

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17466

研究課題名(和文) V02薄膜の相転移を用いたトランジスタの動作原理解明と低電圧動作実現

研究課題名(英文) Operation mechanism of V02-channel Mott transistors and their low-voltage operation

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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：集積回路の消費電力を下げるため、より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。本研究では酸化バナジウムの金属絶縁体転移を、電界トランジスタのチャネルに埋め込むことで、より急峻なスイッチングを可能にし、それによってトランジスタの低電圧化を行うことを目標とした。トランジスタのゲート電圧によって酸化バナジウムの金属絶縁体転移を誘起することに成功したほか、界面近傍の電子状態評価や、界面近傍とそれ以外の場所との電子的相互作用を詳細に調べることで、従来の電界効果トランジスタには見られない新しい動作メカニズムを解明した。

研究成果の概要(英文)：Today's electronics strongly desires the low-voltage transistors for decreasing the power consumption of the next-generation integrated circuits. This research focused on the novel field-effect transistor which incorporates the metal-insulator transitions of V02 in the transistor channel, and is expected to sharpen the switching slope and achieve the low-voltage operation. The transistor incorporating V02 was successfully demonstrated, and its operation mechanism was elucidated through the evaluation of the local electronic states at the interface as well as the interaction between the interface and the rest of the V02 channel.

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 モット転移 金属絶縁体転移 相転移 電界効果トランジスタ ショットキー接合
酸化物ヘテロ構造 エピタキシャル界面

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いため、ON 電流が小さいという問題も発生しない。

相転移を利用したトランジスタの低電圧動作のためには、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 VO₂ 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 VO₂ の相転移過程の研究を行ってきた。その中で研究代表者は初めて、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。さらにまた研究代表者はこの転移応力制御によって相転移を急峻化することで、固体素子で初めて VO₂ 膜の完全相転移を利用したトランジスタを作製することに成功した。しかし転移のために 9V もの巨大なゲート電圧を必要とし、いかにしてこれを低電圧化するかが喫緊の課題となっている。

そもそも相転移を取り込んだトランジスタを理解するには、従来のトランジスタの知識だけでは不十分である。にも関わらず過去の報告は従来と同じやり方で VO₂ をトランジスタのチャンネルに使用したものが殆どであり (S. Sengupta et al., Appl. Phys. Lett. **99**, 062114 (2011)等) 相転移を利用したトランジスタの動作メカニズムを系統的に調べた例はない。今低電圧動作実現のために最も必要とされているのは、従来のトランジスタの知識に基づきながらも、相転移現象を取り込むための新しい理論的枠組みを作ることだと言える

2. 研究の目的

図 1 に示すように、VO₂ をチャンネルとするトランジスタにおいて、1. チャンネル界面への電子蓄積で界面近傍の VO₂ が相転移し、2. それが膜全体へと伝播する、一連のメカニズムを明らかにし、それを基に動作電圧を低減することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 研究代表者が作製した図 1 (a) の VO₂ チャンネルトランジスタは、図 1 (b) に示すよ

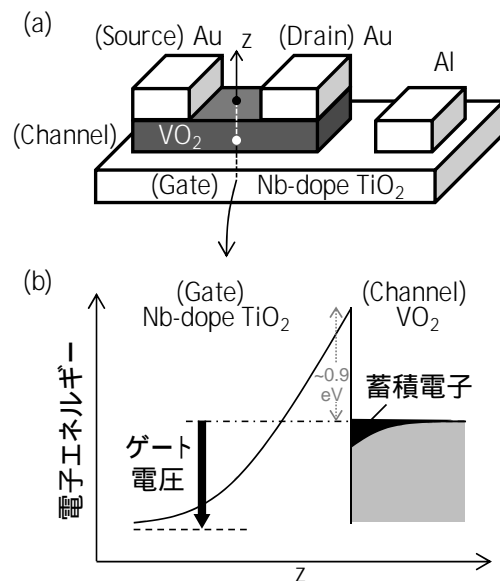


図1. VO₂チャンネルトランジスタの(a)デバイス構造と(b)バンド図。

うに VO₂ 膜と Nb ドープ TiO₂ 基板 (N 型半導体) とのショットキー障壁 (~0.9eV) をゲート絶縁体とする、バックゲート型のトランジスタである。このような構造を用いることで、TiO₂ が持つ極めて高い比誘電率 ~170 をゲート変調に利用でき、蓄積電子量を稼ぐことができる。研究代表者が用いた手法は、この VO₂ チャンネルと Nb ドープ TiO₂ ゲートとの間に形成されるショットキー接合の電気特性を利用して、界面近傍の VO₂ の相転移を膜全体の相転移とは独立に評価することである。この電流特性から得られる障壁高さ、電気容量特性から得られる内臓電位を、温度に対して測定することで、界面近傍の VO₂ の転移温度や転移の急峻さを明らかにしていく。

(2) 不純物 (タングステン) をドーピングした VO₂ を界面に挿入することで、ゲート電圧を印加せずとも界面近傍に電子が蓄積された状態を作り出す。このいわば擬似トランジスタ構造の抵抗の温度依存性から、不純物がドーピングされた界面近傍の相転移と残りの部分の相転移との相互作用を調べ、相転移の伝播のメカニズムを明らかにする。相転移が伝播するかどうかは、蓄積電子が相転移温度を下げようとする局所的な効果と、隣り合う領域を転移させようとする非局所的効果との競合で決まると考えられる。このような点に着目しつつ、実験では膜厚をパラメータとして、転移の伝播を定量的にモデル化する。

4. 研究成果

(1) Nb ドープ TiO₂(101)基板上に VO₂ 単結晶薄膜 6-9nm をパルスレーザー堆積法によって製膜した。このようにして作製したトランジスタは、Nb ドープ TiO₂ 基板

をトランジスタのゲート電極としつつ、VO₂薄膜との界面に形成される空乏層をゲート絶縁層として動作する。転移点近傍で測定することで、ゲート変調が増幅されるモットトランジスタ動作を観察したが[2]、蓄積電子量から予想される程の変調は得られず、界面がゲート変調に影響を及ぼしていることが懸念された。また作製したデバイスは転移温度から離れた温度領域では通常のトランジスタ動作するが、電界効果移動度がホール移動度よりも約1桁小さくなり、界面に蓄積された電子の大部分がチャンネルの電気伝導に寄与していないことが分かった。界面がVO₂モットトランジスタに及ぼす影響をより詳細に明らかにするため、VO₂チャンネルとNbドープTiO₂ゲートとの間に形成されるショットキー接合の特性に着目した。ショットキー接合の特性は、界面極近傍(～nm)のVO₂の状態を反映することから、界面の影響に関して重要な情報を与えると期待できる。その結果、ショットキー接合の電気容量特性から求まる内蔵電位 V_{bi} は温度に対して明確なヒステリシスを示し(図2a)、その温度領域がVO₂チャンネルの転移のヒステリシスとは大きくずれることを見出した(図2b)。これは界面近傍のVO₂がチャンネル全体のVO₂とは独立した界面相を形成していることを意味している。この界面相が蓄積電子の大部分を占有し、ゲート変調を妨げている可能性が示唆された。

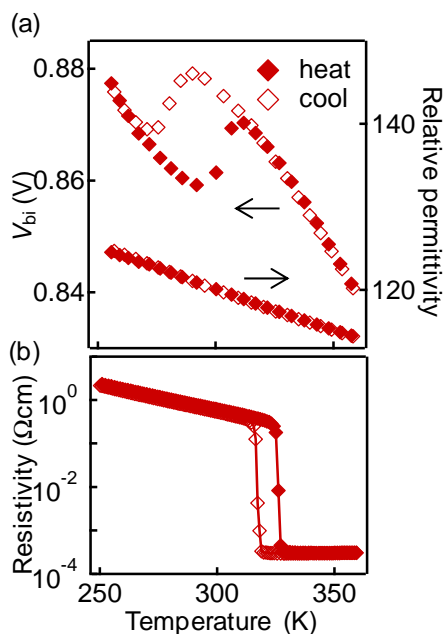


図2. (a) Temperature dependence of V_{bi} and permittivity from the capacitance measurement of VO₂/Nb:TiO₂(101) Schottky junctions. (b) Temperature dependence of resistivity of VO₂ thin film on the TiO₂(101) substrate.

(2)次に、相転移に基づくトランジスタ動作のメカニズムを、実験的に解明した。具体的には、VO₂チャンネルの界面にゲート電圧によって電子が蓄積されたのと同じ状況を、W不純物を用いてVO₂/W:VO₂のヘテロ構造として再現し、ヘテロ構造全体の相転移現象を詳細に評価した。その結果、(1)ヘテロ構造を形成する各層の厚みが十分に小さいと、金属絶縁転移は各層間で分裂することなく、ヘテロ構造全体で一斉に起きること、(2)その時の転移温度は、各層のもともとの転移温度と厚みから計算される加重平均となること、を明らかにした。そしてこれらの実験結果を矛盾なく記述するモデルとして、金属相と絶縁相との相境界が大きなエネルギーをもつモデルを提唱した。この相境界エネルギーを回避するために、金属絶縁転移が各層間で分裂することなく一斉に誘起される。実際に実験的に得られた相境界エネルギーを用いて、ギンツブルグ・ランダウ方程式を解き、電子蓄積層と残りのチャンネル層との相互作用を定量的に記述した[3]。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

- [1] T. Yajima, T. Nishimura, A. Toriumi, Identifying the collective length in VO₂ metal-insulator transitions. *Small* **13**, 1603113 (2017). 査読有
- [2] T. Yajima, T. Nishimura, A. Toriumi, Positive-bias gate-controlled metal-insulator transition in ultrathin VO₂ channels with TiO₂ gate dielectrics. *Nature Commun.* **6**, 10104 (2015). 査読有
- [3] T. Yajima, Y. Ninomiya, T. Nishimura, A. Toriumi, Drastic change in electronic domain structures via strong elastic coupling in VO₂ films. *Phys. Rev. B* **91**, 205102 (2015). 査読有

[学会発表](計9件)

1. T. Yajima, "Time Response Characteristics of the VO₂ Mott Transistor." JSPS Meeting 2016 C2C Program, 2016/11/24, Julich (Germany).
2. T. Yajima, T. Nishimura, A. Toriumi, "Time Response to The Gate Voltage in Strongly Correlated Transistors Using Epitaxial VO₂/TiO₂ Stacks." WOE 23, 2016/10/13, Nanjing (China).
3. T. Yajima, T. Nishimura, A. Toriumi, "Time Response of Gate-Controlled Metal-Insulator Transitions in Ultrathin VO₂ Channels." SSDM 2016, 2016/9/28, Tsukuba International

- Congress Center (Tsukuba).
4. 矢嶋 起彬、西村 知紀、鳥海 明、「VO₂ 薄膜への局所的な不純物ドーピングによる独立フォノンの形成」JSAP Fall Meeting 2016、2016/9/14、朱鷺メッセ(新潟市).
 5. T. Yajima, “Collective Gate Modulation in Mott Transistors with Ultrathin VO₂ Channels.” AWAD 2016, 2016/7/4, Hakodate Kokusai Hotel (Hakodate).
 6. T. Yajima, “Interaction between 2D Electrons and 3D Metal-Insulator Transitions in VO₂-Channel Transistors” CEMS Topical Meeting on Oxide Interfaces, 2017/11/5, Riken (Wako).
 7. T. Yajima, T. Nishimura, A. Toriumi, “Solid-State Operation of Mott Transistors with Ultra-Thin VO₂ Channels.” SSDM 2015, 2015/9/29, Sapporo Convention Center (Sapporo).
 8. T. Yajima, T. Nishimura, A. Toriumi, “Interaction between 2D electrons and 3D metal-insulator transition in VO₂-channel transistors.” ep2ds-21 2015/7/28 Sendai International Center (Sendai).
 9. T. Yajima, T. Nishimura, A. Toriumi, “Critical Role of Domain Boundary Parallel to the Interface in the Operation of VO₂ Mott Transistors.” 2015 MRS Spring Meeting, 2015/4/7, San Francisco (USA).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢嶋 起彬 (YAJIMA, Takeaki)

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号：10644346