

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 5 日現在

機関番号：34416

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15026

研究課題名（和文）モノリシック型相転移トランジスタの高性能化と論理回路への応用

研究課題名（英文）Realization of high-performance monolithic phase transistors and their logic applications

研究代表者

山本 真人 (YAMAMOTO, Mahito)

関西大学・システム理工学部・助教

研究者番号：00748717

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：わずかなエネルギーで急激にオン・オフスイッチする相転移トランジスタは、次世代のエレクトロニクス基盤デバイスとして期待されている。本研究では、典型相転移材料であるVO<sub>2</sub>と優れた電界制御性を示す二次元MoS<sub>2</sub>を用いて相転移トランジスタを作製し、その高性能化に必要な知見の構築と性能改善を行った。具体的な成果としては、VO<sub>2</sub>とMoS<sub>2</sub>との間には大きな接触抵抗が存在することを明らかにした。また、VO<sub>2</sub>とMoS<sub>2</sub>との接触抵抗の低減を目的として、バッファ層となる二次元絶縁体上での高品質VO<sub>2</sub>薄膜成長に成功した。本研究で得られた結果は、相転移トランジスタの論理回路応用への第一歩として重要なものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンピュータは、その基盤デバイスであるシリコンFETを微細化・集積化することで発展を遂げてきた。しかし、近年、微細化・集積化によるコンピュータの高速化は限界に近づいている一方、その消費電力は増加を続けている。したがって、現在のFETに代わる新原理・新構造FETの開発が必要不可欠とされている。本研究では、わずかなエネルギーで抵抗値が急激に変化する相転移材料と電界制御性の優れた二次元半導体を応用することで、低消費電力相転移FETの構築を目指したものである。本研究で得られた知見を元に高性能な相転移FETが実現できれば、将来的に相転移FETを基盤とする低消費電力コンピュータの実現も期待される。

研究成果の概要（英文）：Phase transition transistors have been of great interest for electronic applications because of the possible low-power consumption operations. Here we fabricated phased transition transistors using a phase change material VO<sub>2</sub> and two-dimensional MoS<sub>2</sub> and constructed deep insights into the device performance. We found that a high contact resistance exists between VO<sub>2</sub> and MoS<sub>2</sub>. In order to overcome the drawback in the device, we grew VO<sub>2</sub> thin films on a two-dimensional insulator, which could be used a buffer layer between VO<sub>2</sub> and MoS<sub>2</sub> for the reduction of the contact resistance. Our findings would be a significant step toward practical applications of phase transition transistors in logic circuits.

研究分野：デバイス物理

キーワード：二次元材料 相転移材料 急峻スロープFET 遷移金属ダイカルコゲナイド 二酸化バナジウム 六方晶 窒化ホウ素

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

我々のコンピューターは、その基盤デバイスであるシリコン電界効果トランジスタ (field-effect transistor; FET) を微細化・集積化することで発展を遂げてきた。しかし、近年、微細化・集積化によるコンピューターの高速化は限界に近づいている一方で、その消費電力は将来的に爆発的に増加することが予測されている。微細化・集積化によるシリコン FET の性能発展の限界をスケーリング限界と呼び、近年このスケーリング限界を打破し得る、新原理・新構造 FET の研究・開発が活発に行われている。

最近、いくつかある次世代 FET 候補の中でも注目を集めているのが、相転移トランジスタである。相転移トランジスタとは、わずかなエネルギーで絶縁状態と金属状態を急峻に相転移する相転移材料を電極として用いた半導体 FET であり、既存の FET を超える低消費電力オン・オフスイッチ動作が期待されている。これまでの研究では、室温近傍で急峻な金属 - 絶縁体相転移を示す二酸化バナジウム ( $\text{VO}_2$ ) とシリコン FET を接続したハイブリッド型相転移トランジスタが作製されており、従来の FET の理論限界を大きく下回る駆動電圧でのスイッチ動作が報告されている。さらに、 $\text{VO}_2$  とどこへでも貼り付けられる二次元半導体とを重ね合わせることでモノリシック型相転移トランジスタも作製されており、 $\text{VO}_2$  の急峻な相転移に由来するスイッチング動作が報告されている。

しかし、 $\text{VO}_2$  を電極、二次元半導体をチャネルとするモノリシック型相転移トランジスタは、実用化には必要不可欠な素子の集積化・微細化可能性の面では大きく期待できるものの、既存のシリコン FET を凌駕するような急峻オン・オフスイッチは依然報告されておらず、低消費電力デバイスとしての可能性は未知である。

### 2. 研究の目的

本研究は、 $\text{VO}_2$  と二次元半導体を基盤とするモノリシック型相転移トランジスタにおいて、その性能限界に関する知見の構築を行い、高性能化と集積回路応用を目指したものである。

### 3. 研究の方法

本研究では、 $\text{VO}_2$  を電極、二次元半導体である二硫化モリブデン ( $\text{MoS}_2$ ) をチャネルとする FET 構造を作製し、その接合特性を詳細に調べた。まず、 $\text{VO}_2$  をサファイア (0001) 基板にパルスレーザー堆積法によって薄膜成長し、フォトリソグラフィと反応性イオンエッチングによって細線状に加工した。次に、厚さ数原子層の  $\text{MoS}_2$  を  $\text{VO}_2$  細線状に転写し、さらにゲート誘電体となる六方晶窒化ホウ素 (hBN) を転写させることでトランジスタ構造を完成させた。作製したモノリシック型相転移トランジスタの輸送特性を 100-400 K の温度範囲で調べ、 $\text{VO}_2$  と  $\text{MoS}_2$  との接合におけるエネルギー障壁の高さを評価した。

また、低抵抗な  $\text{VO}_2/\text{MoS}_2$  接合を実現することを目的として、 $\text{VO}_2$  と  $\text{MoS}_2$  との間に二次元材料からなるバッファ層を挿入することを試みた。本研究では、二次元材料バッファ層として hBN を選び、まず hBN 上での  $\text{VO}_2$  薄膜成長を行い、その相転移特性を詳細に調べた。hBN 上での  $\text{VO}_2$  薄膜成長は、パルスレーザー堆積法によって行った。 $\text{VO}_2$  薄膜の相転移の起点となるドメインの観察には、温度可変光学顕微鏡を用いた。また、相転移特性のサイズ依存性を調べるために、 $\text{VO}_2$  薄膜をマイクロスケール加工し、300-400 K の温度範囲で電気伝導評価を行った。

### 4. 研究成果

図 1 は、本研究で作成した  $\text{VO}_2$  を電極、二次元  $\text{MoS}_2$  をチャネルとするモノリシック型相転移トランジスタの光学顕微鏡像と輸送特性を示している。輸送特性は、 $\text{VO}_2$  が絶縁体 (300 K) と金属 (400 K) それぞれの状態において得たものである。図 1(b) の挿入図にある通り、 $\text{VO}_2$  は金属 - 絶縁体相転移において抵抗値が三桁以上変化するが、作製した相転移トランジスタにおけるオン電流は、相転移に際して一桁程度しか変化しないことが分かった。この結果は、 $\text{VO}_2$  と  $\text{MoS}_2$  との接合が  $\text{VO}_2$  の相状態に関わらず高い抵抗を有し、この高い接合抵抗がオン電流を抑制していることを意味している。

実際に、輸送特性の温度依存性から  $\text{VO}_2$  と  $\text{MoS}_2$  との接合間のエネルギー障壁を見積もると、 $\text{VO}_2$  が絶縁体のときで 0.27 eV、一方、金属のときに 0.21 eV となることが分かった。このエネルギー障壁の高さは、 $\text{VO}_2$  と  $\text{MoS}_2$  のバンド構造を考慮した Mott-Schottky 則からは予測できないものであり、つまり  $\text{VO}_2$  と  $\text{MoS}_2$  を接合させるとフェルミ準位が  $\text{MoS}_2$  のバンドギャップ内にピンニングされることが明らかになった。本研究で得られた結果によって、 $\text{VO}_2$  と  $\text{MoS}_2$  からなる相転移トランジスタにおいて高性能動作を実現するためには、接合間のフェルミ準位ピン

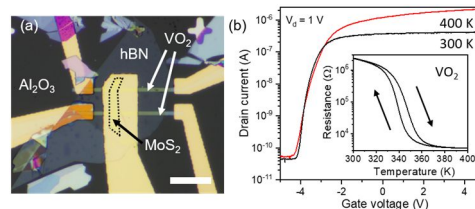


図 1.  $\text{VO}_2$  と  $\text{MoS}_2$  を基盤とするモノリシック型相転移トランジスタの (a) 光学顕微鏡像と (b) 300 K と 400 K における輸送特性。スケールバーは 10  $\mu\text{m}$ 。挿入図は  $\text{VO}_2$  の抵抗温度特性。矢印は温度掃引の方向。

リングを外し、低抵抗な接合を実現する必要があることが分かった。

次に、VO<sub>2</sub>とMoS<sub>2</sub>との接合抵抗を低減させるために、接合間にバッファ層を挿入することを試みた。本研究では、バッファ層として二次元層状絶縁体のhBNを選択し、まずhBN上におけるVO<sub>2</sub>薄膜成長と相転移特性の解析を行った。図2は、hBN上に成長させたVO<sub>2</sub>薄膜の337 Kにおける光学顕微鏡像と、マイクロスケールに加工したVO<sub>2</sub>細線の抵抗-温度特性の図である。VO<sub>2</sub>薄膜の光学顕微鏡像において、ライトブルーに見える領域は絶縁相、一方、ダークブルーの領域は金属相である。この光学顕微鏡像からVO<sub>2</sub>の相転移の起点となるドメインの大きさを見積もると、およそ600 nmとなることが分かった。この大きさは、サファイア基板上に形成したVO<sub>2</sub>薄膜のドメインの大きさに比べて一桁以上大きいものである。VO<sub>2</sub>のドメインの大きさは、相転移における抵抗変化の振る舞いと密接な関係があり、過去の研究によって抵抗測定領域をドメイン程度の大きさまで縮めると、VO<sub>2</sub>が急峻な抵抗変化を示すことが報告されている。実際に、図2(b)に示すように、hBN上VO<sub>2</sub>薄膜を幅、長さともに1 μmほどに加工したときの抵抗値の温度依存性を見ると、わずか0.1 Kの温度変化で抵抗値が3桁以上も変化する、超急峻な相転移特性を示すことが分かった。この結果は、hBN上のVO<sub>2</sub>薄膜が相転移トランジスタ应用到に適していることを意味している。本研究では、実際にhBNをバッファ層として利用するまでには至らなかったが、今後は、hBNとVO<sub>2</sub>との積層構造をMoS<sub>2</sub>チャンネルに転写することでhBNをバッファ層とするVO<sub>2</sub>/MoS<sub>2</sub>接合を形成し、その接合特性に関する評価・解析を行い、さらには高性能オン・オフスイッチ動作の実証を進める。

以上、本研究ではVO<sub>2</sub>を電極、二次元MoS<sub>2</sub>をチャンネルとするモノリシック型相転移トランジスタの高性能化と論理回路応用を目指し、まず、VO<sub>2</sub>/MoS<sub>2</sub>接合特性に関する詳細な解析を行った。その結果、VO<sub>2</sub>とMoS<sub>2</sub>との接合ではフェルミ準位がMoS<sub>2</sub>のバンドギャップ内にピンニングされているため、高い接合抵抗が存在することが分かった。さらに、本研究では、VO<sub>2</sub>とMoS<sub>2</sub>との接合における接触抵抗を、hBNをバッファ層として用いることで低減することを考案した。その第一段階として、hBN上にVO<sub>2</sub>薄膜を直接成長し、その相転移特性を調べた。その結果、hBN上VO<sub>2</sub>はマイクロサイズにおいて、相転移トランジスタ应用到に十分に資する急峻な相転移特性を示すことが分かった。これらの結果は、VO<sub>2</sub>、MoS<sub>2</sub>、hBNに基づく相転移トランジスタの論理回路応用を大いに期待させるものである。

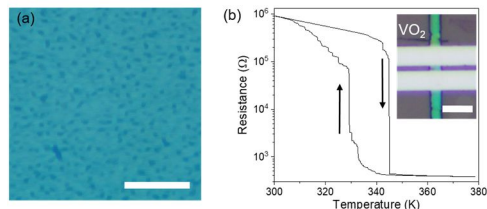


図2. (a) hBN上VO<sub>2</sub>薄膜の337 Kにおける光学顕微鏡像。スケールバーは10 μm。(b) マイクロ細線加工したhBN上VO<sub>2</sub>の抵抗-温度特性。挿入図は光学顕微鏡像。スケールバーは5 μm。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Yamamoto Mahito, Nouchi Ryo, Kanki Teruo, Nakaharai Shu, Hattori Azusa N., Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Wakayama Yutaka, Ueno Keiji, Tanaka Hidekazu	4. 巻 11
2. 論文標題 Barrier Formation at the Contacts of Vanadium Dioxide and Transition-Metal Dichalcogenides	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 36871 ~ 36879
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsami.9b13763	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16件（うち招待講演 2件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 山本 真人、玄地 真悟、神吉 輝夫、野内 亮、谷口 尚、渡邊 賢司、田中 秀和
2. 発表標題 六方晶窒化ホウ素を基板としたVO <sub>2</sub> 薄膜の成長とデバイス応用
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平尾 成、田中 秀和、若山 裕、山本 真人
2. 発表標題 多段階化学気相成長法を用いたバナジウム硫化物薄膜の作成
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 滝川 潤、山本 真人、谷口 尚、渡邊 賢司、神吉 輝夫、田中 秀和
2. 発表標題 六方晶窒化ホウ素挿入層によるイオン液体ゲーティング時における化学反応の抑制効果
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 Shingo Genchi, Mahito Yamamoto, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Characterization of the phase transition property of VO <sub>2</sub> grown on hBN
3. 学会等名 PCOS2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Boyuan Yu, Shingo Genchi, Mahito Yamamoto, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Yasukazu Murakami, Takehiro Tamaoka, Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Observation of Metal Insulator transition in VO <sub>2</sub> ultrathin films
3. 学会等名 PCOS2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Boyuan Yu, Shingo Genchi, Mahito Yamamoto, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Raman study of the phase transition in VO <sub>2</sub> ultrathin films on hexagonal-boron nitride
3. 学会等名 第39回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shingo Genchi, Koji Shigematsu, Shodai Aritomi, Mahito Yamamoto, Teruo Kanki, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Yasukazu Murakami, Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Growth and characterization of VO <sub>2</sub> thin films on hexagonal boron nitride
3. 学会等名 iWOE International Workshop on Oxide Electronics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shingo Genchi, Koji Shigematsu, Shodai Aritomi, Mahito Yamamoto, Teruo Kanki, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Yasukazu Murakami, Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Growth and characterization of V02 thin films on hexagonal boron nitride
3. 学会等名 2nd Workshop on Microactuators ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shingo Genchi, Mahito Yamamoto, Teruo Kanki, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Scaling effects in the resistance-temperature characteristics of V02 on hBN
3. 学会等名 The international symposium for nano science ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shingo Genchi, Mahito Yamamoto, Teruo Kanki, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Scaling effects in the resistance-temperature characteristics of V02 on hBN
3. 学会等名 Materials Research Society ( 国際学会 )
4. 発表年 2019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V02における抵抗跳躍の電極間距離依存性
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 M. Yamamoto, R. Nouchi, T. Kanki, S. Nakaharai, A. N. Hattori, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Wakayama, K. Ueno, H. Tanaka
2. 発表標題 Phase transition FETs based on two-dimensional WSe <sub>2</sub> with V <sub>O2</sub> contacts
3. 学会等名 iWOE International Workshop on Oxide Electronics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Yamamoto, R. Nouchi, T. Kanki, S. Nakaharai, A. N. Hattori, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Wakayama, K. Ueno, H. Tanaka
2. 発表標題 Transfer characteristics of transition metal dichalcogenide transistors with V <sub>O2</sub> contacts
3. 学会等名 Recent Progress on Graphene and 2D Materials Research 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本真人、野内亮、神吉輝夫、中払周、服部梓、谷口尚、渡邊賢司、若山裕、上野啓司、田中秀和
2. 発表標題 V <sub>O2</sub> /遷移金属ダイカルコゲナイド界面におけるフェルミレベルピンニング
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 Boyuan Yu, Mahito Yamamoto, Shingo Genchi, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 The phase transition properties of various thick V <sub>O2</sub> thin films grown on hexagonal boron nitride
3. 学会等名 The 23rd SANKEN International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本真人
2. 発表標題 原子層物質上へのVO2薄膜成長と新奇トランジスタ応用
3. 学会等名 スパッタリングおよびプラズマプロセス技術部会（SP部会） 第162回定例研究会（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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------