

令和 3 年 8 月 18 日現在

機関番号：12601

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2018～2020

課題番号：18KK0112

研究課題名（和文）超多チャンネルセンサアレイによる多成分同時分子識別デバイスの創製

研究課題名（英文）Development of Multi-Channels Sensor Array Towards Simultaneous Discrimination of Mixed Volatile Molecules

研究代表者

長島 一樹 (Nagashima, Kazuki)

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：10585988

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、多元素機能傾斜膜形成技術・ナノ微細加工技術・高速電子回路技術を融合することで、特性の異なる金属酸化物センサ素子が面内集積化された‘高堅牢性異種集積化センサアレイ’を創製し、全1024センサ素子のリアルタイム計測機能、及び多成分標的分子群の同時検出・識別機能の原理実証に成功した。加えて、堅牢な有機分子によるセンサ表面の化学特性改質へ向けて、固体表面上におけるクリック反応制御メカニズムを解明すると共に高効率反応へ向けた設計指針構築に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、従来複雑な作製プロセスのため生じていたセンサアレイ数の限界や、少数センサ素子の誤作動などにより引き起こされるデータの信頼性低下の問題を本質的に打破する方法論を提案・実証した。素子抵抗値の制御やセンサを構成する元素数の増加、センサ応答や分子識別機能の改善など未だ多くの課題が残されているが、本研究で得られた一連の成果は、多角的な化学情報の安定的な収集・蓄積・利活用を目指す次世代の分子認識センサエレクトロニクス実現へ向けて極めて重要な知見となる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we synthesized the highly robust, integrated metal oxide nano-film sensor array, which has a gradient molecular sensing property along in-plane direction, by combining a multi-compositional gradient nano-film deposition technique and a nano-lithography technique, and a high-speed electronic circuit. The real-time molecular sensing in 1024 sensors was also successfully demonstrated by the integrated high-speed electronic circuit together with the proof of concept for the detection and discrimination of volatile molecule mixture. Furthermore, we successfully established the design concept of surface click reaction on sensor surface towards the modification of surface chemical property using the thermally robust organic molecules.

研究分野：ナノ材料科学

キーワード：金属酸化物 センサ 分子識別 揮発性分子

1. 研究開始当初の背景

近年の IoT 関連技術や人工知能の急速な発展を背景に、センサを介して収集した我々の身の回り(フィジカル空間)の膨大な物理的・化学的情報をサイバー空間で蓄積・解析・利活用することで生まれる新たな学術・産業分野(Society5.0)への期待が高まっている。特に、自然界に数十万種類存在する揮発性分子を介して得られる膨大で多角的な‘化学情報’は、多数の因子が相関し合う複雑な現象を本質的に理解するための新たなアプローチであり、生体ガスによる健康診断や毒物・環境負荷物質の時空間解析など全く新たな付加価値を創造可能なことから、揮発性分子群の電気的検出・識別を目指す分子認識センサエレクトロニクスに注目が集まっている。しかしながら、既存のセンサ原理では化学的性質が類似した分子群の識別や、多成分標的分子群を同時検出・識別することは極めて困難である。一方、生物の嗅覚組織に目を向ければ、センサとなる嗅覚受容体の数(ヒト 396 種・イヌ 811 種)が同時識別可能な分子種の数や分子識別分解能を決定する重要な役割を担っている(Genome Res. 2014)。そのため、多数のセンサ素子が集積されたセンサアレイデバイスは上記分子識別機能実現へ向けた有力なアプローチであると考えられるが、①複雑な作製プロセスのためアレイ可能なセンサ数は限られ、②1つのセンサ素子の不具合や素子間で生じる劣化速度のばらつきが分子識別に致命的な誤差を引き起こすといった本質的な技術課題を抱えており、センサ数の増加による分子識別機能の改善効果を検証可能なデバイスプラットフォーム構築にまで至っていない状況であった(Sensors 2017)。

2. 研究の目的

本研究では、多元素機能傾斜膜形成技術・ナノ微細加工技術・高速電子回路技術を融合することで、特性の異なる金属氧化物センサ素子が面内集積化された‘高堅牢性異種集積化センサアレイ’を創製し、多成分標的分子群の同時検出・識別機能実証により多角的な化学情報の安定的な収集・蓄積・利活用を目指す次世代分子認識センサエレクトロニクス基盤技術を創成することを目的とした。

3. 研究の方法

大気中で熱的に安定であり、多種多様な酸・塩基性を有する種々の金属氧化物半導体材料を国際共同研究機関であるタイ国立電子コンピューター技術研究センターの角度可変多元成膜技術、及び我々の界面原子拡散技術を介して多成分組み合わせることで多元素機能傾斜ナノ薄膜を形成した。成膜中の雰囲気酸素圧、及び成膜後の熱処理温度変調により膜中の酸素欠損濃度、及び原子拡散の制御を行い、組成傾斜率・電気伝導性の変調を行った。得られた多元素機能傾斜膜表面を用いて揮発性分子を標的とした分子識別センシング機能を検証した。上記に加えて、クリック反応を介した堅牢な有機分子によるセンサ表面の化学特性改質を試みた。次いで、微細加工技術により 1024 素子から成る超多チャンネルセンサアレイを構築するとともに、高速電子回路をセンサデバイスに実装し、全センサ素子のリアルタイム計測の原理実証を行った。

4. 研究成果

多元素機能傾斜金属氧化物ナノ薄膜の形成 (図 1)

国際共同研究機関であるタイ国立電子コンピューター技術研究センターへ研究員を派遣し、同センターが有する角度可変多元成膜技術により多元素組成傾斜ナノ薄膜を構築するとともに当該技術を習得し、日本側研究機関への技術移転を行った。多元素機能傾斜金属氧化物ナノ薄膜による異種センサアレイ創製の原理実証として、4種の金属氧化物材料(n-type: ZnO, SnO<sub>2</sub>, p-type: CuO, Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)を用いて5mm<sup>2</sup>のSi基板上に多元素傾斜ナノ薄膜の形成を試み、面内で異なる組成分布を持つセンサアレイの構築が原理的に可能であることを実証した。更に詳細に検討するために、異なる酸・塩基特性を有する

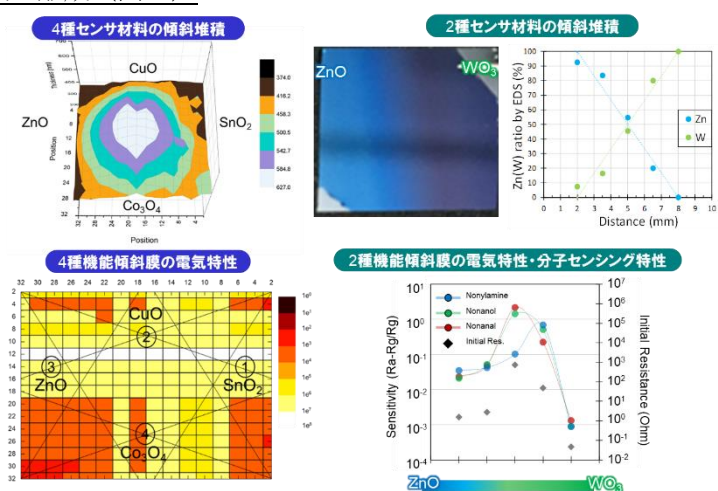


図 1 角度可変多元成膜技術・原子拡散技術による多元素組成傾斜ナノ薄膜の形成と評価

2種の金属氧化物材料 ZnO・WO<sub>3</sub>を用いて、傾斜堆積技術及び界面原子拡散を融合することでセンサ表面の傾斜組成制御を試みた。熱処理温度と表面構造・表面組成・結晶構造との相関性を各

種評価法 (SEM, XPS, EDS, XRD) により明らかにするとともに導電性・分子センシングの評価を行った結果、表面組成変調により異なる分子センシング特性が観測された。加えて、傾斜組成を有する複数のセンサ素子群より得られたセンシングデータセットを機械学習を介して解析した結果、アミン・アルコール・アルデヒド3種の分子群の電気的識別が可能であることを見出し、本研究で提案する高堅牢性異種集積化センサアレイの原理実証に成功した。一方で、本研究で用いたセンサ材料自体の組成傾斜を利用するアプローチでは、組成変調に伴い電気抵抗率が劇的に変化し、単一の高速電子回路による素子応答の読み出しが困難になるといった問題点も明らかとなった。本課題を本質的に打破するためには、センサ表面における局所的な化学特性変調技術が必要不可欠となる。

### 超多チャンネルセンサアレイ構築および高速電子回路実装 (図2)

電子線リソグラフィ及びレーザーリソグラフィを用いたナノ微細加工技術により、1024個のセンサ素子から成るクロスバー型集積化センサデバイスを構築した。次いで、センサ信号の高速読み出し機能を備えた高速電子回路を集積化センサデバイス近傍に実装することで、全センサ素子応答を20ミリ秒以内で読み出すことに成功するとともに、リアルタイム分子センシング機能を実証した。更に、金属酸化物/電極界面設計技術や配線抵抗低減のためのアレイデバイス構造設計を駆使し、1024個のセンサアレイの同時測定においても信

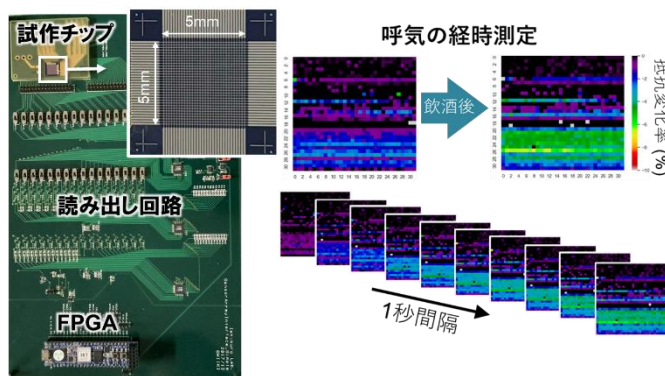


図2 高速電子回路が実装された集積化センサデバイスおよびリアルタイム分子センシング結果

頼性の高いセンサ応答を得られるセンサ材料・デバイス構造を構築した。作製・開発した集積化センサアレイおよびアナログフロントエンド回路による分子検出能の検証として、気相中に拡散させたアセトン、エタノール、およびヒト呼気に対するセンサアレイ抵抗値の変化を経時的に測定した。その結果、それぞれの対象分子(群)に対して1024個のセンサの応答が変化し、そのデータを時系列的に取得できることを実証した。得られたセンシングデータを利用してデータ補正・補間シミュレーションを行った結果、周辺素子を含む複数のセンサ素子(2×2、3×3)の積算信号を平均化するデータ補正アルゴリズムにより、少数センサ素子の不具合や素子特性のばらつき誤差を改善可能であることを見出した。

### クリック反応を介した堅牢な有機分子によるセンサ表面の化学特性改質 (図3)

上記で見出した多元素機能傾斜金属酸化物ナノ薄膜形成アプローチの問題点を打破するために、本研究では二段階型分子修飾方法によるセンサ表面の化学特性改質の可能性検討を行った。二段階型分子修飾方法は、金属酸化物表面へのアンカー分子の接合(第一段階)と有機反応(クリック反応など)を用いたアルキンの接合(第二段階)で構成される。固体表面への分子修飾効率および基質適用範囲に関する詳細な検討を行った結果、トリアゾリル骨格を有する配位子を添加することで、幅広い基質に対して高効率で反応が進行することを見出した。種々の基質を用いて反応率の検証を行った結果、本反応の反応率が対象となる基質分子の立体障害により制限を受けることが明らかとなった。得られた知見を基に異種混合SAMを用いて反応点密度の制御を試みた結果、100%近い効率で表面クリック反応が進行することを確認し、堅牢な有機分子によるセンサ表面の化学特性改質が本質的に可能であることを実証した。

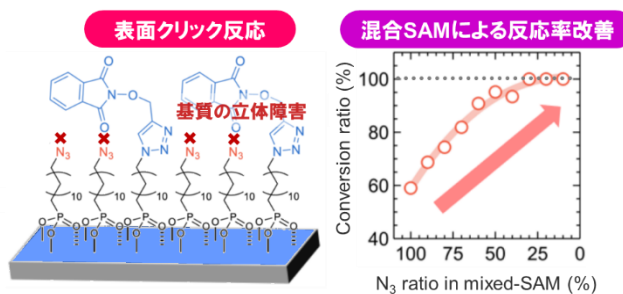


図3 表面クリック反応における基質の立体障害効果と混合SAMによる反応率改善効果

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Akihiro Yuya, Nagashima Kazuki, Hosomi Takuro, Kanai Masaki, Anzai Hiroshi, Takahashi Tsunaki, Zhang Guozhu, Yasui Takao, Baba Yoshinobu, Yanagida Takeshi	4. 巻 4
2. 論文標題 Water-Organic Cosolvent Effect on Nucleation of Solution-Synthesized ZnO Nanowires	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 8299 ~ 8304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.9b00945	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 Sakai Daiki, Nagashima Kazuki, Yoshida Hideto, Kanai Masaki, He Yong, Zhang Guozhu, Zhao Xixi, Takahashi Tsunaki, Yasui Takao, Hosomi Takuro, Uchida Yuki, Takeda Seiji, Baba Yoshinobu, Yanagida Takeshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Substantial Narrowing on the Width of "Concentration Window" of Hydrothermal ZnO Nanowires via Ammonia Addition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 14160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-50641-y	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 該当する
1. 著者名 Nakamura Kentaro, Takahashi Tsunaki, Hosomi Takuro, Seki Takehito, Kanai Masaki, Zhang Guozhu, Nagashima Kazuki, Shibata Naoya, Yanagida Takeshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Redox-Inactive CO <sub>2</sub> 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 Applied Materials & 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/acssami.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 -
1. 著者名 Zhao Xixi, Nagashima Kazuki, Zhang Guozhu, Hosomi Takuro, Yoshida Hideto, Akihiro Yuya, Kanai Masaki, Mizukami Wataru, Zhu Zetao, Takahashi Tsunaki, Suzuki Masaru, Samransuksamer Benjarong, Meng Gang, Yasui Takao, Aoki Yuriko, Baba Yoshinobu, Yanagida Takeshi	4. 巻 20
2. 論文標題 Synthesis of Monodispersedly Sized ZnO Nanowires from Randomly Sized Seeds	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 599 ~ 605
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.9b04367	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. Zeng, T. Takahashi, T. Hosomi, K. Nagashima, M. Kanai, G. Zhang and T. Yanagida	4. 巻 41
2. 論文標題 Improvements of Electrical Characteristics of Single-Crystalline ZnO Nanowire Field-Effect Transistors via Self-Assembled Monolayer Modification	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Engineering Sciences Reports	6. 最初と最後の頁 12-16
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 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 細見 拓郎, 高橋 綱己, 長島 一樹, 柳田 剛	4. 巻 26
2. 論文標題 “ 堅い ” 金属酸化物無機ナノ構造を用いた “ 柔らかい ” 分子群の匂いを識別・記録するエレクトロニクス	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 無機マテリアル	6. 最初と最後の頁 346-353
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 C. Wang, T. Hosomi, K. Nagashima, T. Takahashi, G. Zhang, M. Kanai, H. Zeng, W. Mizukami, N. Shioya, T. Shimoaka, Y. Aoki, J. Terao, T. Hasegawa and T. Yanagida	4. 巻 19
2. 論文標題 Rational Method of Monitoring Molecular Transformations on Metal-Oxide Nanowire Surfaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nano Lett.	6. 最初と最後の頁 2443-2449
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.8b05180	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 R. Yan, T. Takahashi, M. Kanai, T. Hosomi, G. Zhang, K. Nagashima and T. Yanagida	4. 巻 2
2. 論文標題 Unusual Sequential Annealing Effect in Achieving High Thermal Stability of Conductive Al-Doped ZnO Nanofilms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 2064-2070
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c00321	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 J. Liu, K. Nagashima, H. Yoshida, T. Hosomi, T. Takahashi, G. Zhang, M. Kanai, Y. He and T. Yanagida	4. 巻 49
2. 論文標題 Facile Synthesis of Zinc Titanate Nanotubes via Reaction-byproduct Etching	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 1220-1223
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.200480	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 J. Liu, K. Nagashima, H. Yamashita, W. Mizukami, J. Uzuhashi, T. Hosomi, M. Kanai, X. Zhao, Y. Miura, G. Zhang, T. Takahashi, M. Suzuki, D. Sakai, B. Samransuksamer, Y. He, T. Ohkubo, T. Yasui, Y. Aoki, J. C. Ho, Y. Baba and T. Yanagida	4. 巻 1
2. 論文標題 Face-selective tungstate ions drive zinc oxide nanowire growth direction and dopant incorporation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications Materials	6. 最初と最後の頁 58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43246-020-00063-5	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 該当する

1. 著者名 C. Wang, T. Hosomi, K. Nagashima, T. Takahashi, G. Zhang, M. Kanai, H. Yoshida and T. Yanagida	4. 巻 12
2. 論文標題 Phosphonic Acid Modified ZnO Nanowire Sensors: Directing Reaction Pathway of Volatile Carbonyl Compounds	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 44265-44272
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.0c10332	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 S. Nekita, K. Nagashima, G. Zhang, Q. Wang, M. Kanai, T. Takahashi, T. Hosomi, K. Nakamura, T. Okuyama and T. Yanagida	4. 巻 3
2. 論文標題 Face-Selective Crystal Growth of Hydrothermal Tungsten Oxide Nanowires for Sensing Volatile Molecules	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Nano Materials	6. 最初と最後の頁 10252-10260
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnm.0c02194	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 H. Zeng, T. Takahashi, T. Seki, M. Kanai, G. Zhang, T. Hosomi, K. Nagashima, N. Shibata and T. Yanagida	4. 巻 12
2. 論文標題 Oxygen-Induced Reversible Sn-Dopant Deactivation between Indium Tin Oxide and Single-Crystalline Oxide Nanowire Leading to Interfacial Switching	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 52929-52936
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsmi.0c16108	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 R. Yan, T. Takahashi, H. Zeng, T. Hosomi, M. Kanai, G. Zhang, K. Nagashima and T. Yanagida	4. 巻 3
2. 論文標題 Enhancement of pH Tolerance in Conductive Al-Doped ZnO Nanofilms via Sequential Annealing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 955-962
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c01052	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 J. Liu, K. Nagashima, Y. Nagamatsu, T. Hosomi, H. Saito, C. Wang, W. Mizukami, G. Zhang, B. Samransuksamer, T. Takahashi, M. Kanai, T. Yasui, Y. Baba and T. Yanagida	4. 巻 12
2. 論文標題 The impact of surface Cu <sup>2+</sup> of ZnO/(Cu <sub>1-x</sub> Zn <sub>x</sub> )O heterostructured nanowires on the adsorption and chemical transformation of carbonyl compounds	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 5073-5081
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1sc00729g	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 長島 一樹, 高橋 綱己, 細見 拓郎, 柳田 剛	4. 巻 71
2. 論文標題 分子認識エレクトロニクスへ向けたナノ界面エンジニアリング	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 化学工業	6. 最初と最後の頁 518-524
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 長島 一樹, 高橋 綱己, 細見 拓郎, 柳田 剛	4. 巻 20
2. 論文標題 「次世代のセンシング材料」- 堅牢な分子認識界面の創製-	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 月刊MATERIAL STAGE	6. 最初と最後の頁 78-83
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 -

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 細見 拓郎, 井上 暉英, 長島 一樹, 高橋 綱己, 張 国柱, 金井 真樹, 柳田 剛
2. 発表標題 ZnOナノワイヤによる官能基位置選択的な直鎖ケトンの自動酸化促進
3. 学会等名 第80回応用物理学秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuki Nagashima, Yuya Akihiro, Takuro Hosomi, Masaki Kanai, Tsunaki Takahashi, Guozhu Zhang, Takeshi Yanagida
2. 発表標題 Water-Organic Cosolvent Effect on Nucleation of Solution-Synthesized ZnO Nanowires
3. 学会等名 第38回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 細見 拓郎, 井上 暉英, 長島 一樹, 高橋 綱己, 張 国柱, 金井 真樹, 塩谷 暢貴, 下赤 卓史, 長谷川 健, 柳田 剛
2. 発表標題 ZnOナノワイヤ上における官能基位置選択的なケトンの自動酸化メカニズムの解明
3. 学会等名 分子アーキテクトニクス研究会第10回研究会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 山口 倫門, 細見 拓郎, 長島 一樹, 高橋 綱己, 金井 真樹, 張 国柱, 柳田 剛
2. 発表標題 クリックケミストリーを用いた金属酸化物表面に対するユニバーサルな分子修飾方法の開発
3. 学会等名 分子アーキテクトニクス研究会第10回研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水 將博, 高橋 綱己, 細見 拓郎, Guozhu Zhang, 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 分子アーキテクトニクス研究会第10回研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Nagashima, T. Hosomi, T. Takahashi and T. Yanagida
2. 発表標題 Metal Oxide Nanowire Surface for Molecular Recognition
3. 学会等名 The 2nd Material Research Society of Thailand International Conference (MRS-Thailand 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Nagashima
2. 発表標題 Metal Oxide Nanowire Based Robust Molecular Recognition Electronics
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Frontier Technology Innovation (ICFTI-2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 X. Zhao, K. Nagashima, G. Zhang, T. Hosomi, Y. Akihiro, M. Kanai, T. Takahashi, M. Suzuki, B. Samransuksamer and T. Yanagida
2. 発表標題 Post-Seed Engineering for Synthesizing Monodispersely Sized ZnO Nanowires
3. 学会等名 International School and Symposium on Nanoscale Transport and phoTonics 2019 (ISNTT2019) (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 Electrical 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 Chen Wang, Kazuki Nagashima, Takuro Hosomi, Guozhu Zhang, Tsunaki Takahashi, Hideto Yoshida, Masaki Kanai, Seiji Takeda, Takeshi Yanagida
2. 発表標題 Chemical Interaction of Volatile Aldehyde Molecules on ZnO Nanowire Surface
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 Hiroki Yamashita, Kazuki Nagashima, Tsunaki Takahashi, Takuro Hosomi, Guozhu Zhang, Masaki Kanai, Takeshi Yanagida
2. 発表標題 Crucial Role of Tungstate Ions on Elemental Doping of Hydrothermal ZnO Nanowires
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 細見 拓郎, Wang Chen, 長島 一樹, 高橋 綱己, 張 国柱, 金井 真樹, 水上 涉, 塩谷 暢貴, 下赤 卓史, 玉岡 武泰, 吉田 秀人, 竹田 精治, 安井 隆雄, 馬場嘉信, 青木 百合子, 寺尾 潤, 長谷川 健, 柳田 剛
2. 発表標題 単結晶ナノワイヤ表面に対する分光分析を用いた酸化物表面におけるアルデヒドの化学変換経路の解明
3. 学会等名 統合物質創製化学研究推進機構第4回国内シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 細見 拓郎, Wang Chen, 長島 一樹, 高橋 綱己, 張 国柱, 金井 真樹, 水上 涉, 塩谷 暢貴, 下赤 卓史, 玉岡 武泰, 吉田 秀人, 竹田 精治, 安井 隆雄, 馬場嘉信, 青木 百合子, 寺尾 潤, 長谷川 健, 柳田 剛
2. 発表標題 単結晶酸化物ナノワイヤに対する分光的測定を用いたZnO上でのアルデヒドの分子変換メカニズムの解明
3. 学会等名 9th 分子アーキテクトニクス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白石 悟, 長島 一樹, 細見 拓郎, 高橋 綱己, 張 国柱, 金井 真樹, 柳田 剛
2. 発表標題 原子相互拡散法によるW-Zn-O薄膜の組成制御及び電子輸送特性評価
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 C. Wang, T. Hosomi, K. Nagashima, T. Takahashi, G. Zhang, M. Kanai, H. Zeng and T. Yanagida
2. 発表標題 Spectroscopic Analysis on Single Crystalline Nanowire Surface Reveals Chemical Transformation Pathways on An Aldehyde on ZnO
3. 学会等名 The 20th Cross Straits Symposium on Energy and Environmental Science and Technology (CSS-EEST20) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Yan, T. Takahashi, M. Kanai, G. Zhang, T. Hosomi, K. Nagashima and T. Yanagida
2. 発表標題 Systematic study on thermal stability of electrical characteristics of Al doped ZnO formed by pulsed laser deposition metho
3. 学会等名 The 3rd Asian Applied Physics Conference (Asian-APC) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 細見 拓郎, Chen Wang, 長島 一樹, 高橋 綱己, 金井 真樹, Guozhu Zhang, 柳田 剛
2. 発表標題 ホスホン酸修飾を用いたナノワイヤセンサ上における標的化合物の反応経路制御
3. 学会等名 第11回分子アーキテクトニクス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長島一樹, 高橋綱己, 細見拓郎, 柳田 剛
2. 発表標題 堅牢なナノ界面と分子認識エレクトロニクス
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長島 一樹, Chaiyanut Jirayupat, 細見 拓郎, 高橋 綱己, Guozhu Zhang, 金井 真樹, 柳田 剛
2. 発表標題 アンサンブル分子センシングによる堅牢な呼気診断法の開発
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hao Zeng, Tsunaki Takahashi, Takehito Seki, Masaki Kanai, Guozhu Zhang, Takuro Hosomi, Kazuki Nagashima, Naoya Shibata and Takeshi Yanagida
2. 発表標題 Anomalous Reversible Sn-Dopant Deactivation between Indium Tin Oxide and Single-Crystalline Oxide Nanowire
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Researchmap <a href="https://researchmap.jp/nagashima0402">https://researchmap.jp/nagashima0402</a>
--

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
研究分担者	高橋 綱己  (Takahashi Tsunaki)  (60724838)	東京大学・大学院工学系研究科・特任准教授   (12601)	
研究分担者	細見 拓郎  (Hosomi Takuro)  (40830360)	東京大学・大学院工学系研究科・助教   (12601)	

	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)		

6. 研究組織（つづき）

	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	石黒 仁揮  (Ishikuro Hiroki)		
研究協力者	斉藤 光  (Saito Hiraru)		
研究協力者	ホープラトゥム マティ  (Horprathum Mati)		

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		
タイ	タイ国立電子コンピューター技術研究センター		