

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 15 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02615

研究課題名(和文) ゲート誘起相転移の律速過程解明による相転移トランジスタ高速化の研究

研究課題名(英文) Study on the rate limiting process of the gate-induced phase transition and the speed limit of the phase transition transistor

研究代表者

矢嶋 起彬 (Yajima, Takeaki)

九州大学・システム情報科学研究所・准教授

研究者番号：10644346

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,790,000円

研究成果の概要(和文)：金属絶縁体転移材料であるVO₂をチャンネルとする3端子素子の微細化と高速化に関する研究を行った。長チャンネルデバイスでは、ゲート電圧に対して連続的な転移が見られ、ドレイン電圧を大きくするとジュール熱効果で転移が急峻化する。一方で微細化すると、ドレイン電圧にかかわらず転移が急峻化(不連続化)し、VO₂チャンネルの転移がシングルドメイン化したことが分かった。さらに過渡特性では、ゲート電圧に対して指数関数的に高速化する様子が見られ、その変化量は極めて大きくVO₂の集団性を考慮しなければ説明がつかないことが分かった。以上のようにVO₂の3端子デバイスの静特性と過渡特性に対して、包括的な理解が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ゲート電圧によって誘起される相転移について、ドレイン電圧の影響、微細化の影響、過渡特性といった3つの側面から包括的な理解が得られた。近年液体ゲートを用いた相転移の研究が進んでいるが、イオン液体の取り扱いの難しさからこのような系統的な実験は進んでいないのが現状である。本研究は、我々独自の固体ゲート素子を用いることで、相転移チャンネルを用いた3端子素子についての理論・モデルを構築し、実験的に検証することで、今後の3端子デバイス研究の基盤を構築するものだといえる。

研究成果の概要(英文)：We have studied miniaturization and speed-up of 3-terminal devices using VO₂, a metal-insulator transition material, as a channel. In long-channel devices, the transition is continuous with respect to the gate voltage, and as the drain voltage is increased, the transition steepens due to Joule heating effects. On the other hand, when the device is miniaturized, the transition becomes steeper (discontinuous) regardless of the drain voltage, indicating that the transition of the VO₂ channel has become single-domain. Furthermore, the transient characteristics show an exponential increase in speed with gate voltage, and the amount of change is extremely large and cannot be explained without considering the collective nature of VO₂. As described above, a comprehensive understanding of the static and transient characteristics of VO₂ 3-terminal devices was obtained.

研究分野：酸化物エレクトロニクス

キーワード：金属絶縁体転移 微細化 3端子素子 モットトランジスタ 過渡特性 ドメイン成長

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

AI や 5G といった新技術によって情報量が爆発的に増加しており、2020 年の総発電量の 20% が IT 機器で消費されると言われている (三菱総研)。情報処理の低消費電力化が喫緊の課題であり、そのためにはトランジスタの低電圧化が極めて有効である。しかしシリコントランジスタの低電圧化は、電子の熱励起で決まる限界に達している。この限界を破るため、トンネル電流を用いた TFET や、強誘電材料の負性容量を用いた NC-FET 等、新原理に基づくトランジスタが世界中の大学・企業で研究されている。しかし TFET は ON 電流が小さく、NC-FET は極薄強誘電材料の特性ばらつきが大きいという、本質的な問題をそれぞれ抱えている。

モットトランジスタは、チャンネル内部の金属絶縁体転移で ON/OFF スwitching を行うトランジスタであり、上記の ON 電流やばらつきの問題が少ない。低電圧トランジスタの理想的な候補として古くから注目されており、相転移材料研究においても一つのマイルストーンとなってきた [C. Ahn, Nature 2003]。特に酸化バナジウム VO₂ は、室温以上の温度域で急峻な金属絶縁体転移を示すことから、モットトランジスタのチャンネル材料として Perdue 大の Ramanathan グループや IBM の Parkin グループを初め世界中で利用されてきた。我々は、研究開始当初、VO₂ チャンネルに TiO₂ ゲートを組み合わせた固体デバイスで、世界で初めて明確なモットトランジスタ動作に成功していた [T. Yajima, Nature Commun. 2015]。実際に動作するデバイスを手にしたことで、世界に先駆けてモットトランジスタの研究を進め、モットトランジスタの「静特性」が分かってきた状態であった。

一方で、実際のデバイス動作では静特性以上に「過渡特性」が重要である。過渡特性によって、デバイスの速度や低消費電力化の限界が決まる。残念ながら、申請者が作製したモットトランジスタは遅い。これは、1ps 前後で高速転移する VO₂ の光誘起金属絶縁体転移と相いれない [Cavalleri, PRB 2004]。「何がゲート誘起相転移を律速しているのか？」という問いは、モットトランジスタ研究において本質的である。

2. 研究の目的

モットトランジスタのスイッチング速度を、ゲート電圧や測定温度を変えながら系統的に評価すること、そしてそこからゲート誘起相転移の律速過程を解明することを目的とする。金属絶縁体転移の速度に関しては、レーザー誘起相転移や、ジュール熱による熱暴走を利用した転移なので報告があるが、純粋に温度に対して転移速度を系統的に評価した研究は存在しない。ゲート誘起相転移の速度と律速過程を明らかにできれば、ゲート電圧をそれと等価な温度変化に換算することで、温度に対する転移速度についても知見を得ることができる。

3. 研究の方法

< 3 端子素子の作製 >

モットトランジスタは、Nb ドープ TiO₂(101) 基板をゲート電極、基板の上にエピタキシャル成長させた単結晶 VO₂ 薄膜 (7nm) をチャンネルとする、バックゲート構造を採用した。図 1a にバンドダイアグラムを示す。Nb ドープ TiO₂ 基板の界面近傍数十 nm は空乏化されるため、この空乏層をゲート絶縁層として利用することができる。空乏層を介して Nb ドープ TiO₂ 基板に正のゲート電圧を印可すると、空乏層が拡大するとともに VO₂ チャンネル内に電子が蓄積され、これによって VO₂ の金属転移を誘起することができる。図 1b にデバイスの構造を示す。VO₂ チャンネル上に Au 電極を蒸着し、ソース・ドレイン電極を作成した。デバイス加工にはフォトリソグラフィを使用し、チャンネル長は 50μm、チャンネル幅は 35μm である。

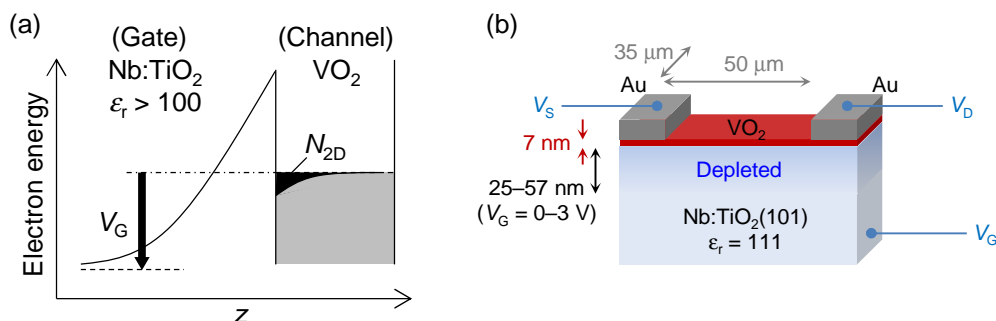


図1: (a) VO₂チャンネル 3 端子素子のバンド図と、(b) 素子構造。

<電気測定による過渡特性評価>

測定はクライオスタット内部で行い、転移温度より少し低い温度で温度を固定し、ステップ関数状の温度を印可することでゲート誘起相転移の過渡特性を測定した。V02の金属転移にもなってチャンネル電流が上昇していくので、このチャンネル電流の時間変化をオシロスコープでモニターすることで過渡特性のデータを得ることができる。ゲート電圧や測定温度といったパラメータに対するスイッチング速度の変化から、ゲート誘起相転移の過渡特性の物理モデルを構築する。また時間に対して得られた過渡特性の波形が説明可能かどうかを確認する。そして物理モデルから律速過程を特定し、スイッチング速度向上のために必要な条件を明らかにした。

<光学顕微鏡による過渡特性評価>

相転移の過渡応答を、電気測定と同時に直接観測する方法として、光学顕微鏡による高速道が撮影（取り込み間隔 10ms）を行った。液体窒素を用いた温調ステージに3端子素子をセットし、各電極に配線をしてステージの外に設置した各種電気測定装置に接続した。そして温度および印加電圧を変えながら、V02チャンネルの映像をリアルタイム測定した。V02薄膜の基板には、両面研磨のNb:TiO₂基板を用い、試料背後から光を照射する透過配置で光学顕微鏡像を取得した。V02チャンネルは、金属化した部分が黒くなるので、本測定からV02チャンネルの転移の振舞を直接調べることができる。

4. 研究成果

長チャンネルデバイスの伝達特性を図2(a)に示す。ゲート電圧を印可することで、チャンネル電流が3桁上昇しており、V02チャンネルが絶縁状態から金属状態へと転移していることが分かる。この際、ゲートリーク電流はドレイン電流と比較して無視できるほど小さく、測定には影響していないことが分かる。

このデバイスを利用して、ゲート誘起相転移の過渡特性の測定を行った結果を図2(b)に示す。ゲート電圧印可と同時にチャンネル電流が上昇し始め、金属転移が誘起されていることが分かる。転移の時間スケールはミリ秒以上であり、チャンネルゲート界面に電荷が蓄積されるためのRC時定数に比べて十分に長い。つまり観察しているチャンネル電流の上昇は、ゲート界面への電荷蓄積ではなく、V02チャンネルの金属転移に起因するものである。

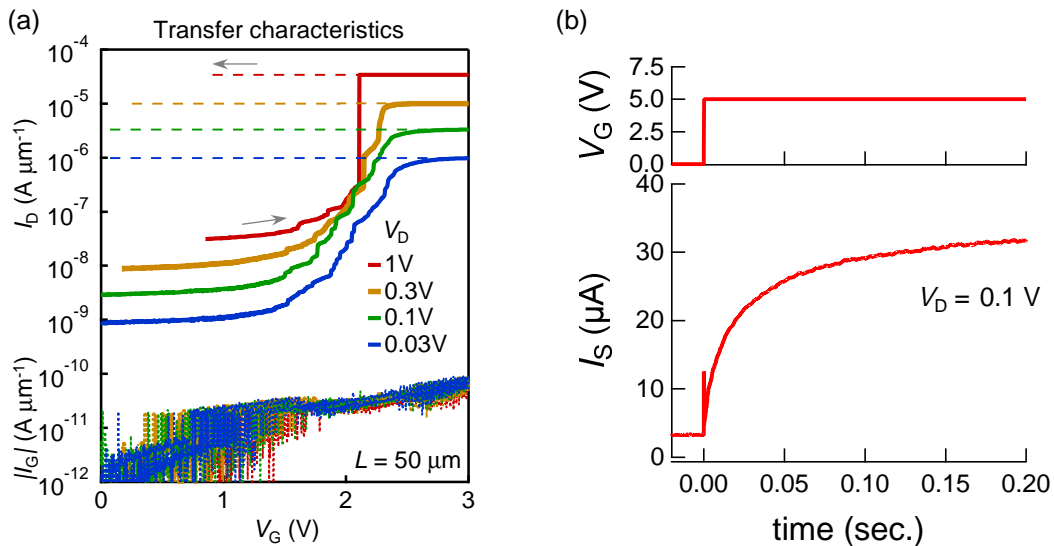


図2: (a) V02チャンネル3端子素子の伝達特性と、(b) 代表的な過渡特性。

ゲート電圧や測定温度を変化させて過渡特性を測定したところ、特にゲート電圧の影響が顕著で、ゲート電圧の上昇とともに劇的に転移速度が向上することが分かった。ゲート電圧印可直後の時間に対するチャンネル電流の傾きを、界面の電荷蓄積量に対してプロットしたものが図3である。電荷蓄積量に対して指数関数的に転移速度が上昇していく様子が見える。

金属転移を、あるエネルギー障壁の熱励起プロセスだと考えると、ゲートによる電子蓄積によって転移速度が上昇したのは、エネルギー障壁の高さが減少したためだと考えられる。電子蓄積当たりの障壁低減量は、図3の傾きから計算することができる。その結果、蓄積電荷量 $10^{13}/\text{cm}^2$ 当たりのエネルギー障壁低減量は $500 k_B$ Jであった。 k_B はボルツマン定数である。比較対象として、蓄積電荷量 $10^{13}/\text{cm}^2$ あたり、絶縁状態に対して金属状態の自由エネルギーがどれくらい下がるかは文献値から見積もることができ、バナジウム1原子あたり $0.2 k_B$ Jである。つまり自由エネルギー変化量に比べて、一見すると、エネルギー障壁の低減量が数桁大きいように見える。これはつまり、金属転移を律速するエネルギー障壁がバナジウム1原子あたりのものではなく、

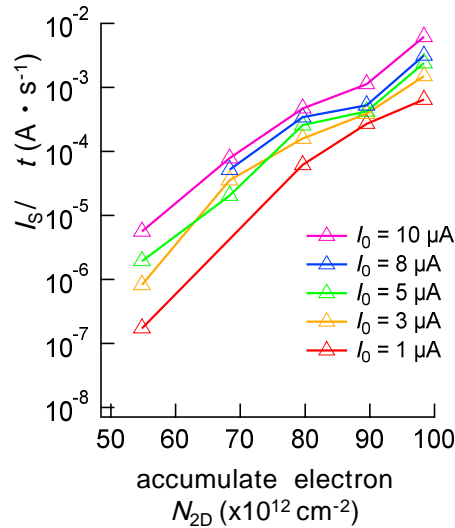


図3: ゲート誘起転移の速度と、蓄積電子量との関係性。転移速度は、ステップ関数上にゲート電圧を印加した直後のチャンネル電流の時間に対する傾きから算出した。複数のプロットは、異なる初期状態 (I_0) に対応している。

V02の集団に対するものであることを意味している。一般的にエネルギー障壁の低減量が、自由エネルギー変化量より小さいことを考えると、金属転移の過渡特性を支配する集団サイズは少なくともバナジウム原子 2500 個分であるといえる。そしてこのエネルギー障壁の低減量は、測定温度には依存しない。

以上をまとめると、V02の金属転移の速度は、印可するゲート電圧の大きさによって、劇的に上昇することが分かった。そしてこれは、金属転移が個別のV02格子ではなく、少なくともバナジウム原子 2500 個以上のV02の集団によって律速されているためであることが分かった。

さらに金属転移の律速過程について理解を深めるため、チャンネル電流の時間に対する波形形状に着目した。しかしチャンネル電流自体は、チャンネル内部の転移のパコーレーションに強く影響されるため、解析対象として不適切である。そこでチャンネル電流の代わりに金属ドメインの面積比の時間変化を解析することにした。チャンネル電流を金属ドメイン面積に変換するには、両者の関係性を明らかにしなければならない。そこで金属ドメイン面積を実験的に明らかにするため、図4のように過渡特性の最中のチャンネルを光学顕微鏡によって観察した。その結果、分解能的に金属ドメインの直接観察はできないものの、金属転移によってチャンネルの平均的な明るさが暗くなるのが分かり、その暗さから金属ドメインの面積を算出できることが分かった。そしてそこからチャンネル電流と金属ドメイン面積の関係性をプロットした結果が図5である。この関係性を用いて、チャンネル電流を金属ドメイン面積に変換することができる。その結果、金属ドメイン面積の過渡特性のグラフは、図6に示すように時間に対する対数関数で表されることが分かった。過去の文献から、時間に対する対数的振舞は、熱活性型の核成長プロセスに特徴的なもので

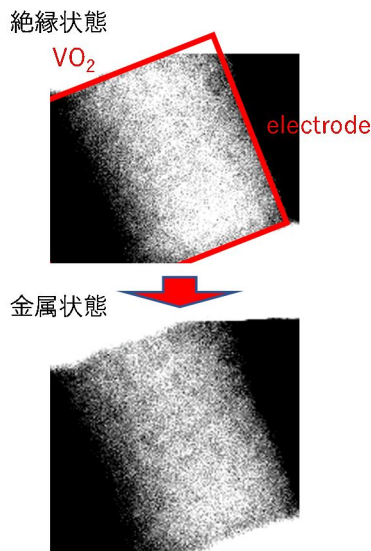


図4: ゲート誘起相転移による、透過光学顕微鏡像の変化。コントラストを増幅した結果、一部の領域では画像がブラックアウトしている。

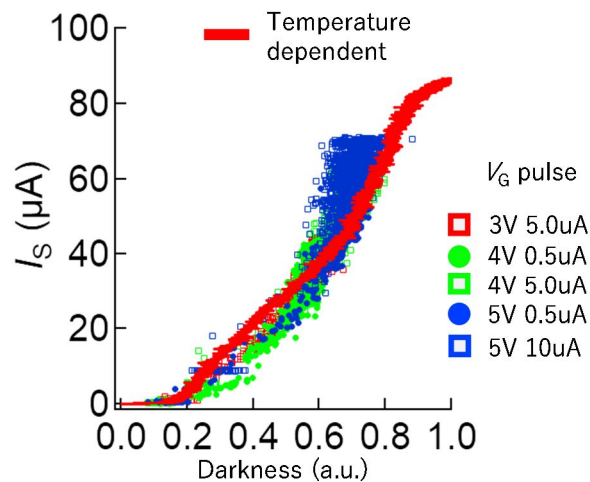


図5: ゲート誘起相転移（過渡特性）と、温度誘起相転移における、チャンネル電流と等価光学顕微鏡像の明るさの関係性。

ある。

以上の結果をまとめると、V02のゲート誘起相転移の律速過程は、熱活性型の核成長プロセスであり、その熱活性障壁の大きさは少なくともバナジウム原子2500個分のV02の集団を反映したものである。その結果、わずかな外場(ゲート電圧)の変化に対して、熱活性障壁が大きく変化し、転移の速度が劇的に向上することが分かった。つまり、3端子素子においてゲート電圧がチャンネルの相転移に与える影響は一般的に小さいと考えられているが、相転移の速度に与える影響は極めて大きいことを明らかにした。

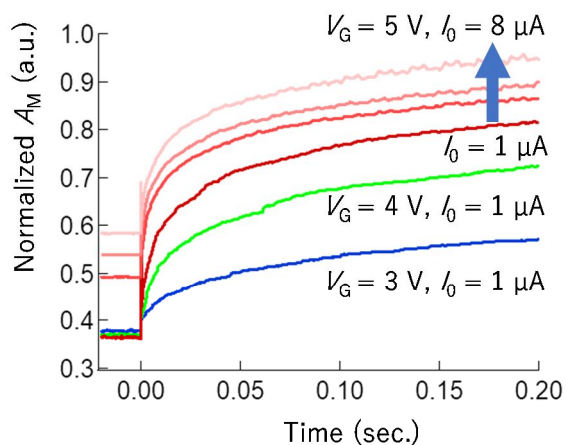


図6: ゲート誘起転移の過渡特性。光学顕微鏡像の結果を用いてチャンネル電流を金属ドメイン領域AMに変換してプロットすると、すべてのプロットが時間に対する対数関数で表されることがわかる。

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 2件）

1. 著者名 Yajima Takeaki, Nishimura Tomonori, Tanaka Takahisa, Uchida Ken, Toriumi Akira	4. 巻 6
2. 論文標題 Modulation of V02 Metal-Insulator Transition by Ferroelectric HfO2 Gate Insulator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 1901356 ~ 1901356
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/aelm.201901356	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 Yajima Takeaki, Toriumi Akira	4. 巻 8
2. 論文標題 Observation of the Pinch Off Effect during Electrostatically Gating the Metal Insulator Transition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 2100842 ~ 2100842
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/aelm.202100842	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8件（うち招待講演 4件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Takeaki Yajima, Takahisa Tanaka, Ken Uchida, and Akira Toriumi
2. 発表標題 Operation Principle of V02 Mott Transistor: Local Electrostatic Modulation and Global Avalanche Effect
3. 学会等名 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takeaki Yajima
2. 発表標題 Ultra-sharp three-terminal switch using nano-scale phase transition material
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takeaki Yajima
2. 発表標題 Codesign of materials and circuits for neuromorphic edge computing
3. 学会等名 ナノ学会 合同シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takeaki Yajima
2. 発表標題 Next-generation switching devices based on metal-insulator transitions
3. 学会等名 ISPlasma2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takeaki Yajima
2. 発表標題 持続可能社会のためのニューロモルフィックデバイス設計
3. 学会等名 学振R031ハイブリッド量子ナノ技術委員会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浜砂 智, パティ サトウヤ プラカシュ, 矢嶋 昶彬
2. 発表標題 VO ₂ 金属絶縁体転移における静特性と過渡特性の結びつき
3. 学会等名 春季応用物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浜砂 智, パティ サトウヤ ブラカシュ, 矢嶋 昶彬
2. 発表標題 VO2三端子素子における絶縁転移の速度の研究
3. 学会等名 秋季応用物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浜砂 智, パティ サトウヤ ブラカシュ, 矢嶋 昶彬
2. 発表標題 VO2三端子素子におけるゲート誘起相転移と温度誘起相転移の等価性
3. 学会等名 春季応用物理学会
4. 発表年 2023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