

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月9日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760014

研究課題名（和文）室温ゆらぎを利用した確率共鳴ナノ材料の創出

研究課題名（英文） Creation of nano-scaled stochastic resonance materials driven ambient noise

研究代表者

神吉 輝夫 (KANKI TERUO)

大阪大学・産業科学研究所・准教授

研究者番号：40448014

研究成果の概要（和文）：生体機能に重要な役割を果たしている「確率共鳴」の原理を用いることで、環境ゆらぎを利用した究極の低消費電力生体模倣型デバイスの実現が期待されているが、従来のエレクトロニクス技術でこれを達成することは困難である。本研究では、生体特有の環境変化に柔軟に対応し頑強性を備えた超低消費電力型電子情報システム構築のための確率共鳴ナノ材料開発を目的とする。確率共鳴素子はコンパレータとノイズジェネレータから構成されるが、両素子の大幅な簡素化と小型化を可能にする巨大非線形特性を持つ酸化物材料のナノ微細加工プロセスを確立したことによって、ゆらぎ自立型低電圧駆動の実現に成功し、将来のオンチップ確率共鳴素子の要素を築いた。

研究成果の概要（英文）： Stochastic resonance (SR) plays a crucial role in signal transmission in neuronal systems that are constantly exposed to ambient noise. In various technological areas, SR has generated interest because of the possibility of using it in sensing applications to detect weak signals even in a noisy environment. SR device consists of comparator and noise generator. In this research, we succeeded in fabrication of VO<sub>2</sub> nano-materials having built-in the both functions. This achievement has fully potential to novel information processors using noise as bio-systems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：酸化物エレクトロニクス

科研費の分科・細目：（分科）応用物理学・工学基礎

（細目）応用物性・結晶工学

キーワード：酸化物エレクトロニクス、新機能電子材料、確率共鳴

## 1. 研究開始当初の背景

ナノテクノロジーによる微細化の進展は、半導体素子の超高集積化を可能にしてきたが、熱擾乱などによる“ゆらぎ”が攪乱要因になり、従来型の“高速”で“精密”な情報処理素子動作の限界に至っている。一方で、生体システムでは、室温の熱ゆらぎを受け入れ、積極的に活用することによって、極めて低いエネルギー消費量により高度な機能・柔

軟な情報処理機能を実現している。

生体システムに見られる、このような“ゆらぎ”の活用は、“確率共鳴”と呼ばれ、生体の感覚器をはじめ姿勢制御、脳にいたる様々な箇所で見出されている。この現象を理解するため、これまでに数理モデルやコンピュータシミュレーションを中心とした研究が国内外で盛んに進められてきた。応用面では、ノイズ下での微弱信号検出という特徴を

活かして、ノイズに埋もれた画像修復への用途も期待されている。しかしながら、リアルタイムな情報検出、低消費電力化は、コンピュータプログラムでは限界があり、元来生体システムが発達させてきた自然にありふれた環境ノイズを利用した信号情報伝達の仕組みには程遠かった。このような研究背景のもと、ユニバーサルな形で、確率共鳴をエレクトロニクス応用するためには、現在あるテクノロジーの延長線上にシステムを構築するのではなく、蓄積された生体機能研究から、工学応用できる重要な原理や機能を掴み有望な電子材料の研究から行うべきであると考えた。

## 2. 研究の目的

本研究目的は、生体の神経情報伝達に重要な要素である“確率共鳴”の原理を用いて、熱ゆらぎを媒体として信号を送る超低消費電力型情報伝達ナノ材料を創出し、電子材料・デバイスの新たなフロンティアを開拓することである。

このノイズによる情報伝達を可能にする確率共鳴素子の工学的な基本構成は、閾値判別するコンパレータ、ノイズを発生するゆらぎ源からなる。これら二つの要素を同時に持ち合わせ、高い効率で動作する材料が超低消費電力型リアルタイム確率共鳴素子を創製する上で望ましく、強相関電子系材料である二酸化バナジウム ( $\text{VO}_2$ ) は、両要素を持った優れた材料であると考えている。 $\text{VO}_2$  は、温度や電界に対して絶縁体から金属への相転移を起こし、数桁にも及ぶ電気伝導度の変化があることから、巨大非線形応答が可能なコンパレータとして活用できる。また、 $\text{VO}_2$  のナノスケール空間では、金属-絶縁体転移点近傍で、電気伝導性が数桁も異なる金属相と絶縁体相が数十~数百ナノメートルサイズの電子集団ドメインを形成し相分離しており、わずかな温度変化でドメインサイズが伸縮し揺らぐことが分かっている。しかしながら、一般的なミリ~数百マイクロサイズの薄膜では、閾値電圧が十数ボルトと大きく、ナノスケールで起こるドメインのゆらぎ現象を見ることができなかつた。大幅な閾値電圧の低減と温度変化によるドメインゆらぎを活用するためには、薄膜サイズのナノスケール化が必須となる。

本来の生体の熱雑音を利用した情報伝達機構に近づけたノイズ自立型確率共鳴素子の創出には、100nm クラスの  $\text{VO}_2$  微細加工プロセスの確立が必須になる。ニューロンと同程度の閾値電圧 (数百 mV) を持つ非線形応答素子の作製、及び  $\text{VO}_2$  の電子集団ゆらぎが最も顕著になる構造最適化の実現を目指し、両要素を組み込んだ確率共鳴素子の創出を試

みる。

## 3. 研究の方法

パルスレーザーデポジション法により、 $\text{VO}_2$  薄膜を作製し、酸化ナノインプリント法を用いた 100nm 以下級のナノ微細加工プロセスを確立することを重点項目にし、閾値電圧の低減 (ニューロンと同程度の数百 mV) により、室温ゆらぎを受けやすいコンパレータを作製する。そして、リアルタイムな非線形電気応答データを取るための測定・評価システムの構築を行い、自立ゆらぎを持つ確率共鳴素子の作製を行う。

## 4. 研究成果

### (1) $\text{VO}_2$ 薄膜のナノ微細化プロセスの確立

ナノインプリントリソグラフィ法を用いて、 $\text{VO}_2$  薄膜の微細加工プロセスの確立を行った。 $\text{VO}_2$  薄膜は、酸・アルカリ溶液に容易に溶解、またプロトン性溶媒においても反応するため、微細加工時のウェットプロセスにおいて  $\text{VO}_2$  が残存できるようなレジストを使う必要があった。このことを鑑み、 $\text{VO}_2$  が反応しない限られたエッチング溶液でリフトオフできる適切なレジストを選定した。また、反応性イオンエッチングのレートが異なるレジストを重ねた「2 層レジストナノインプリント法」により (図 1)、ナノ構造体の作製に成功 (図 2) するとともに、従来のモールドサイズ以下の幅 30nm の  $\text{VO}_2$  ナノワイヤー (図 3) の作製ができるようになった。

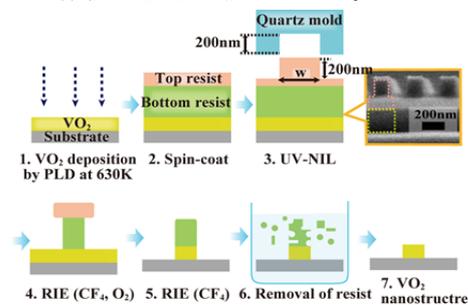


図1 ナノインプリント法を用いた  $\text{VO}_2$  ナノ微細化プロセス

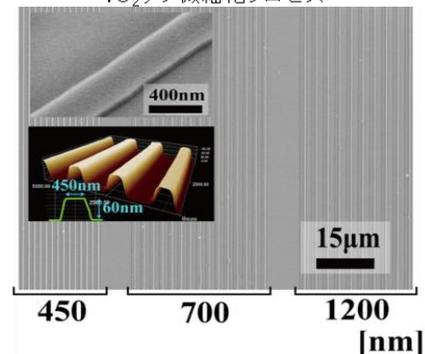


図2 ナノインプリントインプリント一括パターンニングによる  $\text{VO}_2$  ナノ細線の SEM 像

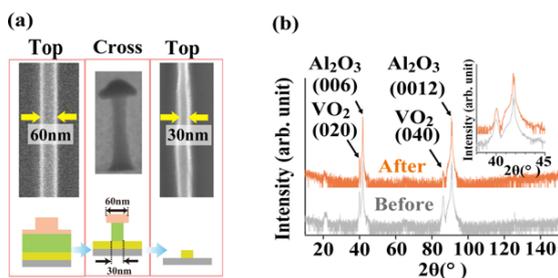


図3 (a) 30nm幅のVO<sub>2</sub>ナノ細線SEM像、及び(b) X線回折ピーク

(2) リアルタイム非線形電気応答計測・評価システムの立ち上げ

リアルタイムにμ秒ステップで電気伝導計測を行える測定システムを立ち上げた(図4)。このシステムの特徴として、電気伝導測定と同時に1μm程度までの大きさの金属-絶縁体ドメインの振る舞いを光学顕微鏡で観測できることである。顕微鏡画像を電気伝導測定結果と照らし合わせることでより従来では窺い知りえなかった詳細な物性評価ができるため、確率共鳴デバイスの高効率化に向けた試料形状等へのフィードバックが可能となった。

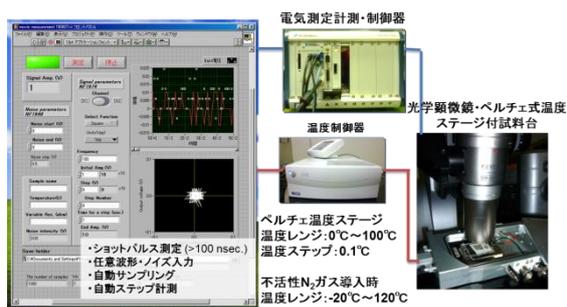


図4 作製したリアルタイム非線形電気応答計測システム

(3) VO<sub>2</sub> ナノ構造薄膜への電極アライメントプロセスの確立

VO<sub>2</sub> ナノ構造薄膜への電極アライメントを精密に行うため、ナノインプリント時に用いるモールドに位置調整するマーカーを付与した設計にし、電極パターンを作製するためのレーザーダイオード(LED) リソグラフィ装置で確認できるようにしたところ、精度±1μmで、位置調整することができ、十分なアライメント精度を確保することができた。

(4) VO<sub>2</sub> ナノ構造体の閾値電圧特性評価

VO<sub>2</sub> 細線幅 200nm、電極間幅 4μm のナノ構造体に電圧を印加し、金属-絶縁体相転移の閾値電圧を調べたところ、転移点近傍の温度域において 1~3 ボルトで相転移することが分かった(図5)。また、個々のナノスケール電子相の相転移のバラつきを電気伝導特性

から確認できるとともに、1℃以下の温度ゆらぎで閾値が変化していることを見出した。

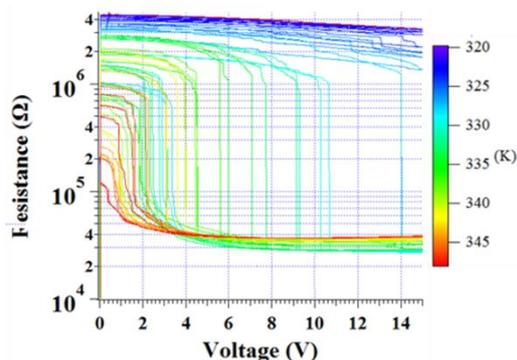


図5 VO<sub>2</sub>ナノ細線の抵抗の電圧依存性

このように、微細化により個々のナノスケール電子相ドメインの挙動を捉えることにより、僅かな温度変化による相転移の“ゆらぎ”を発現させることに成功し、今後のノイズ自立型確率共鳴素子の創出への道筋を得た。

微弱な環境・熱ノイズ効果を高めるには、もう一桁低い(数百mV) 閾値電圧が必要である。このさらに低減化した閾値電圧を実現するため、電極間距離を縮める必要があり、現在取り組んでいる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

- ① H. Ueda, T. Kanki and H. Tanaka, Manipulation of metal-insulator transition characteristics in aspect ratio-controlled VO<sub>2</sub> micro-scale thin films on TiO<sub>2</sub> (001) substrates、査読有、Applied Physics Letters **102**, 153106(3) (2013)
- ② H. Takami, K. Kawatani, H. Ueda, K. Fujiwara, T. Kanki and H. Tanaka, Tuning metal-insulator transition by one dimensional alignment of giant electronic domains in artificially size-controlled epitaxial VO<sub>2</sub> wires、査読有、Applied Physics Letters **101**, 263111(3) (2012)
- ③ T. Kanki, K. Kawatani, H. Takami and H. Tanaka, Direct observation of giant metallic domain evolution driven by electric bias in VO<sub>2</sub> thin films on TiO<sub>2</sub>(001) substrate、査読有、Applied Physics Letters **101**, 243118(3) (2012)
- ④ K. Kawatani, H. Takami, T. Kanki and H. Tanaka, Metal-insulator transition with multiple micro-scaled avalanches

in VO<sub>2</sub> thin film on TiO<sub>2</sub>(001) substrates、  
査読有、Applied Physics Letters **100**,  
173112(3) (2012)

- ⑤ H. Takami, T. Kanki, S. Ueda, K. Kobayashi and H. Tanaka, Filling-controlled Mott transition in W-doped VO<sub>2</sub>, 査読有、Physical Review B **85**, 205111(4) (2012)

[学会発表] (計16件)

- ① T. Kanki and H. Tanaka, Electronic phaseengineering: One dimensional organization of metal-insulator domains in size-controlled VO<sub>2</sub> nano-wires, CNR-SPIN Seminar, 2012年9月28日, ジェノバ大学 (ジェノバ, イタリア) (招待講演)
- ② 神吉輝夫、田中秀和、VO<sub>2</sub> ナノ構造を用いた強相関電子相ドメイン制御と新奇ナノ物性発現、応用物理学会(2012)秋期、2012年09月10日、愛媛・松山大学(愛媛) (招待講演)
- ③ T. Kanki, Exotic signal transmission driven by noise using functional oxides, NIMTE-CAS Seminar, 2012年06月10日, 中国科学技術院寧波材料技術研究所 (寧波、中国) (招待講演)
- ④ T. Kanki, Noise-driven signal transmitter using nonlinear effect of functional oxide thin films, World Congress of Advanced Materials-2012 (WCAM-2012), 2012年06月07日, 北京コンチネンタルグランドホテル (北京、中国) (招待講演)
- ⑤ T. Kanki, Fabrication of functional oxide nanostructures and the electronic application utilizing stochastic resonance, 24th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2011), 2011年10月26日, 京都ANAホテル (京都)

[その他]

ホームページ情報

<http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/bis/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

神吉 輝夫 (KANKI TERUO)  
大阪大学・産業科学研究所・准教授  
研究者番号：40448014

### (2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者  
該当なし