

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月25日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14658

研究課題名(和文) 強相関酸化物/原子薄膜半導体ヘテロ構造の創成と急峻スローブトランジスタ応用

研究課題名(英文) Correlated oxides/atomically thin semiconductors heterostructures for steep-slope transistors applications

研究代表者

山本 真人 (Yamamoto, Mahito)

大阪大学・産業科学研究所・助教

研究者番号：00748717

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：トランジスタにおけるオン・オフスイッチの急峻化は、その低消費電力動作に向けて重要な課題の一つである。本研究では、相転移に由来して急峻な抵抗変化を示す強相関酸化物と、どこへでも張り付けられる半導体である原子薄膜半導体とを用いることで新奇ヘテロ構造トランジスタを作製し、急峻スローブスイッチの実現を試みた。具体的には、室温近傍で4桁におよぶ抵抗変化を伴う相転移を示す二酸化バナジウムを電極、優れた半導体特性を示す二セレン化タングステンをチャネルとしたヘテロ構造トランジスタを作製した。このトランジスタにおいて、二酸化バナジウムの熱的相転移に由来する急峻なオン・オフスイッチを実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今後テクノロジーが持続的に発展するためには、テクノロジーの根幹であるトランジスタのさらなる低消費電力化が必要不可欠である。しかし、従来のシリコンを基盤としたMOSFETではその低消費電力化に理論的限界があった。本研究では、強相関酸化物と原子薄膜半導体とのヘテロ構造を用いた新原理トランジスタにおいて、将来的に社会実装に資する低消費電力動作を実現したことに社会的意義がある。一方、強相関酸化物/原子薄膜半導体ヘテロ構造は新奇物性の発現と場となる可能性も大いにあり、本研究はその作製指針を提示した点において学術的に意義がある。

研究成果の概要(英文)：Steep-slope switching is one of the most important challenges toward the realization of the low power consumption transistors. Here we demonstrated steep-slope transistors based on heterostructures of correlated oxides that show a large resistance change due to the phase transition and atomically thin semiconductors that can be transferred onto any surfaces. In particular, we fabricated transistors by employing vanadium dioxide as an contact electrode and tungsten diselenide as a channel. In the heterostructure transistor, we observed steep-slope switching, resulting from the thermal phase transition of vanadium dioxide.

研究分野：デバイス物理

キーワード：原子薄膜半導体 強相関酸化物 二次元材料 急峻スローブトランジスタ ヘテロ構造 相転移材料
二酸化バナジウム 遷移金属ダイカルコゲナイド

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1)2015年に米国の研究グループによって、シリコン MOSFET の電極として急峻な金属—絶縁体相転移を示す強相関酸化物である二酸化バナジウム(VO_2)を用いた、新奇急峻スロープトランジスタが提案された。同研究グループは別々の基板上に準備された VO_2 と MOSFET とをワイヤーでつないだハイブリッド構造を作製し、実際に MOSFET の理論限界を超える急峻なスイッチング特性を観測した。しかし、このようなハイブリッド構造は集積化・微細化が難しく、実用化へ向けては半導体チャネルと VO_2 とを直接重ねたモノリシック型のトランジスタを作製する必要があった。

(2) VO_2 は巨大な抵抗変化を伴う金属—絶縁体相転移を示すため、スイッチ素子やセンサーなどへのデバイス応用が期待されている材料である。 VO_2 の応用に向けては基板上に薄膜成長させる必要があるが、これまでの研究では主にサファイアや酸化チタンなどの酸化物単結晶が基板として用いられてきた。しかし、 VO_2 のデバイス応用の幅を広げるためには、これらの“硬い”基板だけではなく、“柔らかい”基板上へと薄膜成長させる必要性があった。

2. 研究の目的

(1)本研究では、二次元半導体と VO_2 とのヘテロ構造を基盤としたモノリシック型トランジスタを作製し、そのトランジスタにおいて既存の半導体トランジスタを超える急峻なスイッチングの実現を目的とした。

(2)本研究では、柔軟性、化学的安定性、優れた絶縁性を示す層状物質である六方晶窒化ホウ素 (hBN) を基板として採用し、 VO_2 の薄膜成長を試みた。

3. 研究の方法

(1)本研究では、光学顕微鏡とマイクロマニピュレータを組み合わせた原子薄膜転写装置を導入し、その装置を用いて二次元半導体である二セレン化タングステン (WSe_2) をマイクロ細線状に加工した VO_2 に直接転写することでヘテロ構造を形成した。さらに、そのヘテロ構造上に hBN を転写しゲート誘電体として利用することでトランジスタを作製した。作製したトランジスタの輸送特性を様々な温度およびドレイン電圧下で測り、そのスイッチング特性を調べた。

(2)本研究では、シリコン/酸化シリコン基板上に hBN 薄膜を機械剥離し、その上でパルスレーザー堆積法 (PLD) によって VO_2 の薄膜成長を行った。作製した hBN 上の VO_2 薄膜に対して、ラマン分光法、走査型透過電子顕微鏡 (STEM)、原子間力顕微鏡 (AFM) によって結晶性、および構造の評価を行った。さらに、電極を作製し電気抵抗値の温度依存性を調べた。

4. 研究成果

(1) VO_2/WSe_2 ヘテロ構造トランジスタにおいて両極性のオン・オフ動作を観測し、 VO_2 が WSe_2 トランジスタの電極として作用することを明らかにした。この VO_2 を電極に持つ WSe_2 トランジスタは、室温においては比較的緩慢なスイッチング特性を示す一方、 VO_2 の相転移温度 (67°C) 近傍では、ゲート電圧印可とともに急激なドレイン電流値の増加を示した (図 1)。これはドレイン電流によって VO_2 が自己加熱され熱的相転移が誘起されたことに由来するもので、本研究において初めて、モノリシック型の VO_2 を電極とする急峻スロープトランジスタの実現に成功した。

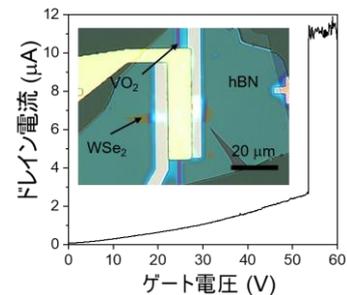


図 1. VO_2 を電極として持つ WSe_2 トランジスタの輸送特性。

(2)ラマン分光法および STEM 観察によって、hBN 基板上に PLD 成長させた VO_2 薄膜が優れた結晶性を示すことを明らかにした。また、AFM 観察によって、hBN 上の VO_2 薄膜は多結晶性であるものの、その結晶粒の大きさは数マイクロメートルに及ぶことを見出した。図 2 に示すように hBN 上の VO_2 は、3 桁以上の抵抗変化を伴う金属—絶縁体相転移を示した。この hBN と VO_2 との積層構造をシリコン基板から剥がし、紙やポリマーなどの他の柔軟基板へと移し変えることに成功した。この結果は、hBN を薄膜成長基板として用いることで、 VO_2 を基盤としたペーパーデバイスやフレキシブルデバイスなどの新奇デバイス展開を大いに期待させるものである。

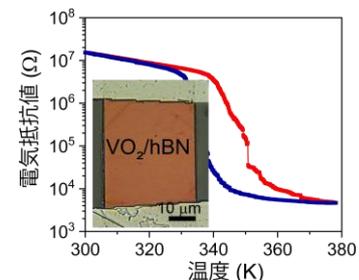


図 2. hBN 上に成長させた VO_2 薄膜の電気抵抗値—温度特性。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 7 件)

1. **M. Yamamoto**, R. Nouchi, T. Kanki, A. N. Hattori, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Ueno, H. Tanaka,

“Gate-tunable thermal metal-insulator transition in VO₂ monolithically integrated into a WSe₂ field-effect transistor”, ACS Appl. Mater. Interfaces 11, 3224 (2019) 査読有.

2. S. Genchi, **M. Yamamoto**, K. Shigematsu, S. Aritomi, R. Nouchi, T. Kanki, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Murakami, H. Tanaka, “Growth of vanadium dioxide thin films on hexagonal boron nitride flakes as transferrable substrates”, Sci. Rep. 9, 2857 (2019) 査読有.

3. D. Kawamoto, A. N. Hattori, **M. Yamamoto**, X. L. Tian, K. Hattori, H. Daimon, H. Tanaka, “Correlation between Ni valence and resistance modulation on a SmNiO₃ chemical transistor”, ACS Appl. Electron. Mater. 1, 82 (2018) 査読有.

4. S. R. Das, K. Wakabayashi, **M. Yamamoto**, K. Tsukagoshi, S. Dutta, “Layer-by-layer oxidation induced electronic properties in transition-metal dichalcogenides”, J. Phys. Chem. C 122, 17001 (2018) 査読有.

5. **M. Yamamoto**, K. Ueno, K. Tsukagoshi. “Pronounced photogating effect in atomically thin WSe₂ with a self-limiting surface oxide layer”, Appl. Phys. Lett. 112, 181902 (2018) 査読有.

6. B. Da, J. Liu, **M. Yamamoto**, *et al.*, “Virtual substrate method for nanomaterials characterization”, Nat. Comm., 8, 15629 (2017) 査読有.

7. **山本真人**, 田中秀和, 「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」, 金属, 88, 112-117 (2018) 査読無.

[学会発表] (計 14 件)

1. **山本真人**, 神吉輝夫, 服部梓, 野内亮, 谷口尚, 渡邊賢司, 上野啓司, 田中秀和, 「VO₂/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」, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 福岡, 2017 年 9 月.

2. Y. Anzai, **M. Yamamoto**, T. Kanki, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsumoto, H. Tanaka, “Effective resistance modulation in VO₂ by gating through hexagonal boron nitride”, The 21st SANKEN International Symposium, Osaka, Japan, January 2018.

3. S. Genchi, **M. Yamamoto**, T. Kanki, K. Watanabe, T. Taniguchi, H. Tanaka, “Growth and characterization of VO₂ on hexagonal boron nitride”, The 21st SANKEN International Symposium, Osaka, Japan, January 2018.

4. **M. Yamamoto**, T. Kanki, A. N. Hattori, R. Nouchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Ueno, H. Tanaka, “Non-Thermionic Switching in an Atomically Thin WSe₂ Transistor with the Phase-Change Material VO₂ Contact”, APS March Meeting 2018, Los Angeles, USA, March 2018.

5. 玄地真悟, **山本真人**, 神吉輝夫, 渡邊賢司, 谷口尚, 田中秀和, 「六方晶窒化ホウ素上における VO₂薄膜の成長と評価」, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 東京, 2018 年 3 月.

6. 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, 「六方晶窒化ホウ素をゲート絶縁体として用いた VO₂ FET における高効率抵抗変調」, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 東京, 2018 年 3 月.

7. **M. Yamamoto**, T. Kanki, A. Hattori, R. Nouchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Ueno H. Tanaka, “Steep-Slope Transistors Based on 2D Semiconductors Contacted with the Phase-Change Material VO₂”, 2018 MRS Spring Meeting & Exhibit, Phoenix, USA, April 2018.

8. 玄地真悟, 重松晃次, 有富翔大, **山本真人**, 神吉輝夫, 渡邊賢司, 谷口尚, 村上恭和, 田中秀和, 「六方晶窒化ホウ素上における VO₂薄膜の成長と評価(2)」, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋, 2018 年 9 月.

9. 安西勇人, **山本真人**, 渡邊賢司, 谷口尚, 田中秀和, 「転写用ポリマー上における六方晶窒化ホウ素膜厚の光学的同定」, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋, 2018 年 9 月.

10. S. Genchi, K. Shigematsu, S. Aritomi, **M. Yamamoto**, T. Kanki, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Murakami, H. Tanaka, “Growth and characterization of VO₂ thin films on hexagonal boron nitride”, 5th Interactive Materials Science Cadet International Symposium 2018, Osaka, Japan, December 2018.

11. S. Genchi, K. Shigematsu, S. Aritomi, **M. Yamamoto**, T. Kanki, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Murakami, H. Tanaka, “Growth and characterization of VO₂ thin films on hexagonal boron nitride”, The 22nd SANKEN International Symposium, Osaka, Japan, January 2019.

12. Y. Anzai, **M. Yamamoto**, T. Kanki, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsumoto, H. Tanaka, “Color thickness identification of hexagonal boron nitride supported on a transfer polymer”, The 22nd SANKEN International Symposium, Osaka, Japan, January 2019.

13. **M. Yamamoto**, R. Nouchi, T. Kanki, A. N. Hattori, S. Nakaharai, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Wakayama, K. Ueno, H. Tanaka, “Carrier injection from VO₂ into MoS₂ and WSe₂”, Hsinchu, Taiwan, January 2019.

14. 玄地 真悟、**山本 真人**、神吉 輝夫、渡邊 賢司、谷口 尚、田中 秀和、「六方晶窒化ホウ素上 VO₂ の金属絶縁体相転移に伴う抵抗変化の素子サイズ依存性」、第 66 回応用物理学会春季学術講演会、東京、2019 年 3 月。

[その他]

新聞報道

1. 山本真人, 田中秀和, 「様々な材料に貼り付け可能な層状物質上で機能性酸化物成長に成功」, 日本経済新聞電子版, 2018 年 12 月 20 日、「二酸化バナジウム薄膜、あらゆる基板上に搭載 阪大が手法開発」, 日刊工業新聞, 2018 年 12 月 25 日.