアレイ構造のメモリスタシナプス素子が、一入力一出力の情報処理しか成し得ない点は、非ノイマン型の脳型コンピュータを高度化するうえで最大のボトルネックとなる。そもそも、生体系のシナプスは一入力のみで出力状態を決定するのではなく、「ヘテロシナプス可塑性」として、自らもしくは他のシナプスの影響を受けて伝達パラメータを自己調節し、情報回帰・統合や連合学習等の機能を発揮している。つまり、将来的に、生体系が本来有する脳の高次機能を模倣する AI チップを実現するには、現状の 2 端子を基本とするクロスバーアレイでは限界があり、他のシナプスと多次元で結びついた新たなアーキテクチャが必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、多入力・多出力が可能なヘテロシナプス素子を基幹とする多端子メモリスタを創生することである。メモリスタ物質のドーパントイオンとして機能する酸素空孔に照準を定め、その挙動に対する実験・理論解析およびシミュレーションに基づいてトポロジーの制御指針を獲得し、多端子クロスバーアレイメモリスタへの多様な次元・ジオメトリでの電界印加によって、高・低抵抗相の微視的形態を 3 次元的に精密にデザインする。それによって、多値・多様な不揮発抵抗状態を発現させ、生体系シナプスの高次機能であるニューロモジュレーション機能を模倣する多元シナプス素子・回路基盤「ヘテロシナプスプラットフォーム」を構築し、近未来脳型コンピュータのハードウェア基盤としての機能を実証する。

3. 研究の方法

(1) 2 端子キャパシタ型 a-GaO_x メモリスタの作製と人工シナプス素子特性の評価

YAG レーザーの第 4 次高調波 (波長 266 nm) 及び Ga₂O₃ ターゲットを擁するパルスレーザー蒸着装置を用い、レーザーフルエンス、基板温度、成長雰囲気、雰囲気分圧、蒸着時間等のパラメータを変化させて酸素空孔濃度を調節し、アモルファス構造を有する還元性酸化ガリウム薄膜 (a-GaO_x) を生成した。同薄膜から Pt 及び ITO 電極で挟んだキャパシタ型メモリスタ素子を作製し、人工シナプス素子としての特性を評価した。

(2) 2 端子キャパシタ型 a-GaO_x メモリスタの温度依存動作特性の評価

a-GaO_x メモリスタの抵抗変化特性ならびにキャリア伝導機構の探索にあたり、室温から最高温度 600K までの範囲で電流-電圧ヒステリシスカーブ等に表れる動作特性を評価した。

(3) 2 端子クロスバーアレイ型 a-GaO_x メモリスタの作製と評価

電子線リソグラフィを用いて酸化膜付き Si 基板上に微細パターンを描画し、ITO 及び Pt 電極材料、a-GaO_x の蒸着・リフトオフプロセスを繰り返すことで、クロスバーアレイ型 a-GaO_x メモリスタを作製した。また、同素子の抵抗変化特性を評価した。

(4) 4 端子平面型 a-GaO_x メモリスタの作製・評価・高次シナプス機能実装

高次シナプス機能の実現には 4 端子構造が不可欠である。作製プロセスが単純な平面型構造を採用し、種々の条件で成膜した a-GaO_x を用いてメモリスタを作製し、その抵抗変化特性を評価した。また、人工シナプス素子としての高次脳機能を実現するために、シナプス重みの増強・減弱特性を素子のコンダクタンスに見立て、そのゲート変調効果を検証した。

(5) 酸素空孔分布トポロジー変化の理論・シミュレーション解析

メモリスタの抵抗変化メカニズムに関して、これまではキャリア及びドーパントイオン (酸素空孔) 分布の 1 次元モデルが提唱されているものの、2 次元モデルは未達である。ここでは有限要素法を用いた酸素空孔のドリフト・拡散のモデルシミュレーションにより、素子内の酸素空孔

密度分布及びその変遷挙動を解析した。また、第一原理計算を用い、Nudged Elastic Band (NEB) 法で原子移動の最小エネルギー経路を探索し、酸素空孔の拡散機構を精密評価した。

(6) 4端子平面型 TiO_{2-x} メモリスタによるパブロッフ型条件付け連合学習の次元拡張

ヘテロシナプスで発現する高次脳機能であるパブロッフ型条件付け連合学習を従来のメモリスタで行う場合、その信号処理は1ビットに限られていた。AIを取り巻く環境では、多次元・多ビット信号の情報処理は必須であり、これを実現するために、高集積化を可能にする4端子平面型還元酸化チタニウム (TiO_{2-x}) メモリスタの微細素子を開発し、多ビットデータの連合学習処理機能を検証した。

(7) 4端子クロスバー型 $\alpha\text{-GaO}_x$ メモリスタのプロセス構築・作製・評価

$\alpha\text{-GaO}_x$ からなる単位メモリスタあたりに4つの端子を有するクロスバー構造を作製するために、電子線リソグラフィによるパターン描画と薄膜蒸着及びリフトオフの反復工程からなる作製プロセスを構築した。作製された素子に対して走査電子顕微鏡 (SEM) 及び透過電子顕微鏡 (TEM) による構造評価を行い、微細人工シナプス素子としての抵抗変化特性及びシナプス特性を計測した。

4. 研究成果

(1) 2端子キャパシタ型 $\alpha\text{-GaO}_x$ メモリスタの作製と人工シナプス素子特性の評価

Ar ガス分圧下で成膜した $\alpha\text{-GaO}_x$ メモリスタにおいては、電圧掃引を繰り返しても安定した抵抗変化特性が得られ、酸素ガス分圧下で成膜した場合と比べて、大きな抵抗比が得られた。図1(a)は同素子の電流-電圧ヒステリシスカーブである。電圧0.1Vにおける抵抗比は9倍近くの高い値を示している。また、パルス電圧印加による素子のコンダクタンス変調を検証した。図1(b)及び(c)は非対称および対称のスパイクタイミング依存可塑性 (STDP) 特性である。これより、 $\alpha\text{-GaO}_x$ がメモリスタ材料として、人工シナプス機能の実現に有効であることが明らかになった。

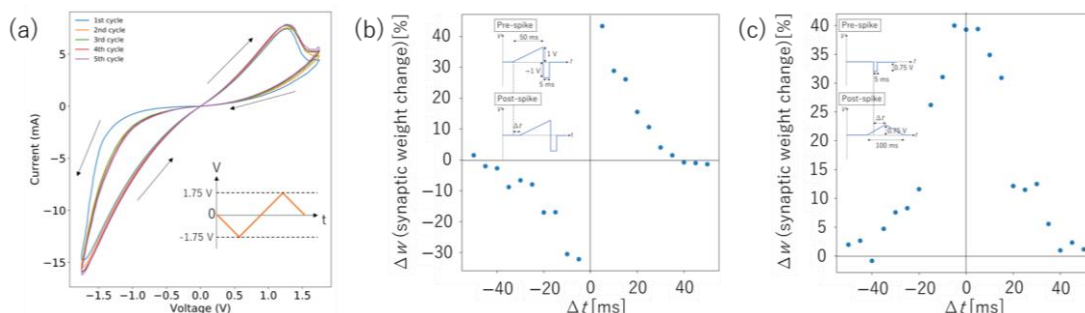


図1 2端子キャパシタ型 $\alpha\text{-GaO}_x$ メモリスタの(a)電流-電圧ヒステリシス特性、(b)非対称及び(c)対称 STDP 特性

(2) 2端子キャパシタ型 $\alpha\text{-GaO}_x$ メモリスタの温度依存動作特性の評価

2端子キャパシタ型 $\alpha\text{-GaO}_x$ メモリスタの動作温度に依存する特性を調査した。成膜時の Ar 分圧を 0.5~1.5Pa の範囲で変化させた $\alpha\text{-GaO}_x$ を準備し、300~600K の温度範囲で抵抗変化特性を測定した結果、すべての成膜・温度条件で電流-電圧ヒステリシス特性が確認された。図2は Ar 分圧 1.0Pa で作製した $\alpha\text{-GaO}_x$ メモリスタの結果である。抵抗率の温度依存性から高・低抵抗状態ともに半導体的電気伝導を示し (図2(b))、高抵抗状態では温度に依存せずに、低電圧側でオーミック特性、高電圧側で空間電荷制限電流特性が観測され (図2(c))、電子捕獲がキャリア伝導に影響することが示唆された。特に 600K で観測されるヒステリシスは、不揮発的な抵抗変化が同温度でも発現することを意味しており、抵抗変化素子としての熱耐性が実証されたといえる。この結果は、今後高温動作が可能なメモリスタ素子の開発へと繋がり、意義深い。

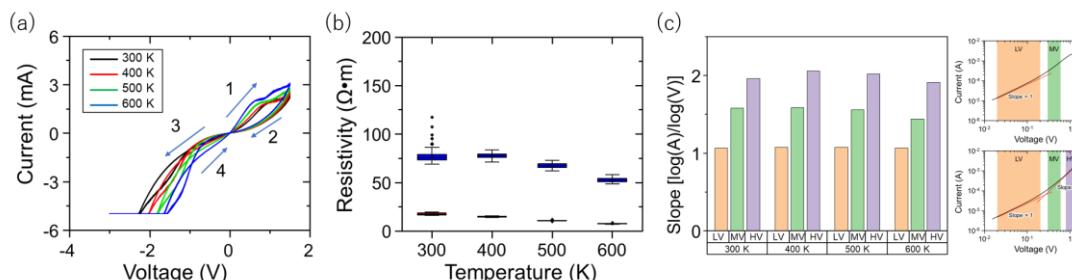


図2 Ar 分圧 1.0Pa で作製した $\alpha\text{-GaO}_x$ メモリスタの各温度における(a)電流-電圧ヒステリシスカーブ、(b)各抵抗状態での $\alpha\text{-GaO}_x$ の抵抗率、(c)各電圧での電流-電圧カーブの傾き値

(3) 2端子クロスバーアレイ型 $\alpha\text{-GaO}_x$ メモリスタの作製と評価

酸素ガス分圧下で成膜した $\alpha\text{-GaO}_x$ を用いて、最小線幅 3 μm の 5 \times 5 クロスバー型メモリスタ

を作製した (図 3(a))。正側もしくは負側のみの連続した電圧掃引測定では、安定して高抵抗化もしくは低抵抗化が起こり、その特徴から a-GaO_x 中の酸素空孔のドリフトによる分布変化が起因していることが示唆された。また、図 3(b)及び(c)に示すように、パルス電圧印加によるコンダクタンス変調及び STDP 特性の実装にも成功し、2 端子クロスバーアレイ型 a-GaO_x メモリスタによる人工シナプス素子の実現可能性を実証した。

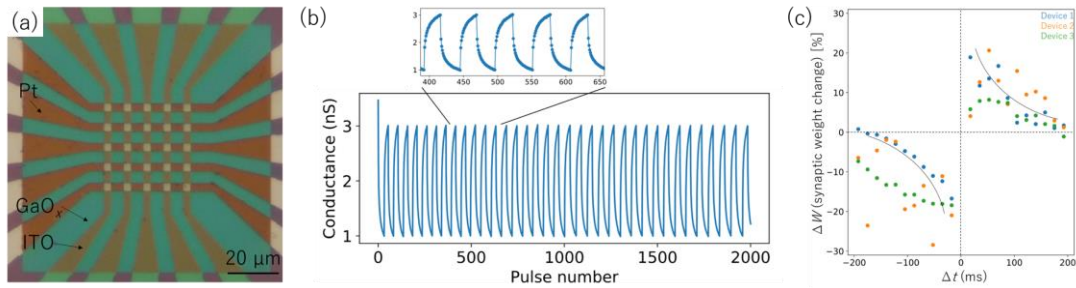


図 3 2 端子クロスバーアレイ型 a-GaO_x メモリスタの(a)光学顕微鏡像、(b)コンダクタンス変調特性、(c)非対称 STDP 特性

(4) 4 端子平面型 a-GaO_x メモリスタの作製・評価・高次シナプス機能実装

Ar 分圧下で成膜した a-GaO_x の 4 端子平面型メモリスタを作製し、対向電極間のコンダクタンス値 (G_{1-3}) が、もう一組の対向電極への印加電圧 (V_{2-4}) によって変化する様子を調べた。図 4(a)のように、正 (負) の V_{2-4} 印加に伴い G_{1-3} が増加 (減少) して高 (低) コンダクタンス状態となる不揮発変化 (ループ特性と称する) が確認された。これによって、4 端子による酸素空孔分布のトポロジーを不揮発に制御できることが実証された。また、この機能を利用して、図 4(b)に示すように、 V_{2-4} をゲート電圧として G_{1-3} の変化率をゲート変調し、興奮性主ニューロンと抑制性介在ニューロンの機能を模倣させた。その結果、シナプス重みの増強/減弱に対応する入出力端子間のコンダクタンスを多段階で変化させることができ (図 4(c))、これによって生体系シナプスの高次機能である homeostatic なシナプス可塑性の実現が可能となった。

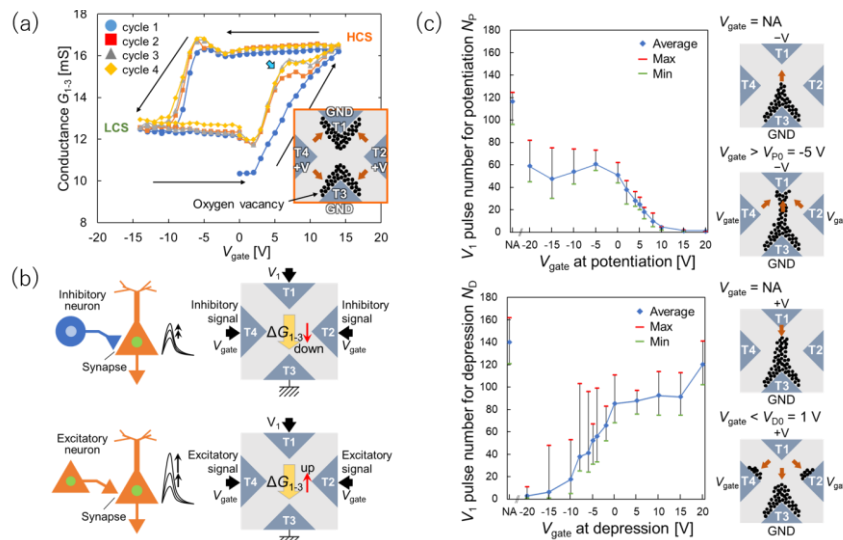


図 4 4 端子平面型 a-GaO_x メモリスタの(a)コンダクタンスループ特性、(b)抑制性介在ニューロンと興奮性主ニューロンの機能模倣原理、(c)シナプス増強 (上) / 減弱 (下) 時に必要なパルス電圧印加数とゲート電圧の関係ならびに予想される酸素空孔分布の模式図

(5) 酸素空孔分布トポロジー変化の理論・シミュレーション解析

酸素空孔挙動の解明にあたり、2 次元有限要素法シミュレーションモデルを構築し、キャリアのドリフト・拡散を考慮した定常状態でのキャリア連続の式及びポアソン方程式をニュートン法で、酸素空孔のドリフト・拡散を考慮した連続の式をクーラン条件下で再帰的に解くことによって、電圧印加による酸素空孔密度の分布変化を評価した。図 5(a)は平面型メモリスタ素子に電圧を印加した場合の酸素空孔密度及び対応する電流密度の分布を表しており、実験的に観察された素子の酸素空孔分布及びコンダクタンス値と良い一致を示した。また、TiO_{2-x} メモリスタ結晶内での酸素空孔の凝集によって発生し抵抗変化特性に強く影響する剪断面とその近傍の酸素空孔の拡散機構を、密度汎関数理論に基づく第一原理計算の NEB 法によって解析した。剪断面構造を含んだスーパーセルモデルを構築し、剪断面の種類に依存する酸素空孔の拡散エネルギー障壁を計算した結果、図 5(b)のように、(121)剪断面では(132)剪断面よりも拡散エネルギー障壁が高い経路の存在が判明し、こうした拡散機構の違いが酸素空孔分布のトポロジー形成機構に深く関連していることが示された。

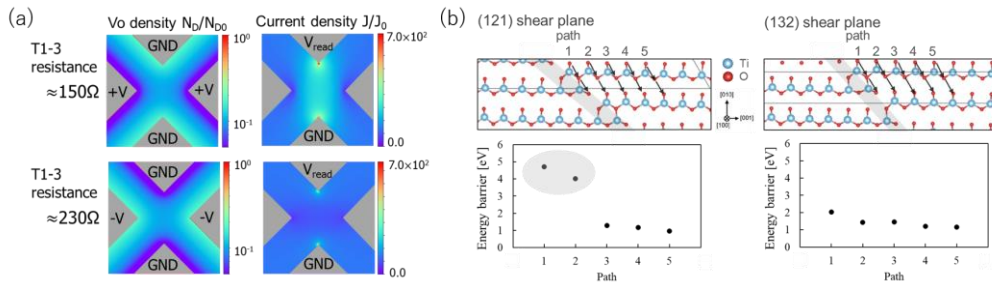


図 5 (a)平面型メモリスタに電圧印加した場合の酸素空孔密度分布及び対応する電流密度分布のシミュレーション結果 (b)第一原理計算に基づき NEB 法で解析した(121)剪断面及び(132)剪断面近傍の酸素空孔拡散エネルギー障壁の計算結果

(6) 4 端子平面型 TiO_{2-x} メモリスタによるパブロフ型条件付け連合学習の次元拡張

フォトリソグラフィによるパターン描画と Pt 電極のリフトオフプロセスを用いて、4 端子平面型 TiO_{2-x} メモリスタ微細素子を作製した (図 6(a))。パブロフ型条件付け連合学習のアルゴリズムに従って、25 個の微細素子群へ条件刺激と無条件刺激に対応する 25 ビットの白・黒データをそれぞれ正・負電圧入力信号に設定し、1 素子あたり 1 ビット入力で各素子のコンダクタンス変化を計測した。ここでは無条件刺激として二次元データ文字「R」の 25 ビット白・黒データをそれぞれ各素子の低・高コンダクタンスに対応させて初期状態とし、条件刺激として文字「S」の電圧信号入力の 10 回に 1 回の割合で無条件刺激「R」の電圧信号を同時に入力して条件付けを行った。図 6(b)は、その際の各素子におけるコンダクタンス値の変化である。また、これを反映して素子内の酸素空孔分布が変化していることも、電気着色現象の観察によって確認された。図 6(c)は 25 個の素子の初期状態と 5 回目の条件付け後のコンダクタンス値をグレイスケールで表した結果である。当初の「R」が「S」に変換されており、メモリスタ素子によるパブロフ型条件付け連合学習において取り扱うデータの次元を拡張することに成功した。

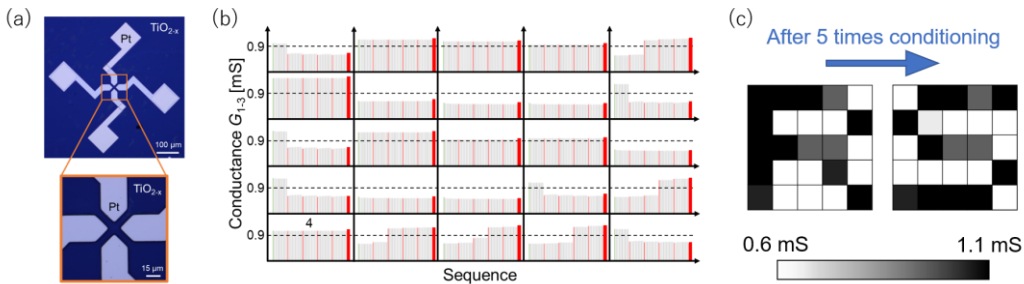


図 6 (a)電極間距離 15μm の 4 端子平面型 TiO_{2-x} メモリスタの光学顕微鏡像 (b)無条件刺激「R」と条件刺激「S」の電圧信号で条件付けた際の、25 素子の(b)コンダクタンス変化、(c) 5 回の条件付けを経て「R」から「S」に変化したコンダクタンスのグレイスケール表示

(7) 4 端子クロスバー型 $\alpha\text{-GaO}_x$ メモリスタのプロセス構築・作製・評価

図 7(a)に作製した 4 端子クロスバー型 $\alpha\text{-GaO}_x$ メモリスタの平面 SEM 像 (同図上) ならびに断面 TEM 像 (同図下) を示す。クロスポイントの $\alpha\text{-GaO}_x$ を囲む下部電極、2つのゲート電極、上部電極の 4 つの電極端子が立体的に交差する構造がゲート電極細線間隔 1μm で作製できていることが分かる。図 7(b)は同素子の上下電極間コンダクタンス G_{1-3} のループ特性である。ゲート電圧 (V_{24}) 制御によって $\alpha\text{-GaO}_x$ 層中の酸素空孔分布のトポロジー変化が誘発され、 G_{1-3} が不揮発に変化している。図 7(c)は人工シナプス素子として、 G_{1-3} をシナプス重みに見たて、その増強・減弱特性のゲート電圧依存性を測定した結果である。これより、シナプス重みのゲート変調効果が実証され、本微細 4 端子クロスバー型 $\alpha\text{-GaO}_x$ メモリスタが、高次脳機能を模倣する人工ニューラルネットワーク素子のプラットフォームとして有望であることが実証された。

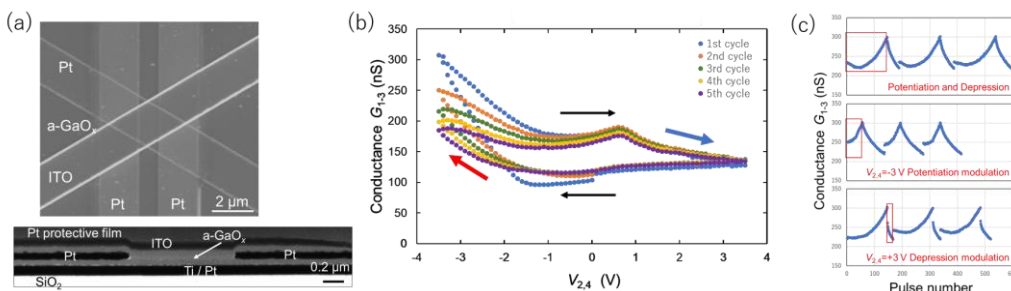


図 7 4 端子クロスバー型 $\alpha\text{-GaO}_x$ メモリスタの(a)平面 SEM 像及び断面 TEM 像、(b)ループ特性、(c)人工シナプス素子としてのシナプス重み増強・減弱特性のゲート電圧依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6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 Miyake Ryotaro, Nagata Zenya, Adachi Kenta, Hayashi Yusuke, Tohei Tetsuya, Sakai Akira	4. 巻 4
2. 論文標題 Versatile Functionality of Four-Terminal TiO ₂ -x Memristive Devices as Artificial Synapses for Neuromorphic Computing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Applied Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 2326 ~ 2336
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.2c00161	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 Ikeuchi Taishi, Hayashi Yusuke, Tohei Tetsuya, Sakai Akira	4. 巻 16
2. 論文標題 Gate-tunable plasticity in artificial synaptic devices based on four-terminal amorphous gallium oxide memristors	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 015509 ~ 015509
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/acb0ae	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 Masaoka Naoki, Hayashi Yusuke, Tohei Tetsuya, Sakai Akira	4. 巻 62
2. 論文標題 Interface engineering of amorphous gallium oxide crossbar array memristors for neuromorphic computing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SC1035 ~ SC1035
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acb060	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 Sato Kento, Hayashi Yusuke, Masaoka Naoki, Tohei Tetsuya, Sakai Akira	4. 巻 13
2. 論文標題 High-temperature operation of gallium oxide memristors up to 600K	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1261-1 ~ 1261-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-023-28075-4	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 Joko Mamoru, Hayashi Yusuke, Tohei Tetsuya, Sakai Akira	4. 巻 59
2. 論文標題 Fabrication of GaOx based crossbar array memristive devices and their resistive switching properties	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SMCC03 ~ SMCC03
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab8be6	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 酒井 朗	4. 巻 107
2. 論文標題 生体神経機能を模倣する人工シナプスメモリスタ素子	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 電子情報通信学会誌	6. 最初と最後の頁 311 ~ 318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Masaki Ninomiya, Yusuke Hayashi, Akira Sakai, Tetsuya Tohei
2. 発表標題 First-Principles Analysis of Oxygen Vacancy Behavior in Rutile TiO2 under External Electric Fields
3. 学会等名 9th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoki Masaoka, Yusuke Hayashi, Tetsuya Tohei, Akira Sakai
2. 発表標題 Amorphous GaOx Crossbar Array Memristors for Artificial Synaptic Devices
3. 学会等名 2022 International Conference on Solid-State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 二宮雅輝、藤平哲也、林侑介、酒井朗
2. 発表標題 第一原理計算によるルチル型TiO ₂ 中の剪断面構造及び酸素空孔挙動の解析
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 二宮雅輝、藤平哲也、林侑介、酒井朗
2. 発表標題 ルチル型TiO ₂ 中の剪断面構造及び酸素空孔挙動に関する第一原理計算
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Taishi Ikeuchi, Yusuke Hayashi, Tetsuya Tohei, Akira Sakai
2. 発表標題 Heterosynaptic Property Demonstrated with Planer Four-Terminal Amorphous GaO _x Memristive Devices
3. 学会等名 2021 International Conference on Solid-State Devices and Materials（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 二宮雅輝、藤平哲也、林侑介、酒井朗
2. 発表標題 第一原理計算手法に基づく外部電場下におけるルチル型TiO ₂ 中の酸素空孔挙動の解析
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 K. Adachi, Y. Hayashi, T. Tohei, A. Sakai
2. 発表標題 Habituation and sensitization properties mimicked in four-terminal TiO ₂ -x memristive devices
3. 学会等名 4th International Conference on Memristive Materials, Devices & Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Miyake, K. Adachi, Y. Hayashi, T. Tetsuya, A. Sakai
2. 発表標題 Pavlovian conditioning implemented in four-terminal TiO ₂ -x memristive devices
3. 学会等名 4th International Conference on Memristive Materials, Devices & Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kentou Sato, Yusuke Hayashi, Tetsuya Tohei, Akira Sakai
2. 発表標題 Temperature-Dependent Resistive Switching Properties of GaO _x Memristors up to 600 K
3. 学会等名 2021 International Workshop on DIELECTRIC THIN FILMS FOR FUTURE ELECTRON DEVICES Science and Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 酒井朗, 藤平哲也, 林侑介
2. 発表標題 酸素空孔分布制御型メモリスタを用いた多機能人工シナプス
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤健人, 林侑介, 藤平哲也, 酒井朗
2. 発表標題 GaOxメモリスタの抵抗スイッチング特性評価
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷口奈穂, 林侑介, 藤平哲也, 酒井朗
2. 発表標題 平面型TiO ₂ -xメモリスタ素子における抵抗変化領域のその場TEM観察
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 正岡直樹, 林侑介, 藤平哲也, 酒井朗
2. 発表標題 アモルファスGaOxを用いたクロスバーアレイメモリスタの抵抗変化特性
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上甲守治, 池内太志, 林 侑介, 藤平哲也, 酒井 朗
2. 発表標題 アモルファス酸化ガリウムを用いたメモリスタの抵抗変化特性およびシナプス特性
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安達健太、三宅亮太郎、林 侑介、藤平哲也、酒井 朗
2. 発表標題 4端子平面型 TiO ₂ -xメモリスタ素子における酸素空孔分布2次元制御に基づくSTP・LTP特性の実装
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池内太志、林 侑介、藤平哲也、酒井 朗
2. 発表標題 4端子平面型アモルファスGaOxメモリスタ素子の開発と抵抗変化特性評価
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 安達健太、林 侑介、藤平哲也、酒井 朗
2. 発表標題 4端子平面型TiO ₂ -xメモリスタ素子におけるゲート制御に基づくシナプス特性の変調
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

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 メモリスタ、それを備えた半導体素子およびメモリスタを備えたアレイシステム	発明者 林 侑介、藤平哲也、 酒井 朗	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-214807	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

ホームページ
 ・生体の脳・神経系により近い人工シナプス素子を開発 4端子メモリスタ素子が高度な脳・神経機能を実現 ResOU 掲載日2022/04/28 https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2022/20220428_1
 ・阪大、脳の機能を模倣した「人工シナプス素子」を4端子メモリスタで実現 マイナビニュース 掲載日2022/05/06 <https://news.mynavi.jp/techplus/article/20220506-2339313/>
 ・阪大がメモリスター人工シナプス素子を開発、脳・神経系に近づく MIT Technology Review Japan 掲載日2022/05/10 <https://www.technologyreview.jp/n/2022/05/10/275527/>
 ・300 超の高温に耐えうる抵抗変化型メモリ素子をアモルファス酸化ガリウムで実現！ ResOU 掲載日2023/01/30 https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2023/20230130_1
 ・アモルファス酸化ガリウムを利用 300 以上で動作する抵抗変化型メモリ素子を開発 EE Times Japan 掲載日2023/02/09 <https://eetimes.itmedia.co.jp/ee/articles/2302/09/news040.html>
 ・大阪大学がセ氏300度超で動く抵抗変化型メモリー素子、アモルファス酸化ガリウムで日経クロステック 掲載日2023/02/22 <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/02122/00238/>
 ・阪大、セ氏300度超で動くメモリスター 極限環境向け NIKKEI Tech Foresight 掲載日2023/02/22 <https://www.nikkei.com/prime/tech-foresight/article/DGXZQ0UC210GE0R20C23A2000000>

報道情報
 「サイエンス」AIにも革新 日本経済新聞 2023年3月26日付朝刊

雑誌
 脳のしくみを真似た人工シナプスが実現 『子供の科学』2022年8月号

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
研究協力者	藤平 哲也 (Tohei Tetsuya)		
研究協力者	林 侑介 (Hayashi Yusuke)		

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