

令和 2 年 4 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04812

研究課題名（和文）ゲート誘起相転移を用いた低電圧トランジスタのデバイス物理構築

研究課題名（英文）Device physics of low-voltage transistors using gate-induced phase transitions

研究代表者

矢嶋 赳彬 (Yajima, Takeaki)

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：10644346

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,000,000円

研究成果の概要（和文）：VO₂チャンネルの相転移トランジスタの微細化を行った。電子線リソグラフィを用いて、VO₂チャンネル上のソースとドレインの電極間距離を250nmまで縮めたデバイスを作製し、トランジスタ特性の評価を行った。その結果、不連続なスイッチングを示すシングルドメイン動作に成功した。これはチャンネルの微細化によって、相転移の不均質性を抑制し、材料本来の特長を生かしたデバイス動作に成功したことを意味している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

相転移を利用した低電圧動作トランジスタを作製する際に、相転移に一般的な空間的不均質性をどう抑制するかは本質的な課題であった。今回の結果は、この課題を解決した点で、相転移トランジスタ研究の一つのマイルストーンだと言える。また今回作成したシングルドメインデバイスは、相転移トランジスタのデバイス物理を構築するための重要な基本デバイスとなることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：The VO₂-channel transistor with metal-insulator transition was scaled down. A discontinuous switching with the single domain operation was successfully demonstrated. The results indicate the inhomogeneity of the phase transition was suppressed and the intrinsic property of the material was successfully utilized in the device operation.

研究分野：酸化物エレクトロニクス

キーワード：酸化バナジウム 金属絶縁体転移 モットトランジスタ シングルドメイン 微細化 スケーリング

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、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

集積回路の低消費電力化のため、0.5V 未満の低電圧で動作するトランジスタの開発が急務となっている。トンネル電流を用いたトランジスタが有望視されているものの、従来のトランジスタに比べて ON 電流が小さいという致命的な問題を抱えている。別のアプローチとして、トランジスタのチャンネルに相転移材料を利用し、相転移の超急峻なスイッチング特性によって低電圧動作を実現しようとするものがある("モットトランジスタ")。相転移材料の電子濃度が大きい場合、ON 電流が小さいという問題も発生しない。

相転移を利用してトランジスタを低電圧化するためには、相転移の急峻さが要となる。数ある相転移材料の中でも酸化バナジウム VO_2 は、電子ドーピングによって室温近傍で他の材料より急峻な転移を示すことから、チャンネル材料として有望視されている。チャンネル材料として応用するにはさらに急峻さを高める必要があり、Harvard 大の Hoffman グループを始め世界各国 10 以上の研究グループが VO_2 の相転移過程の研究を行ってきた。その中で応募者は、転移中に膜中に発生する格子応力を制御することが、より急峻な相転移のために不可欠であることを明らかにした。そして応募者はこの急峻な相転移によって、固体素子で初めて相転移トランジスタを室温動作させることに成功した(図 1)。さらに温度や印加電圧といった外部パラメータの影響を系統的に調べることで、観察された相転移が、トランジスタの蓄積電荷によるものであることを明らかにしてきた。一方で、従来のトランジスタでは見られない特性も観察されており、例えばゲート電圧によって転移する領域が界面から遠く離れた場所まで伝播したり、ゲート電圧に対する相転移のタイミングが大幅に遅れるなど、相転移を取り入れた新しいデバイス物理が必要とされている。また期待されていた低電圧動作も見られず、本当に相転移によってトランジスタを低電圧化できるのか明らかでない。相転移トランジスタの固体室温動作が実証された今こそ、その素子を活用してこれらの問題に取り組んでいく必要がある。

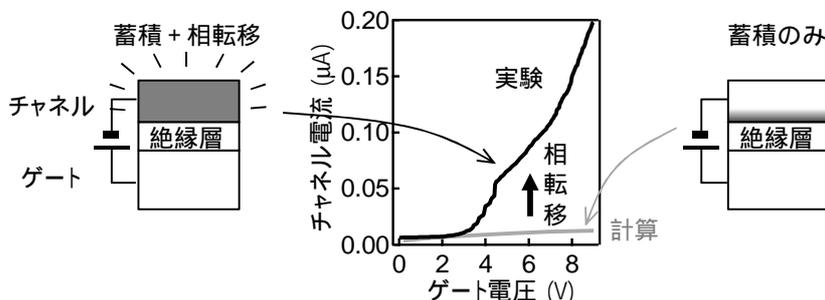


図1: 応募者が作製した VO_2 をチャンネルとする相転移トランジスタの伝達特性[研究業績6]。ゲート電圧による電子蓄積(右図)に加えて、 VO_2 チャンネルの相転移が誘起されることで(左図)、ゲート電圧の効果が増幅される。

2. 研究の目的

以上のような背景から、本研究は応募者が動作実証してきた VO_2 チャンネルのトランジスタを用いて、相転移を取り入れた新しいデバイス物理を構築し、それによって 0.5V 未満での低電圧動作を実現することを目的とする。

3. 研究の方法

図 2a に示す VO_2 チャンネルのバックゲート型トランジスタを作製した。 VO_2 薄膜はパルスレーザー堆積法によって、Nb ドープ $\text{TiO}_2(101)$ 基板上に堆積し、厚みは 6nm のエピタキシャル薄膜とした。フォトリソグラフィまたは電子線リソグラフィと、ウェットエッチングによって、Au 電極と VO_2 薄膜とを加工した。 $\text{VO}_2/\text{Nb}:\text{TiO}_2$ のバンドダイアグラムを図 2b に示す。 $\text{Nb}:\text{TiO}_2$ 基板はバックゲート電極として働くが、界面が空乏化され、この空乏層がゲート絶縁層として機能する。基板にゲート電圧を印加すると、空乏層が拡がり、 VO_2 チャンネルに高濃度の電子が蓄積される。これによって VO_2 の金属転移をひきおこすのが、本研究の相転移トランジスタである。研究では、長チャンネルデバイスと短チャンネルデバイスをそれぞれ作製し、系統的なデバイス特性の評価を行った。

(1) 長チャンネルデバイスについて

ソースとドレインの電極間距離が 50 μm のデバイスでは、チャンネル内部の相転移の不均質性によって、急峻なスイッチングは妨げられる。この不均質性は相転移に本質的な特製ではあるが、これまでではこれがゲート電圧効果に勝っていたため、ゲート電圧だけで完全な相転移を引き起こすことができず、系統的なデバイス評価ができる状態になかった。そこで本研究では、 VO_2 チャンネルの均質性を高め、ゲート電圧だけで完全な相転移を引き起こすことができるデバイスを

実現し、それを用いて長チャネルの相転移トランジスタのデバイス物理を明らかにしようとした。

(2) 短チャネルデバイスについて

ソースとドレインの電極間距離を、電子線リソグラフィによって 240nm まで縮めることで、相転移の不均質性を抑制し、相転移による急峻さだけをとりだした。これによって相転移本来の急峻性を生かした低電圧トランジスタを実現しようとした。

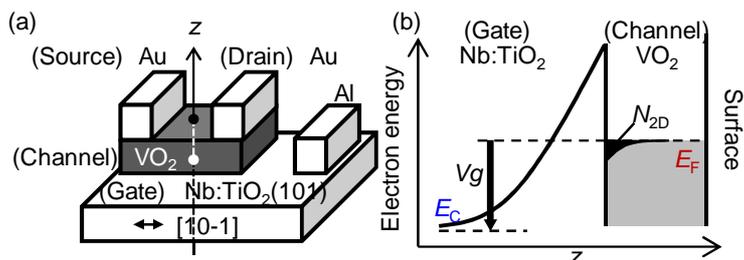


図2: The schematic illustrations of (a) the VO₂ channel transistor and (b) the band diagram.

4. 研究成果

(1) 長チャネルデバイスについて

まずは VO₂ 製膜条件の見直しを行い、より均質な相転移を実現することを目指した。その結果、基板をホルダーに取り付ける際の銀ペーストの焼成条件を改善し、製膜時の温度の制御性を改善することによって、相転移が均質化し、より急峻な相転移特性が得られることが分かった。この VO₂ チャンネルを用いてトランジスタ特性を測定することで、相転移トランジスタの長チャネル特性を系統的に明らかにできると考えた。

まず相転移がより均質化したことで、図 3a のように、2V 程度の比較的小さなゲート電圧で絶縁状態から金属状態まで変化させることができるようになり、ゲート誘起で 3 桁の抵抗変化を引き起こすことに成功した。これはゲート電圧降下が界面近傍の VO₂ だけでなく、チャンネル全体の VO₂ を金属転移させていることの明確な証拠である。

さらに様々なパラメータを変化させたところ、ドレイン電圧がスイッチング特性に劇的に影響することを発見した。詳細な実験・解析の結果、ドレイン電圧がある程度以上大きいところでは、わずかに残っていた相転移の不均質性が不安定化して、長チャネルデバイスであるにもかかわらずゲート電圧に対して完全に不連続なスイッチングを引き起こすことが明らかになった。さらに実験的に得られたこの伝達特性を、シミュレーションによって再現することに成功し、長チャネルデバイスの完全なデバイスモデルを構築することに成功した。当初は 0.5V というゲート電圧目標を立てていたが、このようにドレイン電圧を大きくすることで相共存状態を不安定化すれば、それよりはるかに小さいゲート電圧変化によって、相転移を誘起できることを明らかにした。

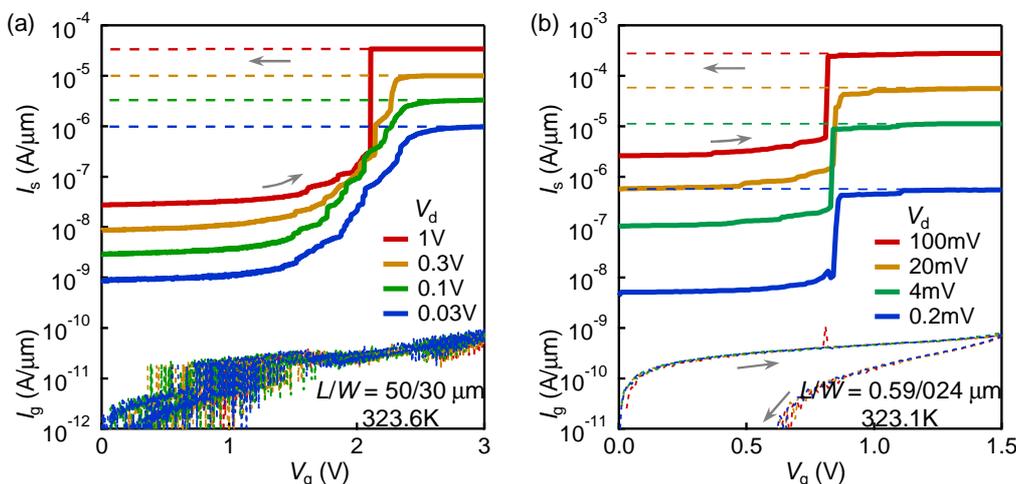


図3: (a)長チャネルデバイスの伝達特性と、(b)短チャネルデバイスの伝達特性。

(2) 短チャネルデバイスについて

電子線リソグラフィを用いて、VO₂ チャンネル上のソース電極とドレイン電極の間隔を 240nm まで

で縮めた。その結果、それまでゲート電圧に対して連続的にチャネル電流が変化していたのが、図 3b に示すように、完全に不連続にジャンプすることが分かった。またジャンプの前後の電流値は、V02 チャネルが完全絶縁状態の値と完全金属状態の値にほぼ一致しており、ゲート電圧によって絶縁相から金属相へ切り替わる 2 値を実現した。これは V02 相転移の長さスケール未満にチャネルが微細化したことによって、相転移の不均質性をほぼ完全に抑制することに成功したことを意味している。

またドレイン電圧を変化させても、スイッチングの閾値ゲート電圧が変化しなかったことから、ドレイン電圧によるジュール熱は殆ど影響していないことも明らかにした。本結果は、240um 程度の微細化によって V02 チャネルが相転移に対してシングルドメイン化することを意味しており、V02 を用いたトランジスタの研究を、相転移の不均質性の影響を受けずに研究できる実験プラットフォームとなると期待している。また当初は 0.5V というゲート電圧目標を立てていたが、このようにデバイスを相転移の長さスケールにまで微細化するだけでスイッチングが急峻化し、それよりはるかに小さいゲート電圧変化によって、相転移を誘起できることを明らかにした。

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 Yajima Takeaki, Nishimura Tomonori, Tanaka Takahisa, Uchida Ken, Toriumi Akira	4. 巻 Early view
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 T., Tanaka T., Samata Y., Uchida K., Toriumi A.	4. 巻 19
2. 論文標題 High-speed low-energy heat signal processing via digital-compatible binary switch with metal-insulator transitions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEDM	6. 最初と最後の頁 903-906
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IEDM19573.2019.8993502	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9件（うち招待講演 3件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 矢嶋 起彬
2. 発表標題 相転移材料によって開かれる新しい電子デバイスと回路の可能性
3. 学会等名 電気学会/ナノエレクトロニクス新機能創出・集積化技術専門委員会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 矢嶋 起彬
2. 発表標題 相転移現象によって開かれる新しい電子デバイスと回路の可能性
3. 学会等名 第6回 酸化物研究の新機軸に向けた学際討論会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 矢嶋 起彬
2. 発表標題 超低電圧動作を可能にするV02モットトランジスタの設計指針
3. 学会等名 秋季応用物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 矢嶋 起彬
2. 発表標題 非平衡状態を活用したV02相転移トランジスタの急峻スイッチング動作
3. 学会等名 秋季応用物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takeaki Yajima
2. 発表標題 New Operation Mode of V02-Channel Mott Transistors for Ultra-Sharp ON/OFF Switching
3. 学会等名 SSDM2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takeaki Yajima
2. 発表標題 High-speed low-energy heat signal processing via digital-compatible binary switch with metal-insulator transitions
3. 学会等名 IEDM (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeaki Yajima
2. 発表標題 Impact of Scaling the V02-Channel Mott Transistor below Material Correlation Length
3. 学会等名 SSDM2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeaki Yajima
2. 発表標題 V02 Mott Transistors for Low-Voltage ON/OFF Switching
3. 学会等名 21th International Symposium on Eco-materials Processing and Design (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takeaki Yajima
2. 発表標題 New Operation Mode of V02 Mott Transistors for Ultra-Sharp ON/OFF Switching
3. 学会等名 26TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON OXIDE ELECTRONICS (iWOE 26) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 半導体デバイス	発明者 矢嶋起彬, 田中貴久, 内田建, 鳥海明	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-204806	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------------------------	-----------------------	----