

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2020～2021

課題番号：20K21086

研究課題名(和文)脈波計測を可能にするフレキシブル超高感度マイクロ歪センサの創出

研究課題名(英文)Creation of flexible and ultra-sensitive micro-strain sensor that enables pulse wave measurement

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：遷移金属酸化物は、軌道・電子・スピンの強く相関し超伝導、金属-絶縁体相転移、超巨大磁気抵抗効果など多彩な物性を発現する魅力的な物質である。酸化物結晶に歪を加えると原子間距離が変わり、電子軌道間の重なりが変化し強い電子間相互作用と相俟って巨大な抵抗変調を引き起こすため、ひずみ測定は物性解明に良く用いられる手法であり、長年世界中で活発に研究されてきた。本研究では、フレキシブルシート上の単結晶酸化物薄膜作製技術を活かして、高次歪制御による巨大抵抗変化デモンストレーション、その機構解明、及びマイクロストレインゲージとしての応用展開までを視野に入れ研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

強相関電子系酸化物は、格子歪、磁場、電場などの外場で巨大な物性変調現象が現れる興味深い物質群であり、多くの研究者によって理論を発展させてきた。現在も、格子歪・圧力制御における新奇物性現象、新物質相の研究は尽きることなく盛んに研究が行われている。本研究課題の学術的意義は、従来一方向のみのひずみ印可に対し、フレキシブルシート上に作製することが可能になったことから多軸方向に連続かつ精密に制御ができ、将来、新奇物性相、歪-電気伝導の相関解明の進展が期待できる点にある。応用面でも、フレキシブルシートの密着性の良さから、生体モニタリングなどのウェアラブルデバイスへの展開が見込める。

研究成果の概要(英文)：Transition Metal oxides are attractive much attention for a variety of exotic physical properties, such as high temperature-superconducting, metal-insulator transition and the colossal magneto-resistance effect. These properties are caused by a strong electron-orbital coupling and an electron-electron coupling. Thus, as a strain effectively make a change in electronic properties. In this study, I have demonstrated a huge resistance modulation due to strain effect using single crystal oxide thin films on flexible sheets and clarified their mechanism. These results will lead to realize applications to a micro-strain gauge.

研究分野：酸化物エレクトロニクス

キーワード：ひずみセンサー フレキシブル 二酸化バナジウム 金属-絶縁体相転移

1. 研究開始当初の背景

遷移金属酸化物は、軌道・電子・スピンの強く相関し超伝導、金属-絶縁体相転移、超巨大磁気抵抗効果など多彩な物性を発現する魅力的な物質である。酸化物結晶に歪を加えると原子間距離が変わり、電子軌道間の重なり状態変化と強い電子間相互作用が相俟って巨大な抵抗変調を引き起こすため、強相関電子系材料の物性解明に良く用いられる手法であり、長年世界中で活発に研究され続けている。一般的には、格子定数の異なる基板上への単結晶薄膜作製、イオン半径の異なる元素ドーピング、及び静水圧による格子歪印可法を用いて結晶相転移、金属-絶縁体相転移などの物性解明や新物質相の探索が行われてきた。本研究では、従来手法とは全く異なるフレキシブルシート上の単結晶酸化物薄膜転写技術を活かして、高次歪制御による巨大抵抗のダイナミック変調デモンストレーション、その機構解明、及びマイクロストレインゲージとしての応用展開までを視野に入れ研究を行う。酸化物ストレインエンジニアリングの学理構築の一助を担い、広範な応用展開を促すことが目的である。

2. 研究の目的

酸化物結晶に歪を加えると原子間距離が変わり、電子軌道間の重なり状態変化と強い電子間相互作用が相俟って巨大な抵抗変調を引き起こすため、強相関電子系材料の物性解明に良く用いられる手法であり、長年世界中で活発に研究され続けている。一般的には、格子定数の異なる基板上への単結晶薄膜作製、イオン半径の異なる元素ドーピング、及び静水圧による格子歪印可法を用いて結晶相転移、金属-絶縁体相転移などの物性解明や新物質相の探索が行われてきた。本研究では、従来手法とは全く異なるフレキシブルシート上の単結晶酸化物薄膜転写技術を活かして、高次歪制御による巨大抵抗のダイナミック変調デモンストレーション、その機構解明、及びマイクロストレインゲージとしての応用展開までを視野に入れ研究を行う。酸化物ストレインエンジニアリングの学理構築の一助を担い、広範な応用展開を促すことが目的である。

3. 研究の方法

フレキシブル VO₂ 薄膜を作製するには、まず MgO 基板上に単結晶 VO₂ 薄膜を作製し、MgO 犠牲層エッチングにより VO₂ 薄膜をフレキシブルシート上へ転写する(図1) 転写面積は mm 単位で可能である。歩留まりを良くするために本研究では、MgO 犠牲層エッチングにおけるエッチング液の温度管理を徹底し、ナノポアシートから基板をすくい上げる速度などを一定にすることによって、結果歩留まりの向上が見られた。

MgO と VO₂ 間の剥離機構が明らかではないため、透過型電子顕微鏡 (TEM) による VO₂-MgO 界面の構造層がどのようになっているのかを観測し、希薄リン酸での界面の溶解性に注目し考察した。

図2は、MgO-TiO₂-VO₂ の断面 TEM 像である。MgO-TiO₂ 界面に注目すると、結晶状態が不完全な 5nm 厚さの (Mg,Ti)O_x 層が見られる。欠陥が多い場合、欠陥点を起点にして、エッチングが進行することになる。

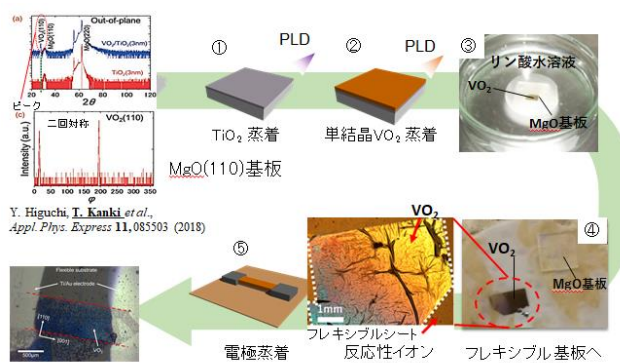


図1 単結晶VO₂のフレキシブル基板への転写工程

MgO 基板からの剥離は、欠陥が多い(Mg,Ti)O_x 層を溶かしながら進行していると考えられる。

また、物性測定においては、曲率の異なる試料台を用意しひずみ度合いを変化させることによって電気伝導特性の変化を系統的に調べた。

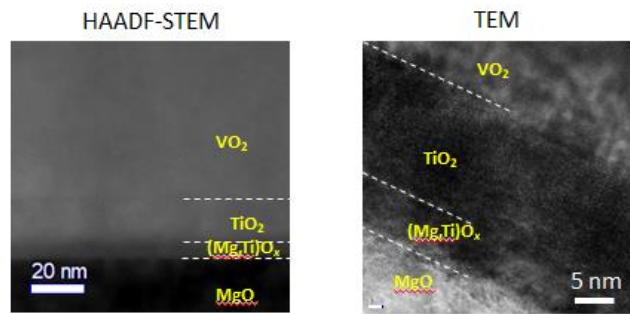


図2 TiO₂バッファーを挟んだMgO基板上のVO₂薄膜の透過型電子顕微鏡像

4. 研究成果

単結晶 VO₂ フレキシブルシートは曲げ歪によって大きく抵抗変化を起こす。デモンストレーションとして、図3では人差し指第一関節の曲げ歪みによる抵抗の変化を示す。指の反りや曲げに対して抵抗が増減していることが示されている。

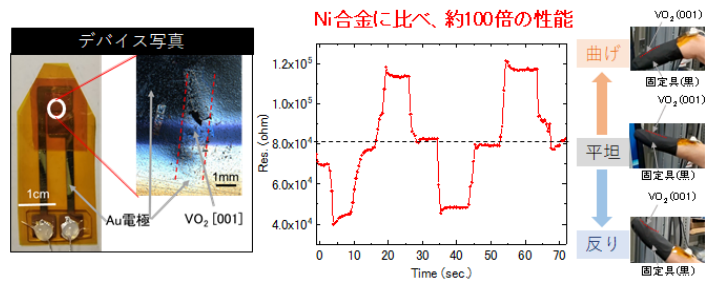


図3 フレキシブルVO₂ひずみセンサーによる人差し指第一関節の曲げによる抵抗変化

また、曲率試料台を用いて精密にひずみ量に対するひずみ感度係数（ゲージ率： K ）は $\Delta R/R = K \times \Delta L/L$ （ ΔR ：抵抗の変化、 R ：元の抵抗、 ΔL ：伸び（縮み）量、 L ：元の長さ）で表され、単結晶 VO₂ フレキシブルシートのゲージ率は、産業化されているNi合金 ($K=2$) を遥かにしのぐ、 $K=200$ 以上であった（図4）。この高いゲージ率は[001]方向のひずみ量が主要因であり、大きな抵抗変化に関与しているものと考えられる。

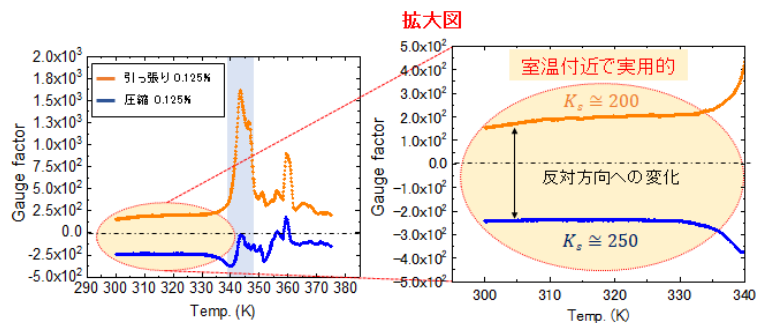


図4 [001]方向のゲージ率の温度依存性

ひずみ印可で結晶構造が変化すると、V⁴⁺の3d電子軌道の重なりが変調される。特にc軸方向（[001]方向）は伝導電子が1個入った3d_{x₂-y₂}軌道が張り出しており、電気伝導特性の主要素を決定する軌道である。このことから[001]方向への歪による伸縮は、電気伝導変調に多大な影響を与えていると考えている。

応用面では、室温付近の300Kから330K付近まで一定したひずみゲージ率を持つことから、用途によって十分に機能するひずみセンサーになると考えられる。

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 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Manca Nicola, Kanki Teruo, Endo Fumiya, Ragucci Enrico, Pellegrino Luca, Marre Daniele	4. 巻 3
2. 論文標題 Anisotropic Temperature-Driven Strain Dynamics in V02 Solid-State Microactuators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 211 ~ 218
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsaem.0c00776	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 該当する

1. 著者名 Manca Nicola, Kanki Teruo, Endo Fumiya, Marre Daniele, Pellegrino Luca	4. 巻 20
2. 論文標題 Planar Nanoactuators Based on V02 Phase Transition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 7251 ~ 7256
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acs.nanolett.0c02638	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 該当する

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Solid State Actuators for Micro/Nanorobotics http://www.vo2actuators.spin.cnr.it/

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			
イタリア	ジェノバ大学	CNR		