

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04476

研究課題名（和文）抵抗変化メモリの超高感度センサー応用 -金属酸化物における新規励起過程の探索-

研究課題名（英文）Application of resistance change memory to ultrasensitive sensors -Exploration of new excitation processes in metal oxides-

研究代表者

木下 健太郎 (Kinoshita, Kentaro)

東京理科大学・理学部第一部応用物理学科・教授

研究者番号：60418118

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：電気、光の両刺激で導電性の変調が確認されるSnドーピングIn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>（ITO）/NbドーピングSrTiO<sub>3</sub>（Nb:STO）接合に注目し、光応答特性の電氣的制御を試みた。作製したITO/Nb:STO接合は電圧誘起の抵抗変化と、紫外光照射による光誘起電流の発生が共に確認された。接合に電圧を印加しながら光誘起電流増加/減衰の緩和特性を評価した結果、 $\pm 0.5$  Vの電圧範囲で2桁に亘り光誘起電流の緩和時間を制御できることが明らかになった。接合の物理リザーバー性能を評価するため、手書き数字の画像分類タスクを行った結果、入力信号の時間スケールに合わせて、適切な電圧を選択することで、学習が最適化されることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物理リザーバー計算（RC）は時系列信号の低電力かつ高速リアルタイム処理に適し、エッジ領域での学習適用性が高いため注目されている。RCのコアであるリザーバーを物理系のダイナミクスに置き換えることでリザーバーの物理実装が可能となり、計算コストと時間の削減が期待される。本研究はITO/Nb:STO接合におけるUV照射による光電流の緩和時間を、 $\pm 0.5$  V以内の微小電圧の印加により数桁にわたって変調できることを明らかにした。これにより様々な時間スケールの時系列信号を、単一のデバイスにより処理できることから、社会的意義は大きい。その機構は永続光伝導等、欠陥物理との関連性が考えられ、学術的にも大変興味深い。

研究成果の概要（英文）：Focusing on Sn-doped In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ITO)/Nb-doped SrTiO<sub>3</sub> (Nb:STO) junctions, whose electrical conductivity is modulated by both electrical and optical stimulation, we attempted to electrically control the photoresponse characteristics. In the fabricated ITO/Nb:STO junctions, both voltage-induced resistance change and photo-induced current generation due to UV light irradiation were confirmed. As a result of evaluating the relaxation characteristics of the increase/decrease of the photo-induced current while applying a bias voltage to the junction, it was found that the relaxation time of the photo-induced current can be controlled over two orders of magnitude in the voltage range of  $\pm 0.5$  V. To evaluate the junction's physical reservoir performance, we performed an image classification task of handwritten digits, and found that learning was optimized by selecting an appropriate voltage according to the time scale of the input signal.

研究分野：デバイス物理

キーワード：欠陥 抵抗変化メモリ 学習デバイス 物理リザーバー 金属酸化物

## 1. 研究開始当初の背景

近年、AI (Artificial Intelligence) 技術の発展や IoT (Internet of Things) の普及、ビッグデータの活用などの情報通信技術の発展に伴い、デジタルデータの総量は急拡大を続けている。このような加速度的に増大するデータを処理し、記憶するために必要となるのがメモリデバイスである。また、AI 技術の発展や IoT の拡大はデータ処理の方式にも変化を要求する。従来のように大量のデータをクラウドに送り、クラウド側でデータを処理する方式は、データ量増大に伴う消費電力の増大に加え、情報漏えいの危険性やデータ通信の遅延が課題となっている。そこで近年、安全性や処理速度の観点から、ユーザーやデータソースに物理的に近い場所で動作するエッジコンピューティングが注目されている[1]。エッジコンピューティングはデータの即時処理が可能であることから、自動車の自動運転システムや工場での機械異常予測などへの応用が期待されている。

任意のエッジでデータ処理を可能とするためには、高い学習性能を維持したまま計算コストを削減する方法が求められる。その候補の一つが、時系列信号の処理に適した計算フレームワークであるリザバーコンピューティング (RC) である。RC は時系列信号をリザバーと呼ばれる非線形素子を通して高次元の時空間パターンに変換することで、複雑なアルゴリズムを用いずとも、パターン解析等のタスクを読み出し時のみの学習で実行可能とする手法である[2,3]。物理リザバーコンピューティング (PRC) は、現実の物理システムの物理的なダイナミクスをリザバーとして利用するため、低消費電力とシンプルなデバイス構造の実現が期待される[4]。そのため、近年、エッジコンピューティングを担う電子 AI デバイスを具現化するための技術として注目を集めている。PRC はこれまで、揮発性メモリスタ[5-8]、磁気トンネル接合[9]、光応答[10]、ソフトマテリアル[11]、イオン液体界面の誘電緩和[12]、イオン液体中の金属イオンの酸化還元反応[13]など、様々な物理系で実験あるいは計算により実証されている。しかし、これらの PRC は選択した物理システムに固有の過渡特性により、処理可能な信号のタイムスケールが限定されているのが現状である。PRC の学習性能を最適化するためには、入力信号のタイムスケールに適切に対応した過渡特性が求められる。したがって、エッジでの広範囲な応用を想定した場合、過渡特性を任意に調整可能な PRC デバイスが必要となる。

本研究では、Sn ドープ  $\text{In}_2\text{O}_3$  (ITO) /Nb ドープ  $\text{SrTiO}_3$  (Nb:STO) 接合の光信号による PRC への適用性の高さを実証した。同接合は既に  $3 \times 3$  のセルを用いた画像記憶が実証されており[14]、視覚器で捉えた画像の記憶、学習といった、生体機能を模倣した応用への展開も興味深い[15]。基板に用いたチタン酸ストロンチウム (STO) はバンド絶縁体 (バンドギャップ: 3.27 eV) であり、様々な興味深い特性を示すことから、基礎研究・応用の両観点から注目されている[16-21]。永続光伝導 (PPC: persistent photoconductivity) はその一つであり、高温アニールなど特殊な処理を施した STO に対して、室温でサブバンドギャップ光 (2.9 eV 以上) を照射すると、抵抗値が数桁も減少し、光照射後も数日間にわたって持続することが確認されている[19,20]。また、STO に Nb をドーピングした Nb:STO は、Nb 濃度の増加とともに絶縁体から n 型半導体、さらには金属半導体に変化することが知られている[22,23]。また、近年、Nb:STO は、抵抗変化メモリ (ReRAM) 用途に必要な電流-電圧 (I-V) 特性に大きなヒステリシスを示すことから、微細化限界に直面したフラッシュメモリを引き継ぐ次世代メモリとしての重責を担うべく、研究開発が進められている[24-29]。

## 2. 研究の目的

次世代の AI 活用を担うエッジデバイスの開発に向け、光刺激と電気刺激の両方で導電性に変化が生じる Nb:STO に注目し、デバイスの光応答特性を電氣的に制御することを目指した。

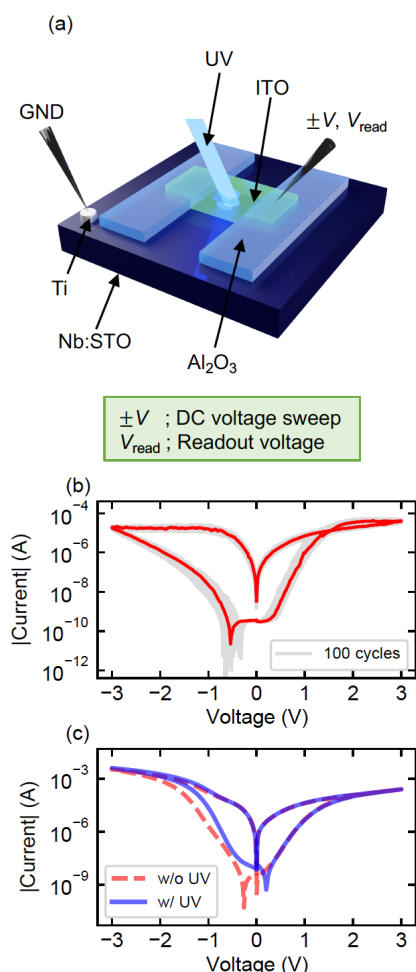


Fig. 1 (a) クロスポイント構造 ITO/Nb:STO 接合の概略図。 (b) 連続で取得した 100 サイクルの I-V 特性 (灰色) 及び典型的な I-V 特性 (赤)。 (c) UV 照射なし (点線), あり (実線) での I-V 特性。

### 3. 研究の方法

結晶基板を用いた．サイズは  $10 \times 10 \times 0.5 \text{ mm}^3$  で片面が鏡面研磨されており，Nb ドーピング量は  $0.5 \text{ wt\%}$  である．先ず，クロスポイント構造を実現するため，絶縁膜として厚さ  $150 \text{ nm}$  の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を基板の研磨面に DC マグネトロンスパッタリング ( $300 \text{ W}$ ) でストライプ状に成膜した． $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜を成膜するために Al ターゲットを用い，Ar/ $\text{O}_2$  ガス  $0.5 \text{ Pa}$  (Ar :  $\text{O}_2 = 3 : 1$ ) にて反応性スパッタリングを行った．続いて，厚さ  $200 \text{ nm}$  の長方形状の上部電極 ITO を RF マグネトロンスパッタリング ( $60 \text{ W}$ , Ar  $2.0 \text{ Pa}$ ) でストライプに直交するよう成膜した．ITO/Nb:STO 接合の素子面積は  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$  である．最後に，電気測定の際にオーミックコンタクトを確保するため Ti を厚さ  $100 \text{ nm}$ ，続いて Ti の酸化防止のため厚さ  $100 \text{ nm}$  の Pt をそれぞれ RF マグネトロンスパッタリング ( $100 \text{ W}$ , Ar  $2.0 \text{ Pa}$ ) で成膜した．薄膜は全て室温で成長させた．全ての電気測定の評価にはソースメジャーユニット (Keysight B2901A) を用いた．光源に超高压水銀ランプ (Ushio Optical Module X) を用いて紫外光 (UV) を照射した．この超高压水銀ランプは，波長  $310, 370, 440 \text{ nm}$  を始め， $300\text{-}600 \text{ nm}$  の範囲に複数の特徴的な波長の光を含む．

### 4. 研究成果

クロスポイント構造を採用した ITO/Nb:STO 接合の概略図を FIG. 1(a) に示す．クロスポイント構造を採用することで，測定用プローブによる照射光の反射を回避し，ITO/Nb:STO 界面に確実に光を入射することが可能となった．作製したデバイスに対し， $0 \text{ V} \rightarrow +3 \text{ V} \rightarrow 0 \text{ V} \rightarrow -3 \text{ V} \rightarrow 0 \text{ V}$  の電圧掃引シーケンスを実行し，デバイスの I-V 特性を評価した結果を FIG. 1(b) に示す．I-V 特性に大きなヒステリシスが観測され，ITO/Nb:STO 接合が ReRAM として動作することが確認された．また，100 回の I-V サイクル再現性は非常に良好であった (灰色線)．次に，I-V 特性の UV 照射依存性を FIG. 1(c) に示す．UV 照射で生じる特徴的な変化は，I-V 曲線において極小値を取るポイントが反転している点である．ここで，図中の I-V 曲線の電流値は絶対値を表示しているため，極小値を取る点では符号の反転が起こっている．即ち，初期状態で起電力が生じていることを意味する．この起電力は，電極/Nb:STO 界面に欠陥が豊富に存在する程，大きくなることが確認されており [28, 29]，作製した ITO/Nb:STO 界面には，トラップサイトが豊富に存在することが示唆される．一方，UV 照射なしの場合，UV 照射によって界面付近のトラップサイトに捕獲されていた電子は伝導帯に励起されるため，逆に界面近傍の EF は Nb:STO バルクに比べ下がる．この電荷の偏りにより，逆バイアスに相当する起電力，光起電力が生じる．

デバイスの ITO 透明電極側から UV を照射した際の光応答特性を評価した．測定はデバイスに一定の読み出し電圧 ( $V_{\text{read}}$ ) を印加し，電流値を読み出すことにより行った (FIG. 1(a) 参照)． $V_{\text{read}} = 0 \text{ V}$  の場合は FIG. 2(a) に示す通りであり，UV 照射により負の電流が生じる．これは，前述の光起電力によって流れる電流を観測していることに他ならない．ここで，注目すべきは， $-0.5 \text{ V}$  の電圧を印加するだけで，デバイスの光応答特性が  $V_{\text{read}} = 0 \text{ V}$  から劇的に変化する点である．FIG. 2(b) に示すように， $V_{\text{read}} = -0.5 \text{ V}$  では，UV 照射中の光誘起電流の大幅かつ緩やかな増加，及び UV 照射停止後の大幅かつ緩やかな電流減少が確認された． $V_{\text{read}} = 0 \text{ V}$  では緩和挙動自体が観測されず， $V_{\text{read}} (|V_{\text{read}}| > 0)$  を印加することで過渡特性が変化することが分かる．

FIG. 2(c) に UV 照射停止後の，光誘起電流の緩和時間と  $V_{\text{read}}$  の関係を示す． $V_{\text{read}}$  を  $-0.5 \text{ V}$  から  $+0.5 \text{ V}$  へ変化させて行くと，緩和時間は 2 桁程度増加する．

一般に，RC を用いた時系列データの処理には，各時刻での入力の影響が，リザーブ内で時間とともに滑らかに消失していくことが好ましく，ある程度の短期記憶性が求められる [30]．従って，調整可能な短期記憶性を示した ITO/Nb:STO 接合は，単に光を用いた高速な信号処理が行えるだけでなく， $V_{\text{read}}$  を調整することによって，生活環境で生成される様々なタ

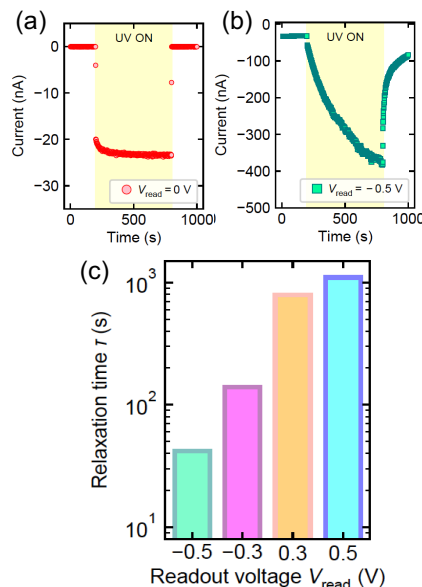


Fig. 2 (a)  $V_{\text{read}} = 0 \text{ V}$  及び (b)  $V_{\text{read}} = -0.5 \text{ V}$  における電流の時間依存性．黄色塗りは UV 照射 ON の時間帯を意味する．(c) UV 照射 OFF 時の電流の緩和時間と  $V_{\text{read}}$  の関係．

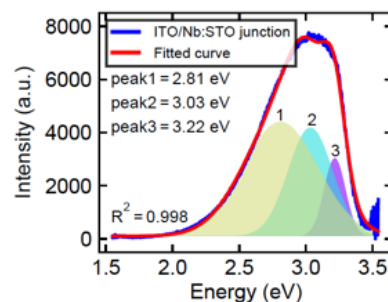


Fig. 3 ITO/Nb:STO 界面のフォトルミネセンス (PL) 測定及びピーク分離の結果．

タイムスケールを持つ時系列信号を、単一のデバイスにより、RCアプローチで処理できる可能性がある。

本研究では主に UV 光を用いて光応答特性の評価を行ったが、Nb:STO のバンドギャップエネルギー (3.27eV) に満たない 450 nm の青色半導体レーザーにおいても、光照射時に光誘起電流が観測されたことから、本デバイスの動作が STO のエネルギーギャップ内に存在するトラップサイト起因であることが示唆される。そこで、ITO/Nb:STO 界面の欠陥を調査するため、接合界面において、フォトルミネッセンス (PL) 測定を行った結果を FIG. 3(a) に示す。同図には ITO/Nb:STO 界面の PL スペクトルに対し、ガウス関数によるピークフィッティングを行った結果も示されている。3 つのピークトップはそれぞれ、2.81 eV, 3.03 eV, 3.22 eV と見積もられた。即ち、伝導帯下端からそれぞれ 0.46 eV, 0.24 eV, 0.05 eV の位置に再結合中心が存在することが示唆される。ここで、0.46 eV, 0.24 eV の再結合中心に関しては、STO のバンドギャップ内部に存在する酸素欠陥の準位に近い値であり [32]、伝導帯近傍の 0.05 eV の再結合中心については、ドーピングに起因する、室温でキャリア生成効率がほぼ 100% の Nb の準位からの発光であると考えられる [22, 23]。STO は間接遷移型の半導体であり、基本的に伝導帯-価電子帯間における直接的な電子とホールの生成・再結合は起こらない。しかし、STO 表面への Ar<sup>+</sup>ビーム照射 [16] や高エネルギー光の照射 [31] により、酸素欠陥が生成された場合において、発光が観測される。本研究で観測された UV 照射時の光電流の増加と UV オフ時の減衰は酸素欠陥の介在により生じると考えられる。

ITO/Nb:STO 接合の光誘起電流特性が、時系列データの処理に適していることを実証するため、 $V_{\text{read}} = -0.5$  V 印加時に、“1010” と “1001” の 4-bit 時系列信号を入力した際の電流出力を評価した。その結果を FIG. 4(a), (b) にそれぞれ示す。ここで、UV オンを “1”、UV オフを “0” と定義し、オン/オフそれぞれの時間幅を 10 s とした。4-bit 信号の入力から 1 s 後の電流値を出力電流 ( $I_{\text{out}}$ ) と定義して計測したところ、“1010” の場合  $I_{\text{out}} = 0.29 \mu\text{A}$ 、“1001” の場合  $I_{\text{out}} = 0.65 \mu\text{A}$  と異なる値を示した。これは、“1010” と “1001” の両者で、“1” を入力した回数は同じでも、“1” が入力されたタイミングによって  $I_{\text{out}}$  が異なることに起因し、デバイスが短期記憶特性を有することを意味する。

ITO/Nb:STO 接合の PRC 性能を評価するために、MNIST (Modified National Institute of Standards and Technology) データセットを用いて手書き数字の画像分類タスクを行った。本研究における画像分類タスクの処理プロセスの概略図を Fig. 5(a) に示す。28 × 28 画素の MNIST 画像を、数字に無関係な周縁部を削除して 20 × 20 画素に切り出し、5 列に分割した後、順次

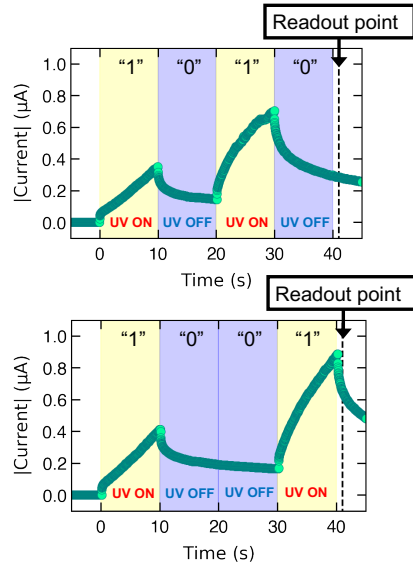


Fig. 4 (a)  $V_{\text{read}} = -0.5$  V 印加下で “1010” と “1001” の 4-bit 時系列信号を入力した際に観測される電流出力。

つなぎ合わせて 100 × 4 画素の画像に再生成した。この画像の明、暗をそれぞれ “1”、“0” の 2 値で表現し、4 ビットで符号化された UV パルス列 (UV オンを “1”、UV オフを “0”) に変換した。ここでも、UV オン/オフの時間幅を 10 s とした。各パルス列を ITO/Nb:STO 接合に入力し、出力電流  $I_{\text{out}}$  を記録した。即ち、4 ビットを 1 組とする UV パルス列を入射し終える毎に  $I_{\text{out}}$  を計測し、リザーバ出力として計 100 個の  $I_{\text{out}}$  データを得た。 $I_{\text{out}}$  データは、100 個の入力ニューロンと 10 個の出力ニューロン (0-9 とラベル付け) を持つ単層パーセプトロンに入力された。活性化関数として softmax 関数を用い、これに  $I_{\text{out}}$  データと入出力ニューロン間の結合重みのドット積を代入することで、最終的な出力を得た。学習は、クロスエントロピーを最小化する RMSprop 法を用いた誤差逆伝播法に基づいて教師あり方式で行った。同様の手法は、MNIST の画像分類タスクを用いて PRC の性能を評価する際にしばしば用いられる [5-7, 12]。学習処理は、k-fold cross validation を用いて、PRC の画像分類タスクにおける汎化性能を評

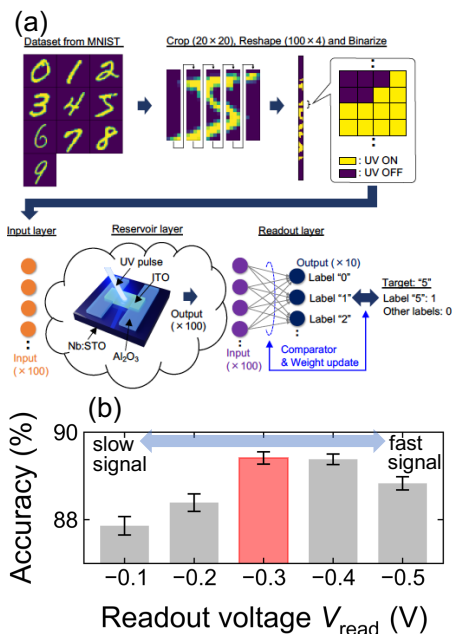


Fig. 5 (a) 画像分類タスク処理プロセスの概略図。 (b) 画像分類精度の評価結果。

汎化性能を評

価した。まず、MNIST から提供された 60000 枚の手書き数字データセットを  $k$  個に分割し、 $k-1$  個を訓練用、残る 1 個を検証用に用い、画像分類精度の推定値を得た。同様に、 $k$  個に分割されたデータセットのそれぞれが 1 回ずつ検証用となるよう、計  $k$  回、推定値を計算した。このようにして得られた  $k$  回の結果を平均して、最終的な推定値を得た。本研究では、 $k = 5$  として学習処理を行った。即ち、48000 枚を学習用、12000 枚を検証用として計 5 回にわたって学習を行った。画像分類精度の評価結果を Fig. 5(b) に示す。本研究で学習させた時系列信号のタイムスケールが 10 s であることを考慮すると、光誘起電流の緩和時間が 10 s に最も近い  $V_{\text{read}} = -0.3$  V において最高精度を示したと解釈できる。即ち、入力信号の時間スケールに合わせて、適切な電流緩和時間を示す  $V_{\text{read}}$  を選択することで、学習を最適化できることを意味する。この特性は、生活環境で生成される様々なタイムスケールを持つ時系列信号を、単一のデバイスにより処理できることを示唆する。本デバイスはエッジコンピューティングを担う AI デバイスとして、エッジでの広範囲な応用が期待される。

#### <参考文献>

- [1] W. Shi et al., IEEE Internet of Things Journal 3, 637 (2016).
- [2] H. Jaeger et al.: German National Research Center for Information Technology GMD Technical Report 148, 13 (2001).
- [3] M. Lukoševičius et al., KI - Künstliche Intelligenz 26, 365 (2012).
- [4] G. Tanaka et al., Neural Networks 115, 100 (2019).
- [5] C. Du et al., Nature Comm. 8, 2204 (2017).
- [6] R. Midya et al., Advanced Intelligent Systems 1, 1900084 (2019).
- [7] Y. H. Jang et al., Nature Comm. 12, 5727 (2021).
- [8] H. Kubota et al., J. Signal Processing 25, 123 (2021).
- [9] T. Furuta et al., Phys. Rev. Applied 10, 034063 (2018).
- [10] Y. Paquot et al., Sci. Rep. 2, 287 (2006).
- [11] K. Nakajima, Jap. J. Appl. Phys. 59, 060501 (2020).
- [12] S.-G. Koh et al., Sci. Rep. 12, 6958 (2022).
- [13] T. Matsuo et al., ACS Applied Materials & Interfaces 14, 36890 (2022).
- [14] S. Gao et al., ACS Nano 13, 2634 (2019).
- [15] S. Seo et al., Nature Comm. 9, 5106 (2018).
- [16] D. Kan et al., Nature Materials 4, 816 (2005).
- [17] K. Szot et al., Nature Materials 5, 312 (2006).
- [18] A. F. Santander-Syro et al., Nature 469, 189 (2011).
- [19] A. Tebano et al., American Chemical Society 6, 1278 (2012).
- [20] M. C. Tarun et al., Phys. Rev. Lett. 111, 187403 (2013).
- [21] T. Takata et al., Nature Comm. 581, 411 (2020).
- [22] T. Tomio et al., J. Appl. Phys. 76, 5886 (1994).
- [23] X. G. Guo et al., Phys. Lett. A 317, 501 (2003).
- [24] T. Fujii et al., Phys. Rev. B 75, 165101 (2007).
- [25] A. Sawa, Materials Today 11, 28 (2008).
- [26] C. Park et al., J. Appl. Phys. 103, 054106 (2008).
- [27] X. G. Chen et al., Appl. Phys. Lett. 98, 122102 (2011).
- [28] E. Mikheev et al., Nature comm. 5, 1 (2014).
- [29] J. Park et al., Appl. Phys. Lett. 105, 183103 (2014).
- [30] M. Lukoševičius et al., Computer Science Review 3, 127 (2009).
- [31] S. Mochizuki et al., J. Physics: Condensed Matter 17, 923 (2005).
- [32] C. Mitra et al., Phys. Rev. B 86, 155105 (2012).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yuta Sasaki and Kentaro Kinoshita	4. 巻 60
2. 論文標題 Controlling filament growth mode in resistive random-access memory based on thermal flow	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SBBB01-1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/abd9d3	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 Shuhei Saitoh, and Kentaro Kinoshita	4. 巻 116
2. 論文標題 Oxide-based selector with trap-filling controlled threshold switching	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 112101
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5143631	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7件（うち招待講演 3件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kentaro Kinoshita
2. 発表標題 Electrode/Nb doped SrTiO <sub>3</sub> junction as a physical reservoir device
3. 学会等名 MEMRISYS 2021（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山崎悠太郎, 橋本悠太, 青木裕雅, 木下健太郎
2. 発表標題 ペロブスカイト型酸化物抵抗変化メモリの光応答特性評価及び人工シナプスデバイス応用の検討
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会10p-S203-4
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木 悠太, 木下 健太郎
2. 発表標題 熱流設計に基づく抵抗変化メモリ (ReRAM) のフィラメントデザイン
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会 11p-Z07-1
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木下 健太郎
2. 発表標題 金属酸化物における抵抗スイッチング現象とデバイス応用
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋藤 修平、木下 健太郎
2. 発表標題 CoO/ITO二層構造で発現するノンポーラ閾値セレクトラ特性
3. 学会等名 第80回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山崎悠太郎, 甲斐洋行, 木下健太郎
2. 発表標題 電極/Nb-dopedSrTiO3界面の光誘起電流を利用したリザパーコンピューティング
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山崎悠太郎, 甲斐洋行, 木下健太郎
2. 発表標題 ITO/Nb:SrTiO3接合における光誘起電流特性を利用したニューロモルフィックコンピューティング ~リザーバーコンピューティング応用に向けて~
3. 学会等名 電子情報通信学会電子デバイス研究会
4. 発表年 2022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

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