

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01054

研究課題名(和文)三次元酸化物ナノ構造によるナノ電子相制御デバイスの創製

研究課題名(英文) Construction of 3 dimensional oxide nanostructures for nanoscale electronic phase change device

研究代表者

田中 秀和 (Tanaka, Hidekazu)

大阪大学・産業科学研究所・教授

研究者番号：80294130

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,200,000円

研究成果の概要(和文)：電子相変化(金属-絶縁体相転移)を発現する機能性酸化物を対象とし、サブ10nmスケールの三次元ナノ構造を構築し、巨大物性応答の創出を目的とし次の成果を得た。

20nm幅のナノギャップ電極を有する酸化バナジウム(VO₂)薄膜2端子デバイスを作製し、非常に急峻な相転移スイッチング観測、3次元方向全てが10nmサイズを持つマグネタイト(Fe₃O₄)のナノ構造体作製を実現し、極微ナノ試料における初めて相転移特性を観察、VO₂マイクロワイヤ/hBN/WSe₂/、VO₂ナノワイヤ/有機誘電体ハイブリッドFETの作成に成功、新電子相変化材料であるNi酸化物イオン液体電界効果トランジスタ作製に成功。

研究成果の学術的意義や社会的意義

遷移金属酸化物は、僅かな環境変化(温度、磁場、キャリア濃度)で、金属相、強磁性、高温超伝導などへ相転移する。この変化は劇的であり、新デバイス概念「Beyond CMOS」において、巨大スイッチング、超高速動作が可能な次世代デバイスの創製が期待されている。また本物質系の興味深い性質はSi半導体と大きく異なり10nm以下のナノ構造体であっても巨大スイッチングを示すと予測され、ムーアの限界以下のサイズでも魅力的なデバイス動作が期待されており、その実現の意義は大きい。本研究ではその実現に役立つ知見を得た。

研究成果の概要(英文)：We report gigantic response for external field in strongly correlated oxides micro-nano-structures. Typical achievements are as follows. Demonstrations of a steep resistance jump with orders of magnitude changes caused by a metal-insulator transition in single-crystal VO₂ nanowires with a 20 nm electrode gap, a three-dimensional Fe₃O₄ epitaxial nanowires at a 10 nm length scale using an original nanofabrication technique that comprises nanoimprint lithography and inclined thin-film deposition, VO₂ nanowire channel FET through a hybrid gate showing an enhancement in the resistive modulation efficiency, VO₂ thin films successfully grown onto hBN thin flakes, a gate-tunable abrupt switching device based on a VO₂ microwire monolithically integrated with a two-dimensional WSe₂ semiconductor. systematically study for a chemical FET composed of a SmNiO₃ film channel and an ionic liquid gate insulator.

研究分野：応用物性・ナノ機能材料科学

キーワード：強相関電子系 機能性酸化物 電子相転移 三次元ナノ構造 ナノエレクトロニクス

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

遷移金属酸化物は、電子相関により電子スピンの強結合している強相関電子系であり、電子が局在化した“電子結晶相”状態から、僅かな摂動(温度、磁場、キャリア濃度)で雪崩的に融解し、金属相、強磁性、高温超伝導を示す“電子液体相”へ相転移する。この変化は劇的であり、新しい物理・デバイス概念「Beyond CMOS」においても、同物質系を用いて、巨大スイッチング、超高速動作が可能な次世代デバイスの創製が期待されている。(Science 2010, 327, 1601, Perspective, 国際半導体委員会ロードマップなど)。

特に、本物質系の重要かつ興味深い性質は、多電子系であるためサブ 10nm スケールではドーパント密度の空間揺らぎにより動作が不安定となる Si 半導体と大きく異なり 10nm 以下のナノ構造体であっても 10^5 個以上の電子を含み、強い電子間相互作用に起因する集団的協調現象相転移に基づく巨大スイッチングを示すと予測され、ムーアの限界以下のサイズ(beyond Moore)でも魅力的なデバイス動作が期待されている。しかしサブ 10nm スケールでのナノ構造デバイス創製はこれまで例が無い。

2. 研究の目的

本研究では電子相変化を示す遷移金属酸化物において、ナノ構造サイズと集団的協調動作を行う電子集団(ナノ電子相)の応答性の相関を明らかにする。これにより Moore の法則のサイズ限界以下での動作が期待される極微サイズ酸化物デバイスにおいて巨大外場応答・新機能を創出する。トップダウンとボトムアップナノプロセスを融合したオリジナル技術によりナノ電子相を制御生成しうる極微細な 3 次元酸化物ナノ構造を形成し、空間的な電子濃度ゆらぎにより生じる、サブ 10nm スケールのナノ電子相の計測を可能とする。

サイズが小さくなるにつれて、連続体薄膜デバイスとは異なる、ナノ電子相の振る舞いが顕在化する特異な【ナノ構造増感効果】(バルク試料で観測されるよりも急峻な金属-絶縁体相転移など)を、電流、電圧などのエレクトロニクスに資する外場印加状態において観測する。ナノ構造サイズと形状を変化させ、ナノ電子相のドメイン形成過程を人為的に制御することにより巨大増感物性発現の制御法を確立する。これに基づき、ナノエレクトロニクスにおけるイノベーション(ムーアの法則の限界以下のサイズのデバイスでも巨大な相変化スイッチングデバイス・メモリ機能を示す“Beyond Moore 電子相変化デバイス”)を創出する。

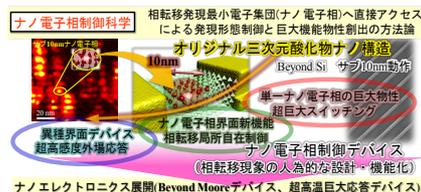


Fig.1 研究計画概念図

3. 研究の方法

金属-絶縁体相転移を発現する強相関酸化物において、(1)トップダウン/ボトムアップ融合 3 次元ナノテンプレート PLD 法によりナノ電子(結晶/液体)相を制御生成しうる 3 次元酸化物ナノ構造を形成する。さらにナノギャップ電極形技術を融合し、10nm スケールのナノ電子相の計測を行う。これにより、(2)ナノ構造増感巨大電気輸送物性(電流誘起相転移、ナノ電子相界面新現象、FET 界面効果デバイス)の観測、(3)透過型電子顕微鏡、走査型プローブ顕微鏡による 10nm~原子レベル構造直視と電気輸送物性の相関の解明により、ナノ電子相ドメイン制御による巨大物性応答創出の学術を構築する。これに基づき、(4) Beyond Moore 電子相変化デバイスのデモンストレーションとこれに基づき酸化物ナノエレクトロニクスデバイス国際ネットワーク構築を推進する。

4. 研究成果

電子相変化(金属-絶縁体相転移)を発現する機能性酸化物を対象とし、サブ 10nm スケールの三次元ナノ構造を構築し、巨大物性応答の創出を目的とし、代表的には次の成果を得た。●強相関酸化物ナノ構造の創製と巨大応答現象の発現(詳細成果(1)、(2))、●強相関酸化物/異種機能性材料(有機物、原子層材料)ハイブリッドによるデバイス化(詳細成果(3)、(4)、(5)、(6))、●新強相関電子系 Ni 酸化物薄膜・デバイスの形成(詳細成果(7))を得た。次にその詳細を記す。

(1)20nm ナノギャップ電極を有する VO₂ 薄膜 2 端子デバイス

単結晶薄膜においても MIT 近傍で、本質的に数十ナノメートル程の電子相ドメインに相分離し、不均質に相転移することが知られている。その伝導特性は例えば薄膜の場合、ドメインごとに相転移した階段状の変化として現れる。本研究では、Fig.2 に見られるように 20nm サイズの電極間ギャップを作製することにより、1つのドメインによる金属-絶縁体相転移の取り出しに成功し、非常に急峻な温度抵抗係数を発現する 1 段階の巨大抵抗変化を確認した。(代表論文: Single-step metal-insulator transition in thin film-based vanadium dioxide nanowires with a 20 nm electrode gap, Appl. Phys. Exp. 12 (2019) 025003(1-4))

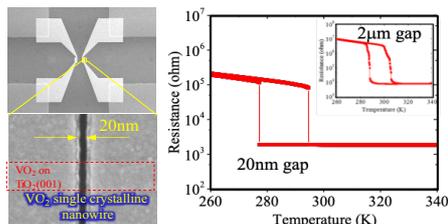


Fig.2 ナノギャップ VO₂ デバイスの SEM 像と相転移特性

(2) 3次元方向全てが10nmサイズを持つFe₃O₄ナノ構造体

ボトムアップ的な薄膜成長は、膜面方向には現在では原子層・分子層のレベルでの成長制御が可能であり、3次元加工基板をガイドテンプレートとし、厚さを精密に制御しながら、ガイド側面に酸化物薄膜ナノ構造を成長させることで、トップダウンナノリソグラフィのサイズ限界を超え、ナノウォール細線構造などの極小ナノ構造の創製が可能となる。単結晶化した3次元ナノテンプレート基板の側面を起点とし、nm精度でサイズを制御したナノ構造作製手法「3次元ナノテンプレートPLD法：パルスレーザー堆積法」を開発し、高品質なナノ構造体を実現した。3次元方向全てが10nmサイズを持つ強相関であるマグネタイト(Fe₃O₄)のナノ構造体の作製を実現し、極微ナノ試料において初めて相転移特性を観察した(Fig.3)。(代表論文：Three-Dimensional Nanoconfinement Supports Verwey Transition in Fe₃O₄ Nanowire at 10 nm Length Scale, Nano Lett. 19 (2019), 5003-5010)

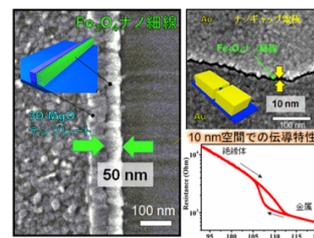


Fig.3 ナノギャップ/ナノワイヤ Fe₃O₄ デバイスのSEM像と相転移特性

(3) VO₂ナノワイヤ/有機誘電体ハイブリッドFETの作製

酸化物への電界効果によるキャリアドーピングは、強相関電子系の物性を測定するツールのみならず、Beyond-CMOSに資するモットランジスタ実現に向けて、多く研究されている。欠損や界面でのイオン拡散を極力抑制できる有機物パリレンCをチャネル界面に用い、高誘電率材料であるTa₂O₅とのハイブリッドゲートを用いることによって効率的な電界効果印加によるVO₂チャネルの抵抗変調を試みた。断面SEMにより、非常にフラットな界面が形成されていることが分かる(Fig.4)。さらにこのハイブリッドゲートをVO₂ナノワイヤへ適用し、VO₂ナノワイヤ/有機誘電体ハイブリッドFETとすることにより、従来より非常に大きい8.6%の抵抗変調率を得ることに成功し、本デバイスは高速(50ms以内)で動作するVO₂固体ゲートFETsの中で最も高いOn/Off比を示すことができた。(代表論文：Enhanced electronic-transport modulation in single-crystalline VO₂ nanowire-based solid-state field-effect transistors, Sci. Rep. 7 (2017) 17215 (1-7))

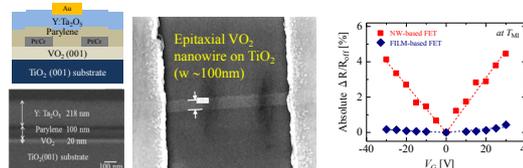


Fig.4 VO₂ ナノワイヤ/有機物パリレンC-FETの断面SEM(左)、上面SEM(中図)、FET特性(右図)

(4) VO₂マイクロワイヤ/hBN/WSe₂ハイブリッド相変化FET

遷移金属ダイカルコゲナイド原子層は、シリコンの微細化限界を超える半導体トランジスタ材とで、それぞれの利点を有し、なおかつそれぞれが抱える課題を相補的に解決が期待出来る。VO₂と遷移金属ダイカルコゲナイド原子層とのヘテロ構造形成により遷移金属ダイカルコゲナイドのゲート制御性を利用しジュール熱を発生させ、その熱をVO₂に伝えることで相転移を誘起させる、ハイブリッドトランジスタの作製を行った。Fig.5に、実際に作製したVO₂/WSe₂/h-BN原子層ハイブリッドトランジスタを示す。このトランジスタでは、VO₂がソース電極、一方WSe₂原子層はチャネルとしての役割を持つ。ゲート絶縁体としては、層状物質の六方晶窒化ホウ素(h-BN)を用いた。ファンデルワールス力によってどこへでも貼り付けられる原子層物質の特徴を活かし、VO₂/WSe₂原子層ヘテロ構造トランジスタの作製に初めて成功した。VO₂の転移温度近傍である345Kにおいて、オン・オフスイッチングの特性を計る、いわゆるサブスレッショルドスイングは157mV/桁であり、測定の解像度の低さを考慮しても、優れた値を得ることに成功した。ハイブリッドトランジスタにおけるサブスレッショルドスイングは、VO₂の相転移およびWSe₂のオン・オフそれぞれの急峻さに比例すると考えられる。

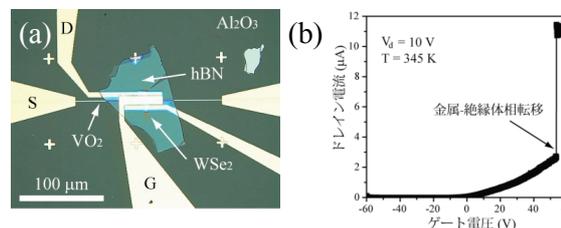


Fig.5 (左) VO₂/WSe₂/h-BN原子層トランジスタの光学顕微鏡像、(右)ゲート電圧-ドレイン電流特性

(代表論文：Gate-Tunable Thermal Metal-Insulator Transition in VO₂ Monolithically Integrated into a WSe₂ Field-Effect Transistors, ACS Appl. Mater. and Inter. 11 (2019) 3224-323-(1-9))

(5) VO₂マイクロワイヤ/hBNハイブリッドFET

室温において超高速に金属-絶縁体相転移を引き起こすVO₂と、界面が原子レベルで平坦でトラップサイトが非常に少ない層状物質である六方晶窒化ホウ素(hBN)をゲート絶縁体として用いたトップゲート型FETを作成したことで、高い抵抗変調率を実現した。これまで、SiO₂やHfO₂などの酸化膜をゲート絶縁体として用いたFETが作製されているが、界面におけるラフネスやキャリアトラップによる電子散乱のため、それらの抵抗変調率は1%以下と非常に低かつ

た。作製した VO₂-FET の光学顕微鏡像を Fig.6 に示す。hBN を介して正のゲート電圧を印可すると、ドレイン電流が急峻に上昇する様子が観察された。特に、30V のゲート電圧印可に対して 4.4% の高い抵抗変調率が得られ、この値はゲート酸化膜を用いた VO₂ FET における抵抗変調率よりも一桁以上大きいものである。この結果は、hBN が VO₂ FET における低界面散乱ゲート絶縁体として有用であることを示している。hBN は原子レベルまで薄くしても優れた絶縁性・誘電性を保つため、数原子層の hBN 超薄膜を用いれば、ゲート電圧印可による金属-絶縁体相転移の誘起も期待される。

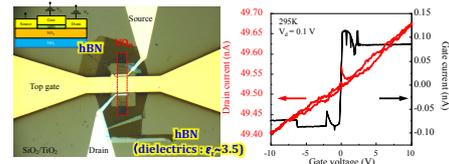


Fig.6 (左) VO₂/h-BN ハイブリッドトランジスタの光学顕微鏡像、(右)ゲート電圧-ドレイン電流特性

(6)原子層材料 hBN 上への VO₂ 薄膜結晶の成長の実現

VO₂ を柔軟性・透明性を有する二次元層状物質上に結晶成長させることができれば、ポトムゲート FET やフレキシブルデバイス形成などその応用が大きく広がることが期待される。SiO₂ 基板の上に hBN を剥離・トランスファーし、その上に VO₂ 薄膜結晶成長を実現した。hBN は層状物質の一種で、各層がファンデルワールス (vdw) 相互作用で結合している。したがって、hBN 上においては、界面での結合力が通常の酸化物基板との界面で働くイオン・共有結合よりはるかに弱く、格子ミスマッチを緩和して VO₂ が成長が期待される。hBN 上の VO₂ 薄膜はそのグレインの大きさは平均 490 nm で、最高で数 μm に達し、hBN(001) 面に対して VO₂ は最安定面である正方晶 (110) 面で成長していた。vdw 相互作用による格子ミスマッチの緩和で成長が実現したと考えられる。さらに、VO₂/hBN は 3 桁程度の抵抗変化を示し、転移温度はバルクとほぼ同じであった。電極間距離を 1 μm まで縮小させると、最高で 3 桁程度の一段飛びの抵抗跳躍を示し巨大ドメインの存在が示唆された。以上より VO₂/hBN にマイクロ加工を行えば、従来の酸化物デバイスを凌駕する高性能デバイスが期待される。

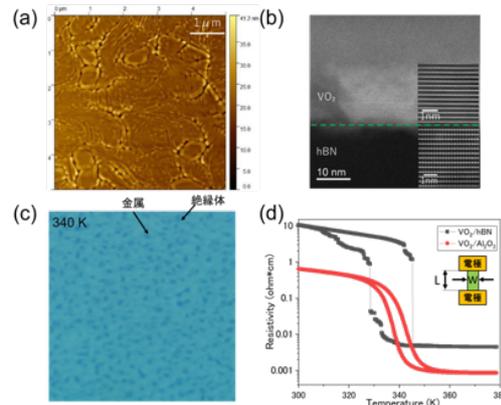


Fig. 7(a) VO₂/hBN の AFM 像、(b) VO₂/hBN の断面 STEM 像、(c) 340K における VO₂/hBN の光学顕微鏡像、(d) L=1.1 μm、W=2.6 μm 時の VO₂/hBN の電気伝導特性と L=2.4 μm、W=2.6 μm 時の VO₂/Al₂O₃ の電気伝導特性

(代表論文: Growth of vanadium dioxide thin films on hexagonal boron nitride flakes as transferrable substrates, Sci. Rep. 9 (2019) 2857(1-9))

(7)酸化物イオントロンクスデバイスの作製

希土類ニッケル酸化物は、金属絶縁体転移、プロトドーピングによる巨大物性変化から新機能材料として着目されており、例えば、SmNiO₃ は不揮発的、多段階の抵抗変化を示す化学トランジスタとして機能する。しかし、デバイス動作機構の定量的理解はなされていなかった。Ni の価数と抵抗変調の大きさ、ゲート電圧印可条件の定量的関係を系統的に調べることで機構の解明に取り組み、抵抗変調の精密制御を実現した。X 線光電子分光により、Ni²⁺ の生成量と抵抗変調度の定量的相関関係を明らかにし、1 桁抵抗変調に必要な時間の測定から、温度、電圧に依存した Ni²⁺ の生成速度を導出し、ゲート電圧印可条件と抵抗変調度の関係を示すモデル式を得た。このモデル式は、SmNiO₃ 化学トランジスタでの抵抗変化の振る舞いを正確に予測でき、ゲート電圧印可条件 (V_g, T, t) の適切な選択により、4 桁に及ぶワイドレンジでの精密抵抗変調制御に成功した。(代表論文: Correlation between Ni Valence and Resistance Modulation on a SmNiO₃ Chemical Transistor, ACS Appl. Electron. Mater. 1 (2019) 82-87)

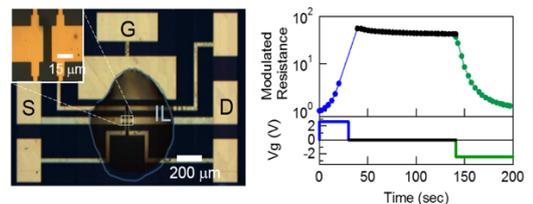


Fig. 8 イオン液体ゲートを有する SmNiO₃-FET (a)光学顕微鏡像 (b)チャンネル抵抗のゲート電圧依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 A.N. Hattori, H.Nakazawa, T.Nakamura and H.Tanaka	4. 巻 32
2. 論文標題 Fabrication of the electric double layer transistor with (La,Pr,Ca)MnO ₃ nanowall wire channel	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Mod. Phys. Lett. B.	6. 最初と最後の頁 1840058 (1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1142/S0217984918400584	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 Y. Cho, S. Aritomi, T. Kanki, K. Kinoshita, N. Endo, Y. Kondo, D. Shindo, H. Tanaka, Y. Murakami	4. 巻 102
2. 論文標題 Morphology of phase-separated VO ₂ films deposited on TiO ₂ (001) substrate	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Mater. Res. Bull. 102	6. 最初と最後の頁 289-293
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2018.02.030	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 Y. Higuchi, T. Kanki, and H. Tanaka	4. 巻 11
2. 論文標題 Formation of single-crystal VO ₂ thin films on MgO(110) substrates using ultrathin TiO ₂ buffer layers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Exp.	6. 最初と最後の頁 085503 (1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7567/APEX.11.085503	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 M. Chikanari, T. Kanki, T. Wei and H. Tanaka	4. 巻 113
2. 論文標題 Enhancement of electronic-transport switching in single-crystal narrower VO ₂ nanowire channels through side-gate electric fields	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 053102 (1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1063/1.5042674	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 Y. Sun, M. Kotiuga, D. Lim, B. Narayanan, M. Cherukara, Z. Zhang, Y. Dong, R. Kou, C.-J. Sun, Q. Lu, I. Waluyo, A. Hunt, H. Tanaka, A. N. Hattori, S. Gamage, Y. Abate, V. G. Pol, H. Zhou, S. K. R. S. Sankaranarayanan, B. Yildiz, K. M. Rabe and S. Ramanathan	4. 巻 115
2. 論文標題 Strongly correlated perovskite lithium ion shuttles	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. Natl. Acad. Sci. USA 115 (2018) 9672-9677	6. 最初と最後の頁 9672-9677
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1073/pnas.1805029115	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 該当する

1. 著者名 H.-T. Zhang, Z. Zhang, H. Zhou, H. Tanaka, D. D. Fong and S. Ramanathan	4. 巻 4
2. 論文標題 Beyond electrostatic modification: design and discovery of functional oxide phases via ionic-electronic doping	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Adv. Phys. X	6. 最初と最後の頁 1523686(1-42)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1080/23746149.2018.1523686	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 該当する

1. 著者名 D. Kawamoto, A. N. Hattori, M. Yamamoto, X. L. Tan, K. Hattori, H. Daimon, and H. Tanaka	4. 巻 1
2. 論文標題 Correlation between Ni Valence and Resistance Modulation on a SmNiO ₃ Chemical Transistor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Appl. Electron. Mater. 1 (2019) 82-87	6. 最初と最後の頁 82-87
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1021/acsaem.8b00028	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 Y. Tsuji, T. Kanki, Y. Murakami and H. Tanaka	4. 巻 12
2. 論文標題 Single-step metal-insulator transition in thin film-based vanadium dioxide nanowires with a 20 nm electrode gap	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Exp.	6. 最初と最後の頁 025003(1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7567/1882-0786/aafa9e	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 S. Genchi, M. Yamamoto, K. Shigematsu, S. Aritomi, R. Nouchi, T. Kanki, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Murakami and H. Tanaka	4. 巻 9
2. 論文標題 Growth of vanadium dioxide thin films on hexagonal boron nitride flakes as transferrable substrates	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sci. Rep.	6. 最初と最後の頁 2857(1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1038/s41598-019-39091-8	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 M. Yamamoto, R. Nouch, T. Kanki, A. N. Hattori, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Ueno and H. Tanaka	4. 巻 11
2. 論文標題 Gate-Tunable Thermal Metal-Insulator Transition in VO ₂ Monolithically Integrated into a WSe ₂ Field-Effect Transistors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Appl. Mater. and Inter.	6. 最初と最後の頁 3224-323-(1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1021/acsmami.8b18745	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 Y. Cho, S. Aritomi, T. Kanki, K. Kinoshita, N. Endo, Y. Kondo, D. Shindo, H. Tanaka, Y. Murakami	4. 巻 102
2. 論文標題 Morphology of phase-separated VO ₂ films deposited on TiO ₂ (001) substrate	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Mater. Res. Bull.	6. 最初と最後の頁 289-293
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.materresbull.2018.02.030	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 N. Manca, L. Pellegrino, T. Kanki, W. J. Venstra, G. Mattoni, Y. Higuchi, H. Tanaka, A. D. Cavigila, and D. Marre	4. 巻 29
2. 論文標題 Selective High-Frequency Mechanical Actuation Driven by the VO ₂ Electronic Instability	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Adv. Mater.	6. 最初と最後の頁 1701618 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.201701618	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 該当する

1. 著者名 T. Wei, T. Kanki, M. Chikanari, T. Uemura, T. Sekitani, and H. Tanaka	4. 巻 7
2. 論文標題 Enhanced electronic-transport modulation in single-crystalline V02 nanowire-based solid-state field-effect transistors	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Sci. Rep.	6. 最初と最後の頁 17215 (1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-017-17468-x	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 S. Tsubota, A. N. Hattori, T. Nakamura1, Y. Azuma, Y. Majima, and H. Tanaka	4. 巻 10
2. 論文標題 Enhancement of discrete changes in resistance in engineered V02 heterointerface nanowall wire	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Exp.	6. 最初と最後の頁 115001 (1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/APEX.10.115001	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 O. Nakagawara, K. Okada, A. S. Borowiak, A. N. Hattori, K. Murayama, N. Tanaka and H. Tanaka	4. 巻 10
2. 論文標題 Epitaxial crystallization of self-assembled Zn0/Ni0 nanopillar system	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Exp.	6. 最初と最後の頁 075501 (1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/APEX.10.075501	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 Y. Higuchi, T. Kanki and H. Tanaka	4. 巻 10
2. 論文標題 Joule-heat-driven high-efficiency electronic-phase switching in freestanding V02/Ti02 nanowires	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Exp.	6. 最初と最後の頁 033201 (1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) Doi:10.7567/APEX.10.033201	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 N. Manca, L. Pellegrino, T. Kanki, W. J. Venstra, G. Mattoni, Y. Higuchi, H. Tanaka, A. D. Cavigila, and D. Marre	4. 巻 1
2. 論文標題 VO2: A Phase Change Material for Micromechanics	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 MDPI Proceedings	6. 最初と最後の頁 294 (1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/proceedings1040294	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 該当する

1. 著者名 T. Kanki and H. Tanaka	4. 巻 5
2. 論文標題 Research Update: Nanoscale electrochemical transistors in correlated oxides	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 APL Mater.	6. 最初と最後の頁 042303(1-11)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4974484	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 山本 真人、田中 秀和	4. 巻 88
2. 論文標題 酸化物・原子層物質ハイブリッドによる新奇デバイスの創製	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 金属	6. 最初と最後の頁 112-117
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 無
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52件 (うち招待講演 19件 / うち国際学会 28件)

1. 発表者名 Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 VO2: Applications of Electronic Phase Change Oxides -Current, Electrostatic, Electrochemical control-
3. 学会等名 2018 Korean Physical Society, Spring Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 VO2: Applications of Electronic Phase Change Oxides
3. 学会等名 2018 MRS Spring Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 VO2: Applications of Electronic Phase Change Oxides
3. 学会等名 ERTI seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hidekazu Tanaka, Mahito Yamamoto, Teruo Kanki, Azusa N. Hattori, Yuto Anzai
2. 発表標題 Basic and Applications of Electronic Phase Change Oxides
3. 学会等名 7th imec Handai International Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中 秀和
2. 発表標題 酸化物ナノ構造で変わり者電子を操る ~強相関電子デバイスの構築~
3. 学会等名 第3回極限ナノ造形・構造物性研究会 公開講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中 秀和、Yifei Sun, Zhen Zhang, Koushik Ramadoss, Fan Zao, Shriram Ramanathan
2. 発表標題 酸化物イオントロニクス
3. 学会等名 「表面界面の機能創成とデバイス応用」セミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中 秀和
2. 発表標題 イオントロニクスとPurdue滞在
3. 学会等名 土曜科学会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Current activities on Nanotechnology at ISIR-Osaka University
3. 学会等名 Workshop on MICROACTUATORS（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Transistors Based on 2D Semiconductors/Dielectrics Contacted with the Phase-Change Oxides
3. 学会等名 E-MRS-J-MRS Joint symposium（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hidekazu Tanaka and Mahito Yamamoto
2. 発表標題 Transistors Based on the Phase-Change Oxides Contacted with 2D Layered Materials
3. 学会等名 The 30th Symposium on Phase Change Oriented Science (PCOS 2018) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hidekazu Tanaka ^{1,2} , Yoshiyuki Higuchi, Fumiya Enodo, Teruo Kanki, N. Manca, L. Pellegrino, D. Marre
2. 発表標題 Strain driven high-efficiency electronic-phase switching in freestanding transition metal oxide nano/microstructures
3. 学会等名 CSRN-Osaka Annual Workshop 2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hidekazu Tanaka, A.N. Hattori, T. Kanki, D. Kawamoto, K. Muraoka, K. Hattori, H. Daimon, S. Ramanathan
2. 発表標題 Control of electrical properties on strongly correlated oxides via ionic-electronic coupling
3. 学会等名 The 8th Indo-Japan Seminar "Designing Emergent Materials" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Nanoscale electrostatic and electrochemical transistors in correlated oxides
3. 学会等名 Yamada Science Foundation Junjiro Kanamori Memorial International Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Electrochemical conductance modulation in Ionic Liquid gating on perovskite nickelates
3. 学会等名 Junjiro Kanamori Memorial International Symposium サテライトワークショップ
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Nanoimprint Technology for Functional Oxide Electronics
3. 学会等名 The 16th International Conference on Nanoimprint and Nanoprint Technology (NNT2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Enhancement Factors of Electrochemical Conductance Modulation in Ionic Liquid Gating on Correlated Oxide Micro/Nanostructures
3. 学会等名 2017 MRS Fall Meeting & Exhibit (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Electrochemical Gating-Induced Hydrogenation in VO ₂ Nano-Patterned Devices
3. 学会等名 2017 MRS Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshiyuki Higuchi, Teruo Kanki, L. Pellegrino, N. Manca, D. Marr; and Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Current driven high-efficiency electronic-phase switching in freestanding transition metal oxide nano/microstructures
3. 学会等名 第22回半導体スピン工学の基礎と応用PASPS-22
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Modulation of magneto-transport properties in a field effect device accompanying Redox processes in ferrite thin films
3. 学会等名 ICDS-29(International Conference on Defects in Semiconductors) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 A. N. Hattori, T. Nakamura, H. Nakazawa, T. V. A. Nguyen, H. Tanaka
2. 発表標題 Ferromagnetic metal nanodomain structure in the manganite nanowall wire through metal-insulator transition
3. 学会等名 ICDS-29(International Conference on Defects in Semiconductors) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Teruo Kanki, Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Nano-spintronics using phase transition in functional oxides
3. 学会等名 ICDS-29(International Conference on Defects in Semiconductors) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 服部 梓、T. V. A. Nguyen、永井 正也、芦田 昌明、田中 秀和
2. 発表標題 THz時間領域分光による強相関マンガ氧化物ナノ電子相の伝導特性評価
3. 学会等名 第78回 応用物理学会秋季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山本真人、上野啓司、塚越一仁
2. 発表標題 自己制御表面酸化によるWSe ₂ 原子層トランジスタの高受光感度化
3. 学会等名 第78回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山本真人、神吉輝夫、服部梓、野内亮、谷口尚、渡邊賢司、田中秀和
2. 発表標題 VO ₂ /原子層半導体ヘテロ構造を用いた急峻スロープトランジスタ
3. 学会等名 第78回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 樋口 敬之、神吉 輝夫、L.Pellegrino、N.Manca、D. Marracute;, 田中 秀和
2. 発表標題 VO ₂ フリースタンディングナノ細線を用いた電界効果動的歪み制御による電気伝送特性変調
3. 学会等名 第78回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 服部 梓、川本 大喜、林 慶一郎、田中 秀和
2. 発表標題 ニッケル酸化物電界効果トランジスターでの抵抗変化の機構解明
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 服部 梓、竹本 昌平、服部 賢、大門 寛、田中 秀和
2. 発表標題 リソグラフィ技術を用いたSi傾斜超構造表面の創製
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 服部 梓、坪田智司、東康男、真島 豊、田中秀和
2. 発表標題 3次元ナノ空間制御によるVO ₂ の外場応答急峻化
3. 学会等名 第3回材料WEEK「材料シンポジウムワークショップ」
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 林慶一郎、川本大喜、服部梓、田中秀和
2. 発表標題 NdNiO ₃ ナノ細線の創製と伝導特性研究
3. 学会等名 第3回材料WEEK「材料シンポジウムワークショップ」
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 A. N. Hattori, H. Tanaka
2. 発表標題 Metal-Insulator Transition Properties of Electric Nanodomains in the Strongly Electron Correlated Metal Oxide Nanowall Wire
3. 学会等名 The 7th World Annual Congress of Nano Science & Technology-2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Teruo Kanki and Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Functional oxide-based nanowire-transistor
3. 学会等名 電界効果を用いた非平衡イオン拡散制御の研究に関する講演 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Teruo Kanki and Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Resistance Modulation and Memory Effect in VO ₂ Nanowires by Electrochemical Gating-Induced Hydrogenation
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Materials and Device Technology (IWAMDT-2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Teruo Kanki and Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Noise-Driven Signal Transmitter Using Nonlinear Effect of Functional Oxides
3. 学会等名 2017 MRS Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Teruo Kanki and Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Enhancement of Electronic Transport Modulation in Single Crystalline V02 Nanowire-Based Solid State-Field-Effect Transistor
3. 学会等名 2017 MRS Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 樋口 敬之, 神吉 輝夫, 田中 秀和
2. 発表標題 The enhancement of electronic phase switching efficiency in V02 freestanding nanowires
3. 学会等名 2017 MRS Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshiyuki Higuchi, Teruo Kanki, Luca Pellegrino, Nicola Manca, Daniele Marrucci, Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Strain Electronics Driven By Electrostatic Actuation in Single-crystal V02
3. 学会等名 21st SANKEN International Symposium 産研国際シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 谷村俊樹、服部梓、田中秀和
2. 発表標題 Quantitative estimation of the doped width and resistivity after hydrogenation for the ReNiO3 device with the designed micrometer electrode gap
3. 学会等名 21st SANKEN International Symposium 産研国際シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kawamoto DAIKI, Hattori N. AZUSA,, Yamamoto MAHITO, Tanaka HIDEKAZU
2. 発表標題 Wide-range nonvolatile multistate resistance modulation in SmNiO3 film EDLT
3. 学会等名 21st SANKEN International Symposium 産研国際シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安西勇人、山本真人、神吉輝夫、渡邊健司、谷口尚、田中秀和
2. 発表標題 Effective resistance modulation in V02 by gating through hexagonal boron nitride
3. 学会等名 21st SANKEN International Symposium 産研国際シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 村岡敬太、神吉輝夫、田中秀和
2. 発表標題 Colossal resistance modulation of single crystal V02 thin films on TiO2(001) substrates by hydrogen doping using catalytic effect
3. 学会等名 21st SANKEN International Symposium 産研国際シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shingo GENCHI, Mahito YAMAMOTO, Teruo KANKI, Kenji WATANABE, Takashi TANIGUCHI, Hidekazu TANAKA
2. 発表標題 Growth and characterization of V02 on hexagonal boron nitride
3. 学会等名 21st SANKEN International Symposium 産研国際シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshihide Tsuji, Teruo Kanki, Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Colossal resistive jump due to metal-insulator transition in single crystal V02 nanowires on TiO2(001) substrates with nano-electrode gap
3. 学会等名 21st SANKEN International Symposium 産研国際シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 左海康太郎
2. 発表標題 TiO2(001)基板上の V02単結晶薄膜における金属-絶縁体相転移の微視的機構に関する研究
3. 学会等名 第 2 回「表面界面の機能創成とデバイス応用」セミナー
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 遠藤史也
2. 発表標題 単結晶 V02を用いたナノ電気-機械素子の作製
3. 学会等名 第 2 回「表面界面の機能創成とデバイス応用」セミナー
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mahito Yamamoto, Teruo Kanki, Azusa N. Hattori, Ryo Nouchi, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Keiji Ueno, Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Non-thermionic Switching in an atomically thin WSe2 transistor with the phase change material V02 contact
3. 学会等名 APS March Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 村岡敬太、神吉輝夫、田中秀和
2. 発表標題 エピタキシャルV02薄膜におけるPt触媒水素ドーピングによる巨大抵抗変調
3. 学会等名 第65回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 辻佳秀、神吉輝夫、田中秀和
2. 発表標題 TiO ₂ (001) 基板上的のナノ電極ギャップ単結晶V02ナノワイヤーにおける巨大抵抗跳躍の観測
3. 学会等名 第65回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川本 大喜, 服部 梓, 山本 真人, 田中 秀和
2. 発表標題 SmNiO ₃ -EDLTにおけるワイドレンジ精密抵抗変調制御
3. 学会等名 第65回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安西勇人、山本真人、神吉輝夫、渡邊賢司、谷口尚、松本和彦、田中秀和
2. 発表標題 六方晶窒化ホウ素をゲート絶縁体として用いたV02 FETにおける高効率抵抗変調
3. 学会等名 第65回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 玄地 真悟, 山本 真人, 神吉 輝夫, 渡邊 賢司, 谷口 尚, 田中 秀和
2. 発表標題 六方晶窒化ホウ素上におけるV02 薄膜の成長と評価
3. 学会等名 第65回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 服部 梓、川本 大喜、林 慶一郎、田中 秀和
2. 発表標題 ニッケル酸化物電界効果トランジスタでの広ダイナミックレンジ抵抗変調制御
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. N. Hattori, H. Nakazawa, T. Nakamura, H. Tanaka
2. 発表標題 Fabrication of the Electric Double Layer Transistor with (La,Pr,Ca)MnO3 Nanowall Wire Channel
3. 学会等名 2018 3rd International Conference on Materials Science and Nanotechnology (ICMSNT 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 田中 秀和	4. 発行年 2019年
2. 出版社 オーム社	5. 総ページ数 764
3. 書名 ナノインプリント技術ハンドブック	

〔産業財産権〕

〔その他〕

田中研究室Home page
<https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/bis/>

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	服部 梓 (Hattori Azusa)	大阪大学・産業科学研究所・准教授 (14401)	
研究協力者	山本 真人 (Yamamoto Mahito)	大阪大学・産業科学研究所・助教 (14401)	現所属：関西大学
研究協力者	神吉 輝夫 (Kanki Teruo)	大阪大学・産業科学研究所・准教授 (14401)	