

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04927

研究課題名（和文）金属酸化物表面反応の瞬時加熱制御によるCMOS分子センサの創出

研究課題名（英文）CMOS compatible chemical sensors based on control of surface reaction on metal oxides

研究代表者

高橋 綱己 (Takahashi, Tsunaki)

九州大学・先端物質化学研究所・学術研究員

研究者番号：60724838

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 18,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、大気中のガス分子を電気信号として検出する、小型・低消費エネルギーな分子センサの実現に向けて、ナノスケールの金属酸化物材料を用いたデバイスの課題抽出と解決に取り組んだ。ナノ金属酸化物分子センサでは、センサ性能の長期安定性が特に問題となっていることに着目し、表面物性制御や界面材料設計技術を駆使して従来構造・材料のデバイスに比べて遙かに長期間安定的に動作するセンサデバイスを創製した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、これまで病院で検査を行う必要があった健康状態のモニタリングをスマートフォン等に搭載されたSoC（ICチップ）で実現する基盤技術の確立につながり、今後ますますIoT（Internet of Things）化に向かう社会に与えるインパクトはきわめて大きい。また、本研究で開発したデバイス性能の長期安定化手法は、センサに限らず多様な機能物性を有する金属酸化物の幅広い応用展開に有用な知見である。

研究成果の概要（英文）：In this research, we investigated fundamental challenges of chemical sensors based on nanoscale metal oxides, which are promising devices to electrically discriminate volatile molecules in ambient. Long-term stability of nanoscale metal oxide device properties, which is one of the most important requirements of these sensors, was intensively investigated via fabricating/evaluating metal oxide nanowire devices. By controlling surface or interface properties of the nanoscale metal oxides, the long-term stability of the electrical properties and sensor response of metal oxide nanowire devices were significantly improved.

研究分野：電子デバイス

キーワード：金属酸化物半導体 分子センサ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年のヘルスケア・環境負荷への関心の高まりや IoT (Internet of Things: モノのインターネット) 社会の到来を背景に, CMOS 混載可能かつ低消費電力で, 高感度に多種の気体分子を検知・識別できるセンサ技術が強く求められている. ZnO や SnO₂ 等の金属酸化物半導体は大気・水分に対してきわめて安定であることに加えて, 金属イオンの変更により容易に表面反応性の指標となる等電位点 (表面水酸基と水素イオンの反応が起こる水素イオン濃度) を 10 桁も変調できることが知られており, 幅広い分子との反応が期待できる. このことから, 金属酸化物ナノ構造をチャネルとした半導体センサは現在最も有力な分子センサの候補であり, 世界中で盛んに研究開発が行われている. しかし, これらのセンサは非常に高感度である反面, 酸化/還元性を持つすべての分子に反応するために対象分子の判別が難しく, また金属酸化物の表面準位や電極界面のショットキー障壁に起因する特性ばらつきが大きいといった課題がある. このように, CMOS 混載・低消費電力を前提とした IoT センサデバイスの社会的要請の大きさにも関わらず研究レベルを含めても真の意味で候補となり得る分子センサ技術は存在しない.

2. 研究の目的

CMOS 技術と親和性があり, 金属酸化物半導体の分子認識能を活かした分子センサの基盤技術創成を目的とする. 具体的には, ナノスケール金属酸化物半導体をセンサ構造における課題の抽出と解決に取り組む. 特に, ナノスケール金属酸化物半導体由来の素子ばらつきや信頼性の改善を行う. また, 超低消費エネルギー分子センサの実現に向けて, ジュール加熱効果による金属酸化物半導体層の表面温度制御解析にも取り組む.

3. 研究の方法

分子センサにおける分子認識層である金属酸化物部として, 単結晶金属酸化物ナノワイヤおよび金属酸化物ナノ薄膜を検討した. 単結晶金属酸化物ナノワイヤは, パルスレーザー堆積法 (PLD 法) および水熱合成法を用いて, SnO₂ ナノワイヤおよび ZnO ナノワイヤをそれぞれ成長させた. 金属酸化物ナノ薄膜は, RF スパッタリングを用いて SnO₂ 薄膜を成膜した.

単結晶金属酸化物ナノワイヤの電子物性解明・信頼性評価の為に, 単一ナノワイヤ電子デバイスを作製した. 同デバイスは成長させたナノワイヤを SiO₂/Si 基板上に分散させた後, 電子線描画法により 4 端子金属電極を単一ナノワイヤ上に形成した. ナノワイヤの電気抵抗率および電極との界面抵抗 (コンタクト抵抗) は 4 探針法により評価した.

4. 研究成果

(1) 単結晶金属酸化物ナノワイヤにおける導電性起源の解明

化学センサとして広く用いられる, 二元系の n 型金属酸化物半導体 (SnO₂, ZnO, WO₃ 等) は格子欠陥が電気伝導性を生むことが知られている. 金属酸化物ナノワイヤにおいては, 成長中に意図しない結晶欠陥が生じ, 電気伝導特性の制御が困難であることが化学センサをはじめとした

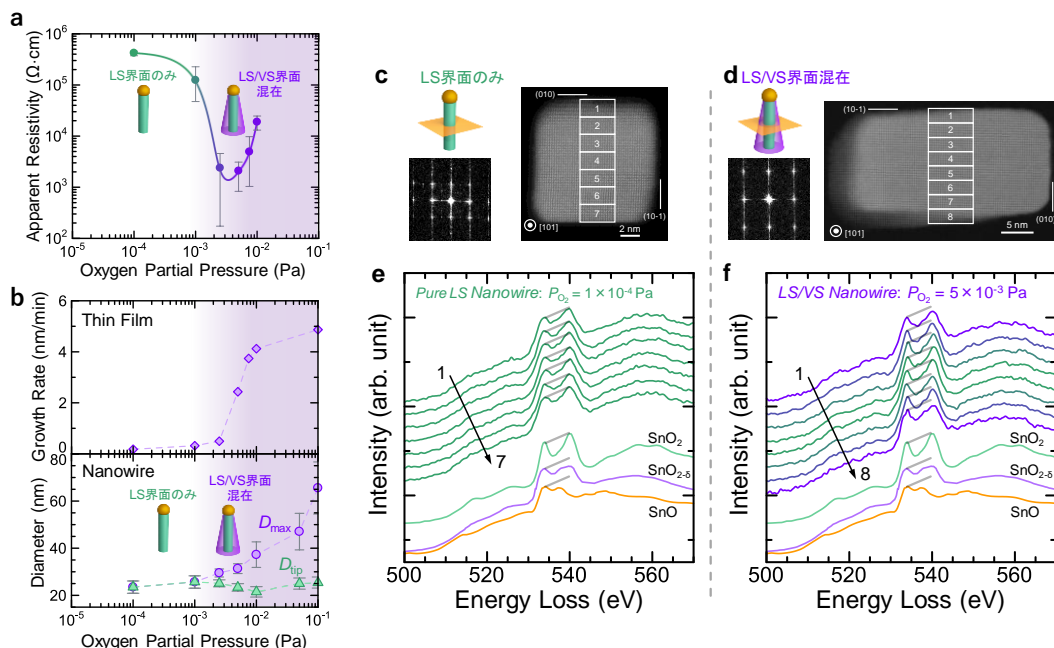


図 1

電子デバイス応用展開の課題となっていた。

本研究では、VLS 法により成長させた単結晶酸化錫ナノワイヤが、従来の n 型酸化物半導体では結晶欠陥を生じやすい低酸素分圧成長時に、LS 界面から結晶成長が行われることで高結晶性を生じることを見出した。精密な酸素分圧制御により作製したナノワイヤの径評価と単一ナノワイヤ電気伝導評価から、高酸素分圧下成長では導電性が生じる一方、低酸素分圧下成長による LS ナノワイヤでは導電性が顕著に抑制されることを実証した (図 1a, b)。STEM-EELS 測定 (図 1c-f)、MD シミュレーションの結果から、低酸素分圧下成長においても LS 界面において平衡に近い結晶成長が進行することにより、結晶欠陥を抑制した高結晶性ナノワイヤが成長するモデルを提案した。

(2) 表面処理による単結晶 ZnO ナノワイヤデバイスの信頼性向上

ZnO ナノワイヤは、金属酸化物特有の機能物性や化学的安定性に加え、水熱合成法による低温・大規模成長が可能であることから、次世代のセンサ材料として注目されている。一方で、電子デバイス性能の長期安定性についての知見は不十分であり、本格的な実用化に向けた課題となっている。本研究では、単結晶水熱合成 ZnO ナノワイヤデバイスの経時特性劣化の起源を解明すると共に、表面処理によって長期安定性の向上を実証した。

ZnO ナノワイヤデバイスの電気特性の、1) 室温・大気中での経時特性および 2) 雰囲気制御による経時特性の評価を通して、大気中の二酸化炭素が ZnO ナノワイヤデバイスの電気特性を著しく劣化させることを示した。次に、ZnO ナノワイヤ表面の微細構造観察および赤外分光測定から、この劣化が ZnO ナノワイヤ表面における炭酸亜鉛層形成による電極/ナノワイヤ界面抵抗の増大に起因することを明らかにした (図 2)。

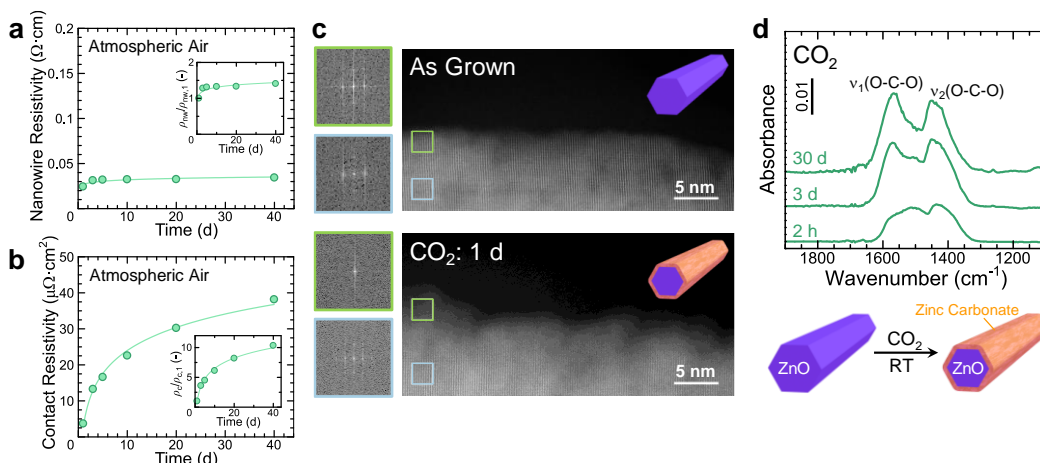


図 2

実験的に得られた知見にもとづき、ZnO 表面上の水酸基 (表面-OH 基) が炭酸化反応の起点となる反応スキームを示した。さらに、熱処理によって表面-OH 基を低減させ、炭酸化反応を抑制する表面物性制御手法を提案した。本表面物性制御手法によって ZnO ナノワイヤデバイス電気特性の長期安定性劇的に改善し、40 日間に渡り安定的な電気特性が得られることを実証した (右図)。

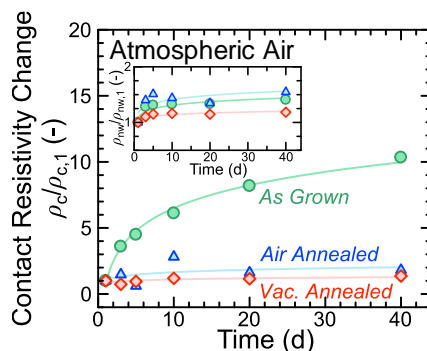


図 3

(3) 単結晶金属酸化物ナノワイヤ界面制御による高信頼分子センサデバイスの創製

酸化物ナノワイヤセンサデバイスの性能がナノワイヤ電極界面特性、特に界面層の熱的・化学的安定性によって制限されることに着目し、導電性金属酸化物薄膜を電極界面層に用いた単結晶酸化錫ナノワイヤセンサデバイスを提案した (図 4)。電子ドープメントとしてアンチモンを添加した酸化錫 (Antimony-doped Tin Oxide: ATO) を、電極界面層およびナノワイヤ材料に用いたセンサデバイスを作製し、従来技術であるチタンを電極界面層とした酸化錫センサデバイスと特性を比較した。チタン

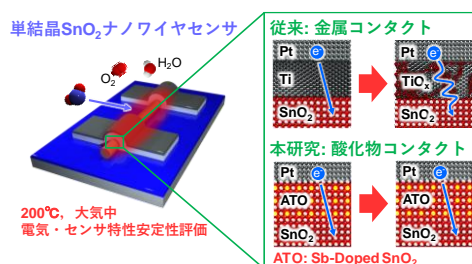


図 4

はセンサ動作環境（大気中、200℃）において酸化され導電性を失うのに対し、ATO層は高温下においても安定して導電性を呈することを見出した。さらに、両構造のセンサデバイスにおいて分子（二酸化窒素）および光に対するセンサ応答を評価し、提案デバイスでセンサ応答の長期安定性が大きく向上することを実証した（図5）。

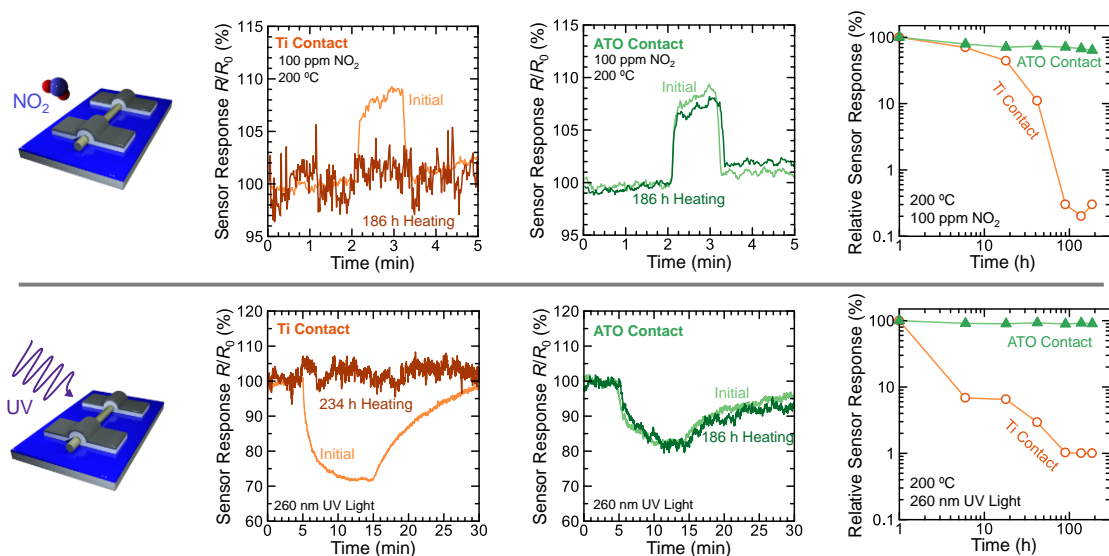


図 5

(4) ジュール熱による金属酸化物ナノ薄膜センサ表面温度制御

上記(3)で開発した高信頼な金属酸化物電極を採用した、ナノ薄膜分子センサデバイスを作製し、分子に対する応答（抵抗変化）を確認した。同構造の分子センサ素子のジュール熱による動作時温度上昇量（自己加熱効果）を、3次元有限要素法を用いてシミュレーションした。チャンネルサイズや配線構造、センサ表面直上のガス流量等がセンサ表面温度に与える影響を評価し、作製したナノ薄膜センサ構造で所望の温度に制御する構造・動作条件を明らかにした。本技術はセンサ表面における化学反応制御を低エネルギーで実現する基盤技術につながる有用な知見である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4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 H. Zeng, T. Takahashi, M. Kanai, G. Zhang, Y. He, K. Nagashima, and T. Yanagida	4. 巻 2
2. 論文標題 Long-term stability of oxide nanowire sensors via heavily-doped oxide contact	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ACS Sens.	6. 最初と最後の頁 1854-1859
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acssensors.7b00716	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 柳田剛, 長島一樹, 高橋 綱己	4. 巻 87
2. 論文標題 結晶成長の空間選択性に基づいた単結晶金属酸化物ナノワイヤの創製とナノデバイス展開	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 応用物理	6. 最初と最後の頁 29-33
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 -
1. 著者名 高橋綱己, 長島一樹, 柳田剛	4. 巻 62
2. 論文標題 単結晶金属酸化物ナノワイヤ分子センサ	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ケミカルエンジニアリング	6. 最初と最後の頁 798-803
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 -
1. 著者名 F. Zhuge, T. Takahashi, M. Kanai, K. Nagashima, N. Fukata, K. Uchida and T. Yanagida	4. 巻 124
2. 論文標題 Thermal conductivity of Si nanowires with μ -modulated dopant distribution by self-heated 3 method and its length dependence	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Appl. Phys	6. 最初と最後の頁 65105-1-65105-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5039988	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 H. Anzai, T. Takahashi, M. Suzuki, M. Kanai, G. Zhang, T. Hosomi, T. Seki, K. Nagashima, N. Shibata, and T. Yanagida	4. 巻 19
2. 論文標題 Unusual oxygen partial pressure dependence of electrical transport of single-crystalline metal oxide nanowires grown by the vapor-liquid-solid process	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nano Lett.	6. 最初と最後の頁 1675-1681
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.8b04668	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 -

1. 著者名 K. Nakamura, T. Takahashi, T. Hosomi, T. Seki, M. Kanai, G. Zhang, K. Nagashima, N. Shibata, and T. Yanagida	4. 巻 11
2. 論文標題 Redox-inactive CO ₂ determines atmospheric stability of electrical properties of ZnO nanowire devices through a room-temperature surface reaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Appl. Mater. Interfaces	6. 最初と最後の頁 40260-40266
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.9b13231	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31件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 K. Nakamura, T. Takahashi, H. Anzai, D. Sakai, M. Kanai, K. Nagashima and T. Yanagida
2. 発表標題 Improvements in Crystallinity and Long-term Stability of Hydrothermally Grown ZnO Nanowires via Atmosphere-controlled Annealing
3. 学会等名 The 19th Cross Straits Symp. on Energy and Environmental Science and Technology (CSS-EEST19) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Nakamura, T. Takahashi, H. Anzai, D. Sakai, M. Kanai, K. Nagashima and T. Yanagida
2. 発表標題 Influence of Seed Layers on Crystallinity of Metal Oxide Nanowires Grown by Hydrothermal Synthesis
3. 学会等名 The 19th Cross Straits Symp. on Energy and Environmental Science and Technology (CSS-EEST19) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 H. Zeng, T. Takahashi, M. Kanai, G. Zhang, Y. He, K. Nagashima and T. Yanagida
2 . 発表標題 Long-term stability of oxide nanowire sensors via heavily-doped oxide contact
3 . 学会等名 The 19th Cross Straits Symp. on Energy and Environmental Science and Technology (CSS-EEST19) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 H. Zeng, T. Takahashi, K. Nagashima, and T. Yanagida
2 . 発表標題 Highly stable heavily-doped oxide contacts on oxide nanowires: Reliable low contact resistance and enhancement of long-term sensor response
3 . 学会等名 Int. Conf. Solid State Devices and Mater. (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Z. Zhu, K. Nagashima, T. Takahashi, M. Kanai, H. Anzai, G. Zhang and T. Yanagida
2 . 発表標題 Dopant incorporation at two crystal growth interfaces in vapor-liquid-solid process of metal oxide nanowires
3 . 学会等名 2018 IMCE International Symposium (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Nakamura, T. Takahashi, H. Anzai, D. Sakai, Z. Guozhu, M. Kanai, K. Nagashima and T. Yanagida
2 . 発表標題 Impacts of Thermal Annealing on Electrical Properties of Hydrothermally Grown ZnO Nanowires: Nanowire Resistivity, Contact Resistance and Their Long-term Stability
3 . 学会等名 IRCCS-JST CREST Joint Symp. “ Chemical Sciences Facing Difficult Challenges ” IRCCS The 1st Int. Symp., The 2nd Base Metal Catalysis Symp. (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 中村健太郎, 高橋綱己, 安西宇宙, Z. Guozhu, 金井真樹, H. Yong, 長島一樹, 柳田剛
2. 発表標題 雰田気制御熱処理によるZnOナノワイヤ物性および電気特性の長期安定化
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安西宇宙, 高橋綱己, Z. Guozhu, 金井真樹, 長島一樹, 柳田剛
2. 発表標題 気液固法による単結晶金属酸化物ナノワイヤにおける電子輸送特性の結晶成長界面依存性
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋綱己, H. Zeng, 中村健太郎, 金井真樹, Z. Guozhu, 長島一樹, 柳田剛
2. 発表標題 ナノ界面設計による酸化物ナノワイヤ分子センサの高信頼化
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Zeng, T. Takahashi, M. Kanai, G. Zhang, Y. He, K. Nagashima, T. Yanagida
2. 発表標題 Heavily-doped oxide contact toward highly reliable nanowire sensors
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 安西宇宙, 高橋綱己, Z. Guozhu, 金井真樹, H. Yong, 長島一樹, 柳田剛
2. 発表標題 単結晶金属酸化物ナノワイヤにおける結晶成長雰囲気及ばず電子輸送特性の結晶成長界面依存性
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋綱己, H. Zeng, 金井真樹, Z. Guozhu, H. Yong, 長島一樹, 柳田剛
2. 発表標題 高不純物濃度酸化物コンタクトによるナノワイヤ分子センサの高信頼化
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中村健太郎, 高橋綱己, 安西宇宙, 酒井大樹, Z. Guozhu, 金井真樹, H. Yong, 長島一樹, 柳田剛
2. 発表標題 水熱合成法における核形成層制御による金属酸化物ナノワイヤの結晶性向上
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中林賢太郎, 高橋綱己, 安西宇宙, H. Yong, Z. Guozhu, 金井真樹, 長島一樹, 柳田剛
2. 発表標題 金属酸化物ナノワイヤ表面吸着分子の静電ポテンシャル制御による脱離
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋綱己
2. 発表標題 単結晶酸化物ナノワイヤデバイスの界面設計
3. 学会等名 第8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 2019年

1. 発表者名 H. Zeng, T. Takahashi, M. Kanai, G. Zhang, Y. He, K. Nagashima and T. Yanagida
2. 発表標題 Long-term stability of oxide nanowire sensors via heavily-doped oxide contact
3. 学会等名 The First Int. Joint Symp. CEFMS-NCTU（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村健太郎, 高橋綱己, 安西宇宙, Z. Guozhu, 金井真樹, 長島一樹, 柳田剛
2. 発表標題 水熱合成ZnOナノワイヤ/Pt界面電気抵抗の長期安定化
3. 学会等名 分子・物質合成プラットフォーム平成30年度シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Zeng Hao, 高橋綱己, 金井真樹, Zhang Guozhu, 細見拓郎, 長島一樹, 柳田剛
2. 発表標題 酸化物ナノワイヤに対するITOコンタクト電極劣化特性の解明
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安西宇宙, 鈴木将, 高橋綱己, 金井真樹, Zhang Guozhu, 細見拓郎, 長島一樹, 柳田剛
2. 発表標題 供給酸素分圧による単結晶金属酸化物ナノワイヤの導電性・結晶成長界面の変調効果
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Nakamura, T. Takahashi, M. Kanai, G. Zhang, T. Hosomi, K. Nagashima, T. Yanagida
2. 発表標題 Long-term stability of hydrothermal ZnO nanowire/Pt junctions
3. 学会等名 第37回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村健太郎, 高橋綱己, 金井真樹, Z. Guozhu, 細見拓郎, 長島一樹, 柳田剛
2. 発表標題 大気中分子 - ZnOナノワイヤ/Pt界面間相互作用の解明に基づくデバイス特性の高信頼化
3. 学会等名 平成30年度応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Zeng, T. Takahashi, M. Kanai, G. Zhang, T. Hosomi, K. Nagashima, T. Yanagida
2. 発表標題 Anomalous Oxygen Role at the Interface between ITO and Single Crystalline Metal Oxide Nanowires
3. 学会等名 平成30年度応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Yan, T. Takahashi, M. Kanai, G. Zhang, T. Hosomi, K. Nagashima, T. Yanagida
2. 発表標題 Systematic study on thermal stability of electrical characteristics of Al doped ZnO formed by pulsed laser deposition method
3. 学会等名 平成30年度応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村健太郎, 高橋綱己, 金井真樹, Z. Guozhu, 細見拓郎, 長島一樹, 柳田剛
2. 発表標題 大気中分子とZnOナノワイヤ表面の相互作用抑制によるデバイス特性の長期安定化
3. 学会等名 第4回ナノ分析化学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 清水将博, 高橋綱己, 細見拓郎, 金井真樹, Z. Guozhu, 長島一樹, 柳田剛
2. 発表標題 SAM修飾ZnOナノワイヤ表面における分子吸着・反応の検証
3. 学会等名 第4回ナノ分析化学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村健太郎, 高橋綱己, 金井真樹, Z. Guozhu, 細見拓郎, 長島一樹, 柳田剛
2. 発表標題 大気中分子 - ZnO ナノワイヤ /Pt 界面間相互作用の解明 に基づくデバイス特性の高信頼化
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安西宇宙, 高橋綱己, 細見 拓郎, 金井真樹, Z. Guozhu, 長島一樹, 柳田剛
2. 発表標題 VLS法ナノワイヤ結晶成長界面設計による単結晶金属酸化物ナノ構造体の表面特性制御
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Takahashi, H. Anzai, H. Zeng, M. Kanai, T. Hosomi, G. Zhang, K. Nagashima, and T. Yanagida
2. 発表標題 Nanoelectronics of single-crystalline metal oxide nanowires: Fundamentals and sensor applications
3. 学会等名 Seoul National University - Kyushu University Joint Symposium on Materials Chemistry and Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Zeng, T. Takahashi, M. Kanai, G. Zhang, T. Hosomi, K. Nagashima, and T. Yanagida
2. 発表標題 Electrical degradation of ITO contact electrodes on metal oxide nanowires
3. 学会等名 International School and Symposium on Nanoscale Transport and phoTonics 2019 (ISNTT) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Yan, T. Takahashi, M. Kanai, T. Hosomi, G. Zhang, K. Nagashima, and T. Yanagida
2. 発表標題 Sequential compensation effect of anion/cation vacancies on thermal stability of electric conductivity of Al-doped ZnO nanofilms
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水將博, 高橋綱己, 細見拓郎, 張国柱, 金井真樹, 長島一樹, 柳田剛
2. 発表標題 有機分子修飾による単結晶金属酸化物ナノワイヤ表面反応制御
3. 学会等名 第10回分子アーキテクトニクス研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

九州大学プレスリリース https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/191
--

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
研究協力者	柳田 剛 (Yanagida Takeshi)		
研究協力者	内田 建 (Uchida Ken)		